

Πρακτικά	δου	Συνεδρίου	Μάιος	1992
Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ.	XXVIII/2	σελ.	Αθήνα
Bull. Geol. Soc. Greece	Vol.		587-603	1993
			pag.	Athens

ΕΠΙ ΤΗΣ ΣΧΕΣΕΩΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΚΑΛΔΕΡΑΣ ΝΙΣΥΡΟΥ

Α.ΤΖΑΝΗΣ*, Ε.ΛΑΓΙΟΣ*

ΣΥΝΟΨΗ

Στο γεωθερμικό πεδίο της Καλδέρας της Νισύρου, η κυκλοφορία των ρευστών ελέγχεται από την ενεργό τεκτονική. Η σημερινή μορφή της νήσου έχει διαμορφωθεί μέσα από σειρά διεργασιών ανεγέρσεως και καταστροφής του ηφαιστειακού οικοδομήματος, στις οποίες πρωτεύοντα ρόλο έπαιξαν οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες της περιοχής. Συμβατικά, πιστεύεται ότι η κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών συνδέεται με συστήματα ρηγμάτων παρατάξεως Β-20°-40°-Δ και Β-30°-50°-Α. Υπάρχουν, εν τούτοις, στοιχεία περί της παρουσίας ετέρου, νεωτέρου συστήματος κανονικών ρηγμάτων (ΕΡ), με παράταξη Β-60°-70°-Α. Το υποτιθέμενο αυτό σύστημα δεν παρουσιάζει εμφανείς επιφανειακές εκδηλώσεις (κατοπτρικές επιφάνειες). Πληθώρα εμμέσων ενδείξεων, όπως η διεύθυνση αναπτύξεως της υδροθερμικής δραστηριότητας (ατμίδες και κρατήρες φρεατικών εκρήξεων), μαρτυρούν την ύπαρξή του. Η επίπεδη περιοχή της καλδέρας της Νισύρου (Λακκί) διερευνήθηκε με πυκνές ΜαγνητοΤελλουρικές (ΜΤ) μετρήσεις σε δύο φάσεις, (1989 και 1991), με σκοπό την διερεύνηση του γεωθερμικού πεδίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η γεωηλεκτρική δομή κάτω από το Λακκί δύναται να διακριθεί σε μία νότια-κεντρική και μία βόρεια ενότητα με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Στην πρώτη (γεωθερμικώς ενεργό) ενότητα, η ασθενώς διδιάστατη κατανομή αγωγιμότητας έχει παράταξη παραπλήσια με αυτήν του συστήματος ΕΡ, η δε ροή των τελλουρικών (γήινων ηλεκτρικών) ρευμάτων λαμβάνει χώρα κατά την διεύθυνση Β-60°-70°-Α, παραλλήλως προς την παράταξη του ΕΡ. Στην δεύτερη (γεωθερμικώς ανενεργό) ενότητα, η κατανομή αγωγιμότητας είναι σχεδόν ομογενής και η ροή των τελλουρικών ρευμάτων εγκάρσια προς την παράταξη του ΕΡ. Παραδεχόμενοι ότι η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος διευκολύνεται κατά μήκος των αγωγίμων αγωγών κυκλοφορίας των γεωθερμικών ρευστών, συμπεραίνουμε ότι οι τελευταίοι παρατάσσονται κατά Β-60°-70°-Α και ως εκ τούτου ταυτίζονται με το σύστημα ΕΡ. Η ανωτέρω ερμηνεία προϋποθέτει την ύπαρξη εφελκυστικού εντατικού πεδίου, διευθυνόμενου από Β-Ν ως ΒΔ-ΝΑ.

* Τομέας Γεωφυσικής Γεωθερμίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πανεπιστημιούπολις, Ιλίσια, 15784 Αθήνα.

* Department of Geophysics and Geothermy, University of Athens, Panepistimioupolis, Ilisia, 15784 Athens, Greece.

ABSTRACT

In the geothermal field of Nisyros Caldera, fluid circulation is controlled by active tectonism. The present landscape has been formed through a series of processes that built and destroyed the volcanic edifice and during which a principal influence was exerted by the major, superimposed, recurrent systems of faults, that appeared in different ages. Conventionally, it is believed that the circulation of geothermal fluids is associated with fault systems with average strike N-20°-40°-W and N-30°-50°-E. There exist, however, evidence about the existence of a young system of normal faults (EP - Greek acronym for active fault) striking N-60°-70° E. The postulated system does not exhibit apparent surface manifestations, but a plethora of indirect evidence, including hydrothermal phenomena and phreatic explosion features, attest to its presence. A high resolution AMT survey was carried out in two phases (1989 and 1991), to explore the geothermal potential of the flat part of the caldera (Lakki area). The results indicate that the geoelectric structure underneath Lakki can be distinguished in a southern-central and a northern part with different characteristics. In the first (geothermally active) part, the weakly two-dimensional conductivity structure appears to be closely associated with the strike of the EP system, while telluric current flow takes place along the direction N-60°-70°-W. In the second (geothermally inactive) area, the geoelectric structure appears to be homogeneous and normal to the EP system. Assuming that current flow is facilitated along the conductive conduits of fluid circulation, we conclude that the latter strike along the direction N-60°-70°-W and may be identified with the young EP system. Such an interpretation requires the existence of an extensional stress field, of direction N-S to NW-SE.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Νίσυρος είναι ένα μικρό νησιωτικό ηφαίστειο τεταρτογενούς ηλικίας, στο ανατολικό άκρο του Αιγαίου Ηφαιστειακού Τόξου. Παρουσιάζει εξαιρετικό γεωθερμικό ενδιαφέρον (πεδίο υψηλής ενθαλπίας) και, μαζί με την νήσο Κω, εντοπίζεται περιοχή υψίστου ενδιαφέροντος για την γεωτεκτονική εξέλιξη του Αιγαίου. Αποτελεί, ως εκ τούτου, πόλο έλξης τόσο ακαδημαϊκών, όσο και εφαρμοσμένων ερευνών.

Σημαντικό ενδιαφέρον έδειξε, στοχεύοντας την εγκατάσταση εκεί σταθμού παραγωγής ενέργειας, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Στα πλαίσια των προσπαθειών αυτών, ο Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, σε συνεργασία με το Τμήμα Γεωλογίας και Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου, εξετέλεσε βαθειά γεωφυσική αναγνώριση, με χρήση της Μαγνητοτελλουρικής (ειδικότερον της Ακουστο-ΜαγνητοΤελλουρικής - AMT) μεθόδου, της περιοχής μεγίστου γεωθερμικού ενδιαφέροντος, στο επίπεδο τμήμα του εσωτερικού της καλδέρας του ηφαιστείου (περιοχή Λακκί). Συνολικά 32 βαθυσκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις, κατά τον Ιούνιο 1989 (Φάση I, 20 βαθυσκοπήσεις) και τον Μάιο 1991 (Φάση II, 12 βαθυσκοπήσεις). Ορισμένα από τα συμβατικά αποτελέσματα και συμπεράσματα της πρώτης φάσεως, δηλαδή ποσοτική ανάλυση της κατακορύφου και πλευρικής κατανομής της αγωγιμότητας και η συναφής ερμηνεία, έχουν ήδη κοινοποιηθεί, (Λάγιος, 1991, Dawes and Lagios, 1991), ενώ περιορισμένης εκτάσεως αναφορά στα αποτελέσματα αμφοτέρων γίνεται από τους Tzanis and Lagios, (1991). Στην παρούσα εργασία θα γίνει χρήση δεδομένων και μετρήσεων αμφοτέρων των φάσεων. Δεν θα δώσουμε έμφαση στην συμβατική χρήση της MT μεθόδου, αλλά θα εστιάσουμε την προσοχή μας στην δυνατότητα την οποία παρέχει, για εύρεση της χωροταξίας της γεωηλεκτρικής δομής και εντοπισμό των διαύλων κυκλοφορίας των εξ επαγωγής γήινων ηλεκτρικών (τελλουρικών) ρευμάτων, για τους ακόλουθους λόγους:

Με δεδομένα, πρώτον ότι τα ηλεκτρικά ρεύματα οδεύουν διά του πλέον αγωγίμου μέσου και, δεύτερον, ότι η ηλεκτρική αγωγιμότης των πετρωμάτων είναι συνάρτηση του υγρού (υδατικού) κλάσματος και της θερμοκρασίας, (π.χ. Keller and Rapolla, 1974), καθίσταται προφανές ότι οι αγωγοί κυκλοφορίας γεωθερμικών ρευστών και τροφοδοσίας του γεωθερμικού συστήματος αποτελούν ταυτοχρόνως και τις πλέον ηλεκτρικώς αγωγίμους οδούς ούτως, ώστε να οφείλει να υπάρχει άμεση συσχέτιση των δύο χαρακτήρων. Επιπλέον, με δεδομένο το ότι το γεωθερμικό σύστημα της Νισύρου ελέγχεται από την ενεργό τεκτονική, οι αγωγοί κυκλοφορίας των γεωθερμικών ρευστών οφείλουν να συσχετίζονται με τα ενεργά τεκτονικά ρήγματα, άρα και οι δίαυλοι κυκλοφορίας των τελλουρικών ρειμάτων. Είναι λοιπόν προφανές, ότι ο εντοπισμός των διαύλων κυκλοφορίας τελλουρικών ρειμάτων (τελλουρικής ροής) δύναται να περιέχει πληροφορία για την χωροθέτηση των αγωγών τροφοδοσίας του γεωθερμικού συστήματος και εμμέσως για την ενεργό τεκτονική της υπό διασκόπηση περιοχής.

Ο επιτυχής και ακριβής εντοπισμός των ενεργών ρημάτων, μέσω των οποίων κυκλοφορούν γεωθερμικά ρευστά, παρέχει περισσότερα και ισχυρά κριτήρια για τοποθέτηση των ερευνητικών και μεταλλευτικών γεωτρήσεων, με την συνακόλουθη εξοικονόμηση πόρων και, εν πάσει περιπτώσει, αποτελεί σημαντική συμβολή στις μεθοδολογίες μελέτης τόσο των γεωθερμικών συστημάτων όσο και των συγχρόνων τεκτονικών δεδομένων μιας γεωθερμικής περιοχής.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ - ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ

Οι πρώτες σπουδές της Νισύρου είχαν κυρίως πετρολογικό περιεχόμενο (Davis, 1967, Di Paola, 1974) αλλά καθόρισαν ένα γενικό πρότυπο εξέλιξης του ηφαιστείου (προκαλδερική υπο-θαλάσσια και χερσαία δραστηριότητα, έκρηξη και σχηματισμός της καλδέρας, έκχυση ρουδακιτών και σχηματισμός μετακαλδερικών θόλων, σύγχρονη υδροθερμική δραστηριότητα και φρεατικές εκρήξεις). Ακολουθεί μία σειρά γεωλογικών, πετρολογικών και ηφαιστειολογικών μελετών, εκ των οποίων οι Παπανικολάου και Λέκκας (1989), Παπανικολάου κ.α., (1990), Keller et al, (1990), ασχολούνται εκτενώς με την τεκτονική και την εκρηκτική ηφαιστειακή εξέλιξη της νήσου. Σημαντική υπήρξε επίσης η προσπάθεια χαρτογραφήσεως της νήσου από τον Βουγιουκαλάκη (1989) και την Merz-Dal Geothermal Consultants (1989) για λογαριασμό της ΔΕΗ. Συγκερασμό συμπερασμάτων των ανωτέρω εργασιών, σε συνδυασμό με προσωπικές επικοινωνίες των γραφόντων με τους Σημιαϊκή, Ν., (1991), Βουγιουκαλάκη, Γ., (1992), καθώς και ίδιες παρατηρήσεις, αποτελεί ο τεκτονικός χάρτης της Εικόνας 1, (τροποποίηση, απλοποίηση και συμπλήρωση του χάρτη της Merz-Dal, 1989).

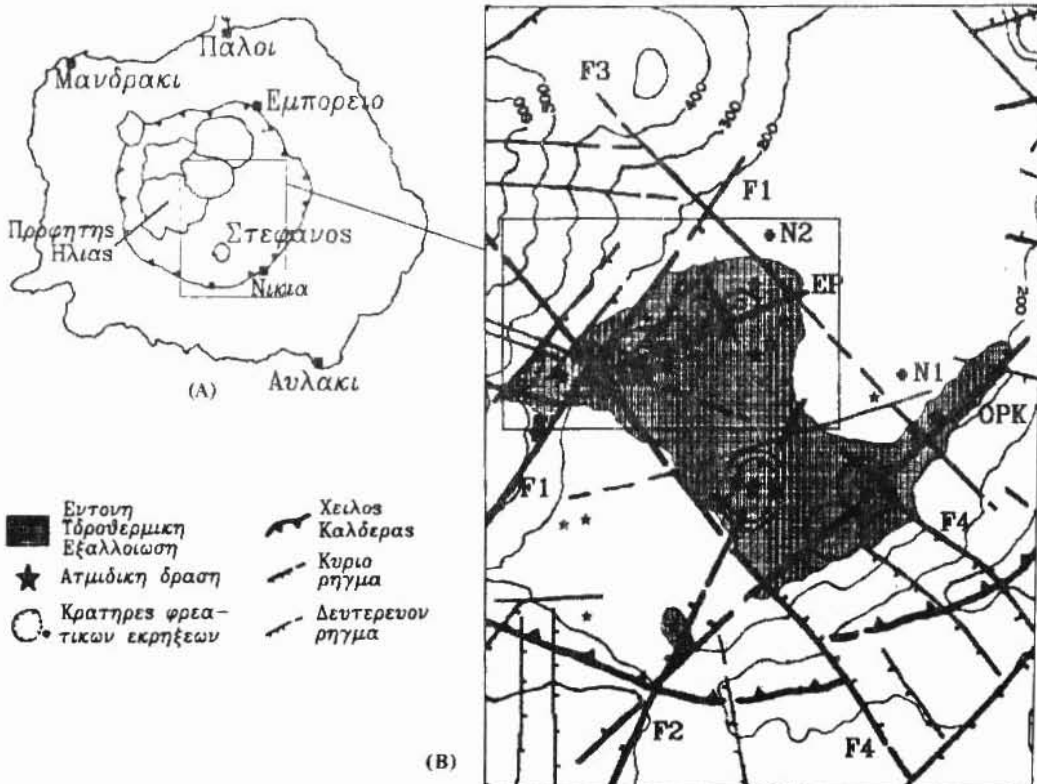
Οι ανωτέρω ερευνητές κατατείνουν προς ένα πρότυπο γεωλογικής εξέλιξης του ηφαιστείου της Νισύρου εκ τεσσάρων σταδίων:

Προκαλδερικό: Κατασκευή ηφαιστειακού κώνου με εξωθητική δραστηριότητα σε διαδοχικές φάσεις, από υποθαλάσσια με ανδραϊτικές λάβες, εξελισσόμενη σε χερσαία δαικιτική ως ρουδακιτική. Τεκτονική δραστηριότητα με εμφάνιση των ρηξιγενών ζωνών F1, F2, F3.

Συν-καλδερικό: Φρεατομαγματική(ες) έκρηξη(εις) καταστρέφει το ηφαιστειακό οικοδόμημα, με ακόλουθη κατακρήμνιση και δημιουργία των καλδερικών βυθισμάτων και εναπόθεση ρουλιθικής κισήρεως.

Μετακαλδερικό: Του σχηματισμού της καλδέρας έπεται εξώθηση ρουλιθικών-ρουδακιτικών υλικών τα οποία δημιουργούν τους δόμους του Προφήτη Ηλία. Για λόγους που δεν έχουν εξηγηθεί αυτοί δεν καλύπτουν το ανατολικό μέρος της καλδέρας. Δράση των ως άνω ρηξιγενών ζωνών.

Σύγχρονο: Εντονη τεκτονική δραστηριότητας με ενεργοποίηση των μεγάλων ρηξιγενών ζωνών



Εικόνα 1: Χωροθέτηση και τεκτονικός χάρτης της περιοχής ΜΤ διασκοπίσεως στην Νίσυρο. Το ορθογώνιο πλαίσιο εντός της εικόνας 1β περικλείει την ΠΕΝΥΔ - Περιοχή ΕΝτόνου Υδροθερμικής Δραστηριότητας. ΕΡ είναι τα Ενεργά Ρήγματα. F1-F4 είναι οι ρηξιγενείς ζώνες αναγνωρισθείσες από τους Παπανικολάου et al (1991). ΟΡΚ είναι το Οριακό Ρήγμα Καλδέρας.

Figure 1: Location and structural map of the MT survey area in Nisyros. The rectangular frame within Figure 1b delineates the area of intense hydrothermal activity (ΠΕΝΥΔ). ΕΡ are the Active Faults. F1-F4 are the major fault zones recognized by Papanikolaou et al (1991). ΟΡΚ is the Caldera boundary Fault

και εμφάνιση της ζώνης F4 -δημιουργία δευτερευόντων ρηγμάτων. Έντονη υδροθερμική δραστηριότητας με παροξυσμούς φρεατικών εκρήξεων στους ιστορικούς χρόνους (1442-1888). Τα ίχνη 13 τουλάχιστον κρατήρων είναι ορατά, με μεγαλύτερο εξ αυτών τον Στέφανο, διαμέτρου 300m (Εικόνα 1).

Οι κύριες τεκτονικές ζώνες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην γεωτεκτονική-μορφολογική εξέλιξη του ηφαιστείου και ταυτοχρόνως ελέγχουν την σύγχρονη υδροθερμική δραστηριότητα και την λειτουργία του γεωθερμικού πεδίου. Οι Παπανικολάου και Λέκκας, (1989) και Παπανικολάου κ.α., (1990) αναγνωρίζουν τέσσερις κύριες ρηξιγενείς ζώνες, τις F1, F2, F3, και F4 και πληθώρα δευτερευουσών. Λόγω της φύσεως και του σκοπού της εργασίας μας, θεωρούμε χρήσιμη την σύντομη περιγραφή των μεγάλων αυτών ζωνών:

Η ζώνη F1, έχει διεύθυνση Β-50°-Α, κλίση 70°-80° προς ΝΑ και άλμα περί τα 100m. Εμφανίζεται χαρακτηριστικώς στην καλδέρα, περιλαμβάνουσα σειρά παραλλήλων μεγάλων ρηγμάτων με κατοπτρικές επιφάνειες προκαλούσες έντονες μορφολογικές ασυνέχειες. Έντονι

ατμιδική -υδροθερμική δραστηριότητας εμφανίζεται κατά μήκος της, πλησίον της τομής της με την ζώνη F4 (Εικόνα 1).

Η ζώνη F2 έχει διεύθυνση B-30°-A, κλίση 70°-80° προς Δ-ΒΔ και άλμα περί τα 120m. Λημιουργεί εντυπωσιακή μορφολογία κυρίως έξω από την καλδέρα. Εντός της καλδέρας η παρουσία της είναι ασαφής και εικάζεται ότι διέρχεται δια του κρατήρα φρεατικής εκρήξεως Στέφανος.

Η ζώνη F3 εμφανίζεται στα ΒΔ της νήσου, με διεύθυνση B-40°-Δ, κλίση 70°-80° προς ΒΑ και άλμα περί τα 70°m. Είναι βεβαιωμένη στο εξωτερικό της καλδέρας πλησίον του Μανδρακίου από αρκετούς ερευνητές, αλλά χάνεται στην περιοχή των ρυολίθων Προφήτη Ηλία εκτός ενός μεγάλου επιμήκου μορφολογικού χαρακτήρα στην νοερή προέκτασή της. Εμφανίζεται πάλι σαν μορφολογική ασυνέχεια στο ΒΔ πρηνές της περιοχής Λακκί. Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι έχει δράσει τόσο κατά το προκαλδερικό όσο και κατά το μετα-καλδερικό στάδιο, αλλά η σπουδαιότης της συμβολής της στο σύγχρονο τεκτονικό καθεστώς και στην λειτουργία του γεωθερμικού πεδίου δεν έχει αποσαφηνισθεί.

Η ζώνη F4, φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του γεωθερμικού πεδίου. Σχηματίζει ταφροειδές βύθισμα με δύο κύρια και σειρά δευτερευόντων ρηγμάτων διεύθυνσης B-20°-40°-Δ, και κλίσης 70°-80°. Έχει εμφανέστατη παρουσία, προκαλούσα μετατόπιση του χείλους της καλδέρας και επαφών άλλων σχηματισμών. Συνδέεται και σχεδόν οριοθετεί την περιοχή γεωθερμικού ενδιαφέροντος (σικτική ζώνη στην Εικόνα 1). Εντονη υδροθερμική δραστηριότητα αναπτύσσεται στην συμβολή της με τις άλλες μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες.

Η ζώνη ORK (Οριακό Ρήγμα Καλδέρας) αναγνωρίζεται από τους Παπανικολάου και Λέκκα, (1989), και την Merz-Dal (1989). Οι πρώτοι δεν το θεωρούν μείζονος χαρακτήρα. Κατά μήκος του υπάρχουν δύο παλαιοί κρατήρες φρεατικών εκρήξεων και ατμιδική δραστηριότητα, ιδίως στην συμβολή με το βόρειο σκέλος της τάφρου F4. Έχει διεύθυνση B-50°-A και κλίση 70°- 80° προς ΒΔ (Εικόνα 1).

Πέραν των ανωτέρω εμφανών ρηξιγενών ζωνών, πρόσφατες μελέτες αποκαλύπτουν την ύπαρξη ετέρου συγχρόνου συστήματος ρηγμάτων, κυρίως διεύθυνσεως B-60°-70°-A. Το σύστημα ερευνήθηκε από τους Σημαιάκη, Ν., (1991, προσ. επικοινωνία) και Βουγιουκαλάκη, Γ., (1992, προσ. επικοινωνία) επίσης αναγνωρίσθηκε από την Merz-Dal (1989) και από τους γράφοντες. Στην Εικόνα 1 σημειώνεται ως τεκτονική γραμμή υπό τα στοιχεία ΕΡ (Ενεργό Ρήγμα). Ο Σημαιάκης, Ν., (1991, προσ. επικοινωνία) υποστηρίζει ότι πρόκειται περί κανονικού δεξιόστροφου συστήματος, με αξιόλογη οριζόντιο συνιστώσα μετατοπίσεως. Στην ερευνηθείσα περιοχή, το σύστημα αυτό αναγνωρίζεται μάλλον από έμμεσες εκδηλώσεις του, παρά από σαφείς κατοπτρικές επιφάνειες. Οι έμμεσες εκδηλώσεις είναι σαφέστερες εντός της περιοχής περικλειομένης από το ορθογώνιο πλαίσιο στην Εικόνα 1, όπου παρουσιάζεται εντονότατη και συνεχής υδροθερμική δραστηριότητας εις το εξής θα αναφέρεται ως Περιοχή ΕΝτόνου Υδροθερμικής Δραστηριότητας (ΠΕΝΥΔ).

Η ΠΕΝΥΔ αποτελείται από δύο μικρούς μετακαλδερικούς θόλους, παρατασσομένους κατά την διεύθυνση B-60°-70°-A. Επί και εκατέρωθεν αυτών των θόλων και κατά μήκος της διεύθυνσης B-60°-70°-A, ευθυγραμμίζεται η ατμιδική δραστηριότης και κρατήρες φρεατικών εκρήξεων. Η ανάπτυξη των ριπιδίων των αναβλημάτων των φρεατικών εκρήξεων έχει επίσης υψηλή κατευθυντικότητα προς την αυτή διεύθυνση. Τα ανωτέρω στοιχεία μαρτυρούν ότι οι εκρήξεις περιορίζονται και ελέγχονται αυστηρώς κατά την διεύθυνση B-60°-70°-A.

Αξιόλογη υδροθερμική δραστηριότητα εκτός ΠΕΝΥΔ, υπάρχει μόνο εντός του κρατήρα Στεφάνου και επί της τομής των ρηγμάτων OPK και του βόρειου σκέλους της F4. Ασθενέστερη εξακολουθεί η ατμιδική δραστηριότητα κατά μήκος του OPK, περί τα 200m βορειότερα. Είναι αξιοσημείωτο, και δύναται να διαπιστωθεί από την Εικόνα 1, ότι η σημαντική ατμιδική δραστηριότητα της ζώνης Στέφανος-OPK έχει επίσης μέση διεύθυνση B-60°-70°-A. Η Merz-Dal (1989) έχει εντοπίσει κανονικό ρήγμα της αυτής διεύθυνσεως, διερχόμενο μόλις βορείως

του Στεφάνου (Εικόνα 1).

Τα ανωτέρω δεδομένα οδηγούν στην παρατήρηση ότι οι σύγχρονοι αγωγοί τροφοδοσίας του γεωθερμικού πεδίου παρατάσσονται κατά την διεύθυνση Β-60°-70°-Α. και οδηγούν στην διατύπωση της υποθέσεως ότι, η σύγχρονη ενεργός τεκτονική στην ερευνηθείσα περιοχή, επίσης συσχετίζεται με κανονικές διαρρήξεις, οι οποίες θα επέτρεπαν την κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών κατά την διεύθυνση Β-60°-70°-Α. Η ύπαρξη τέτοιων κανονικών ρηγμάτων προϋποθέτει την ύπαρξη περιφερειακού εφελκυστικού πεδίου με διεύθυνση από Β έως ΒΔ-ΝΑ. Οι ΜΤ παρατηρήσεις δεν είναι, φυσικά, σε θέση να βεβαιώσουν την ύπαρξη του περιφερειακού πεδίου, είναι όμως σε θέση να ελέγξουν την υπόθεση της ύπαρξης αγωγών κυκλοφορίας ρευστών κατά την ως άνω διεύθυνση

3. ΜΤ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ΜαγνητοΤελλουρική (ΜΤ) μέθοδος βασίζεται στο φαινόμενο της φυσικής (παθητικής) ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, κατά το οποίο επίπεδα, γραμμικώς πολωμένα, υποκατακορύφως διαδιδόμενα πηγαία μαγνητικά κύματα, προερχόμενα από εξωγήινες ή ιονοσφαιρικές πηγές, εισέρχονται και επάγουν ηλεκτρικά (τελλουρικά) ρεύματα εντός αγωγίμου στερεού φλοιού, ελευθέρου πηγών ή καταβοθρών ηλεκτρομαγνητικής ενεργείας. Τα οριζόντια επάγοντα μαγνητικά και επαγόμενα ηλεκτρικά πεδία καταγράφονται πάντοτε υπό μορφή αμοιβαίως ορθογώνιων αντιστάσεων σε ορθοκανονικό (καρτεσιανό) σύστημα αναφοράς. Στο πεδίο συχνοτήτων συνδέονται μέσω των γραμμικών συστημάτων διπλής εισόδου -απλής εξόδου

$$\begin{bmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx}(\omega) & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & Z_{yy}(\omega) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{E}(\omega) = \mathbf{Z}(\omega) \cdot \mathbf{H}(\omega)$$

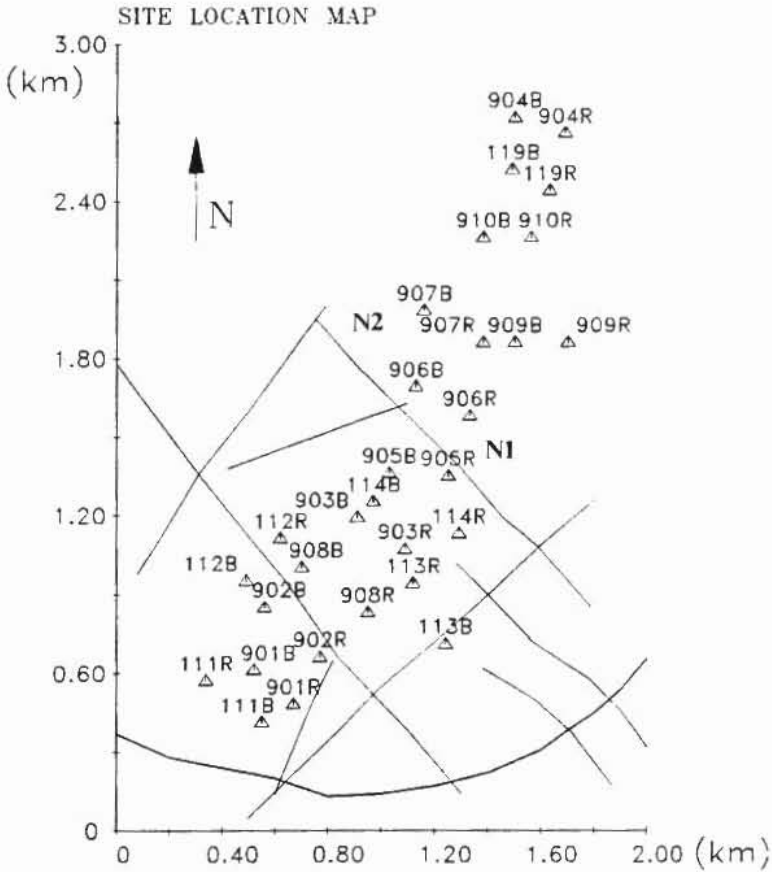
όπου ο μαγνητοτελλουρικός τελεστής (ΜΤΤ) $\mathbf{Z}(\omega)$ είναι 2x2 τανυστής βαθμού 2, αντιπροσωπεύων την *άνθετη αντίσταση (εμπέδηση)* του υπεδάφους και περιέχων πληροφορία για την γεωηλεκτρική δομή στην περιοχή του σταθμού μετρήσεων (ποσοτική κατακόρυφο και πλευρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των πετρωμάτων και τρόπο ροής των τελλουρικών ρευμάτων).

Επειδή το πηγαίο μαγνητικό πεδίο είναι επίπεδο και οριζόντιο, ότι κατακόρυφος μαγνητική συνιστώσα θέλει εμφανισθεί, θα οφείλει την ύπαρξή της σε επαγωγικά φαινόμενα λαμβάνοντα χώρα εντός της γης, (δευτερεύουσα επαγωγή) και μάλιστα μόνον στις περιπτώσεις διδιαστάτων (2-Δ) και τριδιαστάτων (3-Δ) κατανομών της αγωγιμότητας. Η απλή κατακόρυφος μαγνητική συνάρτηση μεταφοράς (ΜΑΣΜ) απαρτίζεται από δύο μιγαδικές ποσότητες $\mathbf{X}(\omega)=[\mathbf{A}(\omega) \mathbf{B}(\omega)]$, απεικονίζουσες τις οριζόντιες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου επί της κατακόρυφου H_z , αμφωνώς προς την σχέση

$$H_z(\omega) = \mathbf{X}(\omega) \cdot \mathbf{H}(\omega) = \mathbf{A}(\omega)H_x(\omega) + \mathbf{B}(\omega) \cdot H_y(\omega)$$

Οι ΜΑΣΜ περιέχουν πληροφορία σχετική με την χωροθέτηση της γεωηλεκτρικής δομής, (παράταξη της γεωηλεκτρικής βαθμίδας προκειμένου περί 2-Δ και 3-Δ κατανομών αγωγιμότητας), την διεύθυνση της τελλουρικής ροής και τις γεωηλεκτρικές διαστάσεις. Περισσότερες λεπτομέρειες επί των ΜΤ μεθόδων θα σπουδάσει ο αναγνώστης στους Rokityansky (1982) και Vozoff (1985).

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το αυτόματο σύστημα S.P.A.M. MkIIb (Short Period Automatic Magnetotelluric system, Dawes, 1984), και κάλυψαν το εύρος συχνοτήτων 128Hz-



Εικόνα 2: Κατανομή των θέσεων των MT βαθυσκοπήσεων στο Λακκί Νισύρου. xxxB δηλώνει την βάση. xxxR δηλώνει την δορυφόρο θέση μετρήσεων. Τα ίχνη των μεγάλων ρηγμάτων περιλαμβάνονται προς διευκόλυνση του προσανατολισμού.
Figure 2: MT site location map in the area of Lakki, Nisyros. xxxB denotes the base site; xxxR denotes the remote site. The major faults are superimposed to facilitate orientation. N1 and N2 mark the locations of two deep exploration wells.

40s. Η κατανομή των θέσεων μετρήσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Το σύστημα SPAM ΜκΠβ έχει την δυνατότητα καταγραφής μέχρι 9 ψηφιακών διαύλων, ώστε τα ευκολύνεται η ταυτόχρονη διασκόπηση σε δύο τουλάχιστον ανεξάρτητες θέσεις, εκ των οποίων την μία ονομάζουμε *βάση* (xxxB στην Εικόνα 2) και την ετέρα *δορυφόρο* (xxxR στην Εικόνα 2). Οι επιτρεπτοί συνδυασμοί τελλουρικών και μαγνητικών διαύλων καθιστούν ευχερή τον προσδιορισμό MTT σ' αμφότερες τις θέσεις, ενώ ΜΑΣΜ δύνανται να μετρηθούν μόνο στην βάση.

Τις εργασίες υπαίθρου ακολούθησε ενδεδειγμένη ανάλυση στο εργαστήριο. Όπως απεδείχθη, στο ελεύθερο βιομηχανικού ή άλλου ανθρωπογενούς θορύβου περιβάλλον της Νισύρου, η τυπική συμβατική μέθοδος εκτίμησης δι' ελαχίστων τετραγώνων, (Sims et al, 1970), υπήρξε υπερπαραρκής για την επίτευξη καλής ποιότητας αποτελεσμάτων. Ειδική μέριμνα ελήφθη για την εξασφάλιση αμερολήπτων εκτιμητριών των MTT και ΜΑΣΜ, κατά τα πρότυπα των

εφαρμογών των Beamish (1986) και Tzaniis (1988). Σε δύο περιπτώσεις μόνον (βαθοσκοπήσεις 907B και 114B) υπήρξε ανάγκη καταφυγής σε αποτελεσματικότερες μεθόδους εκτίμησης, προς αντιμετώπιση φαινομένων ισχυρού και ακανονίστου φυσικού θορύβου. Οι 'σθεναρές' (robust) τεχνικές που περιγράφονται στους Tzaniis and Beamish (1989) και Tzaniis (1988) εφαρμόστηκαν με επιτυχία.

Η χωρική ανάλυση των MTT και ΜΑΣΜ, (ανάλυση πρωτεύουσών συνιστωσών), σκοπό έχει την αποκωδικοποίηση πληροφοριών περι της διευθετήσεως των ΗΜ επαγωγικών διεργασιών στον χώρο. Όπως είναι φυσικό, οι επαγωγικές διεργασίες εξαρτώνται μονοσημάντως από την γεωμετρία και διευθέτηση της γεωηλεκτρικής δομής. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της γενικευμένης θεωρίας του Tzaniis (1988), η οποία παρέχει, ως συνάρτηση της συχνότητας, το μέγεθος, φάση, αξιμώθιο και έγκλιση των χαρακτηριστικών καταστάσεων των MTT και ΜΑΣΜ. Οι δύο πρώτες παράμετροι εκφράζουν ποσοτικώς τον τρόπο διάδοσης (απόσβεσης) των φυσικών ΗΜ πεδίων εντός της Γής και χρησιμοποιούνται για την ποσοτική εκτίμηση της κατακορύφου και οριζοντίου κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η τρίτη παράμετρος εκφράζει την τοπική διεύθυνση μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (βαθμίδα της γεωηλεκτρικής δομής η οποία αποσβένει τα πεδία). Η τετάρτη παράμετρος εκφράζει την 3-Δ διευθέτηση των ΗΜ πεδίων, είναι συνάρτηση των συνθηκών πόλωσής των και λαμβάνει μη μηδενικές τιμές μόνον στην περίπτωση 3-Δ δομής.

Η ορθή και συνεπής ποσοτική ερμηνεία των ΜΤ δεδομένων προϋποθέτει την επαρκή γνώση των διαστάσεων της γεωηλεκτρικής δομής, ώστε να εφαρμοσθούν τεχνικές συμβιβαστές προς τους φυσικούς περιορισμούς τους συναρτωμένους από τον διαφορετικό τρόπο ΗΜ επαγωγής εντός μέσων διαφορετικών διαστάσεων. Η ανάλυση πρωτεύουσών συνιστωσών κατέδειξε την πλήρη απουσία 3-Δ γεωηλεκτρικών δομών. Αυστηρώς γραμμική πόλωση των επαγομένων και επαγόντων πεδίων περητηρήθη (Εικόνα 3), ενώ στην περίπτωση 3-Δ δομών αναμένεται η σαφής ανίχνευση ελλειπτικής πολώσεως (Eggers, 1982, LaTorraca et al, 1986, Tzaniis, 1988). Οι δείκτες διαστάσεων κατά Kao and Orr (1982) έδειξαν κυριαρχούσα την 1-Δ γεωηλεκτρική συνιστώσα, (τυπικώς άνω του 80% συμβολή στην αυγρότηση των ΜΤΤ). Κατόπιν, και σε τελικό στάδιο, εφαρμογή της πλήρως αναλυτικής, μη γραμμική θεωρίας αντιστροφής κατά Parker (1980), η οποία προσφέρει όλες τις ικανές και αναγκαίες συνθήκες, πιστοποίησε την ύπαρξη σχεδόν 1-Δ γεωηλεκτρικής δομής.

Εξοπλισμένοι με τα αποτελέσματα των ανωτέρω αναλύσεων, θα παρουσιάσουμε συνοπτικώς την γεωηλεκτρική δομή και την χωρική ανάλυση των ΜΤΤ και ΜΑΣΜ για να δείξουμε την θέση και διευθέτηση των κυρίων διαύλων ροής ρεύματος και θα συζητήσουμε την σημασία των αποτελεσμάτων. Επίσης, θα συζητήσουμε τις ανωτέρω γεωηλεκτρικές πληροφορίες με την γεωλογική δομή και θα συζητήσουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν σχετικώς με την σύγχρονη τεκτονική στην καλδέρα της Νισύρου.

4. Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΟΜΗ

Όπως ήδη ανεφέρθη στην εισαγωγή, η λεπτομερής ποσοτική διερεύνηση της γεωηλεκτρικής δομής δεν αποτελεί πρωτεύοντα στόχο της παρούσης και θα δοθεί αλλού. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της περιγράφονται από τους Λάγιος (1991) και Dawes and Lagios (1991). Σε γενικές γραμμές, η γεωηλεκτρική δομή διακρίνεται σε δύο μεγάλες ενότητες.

Από τα 100m (μέσο ελάχιστο βάθος διεισδύσεως των μετρηθέντων ΗΜ πεδίων) μέχρι τα 500m περίπου, είναι σχεδόν στρωματοειδής και οριζοντίως ομογενής. Με την εξαίρεση λεπτού παραεπιφανειακού στρώματος μεταβαλλομένου πάχους (λίγες δεκάδες ως 100m), εμφανίζει

εξαιρετικώς χαμηλές αντιστάσεις, (0.5-11 Ω.m). Με την επικουρία των στοιχείων εκ των δύο βαθειών ερευνητικών γεωτρήσεων (N1 και N2 στην Εικόνα 1, βλ. Ungemach, 1982a Geotermica Italiana, 1983), αυτές αποδίδονται σε συνδυασμό πρώτον, εκτεταμένης υδροφορίας, (πιθανολογείται εκτεταμένος γεωθερμικός ταμιευτήρας σε βάθη 100-350m), η οποία κατά τόπους ανέρχεται μέχρι την επιφάνεια (Στέφανος) και, δεύτερον, εκτεταμένης υδροθερμικής εξαλλοιώσεως, (αργιλοποίησης προς μοντιοριλλονίτες, Βλάχου, Μ., 1991, προσ. επικοινωνία), η οποία δημιουργεί σχηματισμούς αυξημένης ικανότητας κατακρατήσεως ύδατος και αυξημένης αλατότητας των πορικών ρευστών (π.χ. Keller and Rapolla, 1974).

Κάτω από τα 500m περίπου, η δομή καθίσταται περιπλοκότερη, μεταβαλλομένη τόσο κατακορύφως, όσο και πλευρικός, χωρίς όμως να παρουσιάζει μεγάλες οριζόντιες αντιθέσεις αγωγιμότητας. Χαρακτηριστική και αντιπροσωπευτική είναι η σύνθετη Εικόνα 3, στην οποία παρουσιάζονται:

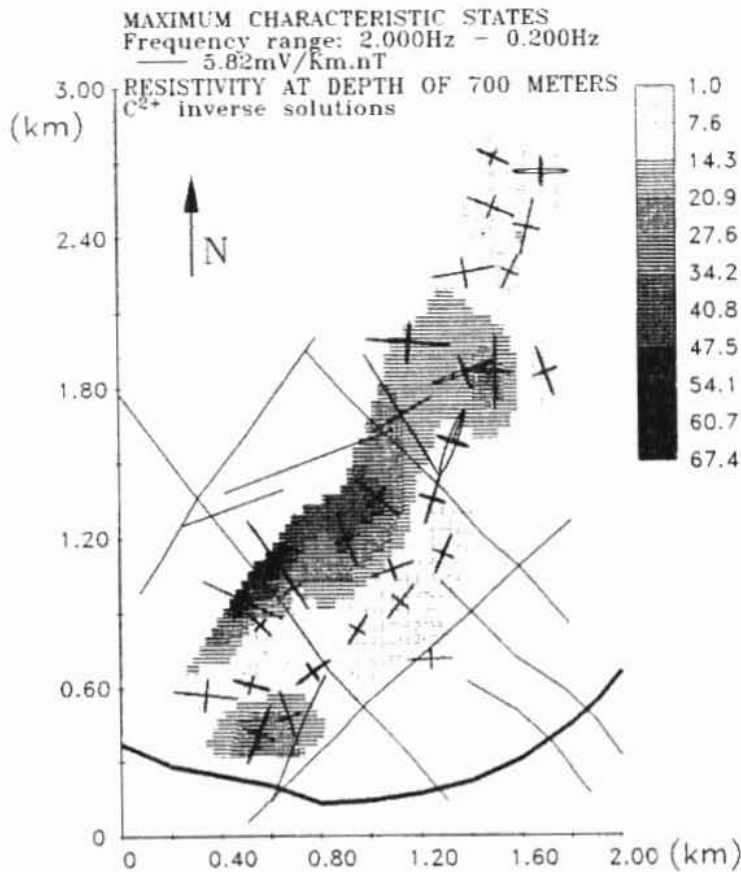
α) Η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσεως (*resistivity*) σε βάθος 700m υπό την επιφάνεια της θαλάσσης, (820m υπό την επιφάνεια του Λακκίου), η οποία συντεθεί από τα αποτελέσματα λεπτομερέστατης ποσοτικής ερμηνείας (αντιστροφής) των βαθυσκοπήσεων με τον πλήρως αναλυτικό μή-γραμμικό αλγόριθμο C^{2+} των Parker (1980) και Parker and Whaler, (1981).

β) Η κατανομή της μέσης *μεγίστης χαρακτηριστικής καταστάσεως* (MXK - *maximum characteristic state*) για εύρος συχνοτήτων 2Hz-0.2Hz το οποίο, στην ερευνηθείσα περιοχή αντιστοιχεί σε βάθη 500m - 2km.. Ο μεγάλος άξονας της MXK αντιπροσωπεύει το ηλεκτρικό πεδίο.

Επειδή η διευθέτηση των χαρακτηριστικών καταστάσεων των MTT και η εγκάρσια κατανομή (βαθίδα) της ειδικής αντιστάσεως αλληλοεξαρτώνται κατά τρόπο αμφιμονοσήμαντο, η παράλληλη μελέτη των ιδιοτήτων αμφοτέρων, παρέχει ισχυρότατα και ασφαλέστερα κριτήρια εκτίμησης της πραγματικής γεωηλεκτρικής δομής και του τρόπου με τον οποίο αυτή ελέγχει τις επαγωγικές διεργασίες σε ένα τόπο.

Παρατηρούμε ότι για βάθη >500m, η κατανομή της ειδικής αντιστάσεως διακρίνεται σε δύο ενότητες. Η πρώτη ενότητα εκτείνεται νοτιώς του ρήγματος F3 και, ειδικότερον εντός και νοτιώς της τάφρου F4. Εκεί παρατηρούμε επιμήκη ανάπτυξη μιας πλευρικής ασυνεχίας, η οποία παρατάσσεται περίπου παραλλήλως προς την ΠΕΝΥΔ. Εκατέρωθεν της ασυνεχίας εμφανίζονται πολύ ασθενείς αντιθέσεις αγωγιμότητας, (λίγες δεκάδες Ω.m), ούτως ώστε η γεωηλεκτρική δομή να χαρακτηρίζεται ασθενώς 2-Δ, έως σχεδόν 1-Δ. Στο N-NA άκρο της ερευνηθείσης περιοχής, η ασυνέχεια σχηματίζει αγωγίμο διάυλο με φαινομένη παράταξη ακριβώς παράλληλη προς την ΠΕΝΥΔ. Ο διάυλος, διαρκώς αμβλυνόμενος διευθύνεται προς τον Στέφανο και τα ανατολικά πρηνή της καλδέρας, όπου και παρατηρούνται οι χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις (ζώνη Στεφάνου). Υψηλές αντιστάσεις υπάρχουν ακριβώς προς N-NA της ΠΕΝΥΔ (ζώνη νοτίων πρηνών ΠΕΝΥΔ).

Η εξήγηση της υπάρξεως ενός σχετικώς εκτεταμένου χώρου πολύ χαμηλών ειδικών αντιστάσεων στην ζώνη του Στεφάνου, είναι αρκετά απλή. Σε μία περιοχή όπου συντρέχουν πολλές μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες που προκαλούν δευτερογενή υδραυλική διαπερατότητα, αυτή οφείλεται στην εκτεταμένη υδροφορία, στην έντονο κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών και στην αργιλοποίηση παλαιών ηφαιστειακών πετρωμάτων (τόφων), περί τον εξαιρετικώς ταραγμένο χώρο κάτω από τον κρατήρα. Δεν πρέπει να λημονείται ότι η ίδια η ύπαρξη του Στεφάνου οφείλεται σε μεγάλης κλίμακος θερμικά φαινόμενα, η ρίζα των οποίων βρίσκεται στην βαθύτερη δομή του ηφαιστείου, ακριβώς κάτω από τον κρατήρα. Αντιθέτως, η ύπαρξη της σχετικώς υψηλών αντιστάσεων ζώνης νοτίων πρηνών ΠΕΝΥΔ (Εικόνα 3) σημαίνει περιορισμένη κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών (περιορισμένη υδραυλική διαπερατότητα) και, ως εκ τούτου, ατελή εξαλλοίωση και αργιλοποίηση. Από την παρατήρηση αυτή διαφαίνεται ότι τα γεωθερμικά ρευστά εκφορτίζονται ευκολότερα, είτε προς στην ίδια την ΠΕΝΥΔ, είτε προς την ζώνη του Στεφάνου, και πάντα κατά διεύθυνση προσεγγίζουσα την Β-



Εικόνα 3: Σύνθεση εικονίζουσα την κατανομή της ειδικής αντιστάσεως στο βάθος των 700m υπό την επιφάνεια της θάλασσας και την κατανομή της μέσης μέγιστης χαρακτηριστικής καταστάσεως των MTT για συχνότητες 2-0.2Hz. Όλες οι τιμές ειδικής αντιστάσεως σε Ω.μ. Τα ίχνη των μεγάλων ρηγμάτων συμπεριλαμβάνονται προς διευκόλυνση του προσανατολισμού.

Figure 3: Composition illustrating the distribution of resistivity at 700m below sea level and the distribution of the average maximum characteristic states of the MT impedance tensors for the frequency interval 2-0.2Hz. All resistivity values in Ω.m. The traces of the major faults are superimposed to facilitate orientation.

60°-A . Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη συγκεκριμένων και αυστηρώς οριοθετημένων οδών κυκλοφορίας και εκφόρτισης των ρευστών, παραλλήλων προς την παράταξη της ΠΕΝΥΛ. Το υποτιθέμενο σύστημα EP θα ήταν ένας θαιμάσιος αγωγός για την περίπτωση.

Η δεύτερη ενότητα κατανομής ειδικών αντιστάσεων που διακρίνεται στην Εικόνα 3, αρχίζει αμέσως βορειότερον της τάφρου F4. Εδώ παρατηρούμε ότι η δομή παρουσιάζει μία σαφή στροφή προς Β, παρατασσόμενη κατά την φαινόμενη διεύθυνση Β-20°-30°-Α. Στο βορειότερο άκρο της ερευνηθείσας περιοχής, (άνω των θέσεων 907R και 909B), η δομή καθίσταται περίπου ομογενής και πολύ αγώγιμη.

Η ανωτέρω περιγραφήσα χωροθέτηση των ειδικών αντιστάσεων επιδρά, προφανώς, στην διεύθυνση των χαρακτηριστικών καταστάσεως των MTT. Από την Εικόνα 3 είναι προφανές

ότι στο νότιο και κεντρικό τμήμα του Λακκίου τουλάχιστον, (νοτιώς των θέσεων 907 και 909), οι ΜΧΚ διευθετούνται ούτως, ώστε οι μέγιστοι ηλεκτρικοί άξονες ευρισκόμενοι στην αγωγήμη πλευρά της ασυνεχούς γεωηλεκτρικής δομής να είναι περίπου *ορθογώνιοι* προς τους ηλεκτρικούς άξονες ευρισκόμενους στην μή αγωγήμη (αντιστατική) πλευρά της γεωηλεκτρικής ασυνέχειας. Συμφώνως προς την σχετική θεωρία διάδοσης ΗΜ κυμάτων σε διδιαστάτα ανομοιογενή μέσα, όταν δεν υπάρχουν ανώμαλες συγκεντρώσεις φορτίων ή διαυκτικά ρεύματα ξένα προς καθαρά τοπικά επαγωγικά φαινόμενα, ο ηλεκτρικός άξονας της μέγιστης καταστάσεως, (μείζων άξονας κατά την συμβατική ορολογία), είναι παράλληλος προς την τοπική διεύθυνση της μέγιστης ειδικής αντιστάσεως (π.χ. Swift, 1971). Συνεπώς, στην αγωγήμη πλευρά μιας 2-Δ ασυνέχειας, ο μέγιστος ηλεκτρικός άξονας θα είναι παράλληλος προς την ασυνέχεια (παράλληλος προς την παράταξη της γεωηλεκτρικής δομής). Αντιθέτως, στην αντιστατική πλευρά της 2-Δ ασυνέχειας, ο μέγιστος ηλεκτρικός άξονας θα είναι κάθετος προς την παράταξη της δομής. Η παρατηρούμενη στην Εικόνα 3 συμπεριφορά της μέγιστης καταστάσεως είναι ακριβώς η αναμενομένη από 2-Δ γεωηλεκτρικές κατανομές. Ούτω, με δεδομένο ότι η ροή των τελλουρικών ρευμάτων βαίνει παράλληλως προς την πλέον αγωγήμη οδό, τα ανωτέρω αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ό,τι, στον χώρο του νοτίου και κεντρικού Λακκίου αυτή λαμβάνει χώρα κατά διευθύνσεις ΔΝΔ-ΑΒΑ έως ΝΔ-ΒΑ. Στο νότιο- νοτιοδυτικό άκρο της ερευνηθείσης περιοχής και εντός της τάφρου F4, η διεύθυνση της τελλουρικής ροής προσεγγίζει την Β-60°-Α Αμέσως βορειότερον της τάφρου F4 η διεύθυνση ροής τους στρέφεται κατά την φαινομένη παράταξη Β-20°-Α, αποκρινόμενη στην αντίστοιχη στροφή της γεωηλεκτρικής δομής.

Η ερμηνεία της χωρικής συμπεριφοράς των ΜΤΤ στο βόρειο τμήμα του Λακκίου, (βορείως του ρήγματος F3 και των θέσεων 907 και 909), παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα. Χωρίς να υπεισεέλθουμε σε λεπτομέρειες, σημειώνουμε ότι εδώ, οι τανυστές πιθανόν να ελέγχονται από φαινόμενα λαμβάνοντα χώρα εκτός της περιοχής διασκοπήσεως (άν και η σχετική ορθογωνιότητα των ΜΧΚ ίσως να ερμηνεύεται, εν μέρει, με βάση την ασθενέστατη διαφορά της αγωγιμότητας μεταξύ του ανατολικού και δυτικού άκρου). Δυστυχώς, η τοπογραφία είναι στενόχωρη και δεν επιτρέπει αρκετές παρατηρήσεις για την σαφή ανάλυση των λεπτομερειών της γεωηλεκτρικής δομής κάτω από τα απροσπέλαστα μέρη της περιοχής (πρανή της καλδέρας και ορεινά). Ενεκα του σημαντικού αυτού περιορισμού, οδηγούμαστε σε αδυναμία σαφούς ερμηνείας των τοπικών χωρικών ιδιοτήτων των ΜΤΤ.

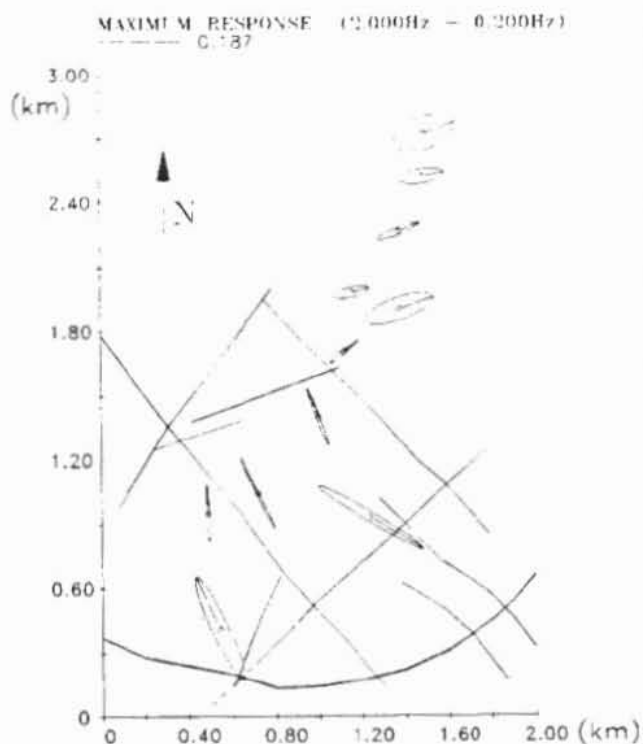
Τα μέχρι τώρα παρατεθέντα στοιχεία δείχνουν ότι υφίσταται σαφής διαφορά στην γεωηλεκτρική δομή, μεταξύ του νοτίου και βορείου Λακκίου. Στον νότο, η δομή και η ροή των τελλουρικών ρευμάτων παρατάσσεται κατά την διεύθυνση Β-60°-Α. Το άνω όριο της τάφρου F4 και η περιοχή του ρήγματος F3 φαίνεται ότι αποτελούν το σημείο καμπής, βορειότερον του οποίου η δομή στρέφει παράλληλως προς την διεύθυνση Β-20°-Α. Στην παρούσα εργασία, δεν θα επιχειρηθεί η εξήγηση των αιτιών προκαλούντων αυτή την στροφή. Άλλωστε, μία τέτοια απόπειρα απαιτεί την παρουσίαση και ανάλυση προσθέτων ΜΤ δεδομένων, η οποία εκφεύγει κατά πολύ των σκοπών της. Είναι γεγονός, πάντως, ότι η στροφή της γεωηλεκτρικής δομής συμπαρομαρτεί με μείζονες τεκτονικούς χαρακτήρες, και ακολουθεί σχεδόν πιστά αντίστοιχη στροφή της μορφολογίας του καλδερικού βυθίσματος. Φαίνεται λοιπόν ότι πιθανότατα οφείλεται σε τεκτονικά αίτια. Στο νότιο τμήμα του καλδερικού βυθίσματος, η δομή φαίνεται να ελέγχεται από τεκτονικές διεργασίες συμπαράτασσόμενες με τα υποτιθέμενα ενεργά ρήγματα (ΕΡ). Εάν αυτό το συμπέρασμα είναι αληθές, τότε πρέπει να θεωρηθεί δεδομένο ό,τι η επιροή (δράση) των ΕΡ αίρεται στο βόρειο τμήμα του Λακκίου. Στα κατωτέρω θα επιχειρηθεί λεπτομερέστερος έλεγχος αυτών των συμπερασμάτων.

5. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η πλέον κοινή μέθοδος αναπαράστασης των ΜΑΣΜ είναι το *επαγωγικά ανύσματα* (*induction vectors*), συνιστάμενα από μέγεθος και αζιμούθιο τα οποία ορίζουν την κάθετο επί την παράταξη τοπικής πλευρικής γεωηλεκτρικής βαθμίδος, η οποία παράγει κάποια ανώμαλη συγκέντρωση ρευμάτων. Δύο τέτοια ανύσματα ορίζονται από τις ΜΑΣΜ, για κατακόρυφο πεδίο αποκρινόμενο εν φάσει (*πραγματικό - real*) και εκτός φάσεως (*φανταστικό - imaginary*) με την οριζόντιο μαγνητική συνιστώσα, μετά της οποίας το κατακόρυφο πεδίο εμφανίζει μέγιστη συμφωνία. Η αναπαράσταση των ΜΑΣΜ δια επαγωγικών ανυσμάτων επιδέχεται απλή ερμηνεία μόνον κατά την περίπτωση διδιάστατης γεωηλεκτρικής δομής, οπότε τα πραγματικά και φανταστικά ανύσματα θα είναι *παράλληλα ή αντιπαράλληλα και κάθετα επί την παράταξή της* (π.χ. Rokityansky, 1982). Όταν όμως η ΜΑΣΜ εμφανίζει κάποια ενδιάμεση φάση, (π.χ. σε περίπτωση 3-Δ γεωηλεκτρικών δομών), ο χωρισμός της σε πραγματικό και φανταστικό μέρος δυνατόν να είναι τεχνητός και παραπλανητικός. Στην περίπτωση αυτή, η *ανάλυση μεγίστης αποκρίσεως* (*maximum response analysis*) σκοπό έχει να εξάγει από την παρατηρηθείσα ΜΑΣΜ, το μέρος εκείνο το οποίο είναι συμβατό με διδιάστατη γεωηλεκτρική δομή. Η αναπαράσταση αυτή επίσης απαιτεί τέσσερις παραμέτρους, ήτοι το μέγεθος, την φάση, το αζιμούθιο και την έγκλιση (ισοδυνάμους ελλειπτικότητα). Η φυσική ερμηνεία των παραμέτρων αυτών είναι παρόμοια με την ερμηνεία των αντιστοίχων παραμέτρων των ΜΤΤ. Οι τρεις πρώτες παράμετροι ορίζουν τό μέρος εκείνο της ολικής ΜΑΣΜ, το οποίο είναι συμβατό με διδιάστατη γεωηλεκτρική δομή.

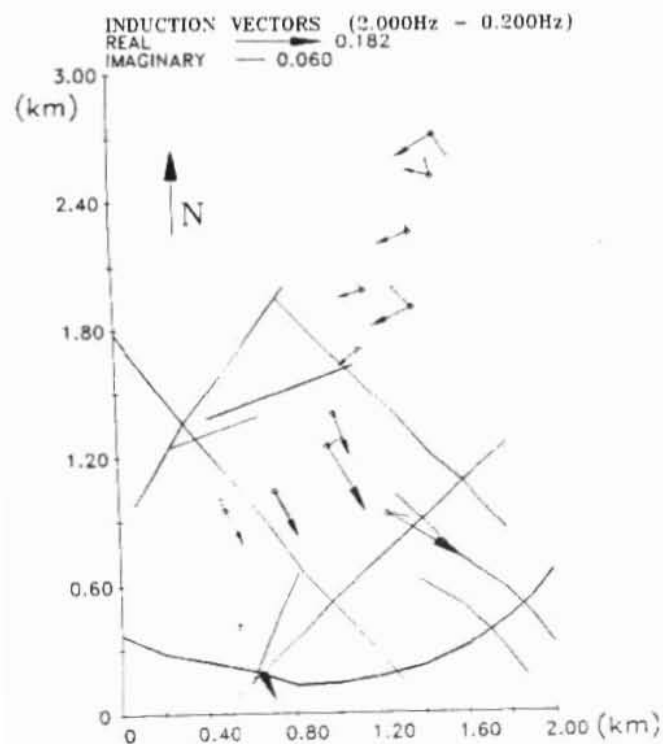
Η μέση μέγιστη απόκριση (ΜΑ) και τα μέσα πραγματικά και φανταστικά επαγωγικά ανύσματα για εύρος συχνοτήτων 2Hz-0.2Hz, παρουσιάζονται στις Εικόνες 4α και 4β αντιστοίχως. Η ΜΑ εμφανίζει, εν γένει, γραμμική πόλωση. Επίσης, από τις Εικόνες 4α,β διαπιστώνεται ότι το μέγεθός της είναι απολύτως συγκρίσιμο με το μέγεθος του πραγματικού επαγωγικού ανύσματος, ενώ το αζιμούθιό της σχεδόν ταυτίζεται με το αζιμούθιο του πραγματικού επαγωγικού ανύσματος. Το μέγεθος των επαγωγικών ανυσμάτων είναι, εν γένει μικρό. Επιπλέον, το φανταστικό άνυσμα δεν είναι μόνον απ' εαυτού ελάχιστο (<0.1), αλλά και περι την μία τάξη μεγέθους μικρότερο του πραγματικού. Από τα ανωτέρω, η όλη περιοχή εμφανίζεται να αποκρίνεται σχεδόν εν φάσει. Είναι, επομένως, δυνατόν να αποκλεισθεί η ύπαρξη τριδιάστατων γεωηλεκτρικών δομών μεγάλης κλίμακος. Η ίδια η μικρότης του φανταστικού ανύσματος αποτελεί θαυμάσια ένδειξη ότι, η απόκριση πλευρικών γεωηλεκτρικών ασυνεχειών είναι ασθενής και, ως εκ τούτου, οι πλευρικές αντιθέσεις αγωγιμότητας χαμηλές.

Εστιάζοντας την προσοχή μας στην Εικόνα 4α, παρατηρούμε ότι η διάταξη των παρατηρηθεισών μεγίστων αποκρίσεων υποδεικνύει την ύπαρξη δύο περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η πρώτη περιοχή εκτείνεται βορείως του ρήγματος F3. Η τελλουρική ροή εδώ φαίνεται να λαμβάνει χώρα κατά την διεύθυνση Β-20°-30°-Δ. Ανάλογη συνελώς, είναι και η φαινόμενη παράταξη της γεωηλεκτρικής δομής. Η δεύτερη περιοχή εκτείνεται νοτίως του ρήγματος F3. Εδώ, η τελλουρική ροή και η παράταξη της γεωηλεκτρικής δομής διευθετούνται κατά την μέση διεύθυνση Β-60°-70°-Α, σχεδόν καθέτως προς την παράταξη της πρώτης (βορείου) περιοχής. Είναι ενδιαφέρον το ότι οι διευθύνσεις Β-20°-30°-Δ και Β-60°-70°-Α είναι ορθογώνιες, απολύτως συσχετιζόμενες με την διεύθυνση του υποτιθέμενου ρήγματος ΕΡ και των δομών της ΠΕΝΥΔ. Επιπλέον, η πρώτη πλησιάζει την παράταξη της τάφρου F4. Η σύγχρονη γεωθερμική δραστηριότητα εμφανίζεται να αναπτύσσεται σε συνδυασμό με τις δύο αυτές διευθύνσεις. Σημαντικώτατη παρατήρηση είναι, η μεγάλη διαφορά των σχετικών μεγεθών των μεγίστων αποκρίσεων της βορείου και νοτίου-κεντρικής περιοχής. Φανεράνεται ότι οι αντιθέσεις αγωγιμότητας, προκαλούσες την ΗΜ απόκριση της βορείου περιοχής είναι πολύ μικρές σε σχέση με αυτές της νοτίου, σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου 4 (Εικόνα 3).



Εικόνα 4α: Κατανομή της μέσης μέγιστης αποκρίσεως των Μαγνητικών Συναρτήσεων Μεταφοράς για συχνότητες 2-0.2Hz. Τα ίχνη των μεγάλων ρηγμάτων συμπεριλαμβάνονται προς διευκόλυνση του προσανατολισμού.

Figure 4a: Distribution of the average maximum response of the Magnetic Transfer Function for the frequency interval 2-0.2Hz. The traces of the major faults are also included to facilitate orientation



Εικόνα 4β: Κατανομή των μέσων πραγματικών και φανταστικών επαγωγικών αντιστάσεων για συχνότητες 2-0.2Hz. Τα ίχνη των μεγάλων ρηγμάτων συμπεριλαμβάνονται προς διευκόλυνση του προσανατολισμού.

Figure 4b: Distribution of the average real and imaginary induction vectors for the frequency interval 2-0.2Hz. The traces of the major faults are also included to facilitate orientation

Διαφαίνεται ότι στο βαθύτερο τμήμα του γεωθερμικού συστήματος, οι ΜΑΣΜ ελέγχονται από το αίσθημα EP και ίσως το F4. Προς βορράν των ζωνών F3 και F4, τα πραγματικά επαγωγικά ανύσματα ευθυγραμμίζονται με την παράταξη των EP και ΠΕΝΥΔ και τείνουν προς συγκεντρώσεις ρευμάτων εγκάρσιες προς αυτούς τους σχηματισμούς (Εικόνα 4β). Εντός της τάφρου F4, με το να κατευθύνονται καθέτως και μακριά από την ΠΕΝΥΔ, τα πραγματικά επαγωγικά ανύσματα υποδηλώνουν ροή ρευμάτων παράλληλη προς αυτήν, κατά την διεύθυνση Β-60°-70°-Α (Εικόνα 4β). Οι υπόλοιποι μείζονες τεκτονικοί χαρακτήρες της περιοχής με παράταξη ΒΑ-ΝΔ, είναι οι ρηξιγενείς ζώνες F1, F2 και ΟΡΚ (διεύθυνσης Β-45°-50°-Α). Εξ αυτών, μόνον η ζώνη ΟΡΚ ευρίσκεται στα κατάντι των επαγωγικών ανυσμάτων. Υπάρχει μια διαφορά 15°-20° μεταξύ της παρατάξεως του ΟΡΚ και της παρατάξεως της γεωηλεκτρικής δομής. Μολονότι η αζιμουθιακή αβεβαιότητα (σφάλμα) επαρκεί να καλύψει την διαφορά, η συστηματική και μονοσήμαντη συμπεριφορά των ΜΑΣΜ είναι έκδηλη και δεν μπορεί παρά να οφείλεται σε φυσικά αίτια. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι είναι πιθανότατο, στο νότιο μέρος του Λακκίου, η ροή ρευμάτων κατά την διεύθυνση Β-60°-70°-Α να οφείλεται σε αγωγίμες διόδους, ευθυγραμμισμένες με την παράταξη ρηγμάτων ανηκόντων στο σύστημα EP. Οφείλει να τονισθεί, πάλι, η διαφορά των σχετικών μεγεθών των πραγματικών επαγωγικών ανυσμάτων της βορείου και νοτίου-κεντρικής περιοχής.

Η ΠΕΝΥΔ είναι περιοχή εντονωτάτης υδροθερμικής δραστηριότητας και προφανώς πολύ αγωγήμη. Διαθέτει όλα τα χαρακτηριστικά μιας 'θερμής κηλίδας' στην επιφάνεια της Νισύρου. Το γεγονός ότι επαγωγικά ανύσματα παρατηρούμενα μόλις στο νότιο όριο της κατευθύνονται μακριά της, οφείλεται στην υψηλής αντιστάσεως ζώνη νοτίων πρανών της ΠΕΝΥΔ (Εικόνα 3). Η ζώνη αυτή επεκτείνεται προς ΒΑ, κάτω από τις θέσεις 909B, 906R και 907B, δημιουργώντας έτσι έναν 'φραγμό' στην ροή των ρευμάτων και χωρίζοντας το Λακκί σε δύο περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Μιά τέτοια κατανομή της γεωηλεκτρικής αγωγιμότητας ίσως βοηθά στην εξήγηση της συμπεριφοράς των ΜΑΣΜ της βορείου περιοχής. Εκεί, τα επαγωγικά ανύσματα υποδηλώνουν ροή ρεύματος εγκάρσια προς την παράταξη του συστήματος EP (και σχεδόν ορθογώνιο προς την ροή ρεύματος στην νότιο περιοχή). Αυτό σημαίνει ότι υφίστανται δύο τελείως διαφορετικοί δίαυλοι τελλουρικής ροής, προς ΒΔ και ΝΑ της ΠΕΝΥΔ αντιστοίχως. Υποθέτουμε ότι η ΠΕΝΥΔ λειτουργεί ως (υπο-κατακόρυφος) τροφοδότης, μέσω του οποίου αναβλίζουν γεωθερμικά ρευστά, εκείθεν πλευρικός διαχεόμενα. Ο αντιστατικός φραγμός όμως, δεν διευκολύνει αγωγήμη ζεύξη μεταξύ του ΒΔ και ΝΑ άκρου της ΠΕΝΥΔ και, συνεπώς, η ροή των ρευμάτων λαμβάνει χώρα κατά δύο τρόπους. Προς νότον κατά την παράταξη του συστήματος EP και προς βορράν εγκάρσιως και καθέτως προς το EP, πιθανόν σε συνδυασμό με τις προετοιμασμένες αγωγίμες δομές της τάφρου F4.

6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την ανωτέρω παρουσιασθείσα ανάλυση, παραθέσαμε σειρά γεωλογικών και γεωφυσικών (ΜΤ-γεωηλεκτρικών) μαρτυριών περί της υπάρξεως συστήματος ενεργών ρηγμάτων (EP), διεύθυνσεως Β-60°-70°-Α, στην περιοχή Λακκί (επίπεδο τμήμα της καλδέρας της Νισύρου). Τα γεωλογικά δεδομένα περιλαμβάνουν την χωροθέτηση και ευθυγράμμιση υδροθερμικών εκδηλώσεων (ατμιακή δράση και κρατήρες φρεατικών εκρήξεων), μαρτυρούντων παρόμοια χωροθέτηση των αγωγών τροφοδοσίας του γεωθερμικού συστήματος. Τα γεωηλεκτρικά δεδομένα περιλαμβάνουν την χωροθέτηση και ευθυγράμμιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των πετρωμάτων και των διαύλων κυκλοφορίας των ηλεκτρικών ρευμάτων. Ευρέθη ότι τόσο η κατανομή αγωγιμότητας, όσο και η τελλουρική ροή συσχετίζονται αμέσως με την διεύθυνση Β-60°-70°-Α.

Στην περιοχή του νοτίου-κεντρικού Λακκίου, αμφότερες η κατανομή αγωγιμότητας (Εικόνα

3) και η τελλουρική ροή (Εικόνες 3 και 4) παρατάσσονται παραλλήλως προς την διεύθυνση Β-60°-70°-Α. Είναι απλός και εύκολος ο καθορισμός σχέσεως αιτίου-αιτιατού μεταξύ ενεργών ρηγμάτων και της γεωηλεκτρικής γεωμετρίας και τελλουρικής ροής κατά την ως άνω διεύθυνση. Ορισμένα στοιχεία έχουν ήδη δοθεί στο οικείο κεφάλαιο περί γεωηλεκτρικής δομής. Σε ένα τεκτονικά ελεγχόμενο γεωθερμικό σύστημα, οι αγωγοί κυκλοφορίας γεωθερμικών ρευστών σχεδόν πάντοτε ταυτίζονται με τις ενεργούς διαρρήξεις ενώ, ταυτοχρόνως, αποτελούν και τους βέλτιστους ηλεκτρικούς αγωγούς. Η ηλεκτρική αγωγιμότης των γεωλογικών σχηματισμών οφείλεται στην ύπαρξη ρευστού εντός του ενεργού πορώδους και εξαρτάται από την αλατότητα του ρευστού, την θερμοκρασία και την ύπαρξη ή όχι αργίλων (π.χ. Keller and Rapolla, 1974). Οφείλει να τονισθεί το ότι οι άργιλοι, (και μάλιστα οι ενεργές όπως οι μοντοριλλονίτες), δύνανται να αυξήσουν κατά τάξεις μεγέθους την αλατότητα, (συνεπώς την αγωγιμότητα), λόγω φαινομένων υδρολύσεως κατά την επαφή των με τα πορικά ρευστά. Το περιεχόμενο ρευστό κλάσμα ενός σχηματισμού είναι αυξημένο στην γειτονία των αγωγών κυκλοφορίας γεωθερμικών ρευστών, όπως και το ποσοστό των ορυκτών των αργίλων λόγω εντονωτέρων φαινομένων εξαλλοιώσεως (αργιλοποίησης). Κατόπιν τούτων είναι προφανές ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μάλλον ευκολύνεται να ρεύσει παραλλήλως προς τους αγωγούς κυκλοφορίας (ενεργά ρήγματα) παρά εγκάρσιως, οπότε η δυνατότητα ταύτισεως των δύο σχηματισμών καθίσταται προφανής. Ένα ερώτημα που παραμένει είναι το γιατί τα ΕΡ δεν έχουν καταφανείς εκδηλώσεις στην αγωγή ζώνη του Στεφάνου. Είναι πιθανόν, οι έντονες υδροθερμικές εξαλλοιώσεις να καθιστούν δύσκολο τον εντοπισμό επιφανειακών εκδηλώσεων του ΕΡ εκτός ΠΕΝΥΔ, όπου η εντονωτάτη και συχνά βίαιη δραστηριότης προσφέρει αφθονία εμμέσων και αμέσων ενδείξεων περί της υπάρξεώς του.

Τα ανωτέρω φαίνεται να ισχύουν αντιστρόφως στην βόρειο περιοχή του Λακκίου. Στην διακοπηθείσα (προσπελάσιμη) περιοχή, η κατανομή αγωγιμότητος είναι σχεδόν ομογενής, εμφανίζουσα ελάχιστες αντιθέσεις κατά την διεύθυνση Β-Ν. Το πλέον ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι το ότι η τελλουρική ροή εμφανίζεται ορθογώνιος επί την παράταξη της ΠΕΝΥΔ και του ΕΡ, γεγονός το οποίο ορισμένα ερωτηματικά. Ασφαλώς, τίθεται μόνον θέμα ερμηνείας, και όχι υπάρξεως και λειτουργίας αυτού του φαινομένου και της προφανούς συσχετίσεώς του με τις δομές του ΕΡ και της ΠΕΝΥΔ. Κάποια ικανοποιητική απάντηση είναι μάλλον δύσκολο να δοθεί. Βασικό πρόβλημα είναι η ανεπαρκής πλευρική κάλυψη του χώρου με ΜΤ παρατηρήσεις και η αδυναμία διευκρινίσεως των δομών εκατέρωθεν του Λακκίου, λόγω των γνωστών τοπογραφικών περιορισμών. Δεν θα ήταν απίθανο όμως, οι αλληλεπιδράσεις των ΕΡ και της τάφρου F4, να δημιουργούν ηλεκτρικούς αγωγούς εγκάρσιως προς το ΕΡ. Υποτίθεται ότι στην 'ανενεργό' περιοχή δυτικής του Λακκίου και της ΠΕΝΥΔ, υπάρχει 'απολιθομένη' γεωηλεκτρική δομή η οποία ομογενοποιήθηκε και κατέστη αγωγή λόγω παλαιότερων διεργασιών, (εξαλλοίωση και αργιλοποίηση), κατά το μετακαλδερικό και σύγχρονο στάδιο, πιθανώς δε και λόγω της δράσεως των F3 και F4. Ο αντιστατικός φραγμός (Εικόνα 3) δεν επιτρέπει την διοχέτευση της τελλουρικής ροής προς ΒΑ, κατά την παράταξη των ΕΡ, με αποτέλεσμα οι σημερινοί ΜΤΤ και ΜΑΣΜ να καταγράφουν την έντονο αγωγιμότητα της (θερμής κηλίδος) ΠΕΝΥΔ και διάχυση τελλουρικής ροής προς ΒΔ. Η ερμηνεία αυτή προϋποθέτει ότι η 'απολιθομένη' γεωηλεκτρική δομή είναι πιά αγωγή από τον αντιστατικό φραγμό της Εικόνας 3, πράγμα το οποίο δεν δύναται μεν να πιστοποιηθεί, αλλά επικουρείται από τις παρατηρήσεις στο υδροθερμικό ανενεργό βόρειο τμήμα του Λακκίου (Εικόνα 3).

Τα ανωτέρω δημιουργούν το εξής ερώτημα: Γιατί εντοπίζεται η ενεργός δράση του ΕΡ στο νότιο τμήμα του Λακκίου; Και κατ' επέκταση, εντοπίζεται το ρήγμα μόνον στην περιοχή ή είναι περιφερειακό; Ο μηχανισμός γενέσεως των ΕΡ - και αυτή η ύπαρξη της ΠΕΝΥΔ και ο εντοπισμός της στην συγκεκριμένη περιοχή - είναι περίπλοκο πρόβλημα, απτόμενο τόσο της τεκτονικής όσο και της ηφαιστειολογικής ιστορίας της νήσου και θα μας απασχολήσει αλλοιού. Από γεωλογικής-τεκτονικής απόψεως όμως, πιστεύουμε ότι ο εντοπισμός της εντόνου υδροθερμικής δραστηριότητος στο νότιο μέρος του Λακκίου είναι προφανής. Εκεί συντρέχουν οι μείζονες τεκτονικοί χαρακτήρες του χώρου, ενώ οι μεγάλοι κρατήρες φρεατικών εκρήξεων

εμμέσως υποδηλούν την ύπαρξη σχετικώς αβαθούς μαγματικού θαλάμου και/ή άλλης θερμικής εστίας ακριβώς κάτω από αυτήν την περιοχή. Τα στοιχεία των υπαρχουσών γεωτρήσεων (Ungemach, 1982, Geotermica Italiana, 1983) σε συνδυασμό με δικές μας MT αναλύσεις της βαθειάς δομής (>1000m) παρέχουν στοιχεία συνηγορούντα τα ανωτέρω συμπεράσματα. Είναι λοιπόν αναμενόμενο το να υπάρχουν εμφανέστερες και εντονότερες ενδείξεις περί της υπάρξεως του EP στην περιοχή του νοτίου Λακκίου περισσότερες λεπτομέρειες θα δοθούν σε άλλη συναφή εργασία.

Προφανώς, τα παρόντα MT δεδομένα δεν δύνανται να απαντήσουν στο ερώτημα της τοπικότητας ή όχι του ρήγματος EP. Η ανάλυση του περιφερειακού εντατικού πεδίου και ενεργού τεκτονικού ιστού απαιτεί εκτεταμένες γεωλογικές και γεωφυσικές μελέτες. Εάν όντως υπάρχει σχέση του EP με το περιφερειακό εντατικό πεδίο, αυτό θα πρέπει να είναι εφελκυστικό και να διευθετείται από Β-Ν ως ΒΔ-ΝΑ, ούτως ώστε να επιτρέψει την δημιουργία κανονικών διαρρήξεων κατά την διεύθυνση Β-60°-70°-Α του EP, (κάθετος επί τον άξονα της ελαχίστης πρωτεύουσας τάσεως σπιν). Η ύπαρξη ή όχι ενός τέτοιου περιφερειακού πεδίου παραμένει προς διευκρίνιση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε τους συναδέλφους Δρ Μ. Βλάχου, Δρ Γ. Βουγιουκαλάκη και Δρ Ν. Σημιαϊάκη για τις διαφωτιστικές συζητήσεις και πληροφορίες που μας παρεχώρησαν. Τους Δρ Γ. Βουγιουκαλάκη και Δρ Ν. Σημιαϊάκη ιδιαίτερος για παροχή στοιχείων από εργασίες υπό δημοσίευση. Οι MT εργασίες χρηματοδοτήθηκαν από την ΔΕΜΕ/ΔΕΗ, η οποία ευγενώς επιτρέπει την δημοσίευση των αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BEAMISH, D., (1985). Deep crustal geoelectric structure underneath the Northumberland Basin. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 84, 619-640.
- ΒΟΥΓΙΟΥΚΑΛΑΚΗΣ, Γ., (1989). Γεωλογικό φύλλο χάρτη νήσου Νισύρου 1:25.000, ΙΓΜΕ, (υπό έκδοση).
- DAVIS, E., (1967). Zur Geologie und Petrologie der Inseln Nisyros und Jali (Dodekanes). *Πρακτικά Ακαδ. Αθηνών*, 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 (authors). Tech. Report, EEC Contract No. EG-A2-031-UK.
- DAWES, G.J.K. and LAGIOS, E., (1991). A magnetotelluric survey of the Nisyros geothermal field. *Geothermics*, 20, 225-235.
- Di PAOLA, G.M., (1974). Volcanology and petrology of Nisyros island (Dodecanese, Greece). *Bull. Volc.*, 38, 944-987.
- EGGERS, D., (1982). An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor. *Geophysics*, 47, 1204-1214.
- GEOTERMICA ITALIANA, Srl, (1983). Nisyros-1 geothermal well. Final report, submitted to PPC/DEME.
- KAO, D. and ORR, D., (1982). Magnetotelluric studies in the Market Weighton area of eastern England. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 70, 323-337.
- KELLER, G.V. and RAPOLLA, A., (1974). Electrical methods in volcanic and geothermal

- environments, in Civetta, L., Gasparini, P., Luongo, G. and Rapolla, A. (editors), 'Physical Volcanology', Elsevier series Developments in solid earth geophysics 6.
- KELLER, J., REHREN, Th. and STADLBAUER, E., (1990). Explosive volcanism in the Hellenic Arc: a summary and review. In 'Thera and the Aegean World III', vol. 2, 13-26.
- ΛΑΓΙΟΣ, Ε. (1991). Μαγνητοτελλουρική έρευνα δομής του γεωθερμικού πεδίου της Νισύρου. Πρακτικά, 5ο Συνέδριο Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., στο Δελτίο Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., XXV/3, 393-407.
- LaTORRACA, G.A., MADDEN, T.R. and KORRINGA, J., (1986). An analysis of the magnetotelluric impedance tensor for three-dimensional conductivity structures. Geophysics, 51, 1819-1829.
- MERZ-DAL Geothermal Consultants, (1989). Geostructural Map of Nisyros. Report submitted to Public Power Corporation/DEME, July 1989.
- ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Δ., και ΛΕΚΚΑΣ, Ε., (1989). Τεκτονική ανάλυση του γεωθερμικού πεδίου της Νισύρου. Έκθεση προς την ΔΕΜΕ/ΔΕΗ, Αθήνα, Ιούλιος 1989.
- ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Δ., ΛΕΚΚΑΣ, Ε. και ΣΑΚΕΛΑΡΙΟΥ, Δ., (1991). Γεωλογική δομή και εξέλιξη της νήσου Νισύρου. Πρακτικά, 5ο Συνέδριο Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., στο Δελτίο Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., XXV/1, 405-419.
- PARKER, R.L., (1980). The inverse problem of electromagnetic induction: Existence and construction of solutions based on incomplete data. J. Geophys. Res. 85, 4421-4428.
- ARKER, R.L. and WHALER, K.A., (1981). Numerical methods for establishing solutions to the inverse problem of electromagnetic induction. J. Geophys. Res. 86, 9574-9584.
- ROKITYANSKY I.I., (1982). Geoelectromagnetic investigations of the Earth's Crust and Mantle. Springer Verlag.
- SIMS, W.S., BOSTICK, F.X., Jr. and SMITH, H.W., (1971). The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data. Geophysics 36, 938-942.
- SWIFT, C.M., (1971). Theoretical magnetotelluric and Turam response from two-dimensional inhomogeneities. Geophysics 36, 32-52.
- TZANIS, A., (1988). Investigations on the properties and estimation of Earth-response operators from EM sounding data. PhD Thesis, University of Edinburgh.
- TZANIS, A. and BEAMISH, D., (1989). A high resolution spectral study of audiomagnetotelluric data and noise interactions. Geophys. J., 97, 557-572.
- TZANIS, A. and LAGIOS, E. (1992). Magnetotelluric Exploration of Geothermal Potential in Greece. Proceedings, General Conf. Balkan Phys. Union, Sept. 26-28, Thessaloniki, Greece (in press).
- UNGEMACH, P., 1982. Nisyros Geothermal Wildcut 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-I.
- VOZOFF, K., (ed.), (1985). Magnetotelluric Methods. S.E.G. Geophysics reprint series No 5, 763 pp.