

## ΜΑΓΝΗΤΟΤΕΛΛΟΥΡΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΝΙΣΥΡΟΥ

Ε. Λάγιος\*

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Είκοσι Ακουστο-Μαγνητοτελλουρικές (AMT)/Audio-Magnetotelluric) βυθοσκοπήσεις εκτελέσθηκαν στην επίπεδη περιοχή της καλδέρας Νισύρου, στην περιοχή συχνοτήτων 128Hz-0.016Hz, προκειμένου να προσδιορισθεί η βαθύτερη δομή αγωγιμότητας των στρωμάτων σχετικά με το γεωθερμικό πεδίο της περιοχής.

Διαπιστώθηκε, κατά μήκος δύο τομών με διεύθυνση περίπου Β-Ν μέσα στην καλδέρα της Νισύρου, ότι σε βάθος 200-500 m από την επιφάνεια υπάρχει ένα πολύ αγωγίμο στρώμα (0.6-2.4 Ohm.m) που πρέπει να συνδέεται με τον επιφανειακό γεωθερμικό ταμειυτήρα, όπως προκύπτει από τα στοιχεία των δύο γεωτρήσεων N1 και N2 (1500 m βάθος). Ο βαθύτερος όμως ταμειυτήρας φαίνεται ότι συσχετίζεται με ένα στρώμα ειδικής αντίστασης 12-15 Ohm.m που η επάνω επιφάνεια του βρίσκεται σε βάθος 1000-1100 m από την επιφάνεια του εδάφους. Η παρουσία ρηγμάτων όπως προκύπτουν από την AMT διασκόπηση, συζητείται επίσης σ'αυτή την εργασία, με κυριώτερο αυτό που διαφαίνεται να εκτείνεται σε διεύθυνση σχεδόν Β-Ν κατά μήκος του κέντρου του επίπεδου μέρους της καλδέρας και ενδιάμεσα από τις δύο κύριες AMT τομές.

A B S T R A C T

An Audio-Magnetotelluric (AMT) survey of 20 measurements was carried out in the flat part of the Nissyros Caldera in the frequency range 128 Hz - 0.016 Hz. The purpose of this geophysical survey was to investigate the deeper conductivity structure of the geothermal field of the area.

Two AMT profiles, trending almost N-S along the inner flat region of the caldera, in addition to a smaller third one perpendicular to the first two were performed. Only the top 2 km of the resistivity variation with depth, associated with the geothermal field of the island, is presented in this study, whilst emphasis has been given to the geological and tectonic aspects.

The most interesting features, which resulted from the applied 1-D inversion modelling, are the electrical conductivity layers related to the two reservoirs identified by the two deep boreholes (1500 m), N1 and N2. The shallower reservoir seems to be associated with the most conductive layer (0.6-2.4 Ohm.m), ranging from 200 to 500 m depth from the ground surface. At a depth of 1000-1100 m, the upper surface of the deeper, "hottest", reservoir seems to be initiated. This particular layer has apparent resistivity values ranging from 12-15 Ohm.m. Interesting faulting and conductivity transitional zones are also inferred. One of them should be running at approximately the center flat part of the Nissyros Caldera, trending almost in between the N-S AMT profiles.

\* Τομέας Γεωφυσικής - Γεωθερμίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, Αθήνα 15784.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θέση της Νισύρου μαζί με την Μήλο, Σαντορίνη και Κω κατά μήκος του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου παρέχει εξαιρετικές προοπτικές για την ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου. Με την εκτέλεση δύο βαθειών δοκιμαστικών γεωτρήσεων N1 και N2 στο επίπεδο τμήμα της καλδέρας της Νισύρου το 1981, αποκαλύφθηκε ατμός υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης (Ungemach, 1982), πράγμα που πολύ πιθανώς συνιστά γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας.

Η μόνη γεωφυσική έρευνα γεωθερμικού χαρακτήρα που έλαβε χώρα έκτοτε στη Νίσυρο, ήταν μια γεωηλεκτρική διασκόπηση από το ΙΓΜΕ (Ναθανάηλ, 1983) για λογαριασμό της ΔΕΜΕ/ΔΕΗ. Η διασκόπηση αυτή αποκάλυψε πολύ χαμηλές ειδικές αντιστάσεις σε μικρά σχετικά βάθη.

Έκτοτε ουδεμία γεωφυσική διασκόπηση εκτελέσθηκε στο νησί, αν και η περιοχή παρουσιάζει άριστες γεωθερμικές προοπτικές. Πρόσφατα όμως αναλήφθηκαν για λογαριασμό της ΔΕΜΕ/ΔΕΗ η διεξαγωγή μιας νεοτεκτονικής μελέτης του νησιού, μαζί με την βαρυτομετρική του κάλυψη, όπως και η εκτέλεση μιας Μαγνητοτελλουρικής (AMT) διασκόπησης. Σκοπός της τελευταίας ήταν η σπουδή της αγωγιμότητας με το βάθος στην επίπεδη περιοχή της καλδέρας της Νισύρου.

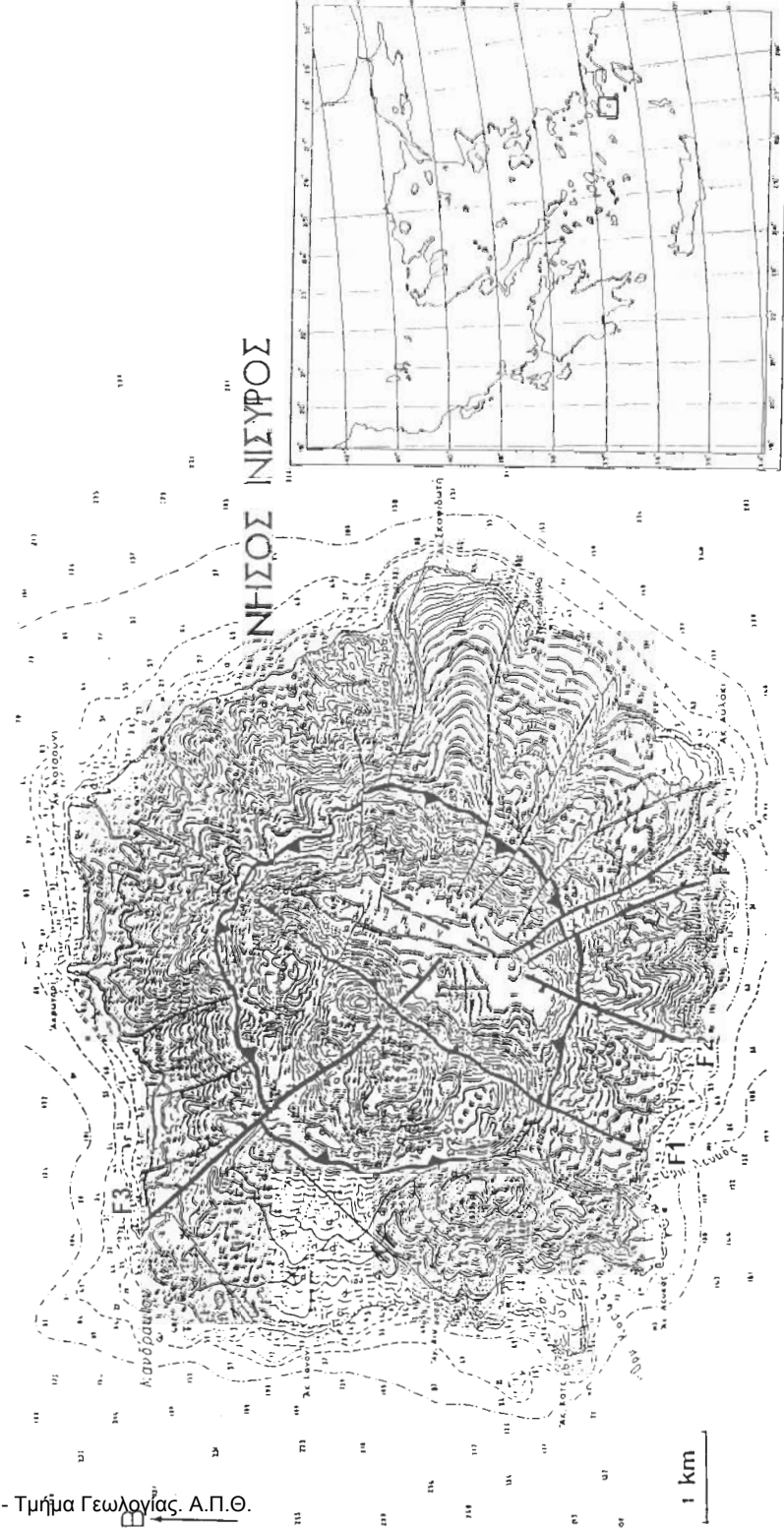
Στην παρούσα λοιπόν εργασία εκτίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα της AMT διασκόπησης στην Νίσυρο, με έμφαση κυρίως στη γεωλογική και τεκτονική πλευρά και όχι τον γεωφυσικό χαρακτήρα των AMT μετρήσεων, που εκτίθενται αναλυτικότερα σε άλλη εργασία.

## 2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ - ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

Η πρώτη ολισθηματική γεωλογική εργασία που έγινε στη Νίσυρο ήταν από την Δάβη (1967) και Di Paola (1974), που πρώτοι έδωσαν τα αρχικά γεωλογικά αποτελέσματα σχετικά με την δομή, τις περιόδους έκχυσης λάβας και την τεκτονική εξέλιξη του ηφαιστείου.

Η πλέον όμως πρόσφατη εργασία νεοτεκτονικού χαρακτήρα είναι αυτή των Παπανικολάου και Λέκκα (1989). Σύμφωνα με την μελέτη αυτή, εντοπίζονται τρεις περίοδοι έντονης τεκτονικής δραστηριότητας: Ο προ-, συν- και μετά-καλδερικός τεκτονισμός. Σαν αποτελέσματα των παραπάνω έντονων τεκτονικών διεργασιών, εντοπίζονται τέσσερες κυρίως σημαντικές ρηξιγενείς ζώνες (Σχ. 1):

1. Η ρηξιγενής ζώνη F1 με μετάπτωση προς τα ΝΑ και διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ.
2. Η ρηξιγενής ζώνη F2 που αρχίζει από το κέντρο της νότιας ακτής του νησιού, με διεύθυνση προς τα ΒΑ και απολήγει στο εσωτερικό της καλδέρας. Αν και κατά πόσο συνεχίζεται το ρήγμα αυτό προς τα βόρεια, δεν είναι δυνατόν να εντοπισθεί με βάση τις επιφανειακές γεωλογικές παρατηρήσεις.
3. Η ρηξιγενής ζώνη F3 αρχίζει ανατολικά από το Μανδράκι, εκτείνεται προς τα ΝΑ και διασταυρώνεται με το ρήγμα F1 στο κέντρο περίπου του νησιού.



Σχ. 1. Τοπογραφικός χάρτης Νισύρου με τις κύριες ρηξιγενείς ζώνες (Παπανικολάου & Λέκκα, 1989)  
Fig. 1. Nisyros topographic map showing the main faulting zones (Papanikolaou & Lekkas 1989).

4. Η ρηξιγενής ζώνη F4 που συνιστά μια στενή τάφρο, αρχίζοντας από το νότιο άκρο του νησιού και καταλήγοντας στο νότιο μέρος της καλδέρας.

Καθίσταται λοιπόν έκδηλο ότι σε ότι αφορά την εξέλιξη και την λειτουργία των ρηγμάτων αυτών στις διάφορες γεωλογικές εποχές πρέπει να διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό ενδεχόμενου γεωθερμικού πεδίου και συνδέονται άμεσα με τις πιθανές κινήσεις των γεωθερμικών ρευστών αυτού.

### 3. AMT ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

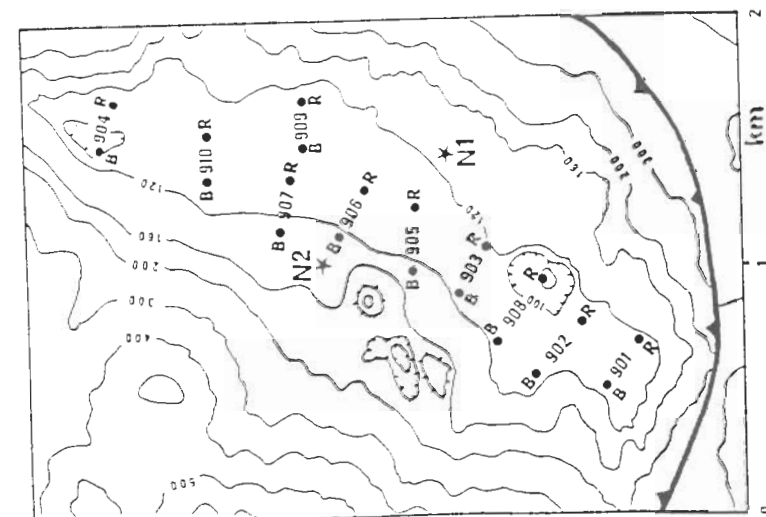
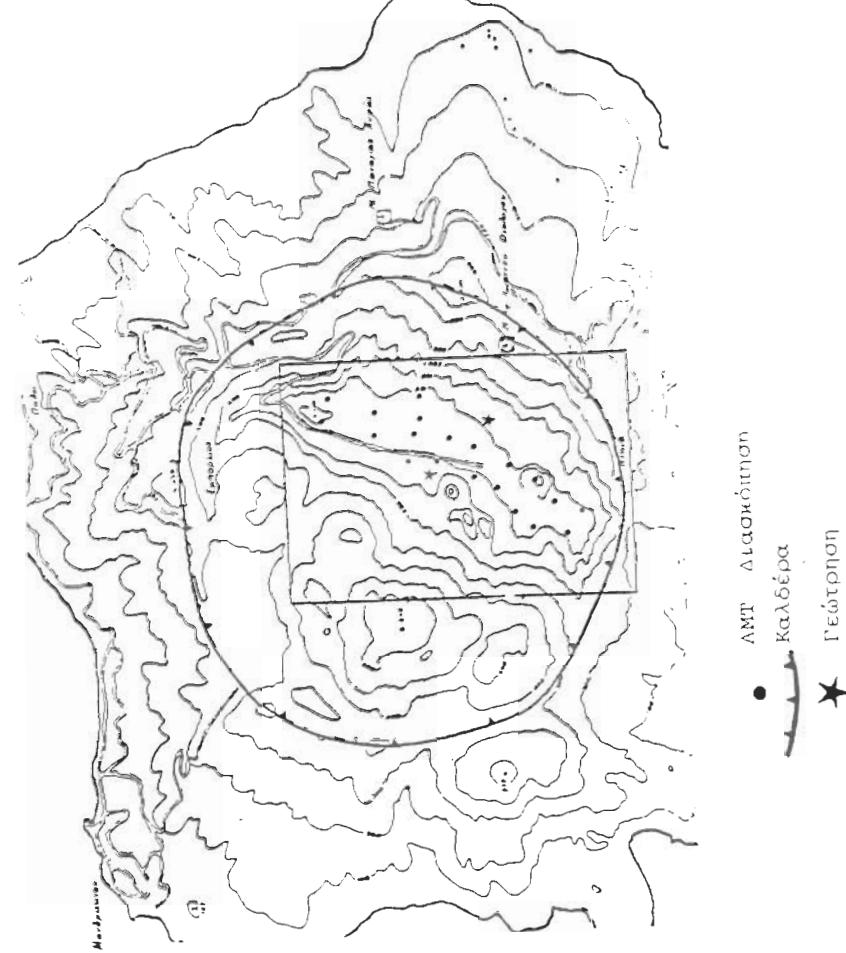
Η εφαρμογή της Μαγνητοτελλουρικής μεθόδου και ιδιαίτερα στην ακουστική περιοχή συχνοτήτων, στη διασκόπηση γεωθερμικών πεδίων, αποτελεί πρόσφατη εξέλιξη γεωφυσικής μεθόδου της τελευταίας 15ετίας. Πλεονεκτεί σαφώς έναντι της γεωηλεκτρικής μεθόδου (π.χ. Schlumberger, Wenner, κ.λπ.) τόσο από πλευράς του βάθους διασκόπησης, όσο και της αντιπροσωπευτικότερης εκτίμησης των πραγματικών τιμών ειδικής αντίστασης των διάφορων γεωηλεκτρικών σχηματισμών σε μεγάλα βάθη. Στην Ελλάδα, χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μόνο με την εφαρμογή της AMT μεθόδου (Fytikaw et al. 1988) κατέστη δυνατός ο εντοπισμός του ταμειυτήρα στο γεωθερμικό πεδίο της Μήλου (βάθος, διακύμανση του άνω μέρους του ταμειυτήρα), κάτι στο οποίο οι εκτεταμένες γεωηλεκτρικές έρευνες απέτυχαν σαφώς να εντοπίσουν. Χρήσιμη πάντως εφαρμογή της Μαγνητοτελλουρικής μεθόδου, των βασικών αρχών της όπως και ορισμένων χαρακτηριστικών παραδειγμάτων συναντάται στη σειρά SEG (Society of Exploration Geophysicists) Vozoff (1985).

Είκοσι Ακουστο-Μαγνητοτελλουρικές (AMT/Audio-Magnetotelluric) μετρήσεις εκτελέστηκαν στην από την ΔΕΜΕ/ΔΕΗ υποδειχθείσα επίπεδη περιοχή της καλδέρας της Νισύρου. Οι θέσεις των μετρήσεων αυτών φαίνονται στο σχήμα 2, μαζί με τις θέσεις των δύο γεωτρήσεων N1 και N2.

Οι AMT μετρήσεις ονομάστηκαν κατά σειρά από 901B μέχρι 910B και από 901R μέχρι 910R. Κάθε διπλή AMT διασκόπηση (π.χ. 901B και 901R) περιλάμβανε την μέτρηση επτά ηλεκτρομαγνητικών (HM) συνιστωσών (δύο ηλεκτρικών και τριών μαγνητικών του επαγόμενου πεδίου στην κύρια θέση (901B) και δύο πρόσθετων ηλεκτρικών στην απόμακρη (901R) θέση). Η καταγραφή των μαγνητικών παραμέτρων έγινε μόνο στις "κύριες" θέσεις (B). Αυτό γιατί πιστεύεται, όπως εξ άλλου αποδείχθηκε στην πράξη από την επιτυχή ανάλυση και ερμηνεία των AMT δεδομένων, ότι το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο δεν αλλάζει σε τόσο μικρές σχετικά αποστάσεις (200-250 m), όταν δεν υπάρχουν έντονες επιφανειακές ανωμαλίες αγωγιμότητας.

Η περίοδος καταγραφής των HM παραμέτρων ήταν από 128 Hz - 0.016 Hz. Οι AMT μετρήσεις έγιναν σε συνεργασία με το τμήμα Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου κάνοντας χρήση του S.P.A.M. (Short Period Automatic Magnetotelluric System) Mk IIb - Dawes (1984).

Από τις θέσεις των AMT μετρήσεων διαμορφώθηκαν τρεις τομές T1, T2 και T3 κα-



ΣΧ. 2. Περιοχή σε μεγέθυνση της AMT διασκόπησης στη Νίσυρο.

Fig. 2. Nisyros AMT survey area in enlargement.

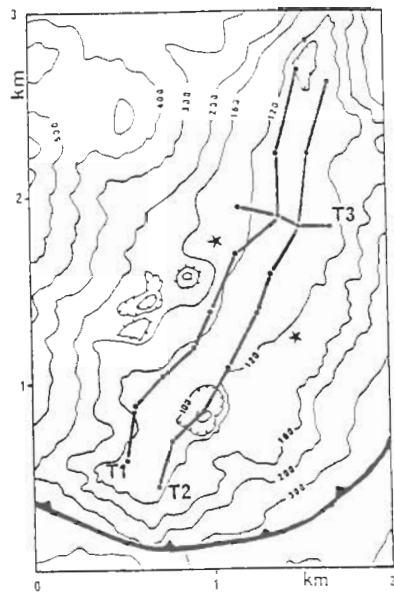
τά μήκος των οποίων αναπαρίσταται γραφικά η μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Έτσι οι τομές T1 και T2 σχηματίζονται κατά μήκος της δυτικής και ανατολικής πλευράς του επίπεδου τμήματος της καλδέρας (Σχ. 3), ενώ η T3 είναι κάθετος στις δύο προηγούμενες με διεύθυνση σχεδόν Α-Δ.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΜΤ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

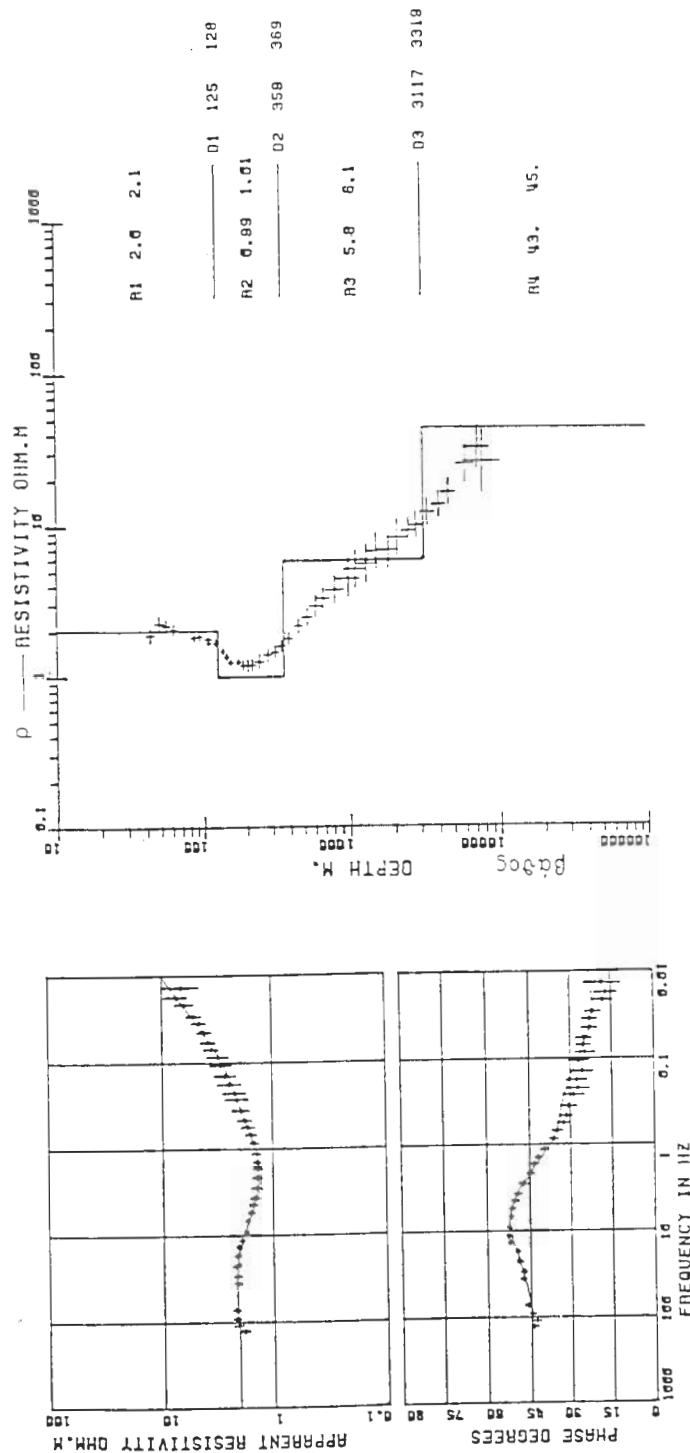
Από την επεξεργασία όλων των ΑΜΤ δεδομένων προέκυψαν όλες οι γνωστές ΗΜ παράμετροι συναρτήσει της συχνότητας, όπως η φαινόμενη ειδική αντίσταση και φάση σε ορισμένες διευθύνσεις, το αζιμούθιο, η εμπέδηση, η πραγματική και φανταστική συνάρτηση απόκρισης του κατακόρυφου μαγνητικού πεδίου, τα αζιμούθια αυτού κ.λπ..

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν διάφοροι μεθοδοι μονοδιάστατης αντιστροφής για κάθε θέση, όπως ο μετασχηματισμός Bostick (1977), που θεωρεί μια τομή όπου η ειδική αντίσταση είναι συνεχής συναρτήσει του βάθους και η μέθοδος Daves (βλ. Sule (1985) για ειδικότερη περιγραφή), όπου προβλέπονται διάφορα στρώματα ορισμένης ειδικής αντίστασης στα μοντέλα αυτού του τύπου, σε όλες τις καμπύλες ειδικής αντίστασης και φάσης για όλες τις συχνότητες στην περιοχή 128 Hz μέχρι 0.016 Hz.

Τα μοντέλα αγωγιμότητας και βάθους, που προέκυψαν από τις αντίστοιχες καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, εφαρμόζοντας τους παραπάνω αλγόριθμους μονοδιάστατων μοντέλων (1-D) αντιστροφής, ήταν σε γενικές γραμμές συμβιβαστά μεταξύ τους. Αντιπροσωπευτικά τυπικά παραδείγματα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, μαζί με τα αντίστοιχα μονοδιάστατα μοντέλα αντιστροφής, δείχνονται στο σχήμα 4.



Σχ. 3. ΑΜΤ τομές στην Καλδέρα Νισύρου.  
Fig.3. AMT profiles in Nisyros Caldera area.

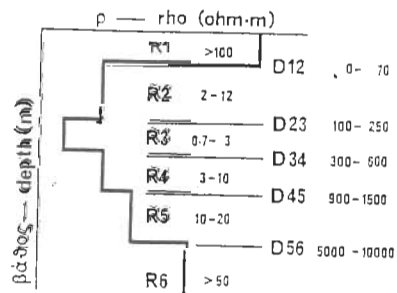


Σχ. 4. ΑΜΤ παράμετροι με το αντίστοιχο 1-D μοντέλο αντιστροφής.  
Fig. 4. AMT resistivity and phase curves with the 1-D inversion model.

Η τεχνική της μονοδιάστατης αντιστροφής της μεθόδου Dawes (Modified Monte-Carlo Hedgehog), που χρησιμοποιήθηκε στα AMT δεδομένα, είχε σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή μοντέλου διάφορου αριθμού στρωμάτων που να προσαρμόζει την παρατηρούμενη καμπύλη ειδικής αντίστασης κάθε AMT βυθοσκόπησης. Διαπιστώθηκε ότι αυξάνοντας τον αριθμό των στρωμάτων ενός μοντέλου σε κάποιο AMT σταθμό, επιτυγχάνετο καλύτερη προσαρμογή μεταξύ της παρατηρούμενης και της θεωρητικής καμπύλης ειδικής αντίστασης. Αυτή η καλύτερη προσαρμογή που αναπόφευκτα οδηγούσε σε καλύτερη αναλυτικότητα του μοντέλου, συνεχίζετο μέχρι που ο μέγιστος αριθμός των στρωμάτων του μοντέλου γινόταν εξ (6). Σχηματική αναπαράσταση μοντέλων αγωγιμότητας με διαφορετικά στρώματα R και ασυνέχειες D δείχνονται στο σχήμα 5.

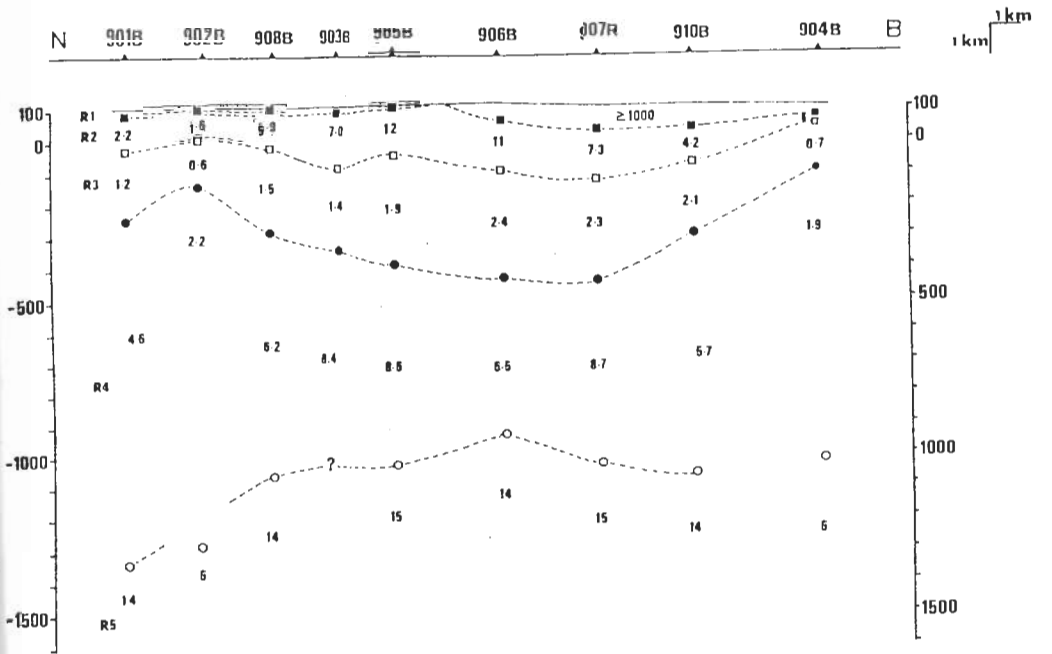
Τα δεδομένα της αμετάβλητης (Invariant) ειδικής αντίστασης και όχι της ειδικής αντίστασης που προκύπτει ύστερα από περιστροφή, χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία σχηματισμού μονοδιάστατων μοντέλων. Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα αυτά (τιμές βάθους και ειδικής αντίστασης), κατασκευάσθηκαν οι τομές αγωγιμότητας T1, T2, T3 συναρτήσει του βάθους (Σχ. 6, 7, 8). Έτσι παρατηρούμε τα ακόλουθα στις τομές T1 και T2, ενώ περίπου ο ίδιος αριθμός στρωμάτων ειδικής αντίστασης συναντάται και στο προφίλ T3, με τα ίδια χαρακτηριστικά αγωγιμότητας, όπως κατά μήκος των T1 και T2:

1. Ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα με μεγάλες σχετικά τιμές ειδικών αντιστάσεων (>1000 Ohm.m).
2. Ένα υποκείμενο στρώμα χαμηλότερης ειδικής αντίστασης (3-12 Ohm.m) πάχους 100-200 m.
3. Ένα στρώμα με την μεγαλύτερη αγωγιμότητα (0.6-2.8 Ohm.m) και πάχος που μεταβάλλεται από 150-400 m.
4. Ένα λιγότερο αγωγίμο από το προηγούμενο στρώμα με πάχος μεγαλύτερο από 500 m και στα ίδια επίπεδα διακύμανσης της ειδικής αντίστασης, όπως το στρώμα (2).



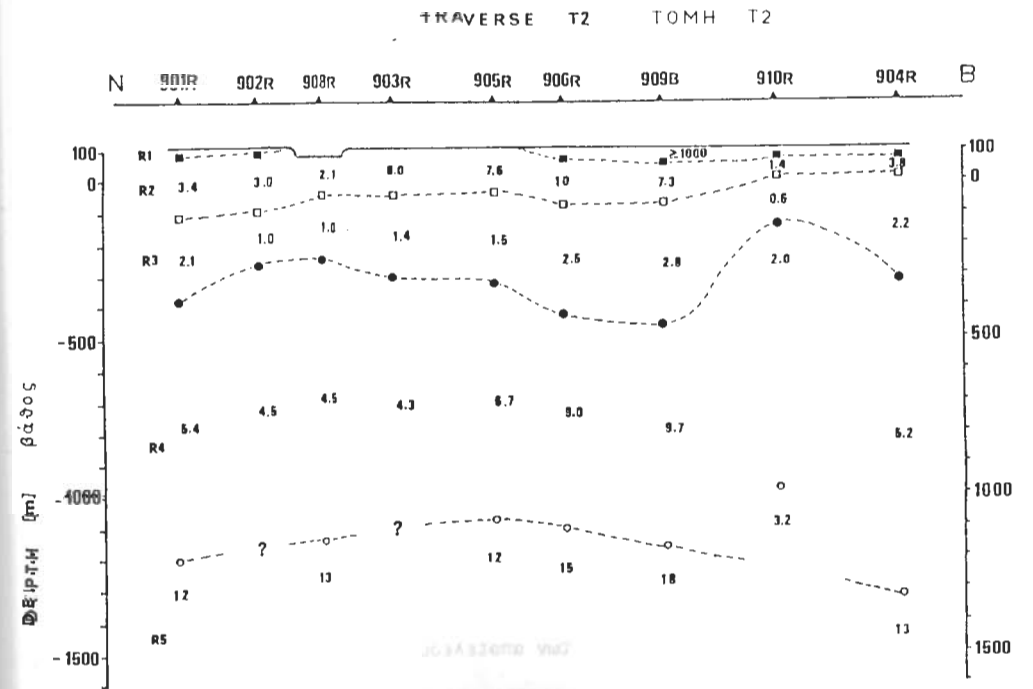
Σχ. 5. Συμβολισμός AMT μοντέλου με τιμές ειδικής αντίστασης των στρωμάτων (R) και τις ασυνέχειες στα διάφορα βάθη.

Fig.5. Notation of AMT resistivity model adopted for layers and interfaces at different depths.



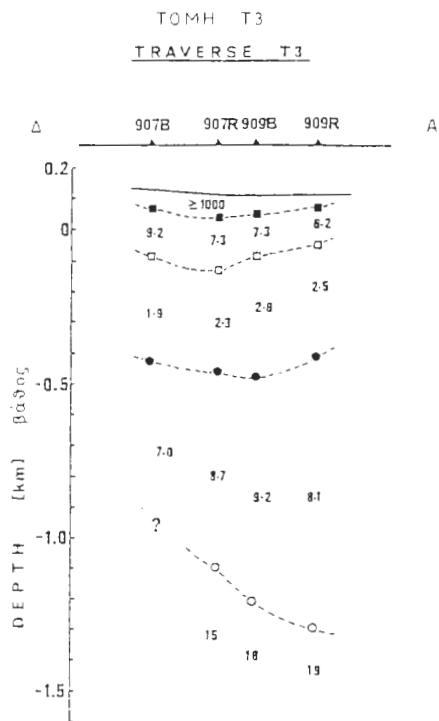
Σχ. 6. AMT μοντέλο ειδικής αντίστασης της τομής T1.

Fig. 6. AMT resistivity structure along Traverse T1.



Σχ. 7. AMT μοντέλο ειδικής αντίστασης της τομής T2.

Fig. 7. AMT resistivity structure along Traverse T2.



Σχ. 8. AMT μοντέλο ειδικής αντίστασης της τομής T3.  
Fig.8. AMT resistivity structure along Traverse T3.

5. Ένα ακόμη λιγότερο αγώγιμο στρώμα (12-15 Ohm.m), που αρχίζει σε βάθος 1000-1100 m. Αυτή η ασυνέχεια διαπιστώνεται ότι συμπίπτει σε βάθος με την επάνω επιφάνεια του βαθύτερου γεωθερμικού ταμιευτήρα (Ungemach, 1982). Σε μεγαλύτερα βάθη συναντάται ένα στρώμα με μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις (>50 Ohm.m).

Η μονοδιάστατη αντιστροφή που εφαρμόστηκε στα AMT δεδομένα σε κάθε σημείο μέτρησης απέδωσε μοντέλα μεταβολής της ειδικής αντίστασης μέχρι το βάθος των 5-6 Km. Αυτό κρίνεται ως ικανοποιητικό, αλλά και σε γενικές γραμμές αντιπροσωπευτικό. Υπενθυμίζεται ότι η διάμετρος του νησιού είναι περίπου 7 Km και επομένως μεγαλύτερα βάθη διασκόπησης θα ήσαν ενδεχόμενα μη αντιπροσωπευτικά, λόγω ύπαρξης της θάλασσας εκατέρωθεν (σώμα πολύ αγώγιμο). Η παρουσίαση όμως μοντέλων μεταβολής της ειδικής αντίστασης με το βάθος στις τομές T1, T2 και T3 δείχνεται μόνο μέχρι τα πρώτα 2 Km περίπου βάθος, κάτι που θεωρείται αρκετά ικανοποιητικό για την γεωθερμική έρευνα της περιοχής.

## 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ύστερα από σχετική σύγκριση των αποτελεσμάτων της γεωηλεκτρικής διασκόπησης

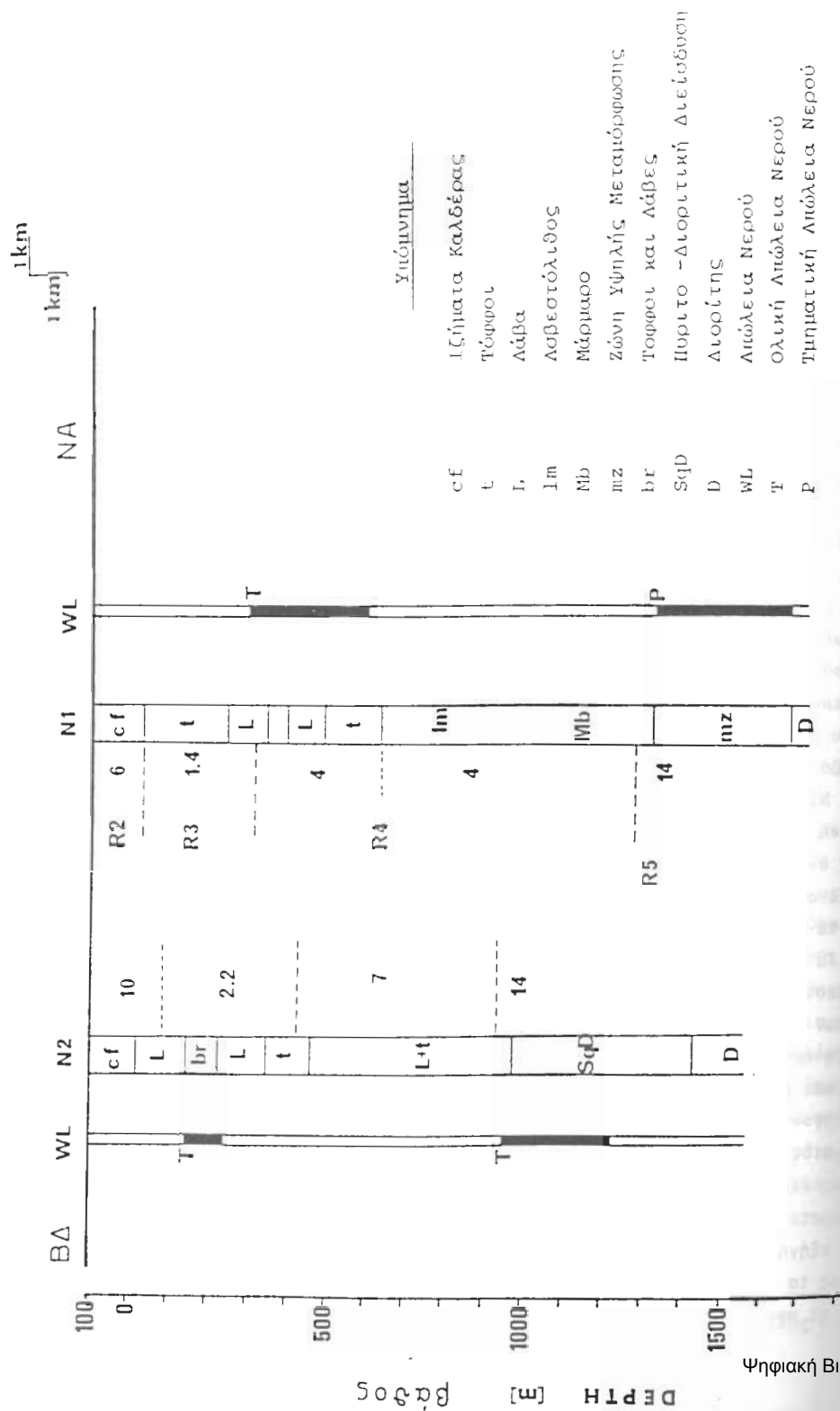
(Ναθαναήλ, 1983) στη Νίσυρο και αυτών που προέκυψαν από την AMT διασκόπηση, προκύπτουν τα εξής:

1. Το πλέον αγώγιμο στρώμα στην καλδέρα (<2.4 Ohm.m) και το βάθος μέχρι τη βάση του (500-600 m) ανιχνεύεται από αμφότερες τις διασκοπήσεις.
2. Υπάρχει συμφωνία του προφίλ B των γεωηλεκτρικών (Ναθαναήλ, 1983) και της AMT τομής που σχηματίζεται από τις διασκοπήσεις 903R, ..., 910R.
3. Σε μεγαλύτερο όμως βάθος των 500 m, η ερμηνεία που προκύπτει από τα γεωηλεκτρικά καθίσταται αμφίβολη και προβληματική. Αυτό λόγω του μεγάλου ανοίγματος των ηλεκτροδίων ρεύματος, που εκτείνονται εκατέρωθεν του χείλους (γκρεμού) της καλδέρας. Στα βάθη αυτά οι προκύπτουσες τιμές ειδικής αντίστασης δεν συμφωνούν, όπως θα αναμενόταν, με τα AMT, λόγω του περιορισμένου χαρακτήρα της γεωηλεκτρικής μεθόδου (υψηλός βαθμός εφαρμοσθείσας εξομάλυνσης, απότομη τοπογραφία κ.λπ.).

Σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων N1 και N2, όπως και την ολική ή επί μέρους απώλεια νερού μέσα σε αυτές κατά την διάρκεια των διεργασιών γεώτρησης, πιστεύεται ότι υπάρχουν δύο ταμιευτήρες (Ungemach, 1982), ένας "κρύος" επιφανειακός (300-400 m βάθος) και ένας "ζεστός" βαθύτερος (1-1.5 Km βάθος). Όπως διαπιστώνεται και από τα σχήματα 6 και 7, οι τιμές ειδικής αντίστασης είναι μικρότερες για τον επιφανειακό (κρύο) ταμιευτήρα σε σχέση με τον βαθύτερο (ζεστό), που έχει τιμές 12, 15 περίπου Ohm.m. Μόνον υποθέσεις είναι δυνατόν να διατυπωθούν σε ότι αφορά το φαινόμενο αυτό. Πιθανότατα οι σχηματισμοί που συνιστούν τον επιφανειακότερο ταμιευτήρα να είναι περισσότερο κατακερματισμένοι συγκριτικά με εκείνους του βαθύτερου ταμιευτήρα, που ενδεχόμενα είναι περισσότερο συμπαγείς.

Με βάση λοιπόν την προκύπτουσα σε απλοποιημένη μορφή στρωματογραφία των γεωτρήσεων N1 και N2 (Ungemach, 1982) και την γεωηλεκτρική δομή που προκύπτει στην ενδιάμεση περιοχή από τις πλησιέστερες προς την N1 και N2 ευρεθείσες AMT τιμές ειδικών αντιστάσεων, κατασκευάστηκε το σχήμα 9, από όπου προκύπτουν τα παρακάτω:

1. Το στρώμα R2 (Σχ. 5) με ειδικές αντιστάσεις 4-12 Ohm.m, πρέπει να αντιστοιχεί με τα επιφανειακά ανάμικτα ιζήματα που πληρώνουν την καλδέρα.
2. Τα στρώματα R3 και R4 (το τελευταίο μέχρι το βάθος της επάνω επιφάνειας των ασβεστολιθών) πρέπει να σχετίζεται με την εναλλαγή των ακανονίστου πάχους στρωμάτων λάβας και ηφαιστειακών τόφφων.
3. Τα προηγούμενα στρώματα R2, R3 και R4 φαίνεται να έχουν μεγαλύτερες τιμές πάχους και ειδικής αντίστασης προς τα ΒΔ, πλησίον της γεώτρησης N2, παρά προς τα ΝΑ, πλησίον της γεώτρησης N1, μέσα στην καλδέρα. Τα παραπάνω συνιστούν την ύπαρξη ρήγματος με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ στο κέντρο περίπου της καλδέρας. Η ύπαρξη τέτοιου ρήγματος είναι συμβιβαστή αφ' ενός μεν με την γεωλογική προέκταση και συνέχιση του ρήγματος F2 στο εσωτερικό της καλδέρας (Σχ. 1), αφ' ετέρου δε προσφέρει μια πιθανή εξήγηση της μη συνάντησης του επάνω μέρους της επιφάνειας των ασβεστολιθών προς τα ΒΔ από την γεώτρηση N2, ενώ συναντάται στα 700 m περίπου από την γεώτρηση N1 προς τα ΝΑ.



9. Ευσχέτιση AMT ευρεθείσας δομής και στρωματογραφίας των γεωτρήσεων N1 και N2.  
 Fig. 9. Correlation between AMT resistivity structure and borehole stratigraphy (N1 & N2).

Έτσι φαίνεται πολύ πιθανή η ύπαρξη του παραπάνω ρήγματος στο μέσο περίπου μεταξύ της N1 και N2, που κόβει τις ασυνέχειες D23 και D34 (πιθανά και την D45 μέχρι την άνω επιφάνεια των ασβεστολίθων;) με μετάπτωση προς τα ΒΔ.

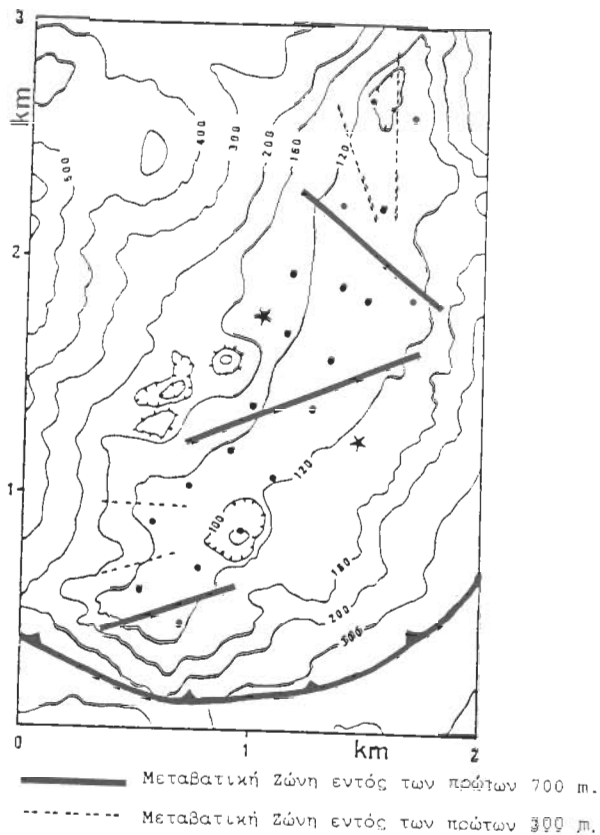
Στην προκειμένη γεωφυσική έρευνα δεν επιτεύχθηκε ο εντοπισμός της επάνω επιφάνειας των ασβεστολίθων από την παρακείμενη προς την γεώτρηση N1 AMT διασκόπηση (905R), που σημειωτέον βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από 200 m από την N1. Αυτό γιατί δεν κατέστη δυνατή η διαφοροποίηση ως προς την τιμή 4 Ohm.m της ειδικής αντίστασης, ακόμη και μετά την πρόσθετη παρεμβολή ασυνέχειας (βλέπε διακεκομμένη γραμμή - Σχ. 9) στο βάθος που εντοπίζεται από την N1 ο ασβεστόλιθος, στη διαδικασία της μονοδιάστατης αντιστροφής των 905 R AMT δεδομένων (Σχ. 2). Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η AMT διασκόπηση έχει λάβει χώρα μέσα σε μια καλδέρα ενός ηφαιστείου, όπου έλαβε χώρα σημαντική έκρηξη και εκτίναξη υλικού, επομένως δεν θα ήταν απίθανη η μη ύπαρξη ασβεστολίθου 200 m προς τα ΒΔ και κάτω από την 905R διασκόπηση. Η εκτέλεση πλησιέστερα προς την N1 AMT μετρήσεων καθίσταται προβληματική, γιατί οι σωληνώσεις της γεώτρησης επιδρούν στις AMT καταγραφές (όπως συνέβει και με τις AMT μετρήσεις προς τα ΒΔ, πλησίον της N2) προκαλώντας διαστροφή στο τελλουρικό κυρίως σήμα.

Επανερχόμενοι στο σχήμα 9, η ασυνέχεια D45 φαίνεται να είναι ρηγματωμένη με μετάπτωση προς τα NA. Από όλα τα παραπάνω συνάγεται ότι πιθανώς πρόκειται για σχηματισμό δύο ρηγμάτων που σχηματίστηκαν κατά την διάρκεια δύο διαφορετικών γεωλογικών επεισοδίων.

4. Θεωρώντας τα μοντέλα κατά μήκος των τομών T1, T2 και T3, φαίνεται ότι τα στρώματα R2 και R3 σχηματίζουν (για το μεγαλύτερο τμήμα της καλδέρας) ουσιαστικά μια κοίλη μορφή, που είναι σχετικά αγώγιμη σε σύγκριση με την κυρτή μορφή του βαθύτερου στρώματος R5, που είναι σαφώς λιγότερο αγώγιμο. Το κοίλο σχήμα των "αγώγιμων" στρωμάτων (R2 και R3) θα πρέπει να διαμορφώθηκε μετά την κατακρήμνιση και κατάρρευση της καλδέρας πάνω σε ένα "λιγότερο αγώγιμο" σχηματισμό, που ενδεχομένως αποτελούσε μέρος του αρχικού σταδίου σχηματισμού της ηφαιστείου.

5. Όπως φαίνεται από το σχήμα 9, υπάρχει πολύ καλός συσχετισμός μεταξύ του επάνω τμήματος του στρώματος R5 και της απαρχής απώλειας ύδατος σε ορισμένα βάθη σε αμφότερες τις γεωτρήσεις N1 και N2, που αποτελεί σημαντική ένδειξη ύπαρξης ταμειυτήρα, όπως συμβαίνει σε τέτοιες περιπτώσεις. Το παραπάνω πιθανώς συνιστά ότι η ασυνέχεια D45 αποτελεί την επάνω επιφάνεια του βαθύτερου ταμειυτήρα. Το γεγονός αυτό είναι αρκετά σημαντικό στην παραπέρα γεωθερμική έρευνα του νησιού.

Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής εξέταση των μοντέλων ειδικής αντίστασης των AMT δεδομένων για όλη την έκταση διασκόπησης και σε ότι αφορά τα διάφορα στρώματα και τιμές αγωγιμότητας (Σχ. 5). Διαπιστώθηκε η ύπαρξη ορισμένων μεταβατικών ζωνών αγωγιμότητας, που δείχνονται στο σχήμα 10. Οι ζώνες αυτές δεν θα πρέπει να θεωρούνται και να εκληφθούν υποχρεωτικά ως ρήγματα. Απλά αποτελούν περιοχές έντονης μεταβολής, μετάβασης, της ειδικής αντίστασης, χωρίς βέβαια να αποκλείεται κατη-



Σχ. 10. Συνοπτική παρουσίαση των κύριων μεταβατικών ζωνών που προσδιορίστηκαν από την AMT διασκόπηση.

Fig.10. Summary of main transitional zones deduced from the AMT survey.

γορηματικά και η περίπτωση ρήγματος. Ανάλογα δε με το βάθος, υφίσταται διαφοροποίηση στις ζώνες αυτές, που άλλες είναι επιφανειακότερες.

Επιβάλλεται λοιπόν λεπτομερέστερη ανάλυση των δεδομένων καταγραφής από το S. P.A.M.-IIb και κατά κύριο λόγο αυτών που προέρχονται από την ζώνη II (band II) με εύρος συχνοτήτων καταγραφής 2 Hz - 0.25 Hz. Με τον τρόπο αυτό θα καταστεί δυνατόν να απεικονισθεί ακριβέστερα η υπόγεια τοπογραφία της ασυνέχειας D45. Άκρωξ ενδιαφέροντα θα ήταν επίσης η ανίχνευση της ασυνέχειας αυτής και εκτός των ορίων του εσωτερικού τμήματος της καλδέρας, όπου ενδέχεται να ανεβαίνει σε μικρότερα βάθη από την επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή η επιλογή μελλοντικών θέσεων γεωτρήσεων καθίσταται ουσιαστική για την γεωθερμική εκμετάλλευση του πεδίου της νήσου. Συνιστάται επίσης και η παραπέρα AMT εξερεύνηση του βόρειου και νότιου τμήματος του επίπεδου τμήματος της καλδέρας.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bostick, F.X. (1977). A simple almost exact method of MT analysis. Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration. US Geological Survey, Contract No 14080001-8-359.
- Davis, E.N. (1967). Zur Geologie und Petrologie der Inseln Nisyros und Jali (Dodecanes). *Practica Acad. Athen*, 42, 235-252.
- Dawes, G.J.K. (1984). Short Period Automatic Magnetotelluric (S.P.A.M.) System, In A broadband tensorial magnetotelluric study in the Travale - Radicondoli geothermal field. (Hutton et al.) EEC Final Report Contract No EG-A2-031-UK.
- Di Paola, U. (1974). Volcanology and petrology of Nissyros Island (Dodecanne, Greece).
- Ναθαναήλ, Η. (1983). Γεωηλεκτρική διασκόπηση της Νισύρου. ΙΓΜΕ, Αθήνα, 12 σελ.
- Παπανικολάου, Δ. και Λέκκας, Ε. (1989). Τεκτονική ανάλυση του γεωθερμικού πεδίου της Νισύρου. Εκθ. υποβλ. ΔΕΜΕ/ΔΕΗ, 64 σελ.
- Sule, P.O. (1985). A broadband magnetotelluric investigation in SE Scotland. Ph. D. Thesis, University of Edinburgh, U.K.
- Ungemach, P. (1982). Nissyros geothermal Wildcat drilling, Testing, Sampling 6 June-3 December, 1982. Exec. summary, preliminary report, EEC Contract No EG-A-1-046-G and EG-A-Y-113-1.
- Vozoff, K. (1985). Magnetotelluric Methods. SEG Geophysical reprint series No 5, 763 p.