



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΕΠΑΝΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ”**

MARIA ΚΟΡΩΝΗ

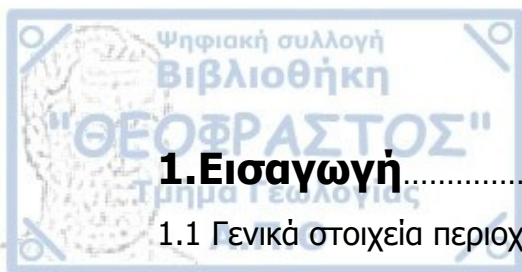
AEM 4311

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ :

ΤΣΟΥΡΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ , Αναπληρωτής καθηγητής, ΑΠΘ

ΤΣΟΚΑΣ ΓΡΗΓΟΡΗΣ , Καθηγητής ΑΠΘ

ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ , Επίκουρος καθηγητής ΑΠΘ



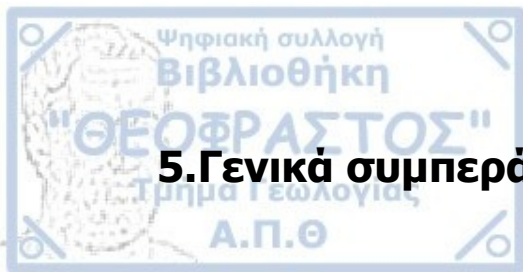
1.Εισαγωγή	4
1.1 Γενικά στοιχεία περιοχής μελέτης.....	6

2.Γεωλογικά στοιχεία της Μήλου.....6

2.1 Γεωλογική θέση της περιοχής που μελετάται.....	7
2.2 Γεωλογικοί σχηματισμοί της Μήλου.....	11
2.2.1. Κρυσταλλικό υπόβαθρο.....	11
2.2.2. Νεογενή ιζήματα.....	12
2.2.3 Ηφαιστειακή δραστηριότητα.....	12
2.2.4. Αλλουβιακές αποθέσεις.....	13
2.2.5. Φρεατικές εκρήξεις.....	13
2.3 Τεκτονική.....	17
2.4 Το γεωτεκτονικό καθεστώς του ελληνικού τόξου.....	20

3.Γεωθερμία23

3.1 Γενικά στοιχεία.....	23
3.2 Γεωθερμικό πεδίο της Μήλου.....	28
4.Γεωηλεκτρική διασκόπηση της Μήλου.....	38
4.1 Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	38
4.2 Ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων.....	46
4.3 Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή της Μήλου.....	47
4.3.1 Επεξεργασία δεδομένων.....	50
4.3.2 Ερμηνεία γεωηλεκτρικών δεδομένων και Συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη.....	55



5.Γενικά συμπεράσματα και Σύνοψη.....66

Βιβλιογραφία.....70

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας του τμήματος Γεωλογίας. Το αντικείμενο είναι η συμβολή στη μελέτη του γεωθερμικού πεδίου της Μήλου με ερμηνεία γεωηλεκτρικών μετρήσεων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από παλαιότερες γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις τα οποία επεξεργάστηκαν με συγκεκριμένο λογισμικό και στη συνέχεια έγινε επανερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το 1982 από το ΙΓΜΕ το 1982 και 1984 (κ. Θανασούλας) με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό του γεωθερμικού πεδίου της Μήλου. Μελετήθηκαν 32 βυθοσκοπήσεις που έγιναν στην περιοχή του νησιού οι οποίες και ομαδοποιήθηκαν σε 6 τομές. Έπειτα ερμηνεύθηκαν οι τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων των σχηματισμών και δόθηκαν σχηματικές τομές του υποβάθρου και των υπερκείμενων σχηματισμών.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας ήταν η εξής: αρχικά οι μετρήσεις των αντιστάσεων για κάθε βυθοσκόπηση καθώς και οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα IPI2win με σκοπό την εξαγωγή των πειραματικών καμπυλών. Επίσης έγινε έλεγχος της ποιότητας των μετρήσεων και εξομάλυνση των τιμών που θεωρήθηκαν εξωπραγματικές. Στη συνέχεια οι διάφορες βυθοσκοπήσεις ομαδοποιήθηκαν στις καθορισμένες τομές και προέκυψαν γεωηλεκτρικές τομές.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των τομών μεταφέρθηκαν στο πρόγραμμα SURFER έτσι ώστε να δημιουργηθούν χρωματιστές τομές βάσει των ισοηλεκτρικών καμπυλών οι οποίες και παρουσιάζουν της κατανομή των ειδικών αντιστάσεων σε συνάρτηση με το βάθος. Στις τομές συμπεριλήφθηκε και το τοπογραφικό ανάγλυφο και η χρωματική κλίμακα ανταποκρίνεται στους λογαρίθμους των αντιστάσεων για μεγαλύτερη σαφήνεια στην παρουσίαση.

Τελικά επισημάνθηκαν οι περιοχές με πολύ ενδιαφέρουσες μεταβολές της αντίστασης με σκοπό την μετέπειτα ερμηνεία τους βάσει της γεωλογίας και της τεκτονικής της περιοχής.

Αυτό αποτελούσε και τον τελικό στόχο της εργασίας. Τα συμπεράσματα προέκυψαν μετά από την μελέτη όλων των γεωλογικών και γεωθερμικών στοιχείων για την περιοχή και τον συνδυασμό αυτών με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας.

Η δομή της εργασίας είναι η εξής : στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικά γεωλογικά στοιχεία για τη Μήλο (γεωτεκτονική ζώνη όπου ανήκει,

λιθοστρωματογραφία και τεκτονική). Αναφέρονται επίσης στοιχεία για την εξέλιξη του ελληνικού τόξου έχοντας ως στόχο να εξηγηθούν οι συνθήκες δημιουργίας της ηφαιστειότητας.

Στο τρίτο (3^ο) κεφάλαιο, το οποίο αφορά στη Γεωθερμία σαν γενικό όρο, αναφέρονται επιγραμματικά κάποια από τα γεωθερμικά συστήματα και πεδία, οι επιφανειακές εκδηλώσεις της γεωθερμίας και φυσικά γενικά στοιχεία για την γεωθερμία της Μήλου. Παρατίθενται φωτογραφίες, χάρτες και σχήματα για να γίνονται πιο σαφή τα όσα γράφονται στο κείμενο.

Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο αναλύεται συνοπτικά η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η εφαρμογή της, ο τρόπος με τον οποίον γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων και ο τρόπος που γίνεται η ερμηνεία. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφονται τα βήματα επεξεργασίας των βυθοσκοπήσεων ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα σε τομές. Επίσης παρουσιάζεται η ερμηνεία για κάθε τομή ξεχωριστά που έγινε βάσει των γεωτεκτονικών, λιθολογικών και άλλων δεδομένων της περιοχής.

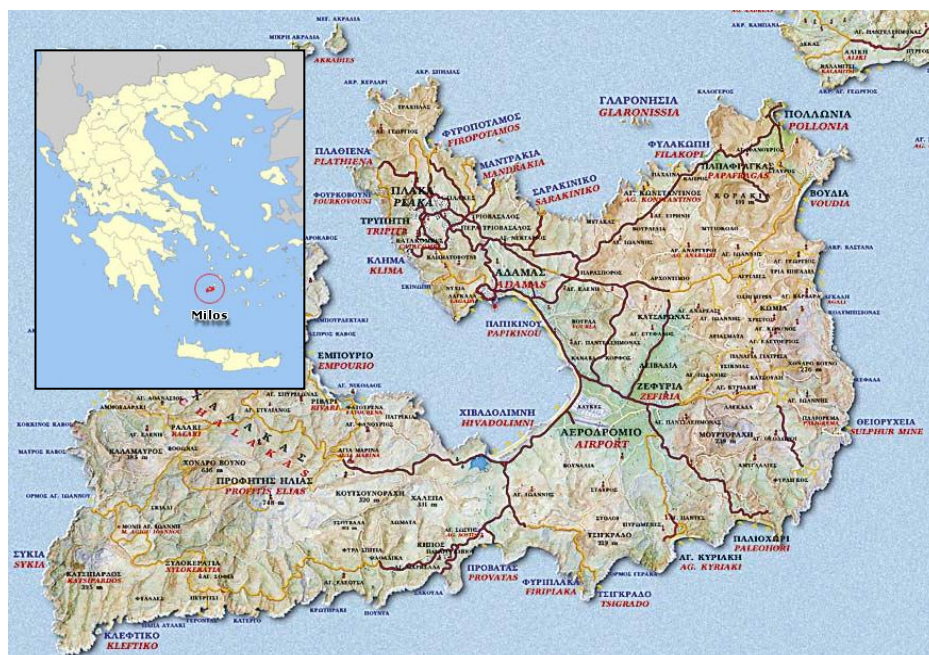
Στο τελευταίο (5ο) Κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων της εργασίας.

Σε αυτό το σημείο θέλω να ευχαριστήσω τους επιβλέοντες κύριο Παναγιώτη Τσούρλο, τον κύριο Τσόκα Γρηγόρη και τον κύριο Βαργεμέζη Γιώργο για την συνεργασία και βοήθεια καθ'όλη την διάρκεια της εκτέλεσης της εργασίας.

1.1 Γενικά στοιχεία της περιοχής μελέτης

Η νήσος Μήλος βρίσκεται στο σύμπλεγμα των Κυκλάδων με γεωγραφικό πλάτος 36° 41' Βόρειο και γεωγραφικό μήκος 24° 25' Ανατολικό. Η επιφάνειά του ανέρχεται σε 151 km² με μήκος ακτών 126 km και έδαφος μάλλον ορεινό με χαμηλό ύψος βουνών και υψηλότερη κορυφή του Προφήτη Ηλία στα 751m. Είναι ένα ηφαιστειακό νησί, ξηρό και ανεμώδες με ετήσια βροχόπτωση κάτω των 400 mm. Οι οικισμοί του νησιού αποτελούν σήμερα τον Δήμο της Μήλου με κύριο λιμάνι στον Αδάμαντα. Οι περισσότεροι οικισμοί είναι συγκεντρωμένοι στο Β-ΒΑ μέρος του νησιού (Σχ. 1.1)

Η Μήλος ανήκει στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου και παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον λόγω του ενεργειακού πεδίου της το οποίο προέρχεται από την γεωθερμία αλλά επίσης και λόγω των κοιτασμάτων μπετονίτη και καολίνη της περιοχής.

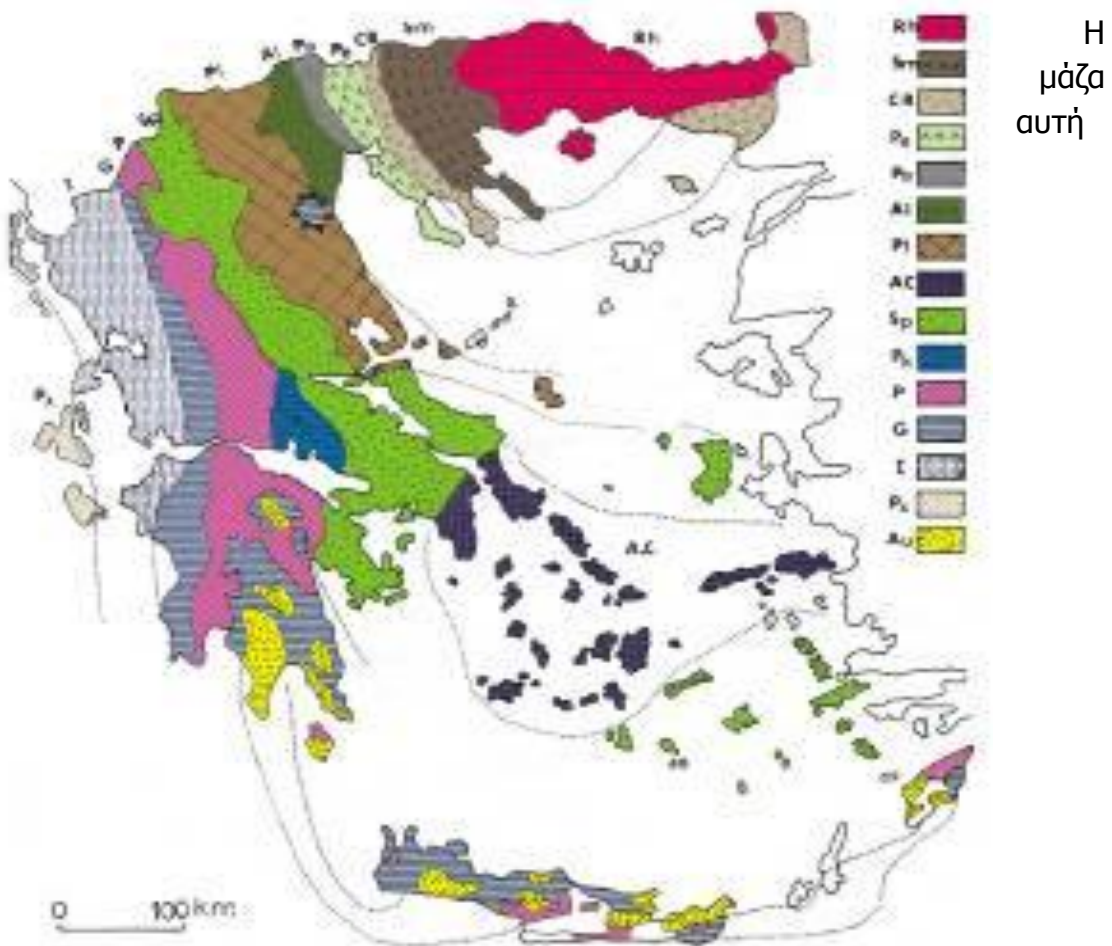


ΣΧΗΜΑ 1.1 Χάρτης Μήλου (επάνω) και Ορυχεία στην Μήλο (κάτω)

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΗΛΟΥ

2.1 Γεωλογική θέση της περιοχής που μελετάται

Η Μήλος αποτελεί μέρος της Αττικοκυκλαδικής γεωτεκτονικής ζώνης των εσωτερικών ελληνίδων. Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει τα νησιά των Κυκλάδων καθώς και τμήμα της Αττικής και της Νότιας Εύβοιας. Ορισμένες απόψεις στηρίζουν ότι η Αττικοκυκλαδική αποτελεί συνέχεια της Πελαγονικής προς το Νότο. Στην πραγματικότητα όμως αποτελείται από ετερογενούς σύστασης σχηματισμούς με τεκτονικές μεταξύ τους σχέσεις.



ΣΧΗΜΑ 2.1 Γεωτεκτονικές ζώνες Ελλάδας ,(Μουντράκης et al.,1983)

Η ζώνη αυτή χωρίζεται σε τρεις ενότητες : Ενότητα Αττικής, Ενότητα Β. Κυκλάδων και Ενότητα Ν. Κυκλάδων. Το νησί της Μήλου ανήκει στην Ενότητα των Νότιων Κυκλάδων στην οποία διαπιστώνονται οι εξής σχηματισμοί:

i. Το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο με γνεύσιους, αμφιβολίτες και σχιστόλιθους Παλαιοζωικής ηλικίας οι οποίοι παρουσιάζουν σαφείς ομοιότητες με αυτούς της Πελαγονικής μάζας.

ii.Ορίζοντας σχιστολίθων με πιθανή Περμοτριάδική ηλικία

iii.Ανθρακικά μεταμορφωμένα πετρώματα, κυρίως μάρμαρα και δολομίτες, ηλικίας Α.Τριαδικό μέχρι Α.Κρητιδικό

iv.Ένα σχηματισμό μεταφλύσχη ηλικίας Τριτογενούς

Η διαδοχή αυτή των σχηματισμών της Ενότητας των Ν.Κυκλάδων παρουσιάζει ομοιότητα με την Πελαγονική ζώνη γι'αυτό και θεωρήθηκε προέκτασή της. Παρόλα αυτά στο σύνολό της η Αττικοκυκλαδική μάζα δεν μπορεί να θεωρηθεί προέκταση της Πελαγονικής στο σύνολο των ενοτήτων της. Ένας γενικά αποδεκτός χαρακτήρας αυτής της ζώνης είναι ότι συγκροτείται από αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων.

Στα πετρώματα της Αττικοκυκλαδικής διεισδύουν μεγάλοι όγκοι νεώτερων μαγματικών πετρωμάτων τα οποία είναι πλουτωνικά πετρώματα γρανιτικής σύστασης και ηλικίας Μειοκαίνου.

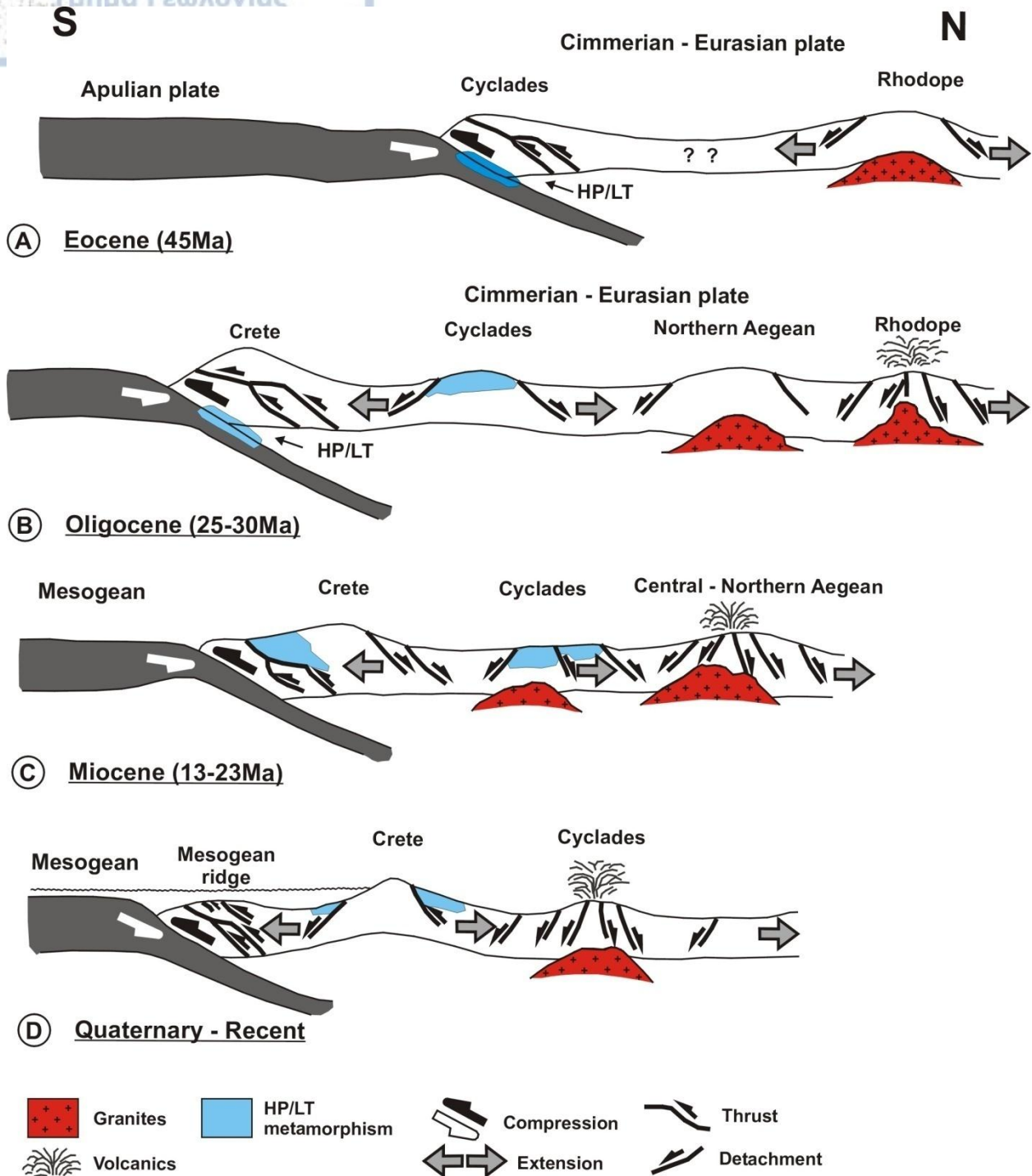
Σημαντικές είναι για την γεωτεκτονική εξέλιξη της περιοχής οι τρεις φάσεις μεταμόρφωσης στην μάζα. Αυτή δε που αφορά συγκεκριμένα στο νησί της Μήλου είναι η πρώτη φάση η οποία έχει χαρακτήρες πρασινοσχιστολιθικής ως αμφιβολιτικής φάσης. Η φάση αυτή διαπιστώνεται στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα του υποβάθρου της ενότητας των Ν.Κυκλάδων και είναι Παλαιοζωικής ηλικίας.

Η 2^η φάση είναι ΗΡ/ΛΤ γλαυκοφανιτική ηλικίας Ηωκαίνου και η 3^η είναι πρασινοσχιστολιθική, η οποία έλαβε χώρα στο Ολιγόκαινο-Μειόκαινο και ήταν ανάδρομη της γλαυκοφανιτικής. Συνέβη

ταυτόχρονα με την μαγματική άνοδο που έδωσε τους πλουτωνικούς όγκους. Οι δύο τελευταίες φάσεις αναγνωρίζονται τόσο στα πετρώματα της ενότητας των Ν.Κυκλάδων όσο και σε αυτά της ενότητας των Β. Κυκλάδων.

Γενικά θα μπορούσε εδώ να αναφερθεί η μετανάστευση του τεκτονισμού στο ελληνικό ορογενές ως αιτία της δημιουργίας εφελκυστικών τάσεων στο χώρο που μας αφορά, δηλαδή στην περιοχή του Ν. Αιγαίου και συνεπώς στη Μήλο. Από το Κρητιδικό, οπότε και άρχισε η Αλπική ορογενετική δράση, παρατηρείται μια συνεχής μετανάστευση της ορογένεσης προς τα εξωτερικά τμήματα (Δυτικά, Νοτιοδυτικά) του Ελληνικού Ορογενούς. Η σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών συνεχώς μετατοπίζεται προς τα έξω. Επομένως μετατοπίζεται προς τα έξω η συμπίεστική τεκτονική ενώ εσωτερικά ασκείται εφελκυστική τεκτονική που οδηγεί σε εκταφή τμήματος της Κάτω πλάκας. Δηλαδή η μετανάστευση προς τα έξω της εκταφής ακολούθησε τη μετανάστευση της συμπίεσης που εκφράζεται με τις δύο ζώνες HP/LT. Κάθε φορά η συμπίεση ακολουθείται από τον εφελκυσμό. Τα βαθύτερα τμήματα φλοιού εκθάβονταν και παραμορφώνονταν εφελκυστικά, ενώ ταυτόχρονα μπροστά στο μέτωπο της σύγκλισης των πλακών άλλα τμήματα του φλοιού συμπιέζονταν και συσσωρεύονταν ως τεκτονικά λέπια, παχύνοντας το φλοιό στο πρίσμα επαύξησης για να ακολουθήσει η κατάρρευση και αυτών αργότερα. (Μουντράκης Δ.)

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται σχηματικά η μετανάστευση του τεκτονισμού στον Ελληνικό χώρο.



ΣΧΗΜΑ 2.2 Μετανάστευση του τεκτονισμού στον Ελληνικό χώρο. (από Μουντράκης Δ., 1988)

2.2 Γεωλογικοί σχηματισμοί της Μήλου

Οι παλαιότεροι σχηματισμοί του νησιού είναι τα μεταμορφωμένα πετρώματα και το έντονα τεκτονισμένο κρυσταλλικό υποβάθρο. Επικλυσιγενώς στο υπόβαθρο επικάθονται οι θαλάσσιοι σχηματισμοί ηλικίας Μειοκαίνου-Πλειοκαίνου. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα κατά το Πλειόκαινο-τέλος Πλειστοκαίνου είχε σαν αποτέλεσμα την απόθεση ηφαιστειακών σχηματισμών. Οι αλλουβιακές αποθέσεις βρίσκονται σε περιορισμένη έκταση. Πιο συγκεκριμένα η λιθοστρωματογραφία του νησιού από τους κατώτερους προς τους ανώτερους σχηματισμούς είναι η εξής: κρυσταλλικό υπόβαθρο, νεογενή ιζήματα, παλιοί ηφαιστειακοί τόφφοι και τοφφίτες, ιγνιμβρίτες, παλιές ρυολιθικές εκχύσεις, παλιές δακιτικές – ανδεσιτικές εκχύσεις, διαφόρων τύπων αναβλήματα, νεότεροι τόφφοι, λαχάρ, νεότερες ρυολιθικές εκχύσεις και αναβλήματα και νεότερες αλλουβιακές αποθέσεις. Τα στοιχεία που αφορούν στη γεωλογική δομή της Μήλου γράφτηκαν σύμφωνα με τη διδακτορική διατριβή του κ. Γ. Τσόκα (1985).

2.2.1 Το κρυσταλλικό υπόβαθρο

Το κρυσταλλικό υπόβαθρο έχει περιορισμένη έκταση, μέρη του υποβάθρου έχουν έρθει στη επιφάνεια μέσω ηφαιστειακών και φρεατικών εκρήξεων. Η λιθολογία του υποβάθρου αποτελείται από επιζωνικώς όρθο- και παρά- μεταμορφωμένα πετρώματα τα οποία εναλλάσσονται και βρίσκονται μεταξύ του μαρμάρου και του μαρμαρυγιακού σχιστόλιθου. Οι ορθομεταμορφωμένοι τύποι συντελούνται από αμφιβολιτικούς και χλωριτικούς σχιστόλιθους οι οποίοι προέρχονται από τις διαδοχικές φάσεις μεταμόρφωσης των βασικών και υπερβασικών μαγματικών συμπλεγμάτων. Σημειώνεται και η παρουσία γαλάζιων σχιστολίθων που προέρχονται από την γλαυκοφανιτική φάση μεταμόρφωσης (HP/LT). Με ραδιοχρονολογήσεις προσδιορίστηκαν οι ηλικίες μεταμόρφωσης ,64 Ma για τους γαλάζιους σχιστόλιθους και 33 Ma για τους πράσινους, δηλαδή αλπική ηλικία.

Το υπόβαθρο παρουσιάζει έντονη μικροπύτχωση και είναι έντονα τεκτονισμένο με ευρύ φάσμα προσανατολισμού των κατατμήσεων και των ρηγμάτων.

2.2.2 Τα Νεογενή ιζήματα

Τα νεογενή ιζήματα αποτελούνται από σχηματισμούς ασβεστολίθων και κροκαλοπαγών και δεν καλύπτουν όλη την έκταση του νησιού.

Οι σχηματισμοί των ασβεστολίθων παρουσιάζουν στρώση και χαρακτηρίζονται από μεσοστρωματώδεις ως λεπτοστρωματώδεις. Είναι ελαφρά ως καθόλου μαργαϊκοί και σπανίως στιφροί. Περιέχουν απολιθώματα που προέρχονται από κελύφη μαλακίων. Είναι έντονα τεκτονισμένοι και η παρουσία ρηγμάτων και κατατμήσεων είναι έντονη κυρίως με διεύθυνση Α-Δ και Β-Ν.

Οι σχηματισμοί των κροκαλοπαγών αποτέθηκαν επικλυσιογενώς στο υπόβαθρο και αποτελούνται από εναλλαγές ενστρώσεων σχετικά με το μέγεθος και την πετρογραφική σύσταση που σχετίζεται με αυτήν του υποβάθρου. Η προέλευση των κροκαλοπαγών προέρχεται από την διάβρωση του υποβάθρου. Μεταξύ των κροκαλοπαγών υπάρχουν ενστρώσεις ψαμμιτών καθώς και αργιλικές αποθέσεις.

2.2.3 Ηφαιστειακή δραστηριότητα

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στην περιοχή άρχισε το ανώτερο Πλειόκαινο-κάτω Πλειστόκαινο και τα προϊόντα αποτελούνται από εναλλαγές πυροκλαστικών υλικών που αποτέθηκαν σε χερσαίο περιβάλλον και τοφφιτών που αποτέθηκαν σε θαλάσσιο περιβάλλον. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι το νησί υπέστη διαδοχικές καταβυθίσεις και ανυψώσεις κατά την διάρκεια του ανώτερου Πλειοκαίνου και Πλειστοκαίνου (Φυτίκας, 1977).

Τα πυροκλαστικά πετρώματα με τις σειρές κίσσηρις, καθώς και οι τόφφοι που αποτέθηκαν σε χερσαίο περιβάλλον όπως και οι

εναλλαγές απολιθωματοφόρων τοφφιτικών οριζόντων με απόθεση τους σε θαλάσσιο περιβάλλον αντίστοιχα είναι τα παλαιότερα της ηφαιστειακής σειράς.

Το φαινόμενο των εκχύσεων είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν πολυάριθμοι δόμοι και ρεύματα λαβών από ανδεσιτικής ως ρυολιθικής σύστασης. Η δραστηριότητα των δόμων έδωσε πολλά λατυποπαγή λίγα πυροκλαστικά και προϊόντα από πυρακτωμένα σύννεφα.

Τελικό αποτέλεσμα όλων αυτών των γεγονότων ήταν να ανορθωθούν στην Μήλο όξινα κεντρικά ηφαίστεια που είχαν κυρίως εκρηκτική δράση με τελικά προϊόντα στρώσεις από τεμάχη λαβών, κίσηρις και τέφρα.

2.2.4 Οι αλλουβιακές αποθέσεις

Οι αποθέσεις αυτές είναι αρκετά περιορισμένης έκτασης και σε όλες τις περιοχές έχουν μικρό πάχος. Τα υλικά που συντελούν τις αλλουβιακές αποθέσεις είναι σε γενικές γραμμές ηφαιστειακά υλικά που συχνά εξαλλοιώνονται σε αργιλικά προϊόντα.

2.2.5 Φρεατικές εκρήξεις

Οι φρεατικές εκρήξεις αποτελούν ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο όσον αφορά την γεωθερμική και γεωλογική έρευνα. Ειδικότερα, πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο, σε ηφαιστειογενείς περιοχές, λαμβάνουν χώρα εκρηκτικά φαινόμενα χωρίς να παίρνουν μέρος σε αυτά η ενέργεια των αερίων που βρίσκονται μέσα στο μάγμα και χωρίς να γίνεται έξοδος νέου μαγματικού υλικού. Ο λόγος που συμβαίνουν αυτές οι εκρήξεις είναι η ελάττωση της λιθοστατικής πίεσης σε σημείο που καταλήγει να γίνεται μικρότερη της πίεσης βρασμού του νερού στη θερμοκρασία που έχει το νερό στο βάθος που βρίσκεται το σημείο. Συνεπώς

ΝΗΟΣ ΜΗΛΟΣ
MILOS ISLAND

0,38 Ma
0,95 Ma
2,4 Ma
2,5 Ma
2,3 Ma
3,5-3,1 Ma
2,7 Ma
1,8 Ma
2,7 Ma
1,6 Ma
1,1-0,9 Ma
2 Ma
90/19 Ka
1,6 Ma
1,8 Ma

Ακρ. Τράχλιας
C. Trahilas
Ακρ. Φιλκοπί
Filakopi
Σαρακηνίτσο
Sarakeniso
Πλάκα
Plaka
Αδάμας
Adamas
Ζεφυρία
Zeyfia
Ακρ. Μπομπορντά
C. Bombarda
Κόλπος της Μήλου
Milos bay
Χαλέπα
Halepa
Πρ. Ηλίας
Pr. Ilias
Ακρ. Φυριπλάκα
C. Fyriplaka
Πολιχορή
Pelechori
Βουδία
Vudia
Δεμενεγάκι
Demenegaki
Πολιόνα
Polonia

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11

0 1 2 km

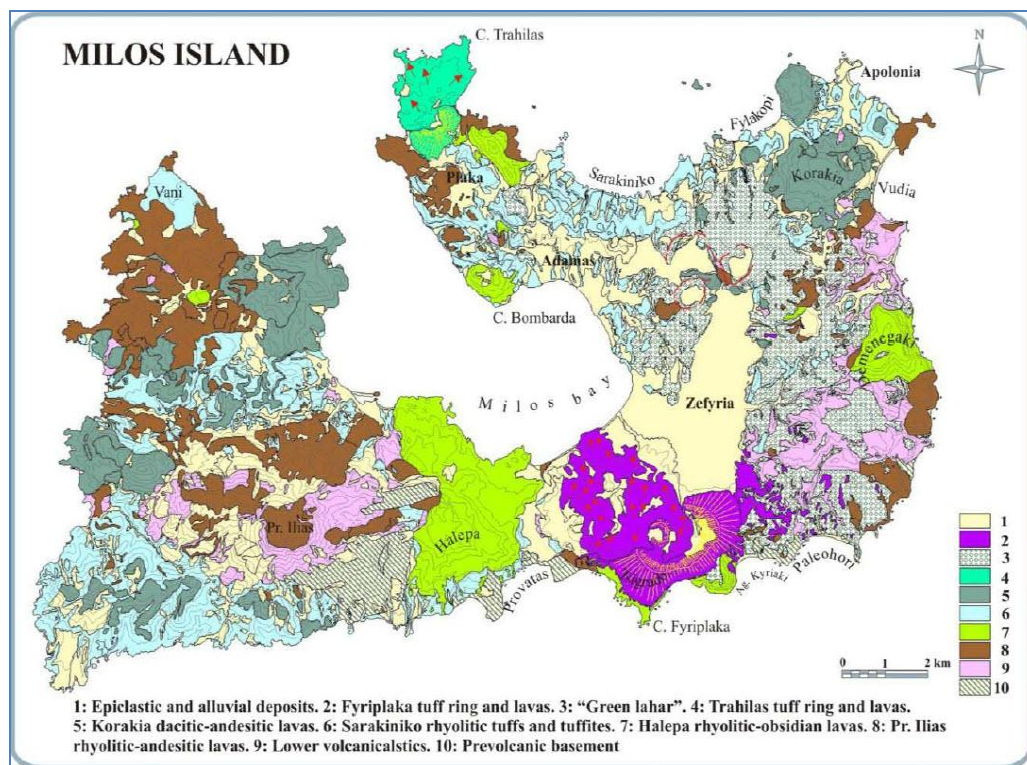
1: Δακτύλιος τόφφον και λάβες Φυριπλάκας (90/19 Ka). 2: "Πράσινο λαχάρ". 3: Δακτύλιος τόφφον και λάβες Τράχλια (0,38 Ma). 4: Ρυολιθικές λάβες Χαλέπας (1,1-0,9 Ma). 5: Άνωτεροι τόφφοι και τορφίτες (2,7-1,6 Ma). 6: Ρυολιθικές-ανδευτικές λάβες (2,7-1,6 Ma). 7: Κατώτερα ηφαιστειακά σκιστικά. 8: Προηφαιστειακό υπόβαθρο. 9. Ηφαιστειακά κέντρα. 10. Κύριες τεκτονικές γραμμές. 11. Υδροθερμικοί κρατήρες.

1: Holocene Fyriplaka tuff ring and lavas (90/19 Ka). 2: "Green lahar". 3: Trahilas tuff ring and lavas (0,38 Ma). 4: Halepa rhyolitic lavas (1,1-0,9 Ma). 5: Upper tuffs and tuffites (2,7-1,6 Ma). 6: Rhyolitic-andesitic lavas (2,7-1,6 Ma). 7: Lower volcanics. 8: Prevolcanic basement. 9. Volcanic centers. 10. Main tectonic lineaments. 11. Hydrothermal craters.

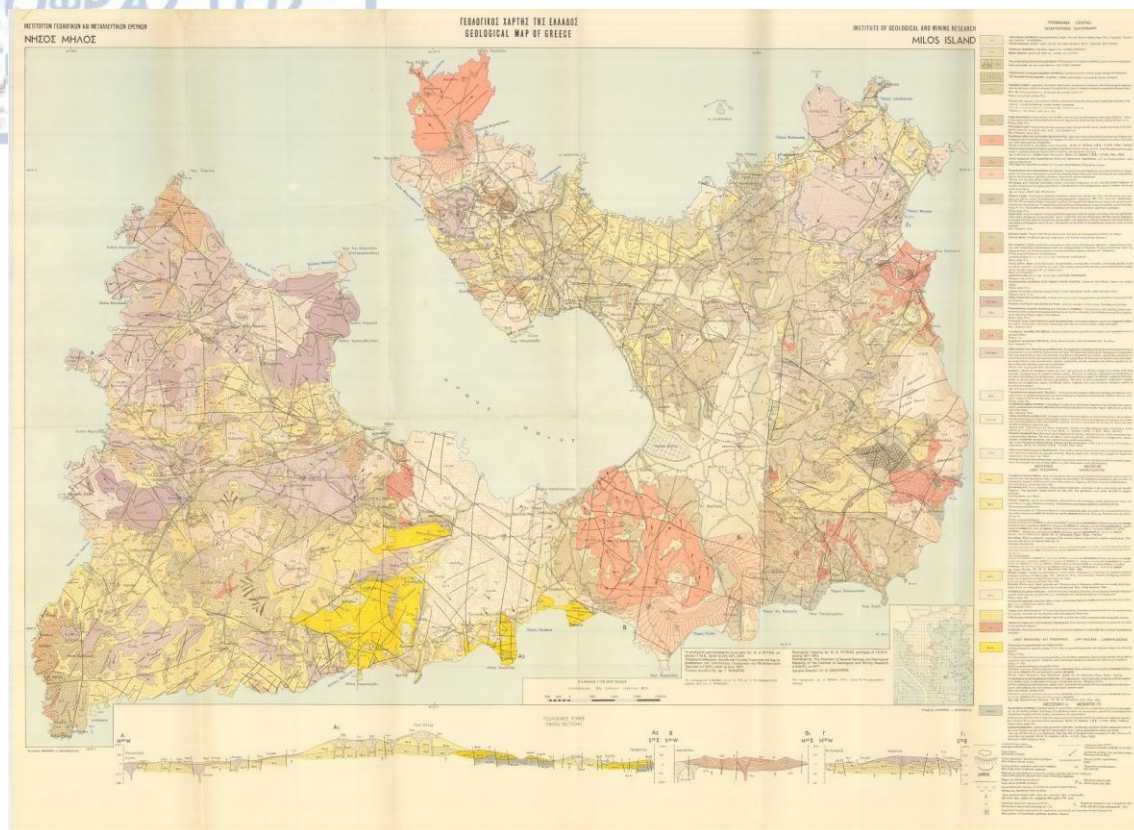
~~Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης~~



ΣΧΗΜΑ 2.5 Επαφή του υποβάθρου με τα ηφαιστειακά πετρώματα του νησιού.



ΣΧΗΜΑ 2.6 Γεωλογικός χάρτης με τις ηλικίες και τα ηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα



2.7 Γεωλογικός χάρτης της Μήλου

2.3 Τεκτονική

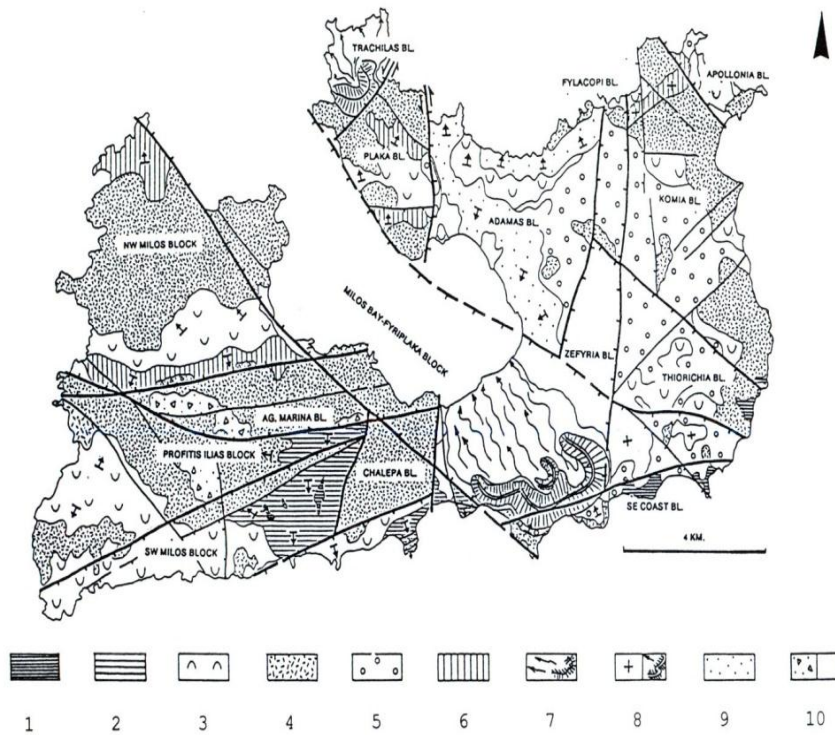
Το τεκτονικό καθεστώς που επικρατεί στο νησί δίνει την δυνατότητα στο μάγμα να ακολουθεί ανοδική πορεία, στην ουσία διευκολύνεται η πορεία του, με αποτέλεσμα να υπάρχει αυτή η θερμική ανωμαλία στη Μήλο. Συγκεκριμένα στην περιοχή δρά εφελκυστική τεκτονική και η γενικότερη περιγραφή των συστημάτων διάρρηξης δίνεται παρακάτω.

Στο σχήμα απεικονίζονται οι κυριότερες διευθύνσεις των ζωνών διάρρηξης στο νησί της Μήλου, οι οποίες διευθύνσεις δικαιολογούνται από τη θέση του νησιού ως προς τα κύρια τεκτονικά φαινόμενα του Ν. Αιγαίου.

Η διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ είναι σχεδόν παράλληλη στο ηφαιστειακό τόξο και ευδιάκριτη στο νότιου τμήμα της νήσου. Μια άλλη τεκτονική διεύθυνση είναι η Α-Δ περίπου όπως φαίνεται στο τεκτονικό κέρασ της Κουτσουνοράχης. Οι διευθύνσεις Β-Ν είναι ευδιάκριτες, το σύστημα αυτό προκάλεσε την άνοδο των μαγμάτων.

Τα συστήματα των ρηγμάτων αυτών προκάλεσαν την δημιουργία των τεκτονικών βυθισμάτων (graben) και κεράτων (horsts) που εμφανίζονται σε όλη την έκταση του νησιού.

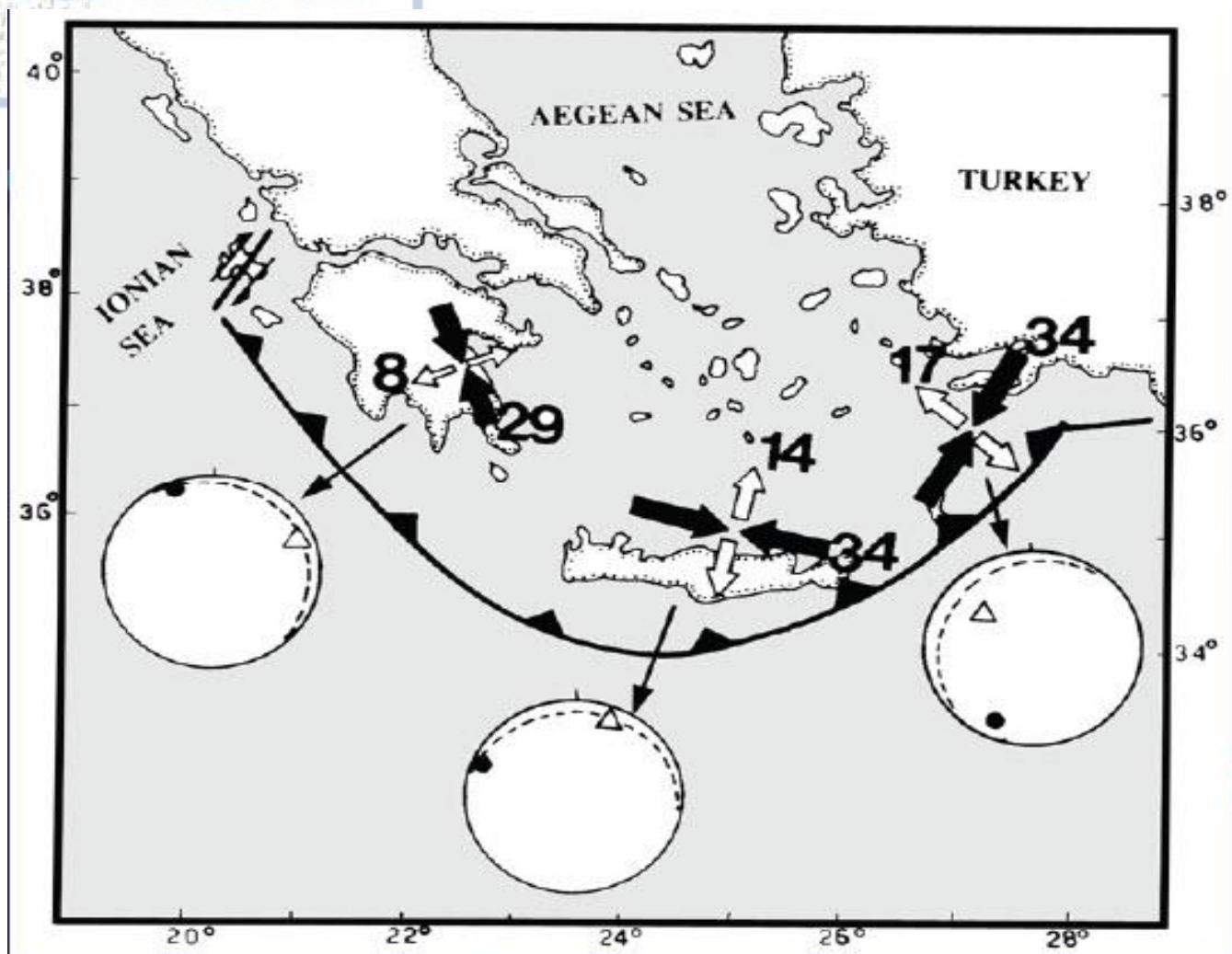
Οι φάσεις κατά τις οποίες δημιουργήθηκε αυτό το σύστημα διαρρήξεων είναι τρεις. Η πρώτη φάση είναι αλπικής ηλικίας. Η δεύτερη φάση, βαλαχική, τοποθετείται στην αρχή του Τεταρτογενούς και είναι κοινή σε όλο το Ν. Αιγαίο. Η τρίτη και τελευταία φάση, η οποία συνεχίζεται ακόμη, προκάλεσε φαινόμενα τεκτονικής καταβύθισης κατά κύριο λόγο και προσέδωσε στο νησί της Μήλου την σημερινή του μορφή. (Τσόκας, 1985)



Εικ. 1: Σχηματικός νεοτεκτονικός χάρτης της Νήσου Μήλου.

1: Μεταμορφωμένο υπόβαθρο, 2: Ασβεστόλιθοι κ.λπ. ιζήματα Ανωτέρου Μειόκαινου – Κατωτέρου Πλειοκαίνου, 3: Παλαιοί τοφφίτες, 4: Κατώτερες Λάβες, 5: Λαχάρ, 6: Νέοι τοφφίτες, 7: Ηφαιστειακά Τράχηλα, 8: Ηφαιστειακά Φυριπλάκας, 9: Πρόσφατοι τόφφοι και ψαμμίτες, 10: Αλλουβία και πλευρικά κορήματα.

ΣΧΗΜΑ 2.8 Σχηματικός νεοτεκτονικός χάρτης Μήλου



ΣΧΗΜΑ 2.9: Ρυθμός επέκτασης (αποκλίνοντα λευκά βέλη) κατά μήκος της διεύθυνσης κλίσης του επιφανειακού τμήματος (40–100km) της καταδυόμενης λιθόσφαιρας το ελληνικό τόξο και ρυθμός συμπίεσης (συγκλίνοντα μαύρα βέλη) σε αυτό το τμήμα της καταδυόμενης λιθόσφαιρας παράλληλα προς το τόξο. Οι αριθμοί κοντά στα βέλη δίνουν τις ταχύτητες σεισμικής παραμόρφωσης σε mm/yr (Kiritzi and Papazachos, 1995)

2.4 Το γεωτεκτονικό καθεστώς του ελληνικού τόξου

Ως κατακλείδα στο κεφάλαιο αυτό που αφορά στην γεωλογία του νησιού αξίζει να σημειωθούν στοιχεία για το γεωτεκτονικό καθεστώς του Ελληνικού τόξου. Έτσι λοιπόν κατά τις σημειώσεις του κ. Δ. Μουντράκη, όσον αφορά το σημερινό γεωτεκτονικό καθεστώς του Ελληνικού τόξου φαίνεται πως αυτό παρουσιάζει όλες τις πτυχές ενός τυπικού νησιωτικού τόξου κατά την σύγκλιση μιας ωκεάνιας πλάκας κάτω από μια ηπειρωτική.

Αρχικά αναφέρεται ότι το Ελληνικό τόξο είναι αποτέλεσμα σύνθετων φαινομένων που οφείλονται στην σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών Αφρικής και Ευρώπης. Κατά την σύγκλιση αυτή λαμβάνει χώρα αμφιθεατρική βύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την πλάκα της Ευρώπης της οποίας ενεργό περιθώριο αποτελεί ο ελληνικός χώρος. Η διεύθυνση βύθισης είναι ΒΒΑ και η βύθιση αυτή γίνεται με ταχύτητα 2.5-3.5 cm/yr.

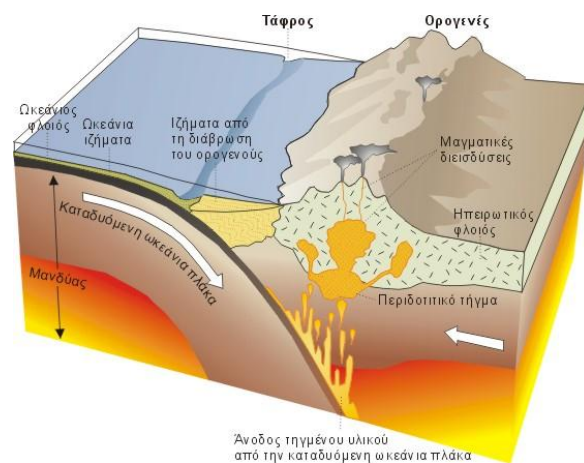
Θα περιγραφούν τώρα τα κύρια μορφοτεκτονικά στοιχεία από τα οποία συγκροτείται το Ελληνικό τόξο. Καταρχάς το εξωτερικό ιζηματογενές τόξο που περιλαμβάνει τις Δυτικές εξωτερικές οροσειρές της ηπειρωτικής Ελλάδας, την Κρήτη-όπου έχει χαρακτηριστική μορφή πρίσματος επαύξεσης- και τα Δωδεκάνησα. Στη συνέχεια, η Ελληνική περιφερειακή τάφρος η οποία περιβάλλει το ιζηματογενές τόξο, από το Ιόνιο πέλαγος ως και νότια της Κρήτης και της Ρόδου. Η τάφρος αυτή αποτελεί ουσιαστικά σύστημα βαθιών (με βάθη 2-5km) υποθαλάσσιων βυθισμάτων.

Το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου, στο οποίο και επικεντρώνεται το ενδιαφέρον της αναφοράς, βρίσκεται στο εσωτερικό μέρος και αποτελείται από τα ενεργά και τα Πλειο-Τεταρτογενή ηφαίστεια της Μήλου, της Σαντορίνης, της Νισύρου, των Μεθάνων, της Κω, των Λιχάδων, της Πάτμου, της Αντίπαρου, της Κρομμυωνίας και της Ψαθούρα. Τα ηφαίστεια αυτά συνδέονται με τη βύθιση και την τήξη της Αφρικανικής πλάκας σε βάθος περίπου 150km πίσω από το μέτωπο της σύγκλισης των πλακών. Η ηφαιστειότητα του τόξου

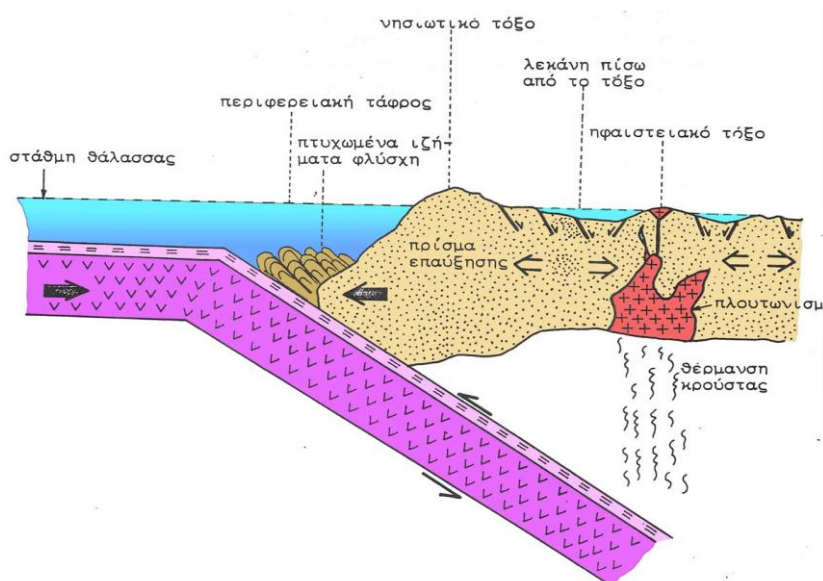
του Αιγαίου είναι ασβεστοκαλκή, τυπική δηλαδή φαινομένου σύγκλισης λιθοσφαιρικών πλακών.

Τέλος, η λεκάνη πίσω από το τόξο που δημιουργείται από εφελκυστικές τάσεις πίσω από το τόξο και κυρίως πίσω από το πρίσμα επαύξεσης.

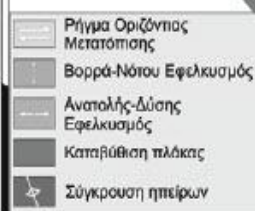
ΣΧΗΜΑΤΑ 2.10-11: Σκαρίφημα που δείχνει τη γεωτεκτονική κατάσταση και τα συνοδά φαινόμενα στο στάδιο της σύγκλισης μιας ωκεάνιας και μιας ηπειρωτικής πλάκας (Understanding Earth, 1993)



ΣΧΗΜΑ 2.10



ΣΧΗΜΑ 2.11



ΣΧΗΜΑ 2.12: Κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών που καθορίζουν την ενεργό τεκτονική στο Αιγαίο και τις γύρω περιοχές (Papazachos et al, 1998)

3. ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αναφέρονται γενικά στοιχεία των γεωθερμικών πεδίων και των επιφανειακών εκδηλώσεων της θερμότητας της Γης, κατά κύριο λόγο το παρακάτω κείμενο συντάχθηκε με την βοήθεια του συγγράματος των κ.Μ.Φυτίκα και κ.Ν. Ανδρίτσο (2004). Επίσης θα περιγραφεί το γεωθερμικό πεδίο της Μήλου καθώς και οι αιτίες δημιουργίας του.

3.1 Γενικά στοιχεία για τα γεωθερμικά πεδία

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια όπως είναι το είδος των γεωθερμικών πόρων, το είδος της εστίας θερμότητας, ο τύπος και η θερμοκρασία των ρευστών ,ο τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά κ.ο.κ.

Σε αυτό το σημείο θα περιγραφούν συνοπτικά οι τύποι ταξινόμησης των γεωθερμικών πεδίων. Έτσι λοιπόν βάσει του είδους των γεωθερμικών πόρων ορίζονται πέντε κατηγορίες συστημάτων:

i) Τα **υδροθερμικά συστήματα** ή πόροι που στην ουσία είναι τα υπόγεια θερμά ρευστά. Αυτά βρίσκονται σε ταμιευτήρες και θερμαίνονται από κάποια εστία, συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια με την μορφή θερμών εκδηλώσεων. Τα συστήματα αυτά διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

α) Τα συστήματα συναγωγής, τα οποία αφορούν σε περατούς σχηματισμούς με φυσική κυκλοφορία ρευστών είτε σε κλειστά κυκλώματα συναγωγής ,πρόκειται για ατμούς παγιδευμένους από στεγανά καλύμματα με $T > 200^{\circ}\text{C}$ και βάθος μέχρι και 1,5km.Επίσης σε αυτά τα συστήματα συγκαταλέγονται τα συστήματα που περιέχουν θερμό νερό υψηλής θερμοκρασίας ($T > 150^{\circ}$ και βάθος μέχρι τα 3 km),μέσης θερμοκρασίας ($T = 90-150^{\circ}\text{C}$),δηλαδή σχεδόν οριζόντιοι υδροφόροι ορίζοντες με τοπική αποστράγγιση ψυχρού

νερού ή κυκλοφορία θερμού νερού υπό πίεση και τέλος θερμό νερό χαμηλής θερμοκρασίας ($T < 90^{\circ}\text{C}$) όπως και η προηγούμενη περίπτωση με χαμηλότερη θερμοκρασία και με μικρή ή καθόλου πίεση του υδροφόρου.

β) Τα συστήματα αγωγής που αναφέρονται σε μη περατούς σχηματισμούς με μεγάλο πορώδες και περατότητα σε βάθη 1-3 km με εγκλωβισμένα νερά. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 60 ως και 150 °C.

ii) Η **αβαθής γεωθερμία**, που είναι μια άλλη κατηγορία γεωθερμικής ενέργειας. Τα ποσά ενέργειας συλλέγονται από μικρά βάθη 1m -100m με την ανακυκλοφορία νερού σε κλειστές υδροφόρες γεωτρήσεις ή σε ρηχές επιφάνειες πετρωμάτων/εδάφους.

iii) Τα **συστήματα θερμών ξηρών πετρωμάτων** που βρίσκονται σε βάθη από 3 ως 10 km. Πρόκειται για μη περατούς σχηματισμούς πετρωμάτων χωρίς να υπάρχει σε αυτά φυσική κυκλοφορία ρευστών, έτσι λοιπόν με τεχνητές μεθόδους (όπως οι γεωτρήσεις) εισάγεται νερό το οποίο κυκλοφορεί σε αυτά τα πετρώματα θερμαίνεται και έπειτα ανακτάται θερμότερο ή με την μορφή ατμού. Διακρίνονται σε υψηλής θερμοκρασίας $T > 250^{\circ}\text{C}$ και μέσης –χαμηλής θερμοκρασίας $T < 150^{\circ}\text{C}$.

iv) Τα **γεωπεπιεσμένα συστήματα ενέργειας**, πρόκειται για έγκλειστα υδροφόρα στρώματα υπό μεγάλη πίεση και παρουσία υδρογονανθράκων με θερμοκρασίες 150-200°C.

v) Τέλος , τα **μαγματικά συστήματα** τα οποία αναφέρονται στην απόληψη της θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις που βρίσκονται σε σχετικά μικρό βάθος. Η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει τους 500°C σε μερικά χιλιόμετρα λόγω ακριβώς των μαγματικών διεισδύσεων.

Αξίζει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι για την πρώτη (i) κατηγορία, των υδροθερμικών συστημάτων δηλαδή, τα συστήματα μίγματος νερού-ατμού είναι και το 90% των υδροθερμικών συστημάτων που αξιοποιούνται ενεργειακά. Τέτοια πεδία

βρίσκονται στην Τουρκία, Ισλανδία, Ιταλία, Αζόρες, Νεβάδα, Νέα Ζηλανδία, Κόστα Ρίκα, Μεξικό, Χαβάη, Καλιφόρνια, Ιαπωνία και σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται και τα πεδία της Μήλου και της Νισύρου.

Αναφέρεται τέλος πως η συνηθέστερη διάκριση των γεωθερμικών ρευστών γίνεται βάσει της ενθαλπίας τους. Η ενθαλπία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της θερμοκρασίας τους και εκφράζει το θερμικό περιεχόμενο τους. Υψηλής θερμοκρασίας ή ενθαλπίας ρευστά είναι αυτά με $T > 150^{\circ}\text{C}$, μέσης ενθαλπίας τα ρευστά με $T_a = 90-150^{\circ}\text{C}$ και χαμηλής ενθαλπίας ρευστά είναι αυτά με $T < 90^{\circ}\text{C}$.

Όσον αφορά τις επιφανειακές εκδηλώσεις της θερμότητας της Γης αναφέρονται παρακάτω κάποιες από τις μορφές αυτών των εκδηλώσεων :

- i) Οι υδροθερμικοί ή ηφαιστειακοί κρατήρες που σχηματίζονται ύστερα από έκρηξη υπέρθερμων γεωθερμικών ρευστών που είναι εγκλωβισμένα σε μικρό βάθος υπό πίεση και εκτινάσσουν τα υπερκείμενα πετρώματα.
- ii) Οι θερμές πηγές που είναι φυσικές εξοδοί ζεστού νερού με θερμοκρασία που πλησιάζει το σημείο ζέσεως του νερού.
- iii) Οι θερμοπίδακες (geysers) οι οποίοι αποτελούν ειδική περίπτωση ζέουσων θερμών εκδηλώσεων και δημιουργούνται από την κυκλοφορία υπέρθερμων υπόγειων νερών σε μικρό βάθος. Οι θερμοπίδακες προσφέρουν πολλές φορές ένα εντυπωσιακό θέαμα λόγω της μεγάλης πίεσης που αποκτούν τα ρευστά με αποτέλεσμα να εκτινάσσονται σε δεκάδες μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους.



ΣΧΗΜΑ 3.1 Geysers,Iceland

- iv) Οι ατμίδες που είναι αναδύσεις υπέρθερμων ατμών και αερίων, που βγαίνουν από ρωγμές ή τρύπες του εδάφους χωρίς πίεση αλλά με σταθερότητα. Οι ατμίδες που εκπέμπουν ποσότητες υδρόθειου ονομάζονται θειωνίες και αυτές που εκπέμπουν μόνο διοξείδιο του άνθρακα καλούνται μοφέτες.
- v) Τα θερμά εδάφη σχηματίζονται συνήθως από την θερμική αγωγή των πετρωμάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ μερικών σημείων της γήινης επιφάνειας και των υποκείμενων αβαθών και πολύ θερμών ρευστών.



ΣΧΗΜΑ 3.2 Fumaroles and sulfur mining at kawah ijen crater (πηγή google.com)

3.2 Το γεωθερμικό πεδίο της Μήλου και οι αιτίες δημιουργίας του

Τα αίτια δημιουργίας των θετικών θερμικών ανωμαλιών στα νησιωτικά τόξα, όπου ανήκει και το νησί της Μήλου, περιγράφονται παρακάτω. Η βασικότερη διεργασία που συντελεί στην ανάπτυξη θερμικής ανωμαλίας σε τέτοιες περιοχές είναι η ολίσθηση της ωκεάνιας λιθοσφαιρικής πλάκας κάτω από το νησιωτικό τόξο κατά μήκος της ζώνης Benioff, η οποία αρχίζει από την ωκεάνια τάφρο. Σε ορισμένο βάθος λοιπόν πραγματοποιείται τήξη και δημιουργία μαγμάτων. Συγκεκριμένα, τα μάγματα αυτά προέρχονται κυρίως από μερική τήξη της ωκεάνιας πλάκας ή του λερζολίθου της υπερκείμενης μανδυακής σφήνας μετασσωματωμένου από τα ένυδρα πυριτικά ρευστά.

Η τήξη αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μετανάστευση θερμότητας προς την επιφάνεια λόγω της ανόδου των μαγμάτων και τις μαγματικές μεταφορικές κινήσεις. Διακρίνονται λοιπόν τρεις ζώνες a,b,c από την τάφρο προς το τόξο. Η ζώνη a έχει χαμηλή θερμική ροή λόγω της ύπαρξης πολλών ψυχρών ωκεάνιων ιζημάτων από την βυθιζόμενη πλάκα. Η ζώνη b χαρακτηρίζεται από μέση θερμική ροή και αποτελείται από ιζήματα τα οποία συγκεντρώθηκαν προηγουμένως στο χώρο αυτό ή από παλαιό φλοιό και τέλος η ζώνη c που την χαρακτηρίζει υψηλή θερμική ροή λόγω του ότι βρίσκεται στην περιοχή όπου λαμβάνει χώρα η τήξη και η δημιουργία μαγμάτων τα οποία διοχετεύουν στην περιοχή ποσά θερμότητας με τις ανοδικές τους κινήσεις. Κατά τον τρόπο αυτό δημιουργούνται τα ηφαιστειακά τόξα και μεταφέρεται θερμότητα με συναγωγή είτε από πλουτωνισμό είτε από ηφαιστειότητα.

Η θερμική ανωμαλία στα συμπλέγματα των νήσων Μήλος, Σαντορίνη και Νίσυρος, που σαφώς ανήκουν στο ηφαιστειακό τόξο της μικροπλάκας του Αιγαίου το οποίο έχει μήκος 500km και εύρος 40-50km περίπου, οφείλεται στην βύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την πλάκα του Αιγαίου. Η διεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί το ενεργό ηφαιστειακό τόξο του

Νοτίου Αιγαίου που μέρη του αποτελούν τα προαναφερθείσαντα νησιωτικά συμπλέγματα.

Το σύμπλεγμα νησιών της Μήλου (Μήλος, Κίμωλος, Αντίμηλος, Πολύαιγος κ.ά.) ανήκει σαφώς στην ζώνη c υψηλής θερμικής ροής. Παρελθοντικά η περιοχή πέρασε διαδοχικά από τις ζώνες a, b όπως γίνεται κατανοητό από τα προηγούμενα.

Τα ηφαιστειακά κέντρα των νησιωτικών αυτών συμπλεγμάτων φαίνεται πως τροφοδοτούνται κατευθείαν από μαγματικούς θαλάμους που βρίσκονται σε πολύ βαθιά σημεία χωρίς να παρεμποδίζονται από την ύπαρξη ρηχών σημείων του ηπειρωτικού φλοιού. Οι επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας, η γεωχημεία και τα σχετικά γεωθερμόμετρα καταδεικνύουν ταμειυτήρες υψηλής ενθαλπίας στα συμπλέγματα αυτά.

Τα αίτια που προκαλούν την θετική αυτή θερμική ανωμαλία στα νησιά της Μήλου είναι η ύπαρξη σε μικρά σχετικά βάθη μεγάλων ποσοτήτων μαγμάτων κρυστάλλωσης. Τα μάγματα αυτά δημιουργήθηκαν από μερική τήξη σε βάθη περίπου 180km, το οποίο βάθος αποτελεί το μεγαλύτερο βάθος της περιοχής των σεισμικών εστιών μεγάλου βάθους της περιοχής του Ν.Αιγαίου.

Συγκεκριμένα για την Μήλο, το μεγαλύτερο γεωθερμικό ενδιαφέρον εστιάζεται στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του νησιού (ανατολικά της νοητής γραμμής Προβατά-Αδάμαντα) , με εκτιμώμενη έκταση του γεωθερμικού πεδίου 60km². Ο βαθύς ταμειυτήρας (700-1500m) παράγει διφασικά ρευστά υψηλής ενθαλπίας, ενώ οι ρηχοί (30-150m) θερμά νερά μέχρι 100°C.

Το εκτιμώμενο γεωθερμικό δυναμικό είναι περίπου 100MWe και πολλαπλάσια MWth.

Οι επιφανειακές εκδηλώσεις στο νησί είναι οι εξής:

- i) Θερμά εδάφη μέχρι 100°C στην επιφάνεια
- ii) Διάσπαρτες θερμές πηγές και ατμίδες (έως 102°C)

Οι γεωτρήσεις που έχουν γίνει στη Μήλο όσον αφορά την παρακολούθηση και λήψη στοιχείων του γεωθερμικού πεδίου είναι:

- i) 5 παραγωγικές γεωτρήσεις συνάντησαν ρευστά υψηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες 320°C σε βάθη περίπου 1000m.
- ii) Ρευστά μέσης ενθαλπίας πιθανότατα υπάρχουν σε μικρότερα βάθη
- iii) Ρηχές γεωτρήσεις (από 30-150m) συνάντησαν θερμή υδροφορία

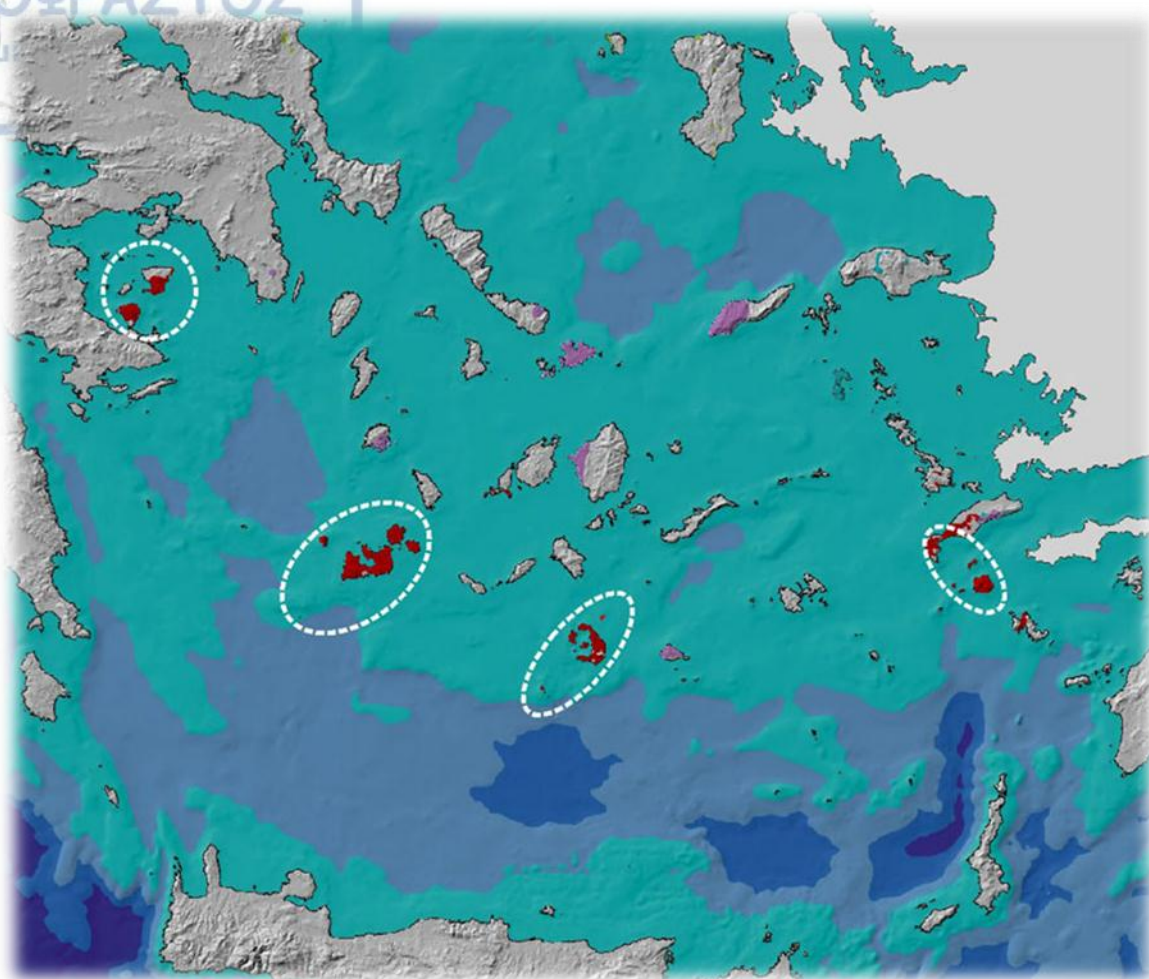
Στη φωτογραφία του σχήματος 3.3 φαίνεται επιφανειακή μέτρηση των ρευστών κοντά σε κάποιο κρατήρα του νησιού ενώ στην φωτογραφία του σχήματος 3.4 απεικονίζεται ένας παλιός κρατήρας στην Μήλο.

ΣΧΗΜΑ 3.3 : Θερμόμετρο δείχνει θερμοκρασία 98.6 °C σε επιφανειακές συνθήκες

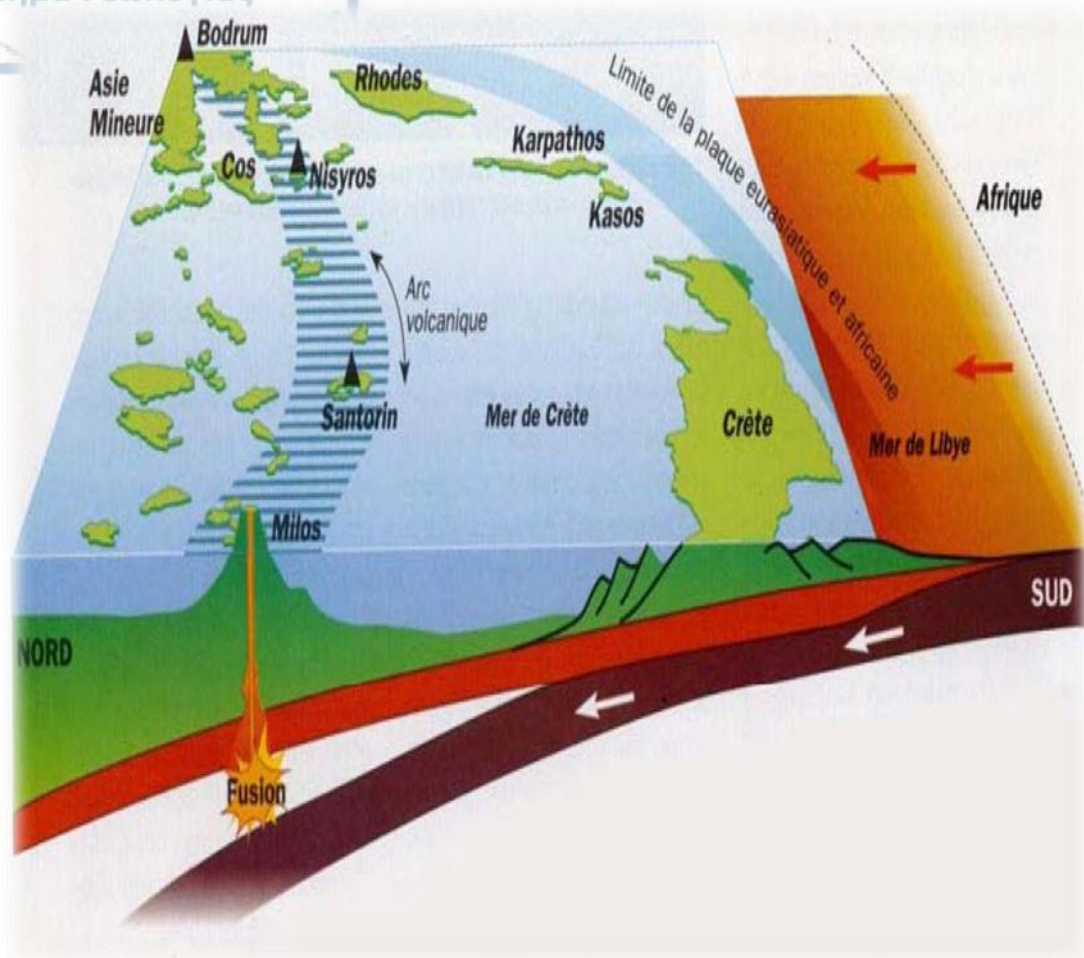




ΣΧΗΜΑ 3.4: Παλιός κρατήρας

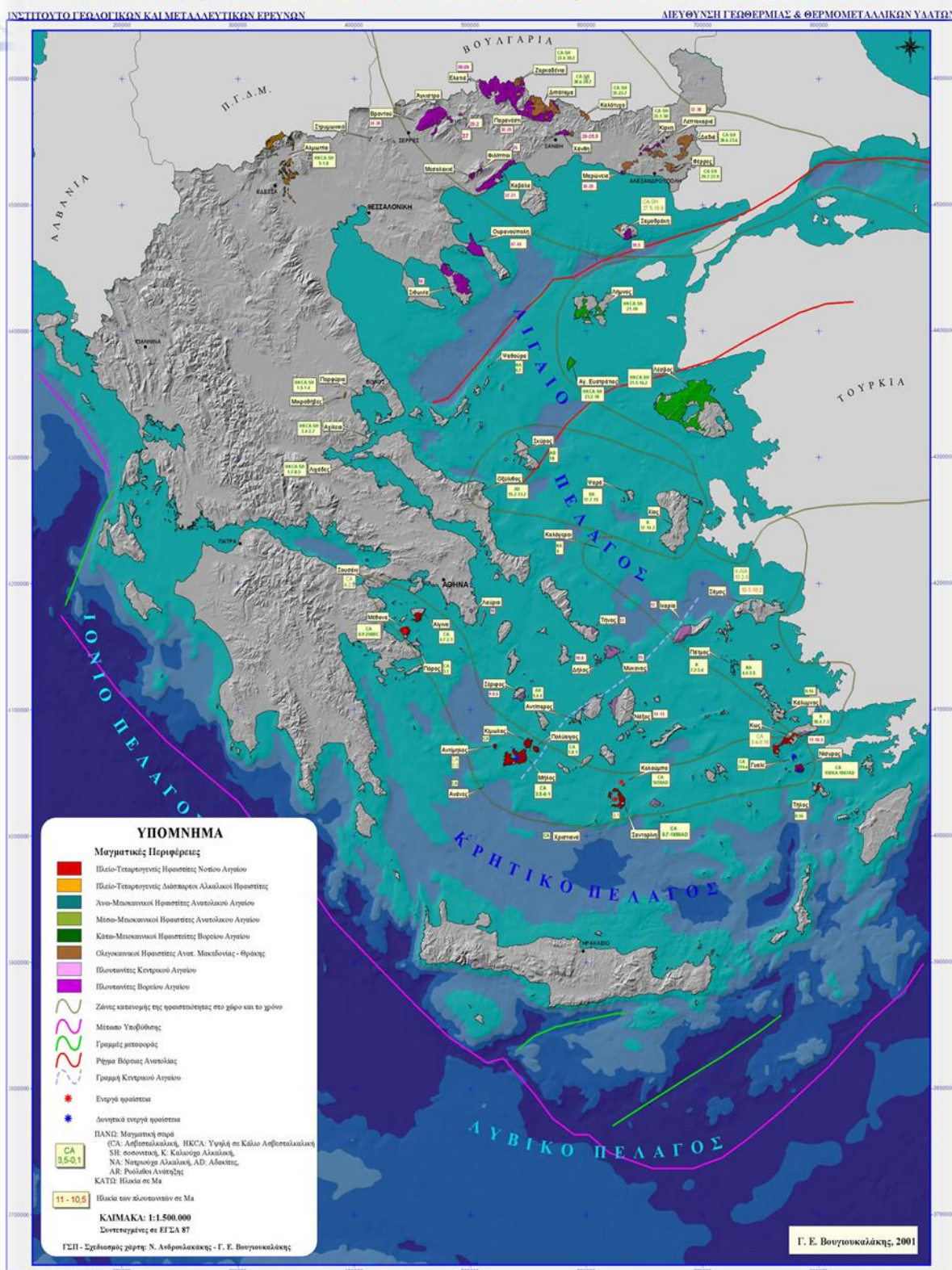


ΣΧΗΜΑ 3.5 Το ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου με τα νησιωτικά συμπλέγματα Μήλου, Σαντορίνης, Νισύρου και Μεθάνων



ΣΧΗΜΑ 3.6 Σχηματική απεικόνιση του ηφαιστειακού τόξου και των διεργασιών λόγω της ολίσθησης της Αφρικανικής πλάκας (Φυτίκας Μ., Παπαχρήστου Μ.)

ΚΑΙΝΟΖΩΙΚΗ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΤΗΤΑ ΕΛΛΑΔΑΣ



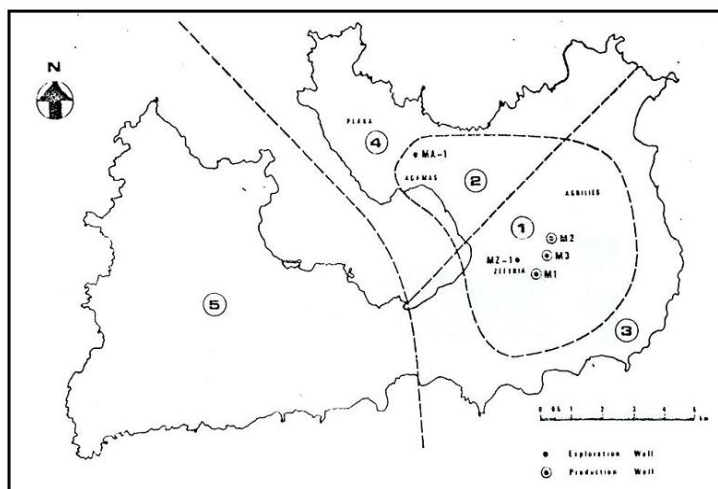
ΣΧΗΜΑ 3.7 Χάρτης ηφαιστειότητας της Ελλάδας, ΙΓΜΕ, Γ.Ε Βουγιουκλάκης

Στο σημείο αυτό δίνεται στο σχήμα 3.9 η εικόνα πέντε (5) βαθιών γεωτρήσεων που έλαβαν χώρα στο ΒΑ κομμάτι του νησιού με σκοπό την εύρεση των θερμοκρασιών σε μεγάλα βάθη ως περίπου 1400 μέτρα. Οι γεωτρήσεις αυτές έδωσαν την δυνατότητα να γίνει σαφέστερη η γενική (αν μπορούμε να το θέσουμε έτσι) στρωματογραφική εικόνα των σχηματισμών του νησιού.

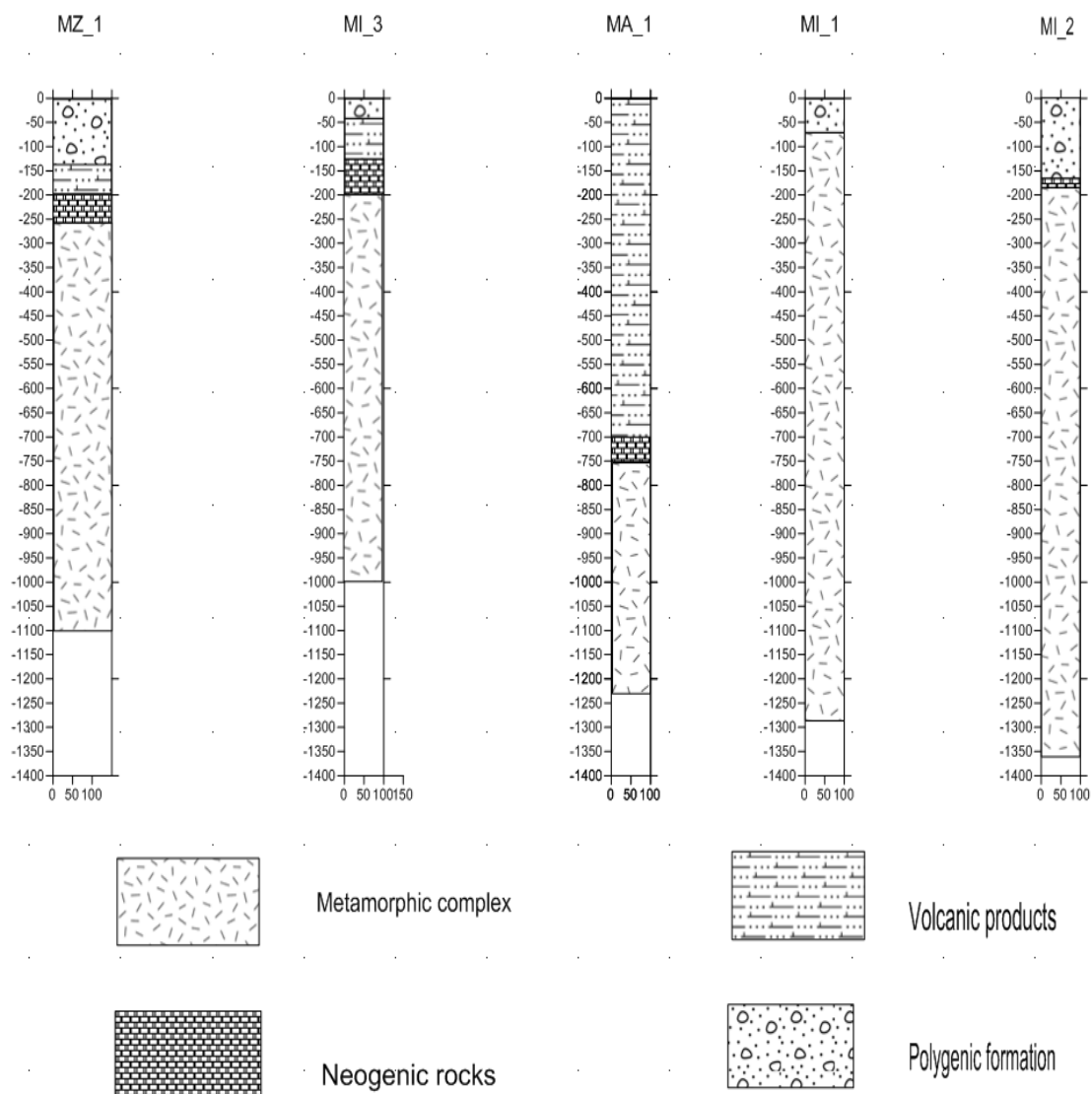
Προκύπτει λοιπόν πως η αλληλουχία των πετρωμάτων έχει ως εξής : στη βάση της στρωματογραφικής στήλης βρίσκεται το υπόβαθρο που αποτελείται από ένα μεταμορφικό σύμπλεγμα. Σε αυτό επικάθονται Νεογενή πετρώματα με ασυμφωνία αποτελούμενα κυρίως από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα ηφαιστειακά υλικά που αποτελούνται από λάβες ενδιάμεσης ως βασικής σύστασης, τόφφους, πυροκλαστικά υλικά. Στην κορυφή της στήλης , τέλος, υπάρχουν τα πρόσφατα ιζήματα.

Από την μελέτη των γεωτρήσεων προέκυψε το διάγραμμα του σχήματος 3.10 στο οποίο χαρτογραφήθηκε η θερμοκρασία σε βαθμούς °C που μετρήθηκε σε συνάρτηση με το βάθος σε μέτρα.

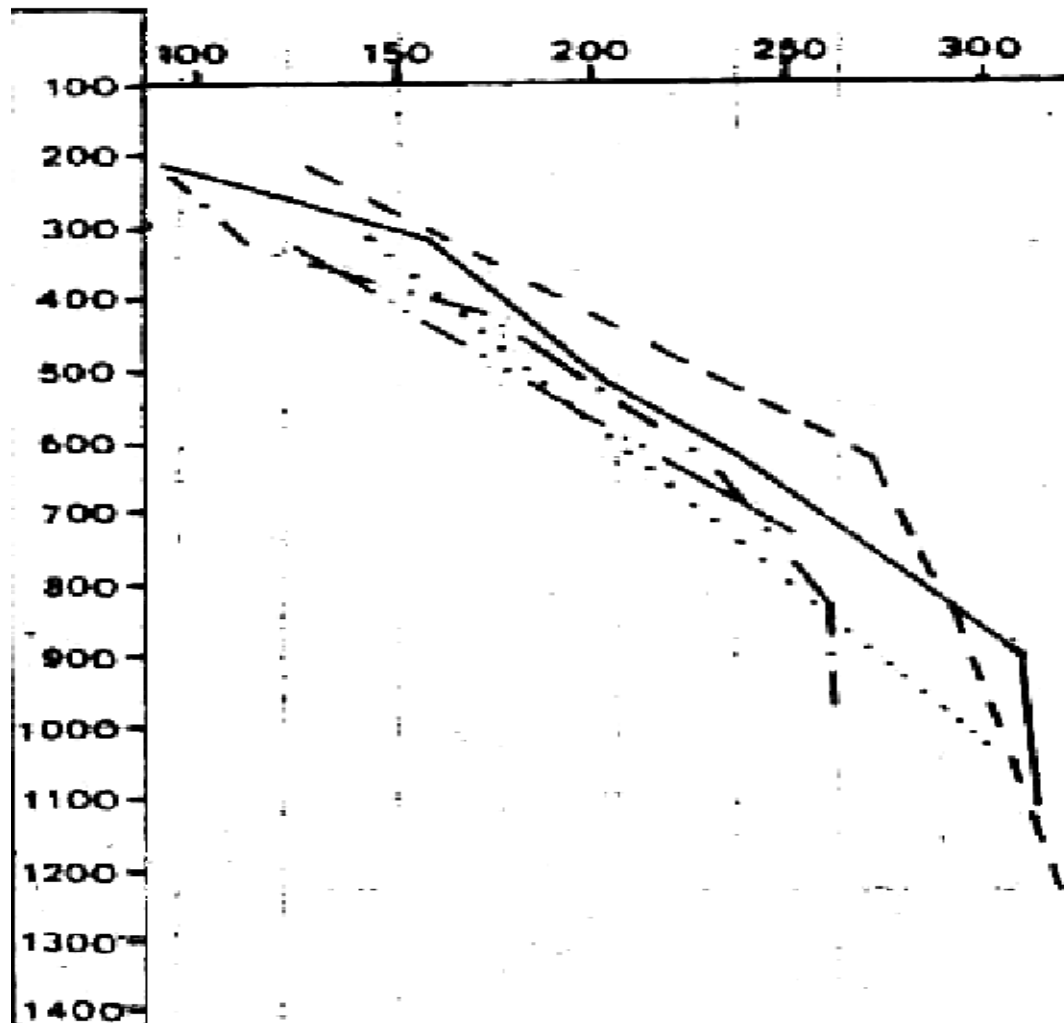
Μελετώντας το διάγραμμα παρατηρείται πως σε βάθος 1000-1200 περίπου μέτρα υπάρχουν ρευστά πολύ υψηλής ενθαλπίας περίπου 300°C.



ΣΧΗΜΑ 3.8 Χάρτης της Μήλου στον οποίο φαίνονται οι θέσεις των 5 ερευνητικών γεωτρήσεων



ΣΧΗΜΑ 3.9 Οι γεωτρήσεις και οι σχηματισμοί της περιοχής



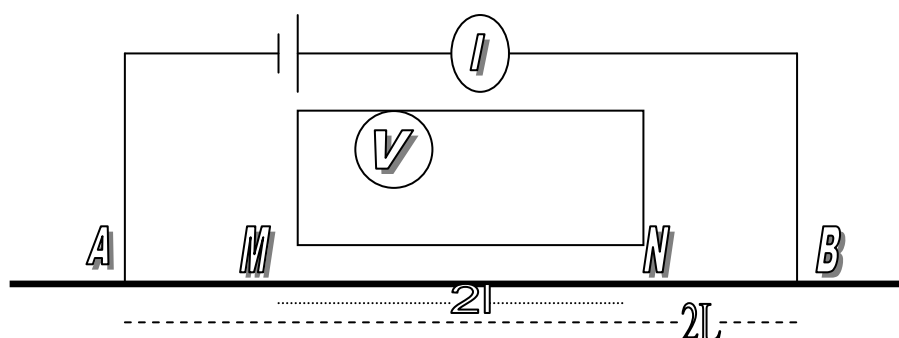
ΣΧΗΜΑ 3.10 Διάγραμμα θερμοκρασιών σε σχέση με το βάθος

4. ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΛΟΥ

4.1 Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Στην παράγραφο αυτή θα δοθούν γενικά στοιχεία που αφορούν στην μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, καθώς αυτή χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα για το γεωθερμικό πεδίο της Μήλου. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη από τις γεωηλεκτρικές μεθόδους και υπάγεται στην κατηγορία όπου παράγεται ηλεκτρικό πεδίο με τεχνητό τρόπο στο έδαφος. Με μετρήσεις της διαφοράς δυναμικού καθορίζεται τελικά η δομή του υπεδάφους λόγω του ότι οι ιδιότητες του πεδίου διαμορφώνονται από την ζητούμενη δομή.

Η διαδικασία έχει ως εξής: με δύο ηλεκτρόδια ρεύματος A ,B διαβιβάζεται στο υπέδαφος ηλεκτρικό ρεύμα και με δύο ηλεκτρόδια δυναμικού M,N μετριέται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού που δημιουργεί το ρεύμα. Στο σχήμα (4.1) αναπαριστάται η παραπάνω διαδικασία.



ΣΧΗΜΑ 4.1 Διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger

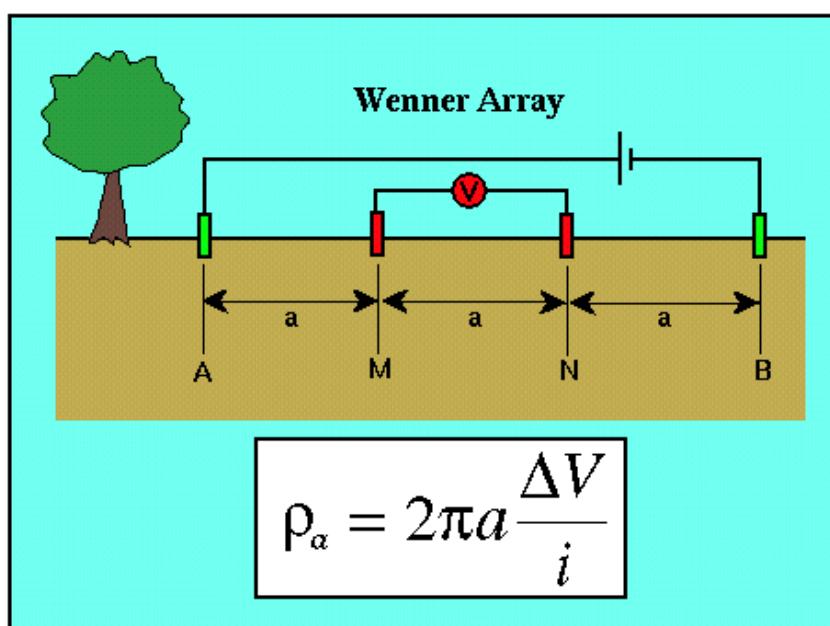
Με στόχο λοιπόν τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, δηλαδή τον καθορισμό της γεωηλεκτρικής δομής όπως ονομάζεται, γίνονται μετρήσεις τόσο της έντασης του ρεύματος I όσο και της διαφοράς δυναμικού ΔV .

Συνοψίζοντας, αρχικός στόχος της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποτελεί ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους με απώτερο σκοπό την τελική γεωλογική ερμηνεία η οποία όμως, όπως γίνεται κατανοητό, παρουσιάζει δυσκολίες καθώς απαιτείται η γνώση και άλλων στοιχείων της περιοχής όπως γεωλογικών, τεκτονικών, γεωφυσικών.

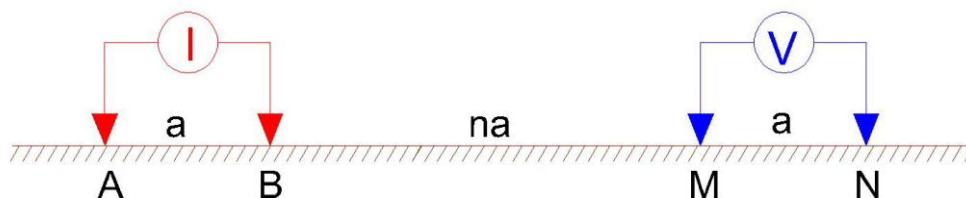
Επιγραμματικά αναφέρονται οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων κατά την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Θα δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην διάταξη Schlumberger καθώς αυτή χρησιμοποιήθηκε στη γεωφυσική διασκόπηση της Μήλου.

Η διάταξη Wenner είναι μια από τις τρεις διατάξεις κατά την οποία τα ηλεκτρόδια A, B, M, N διατάσσονται συμμετρικά σε ορισμένη γραμμή σχήμα (4.2). Η διάταξη αυτή όμως παρουσιάζει δυσκολίες καθώς για κάθε καινούρια μέτρηση θα πρέπει να μετακινούνται όλα τα ηλεκτρόδια.

ΣΧΗΜΑ 4.2 Διάταξη Wenner. Πηγή: aeic.alaska.edu



Μια άλλη διάταξη είναι αυτή του διπόλου-διπόλου κατά την οποία τα ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε μικρή μεταξύ τους απόσταση $AB=2I$ αλλά η απόστασή τους από τα ηλεκτρόδια M, N που μετρούν την διαφορά δυναμικού είναι αρκετά μεγαλύτερη σχήμα (4.3). Ένα πολύ βασικό πλεονέκτημα της διάταξης αυτής έναντι των άλλων δύο (Wenner, Schlumberger) είναι ότι το μόνο που περιορίζει την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και του δυναμικού είναι ο εδαφικός θόρυβος και από την δυνατότητα των οργάνων να καταγράψουν την τάση και όχι από την απαίτηση χρήσης μεγάλου μήκους καλωδίων.



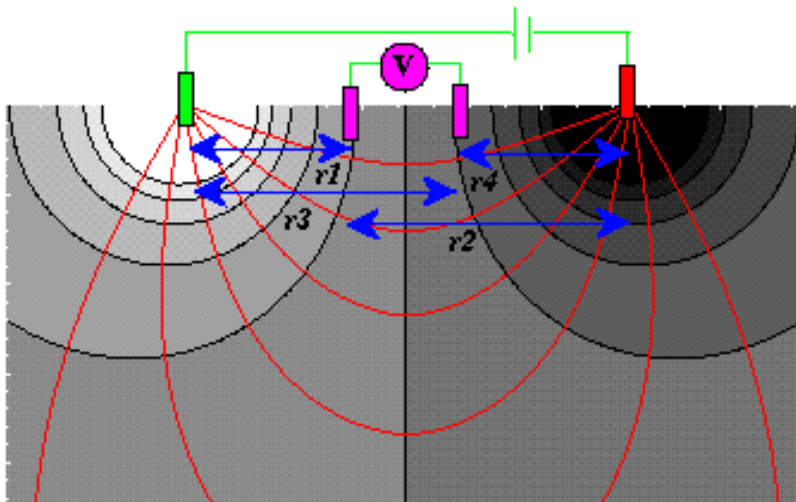
ΣΧΗΜΑ 4.3 : Διάταξη διπόλου-διπόλου. Πηγή brantax.com

Τέλος, η διάταξη Schlumberger, σχήμα (4.1), κατά την οποία τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν μεταξύ τους πολύ μικρότερη απόσταση απ' ό,τι τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B με απόσταση $AB=2L$, $L \gg 1$. Χρησιμοποιώντας την διάταξη αυτή για μια γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, όπως και στην μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Μήλο, η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού παραμένει σταθερή.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διάταξης είναι το ότι η σταθερή θέση των ηλεκτροδίων M, N περιορίζει σημαντικά τις ανωμαλίες που προκύπτουν από γεωλογικές πλευρικές ασυνέχειες, επίσης χρειάζεται η μεταβολή απόστασης μόνο των ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την βυθοσκόπηση και τέλος βοηθητικό υλικό όπως λογισμικό και πρότυπες καμπύλες έχουν γίνει για την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger.

Στην έρευνα για το γεωθερμικό πεδίο της Μήλου έλαβαν χώρα γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, γενικά στοιχεία για την μέθοδο αυτή θα φανούν χρήσιμα για την κατανόηση της.

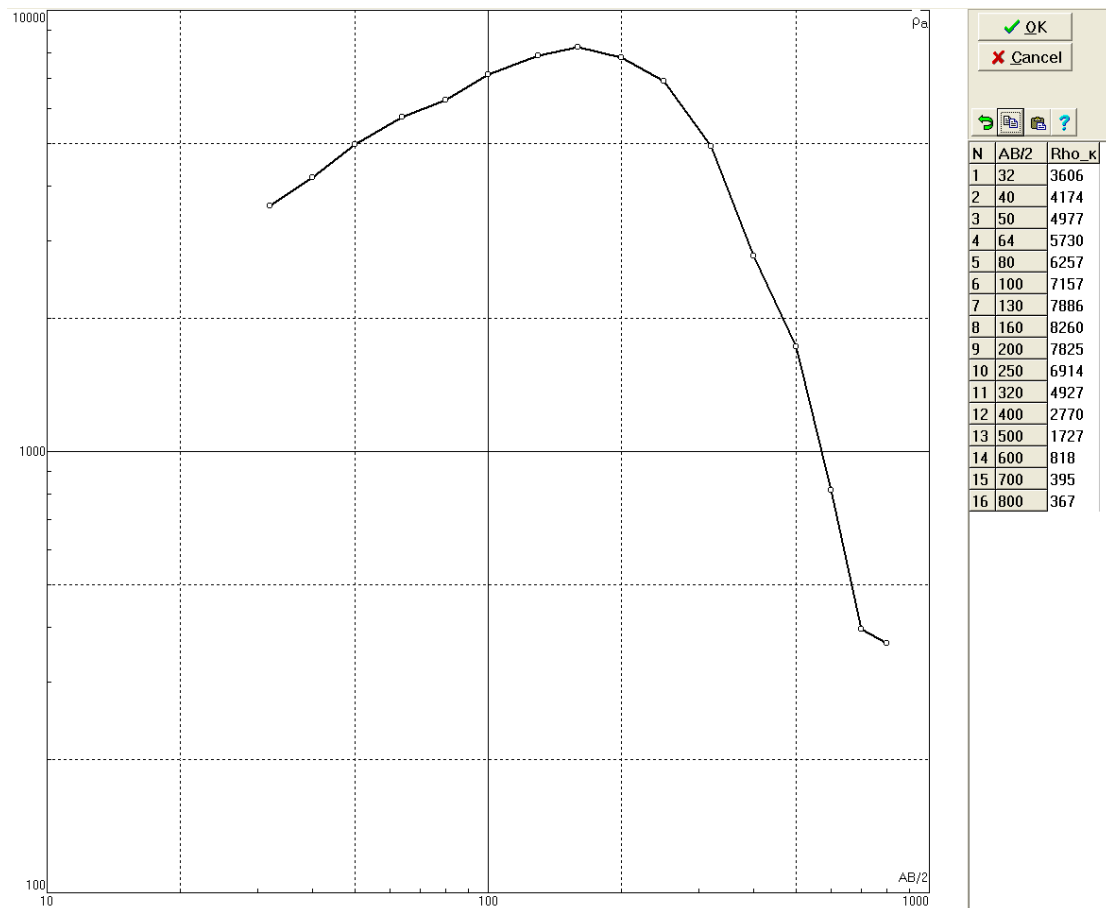
Η κάθε βυθοσκόπηση αποτελείται από σειρά μετρήσεων κατά τις οποίες αυξάνεται λογαριθμικά η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος A, B σε αντίθεση με την απόσταση των ηλεκτροδίων που μετρούν την διαφορά δυναμικού M, N η οποία αυξάνεται όταν το δυναμικό που μετράται πλησιάζει την ακρίβεια του οργάνου μέτρησης. Όσον αφορά το βάθος διείσδυσης του ρεύματος επισημαίνεται ότι όσο αυξάνει η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος τόσο αυξάνει και αυτό με συνέπεια να παίρνεται μια ακριβέστερη εικόνα του υπεδάφους. Έτσι λοιπόν, γίνεται κατανοητό πως η φαινόμενη αντίσταση που μετράται διαμορφώνεται βάσει κάθε φορά των βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών που διαρρέονται από το ρεύμα.



ΣΧΗΜΑ 4.4 : Διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος

Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός πως για να λάβουμε τις τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με το βάθος θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αντιστροφή για την οποία

χρησιμοποιείται η κατανομή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την απόσταση $AB/2$ όπως φαίνεται και στο παράδειγμα του σχήματος (4.5) .



ΣΧΗΜΑ 4.5 : Κατανομή της ε.η.α με το ημιάνπτυγμα της απόστασης $AB/2$

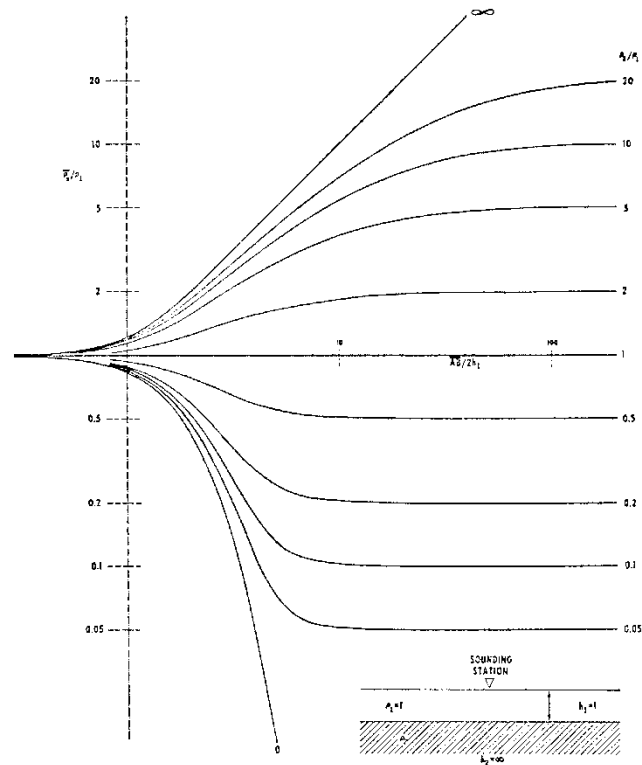
4.2 Ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων

Όπως προαναφέρθηκε για να γίνει η ερμηνεία των μετρήσεων θα πρέπει να γίνει αντιστροφή των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την απόσταση $AB/2$. Στόχος αυτής της διαδικασίας αντιστροφής είναι να υπολογιστεί η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατανομή της ειδικής αυτής ηλεκτρικής αντίστασης είναι που καθορίζει την γεωλογική δομή του υπεδάφους και στη συνέχεια την σύσταση των σχηματισμών αυτών.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την διαδικασία της αντιστροφής είναι το IPI2WIN σε συνδυασμό με το πρόγραμμα αντιστροφής RESGRAPH. Για να λυθεί το απευθείας πρόβλημα χρησιμοποιείται γραμμικό φίλτρο ενώ το πρόβλημα της αντιστροφής επιλύεται με τη χρήση μεταβλητής από τον αλγόριθμο του Newton του ελάχιστου αριθμού στρωμάτων ή του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης προσαρμογής καμπυλών με την προσέγγιση Tikhonov. Για να ενισχύσουμε την ελαχιστοποίηση του σφάλματος ταύτισης των πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο αρχικό μοντέλο για τα πάχη των στρωμάτων και τις αντίστοιχες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Συγκεκριμένα , για την ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων πρώτο βήμα αποτελεί η αρχική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών καμπυλών με βάση τις πρότυπες καμπύλες και έπειτα η αντιστροφή με το πρόγραμμα RESGRAPH. Κατά την διαδικασία αυτή σχεδιάζονται οι πειραματικές καμπύλες σε χαρτί διλογαριθμικό, έπειτα τα τμήματα που αντιπροσωπεύουν τα δύο στρώματα ταυτίζονται με μία από τις πρότυπες καμπύλες. Συνεπώς προκύπτει ένα αρχικό μοντέλο το οποίο και αντιστοιχεί σε ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις και πάχη των εν λόγω στρωμάτων. Αυτό είναι και το μοντέλο που χρησιμοποιείται στα προγράμματα αντιστροφής και δίνει το τελικό

μοντέλο. Στο σχήμα (4.6) αναπαριστώνται οι πρότυπες καμπύλες Schlumberger.



Two-layer master set of sounding curves for the Schlumberger array (adapted from Orellana and Mooney, 1966).

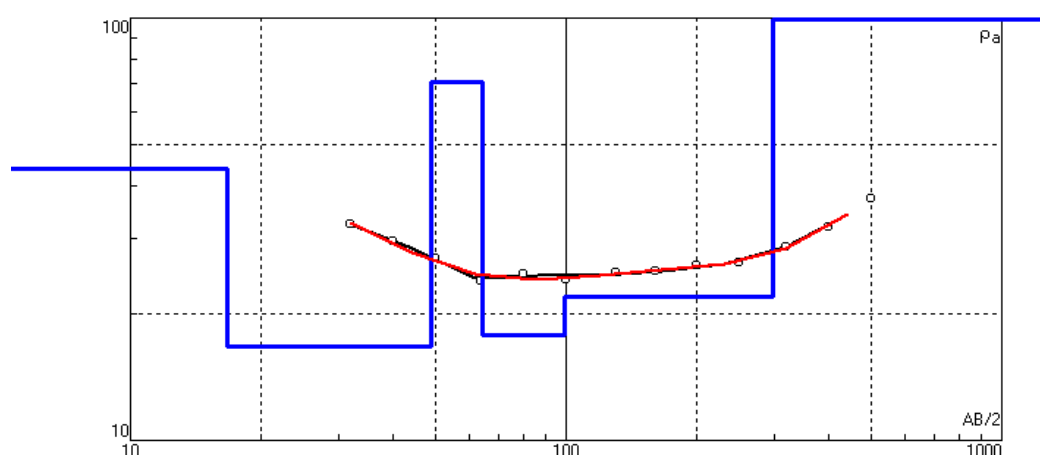
ΣΧΗΜΑ 4.6 : Πρότυπες καμπύλες Schlumberger

Σε κάθε βυθοσκόπηση παρουσιάζεται ο πίνακας όπου δίνονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για κάθε στρώμα που εντοπίζεται, το πάχος και το βάθος του (d). (Πίνακας 1)

N	ρ	h	d	Alt
1	43.86	16.74	16.74	-16.737
2	16.74	32.15	48.88	-48.883
3	70.48	15.24	64.12	-64.12
4	17.74	35.24	99.36	-99.363
5	21.82	199.7	299	-299.05
6	2000			

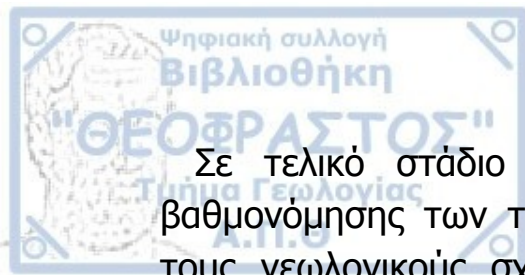
Πίνακας (1)

Για να γίνουν όμως πιο κατανοητά αυτά παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αντιστροφής δεδομένων στο σχήμα (4.7).



ΣΧΗΜΑ 4.7 : Κόκκινη καμπύλη-θεωρητική καμπύλη, Μπλέ γραμμή- μοντέλο ερμηνείας ,Μάυρη καμπύλη –πειραματική καμπύλη

Προκύπτει πάντοτε και κάποιο σφάλμα κατά την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Το σφάλμα αυτό ελαττώνεται όσο ταυτίζονται η πειραματική με την θεωρητική καμπύλη που προκύπτει από το μοντέλο ερμηνείας. Έτσι λοιπόν το μοντέλο αντικατοπτρίζει ακριβέστερα την γεωηλεκτρική στρωματογραφία της περιοχής.



Σε τελικό στάδιο της ερμηνείας και βάσει των στοιχείων βαθμονόμησης των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που αναμένεται να υπάρχουν στην περιοχή που μελετάται, γίνεται απόδοση των γεωηλεκτρικών σχηματισμών στους γεωλογικούς με στοιχεία των οποίων τα χαρακτηριστικά σχετίζονται με την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που τους αποδίδεται από την γεωφυσική έρευνα.

4.3 Γεωηλεκτρικά δεδομένα

Στην παρούσα εργασία τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από μια σειρά γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων που έγιναν στο νησί το 1982-1984 από το ΙΓΜΕ.

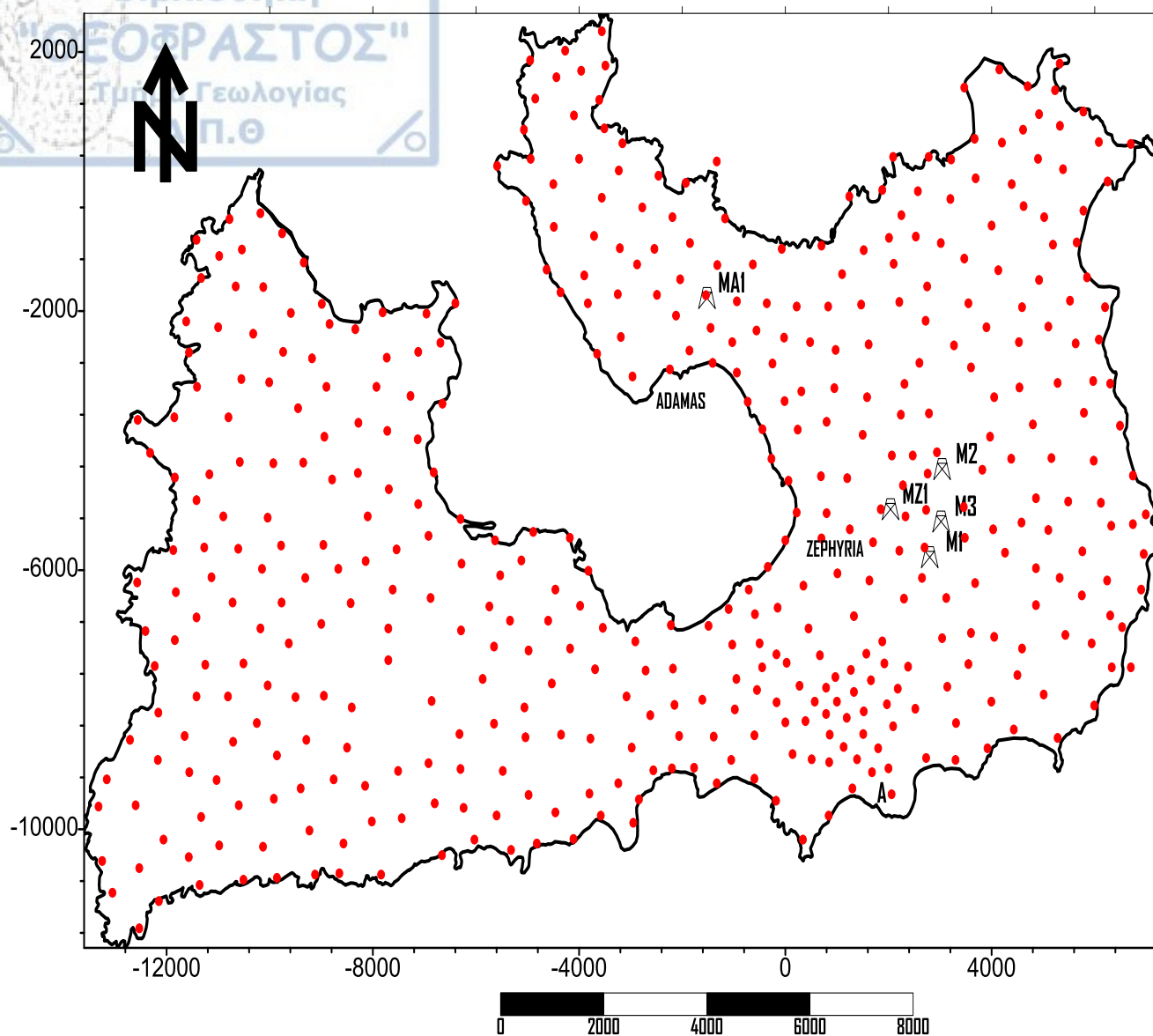
Συνολικά οι βυθοσκοπήσεις που επεξεργάστηκαν στην εργασία αυτή είναι 32 και καλύπτουν μεγάλη έκταση του νησιού. Σε παλιότερες έρευνες (Τσόκας, 1985) έχουν ομαδοποιηθεί σε 6 τομές, οι 5 από τις οποίες έχουν γενική κατεύθυνση Δ-Α ενώ μια (η T6) έχει διεύθυνση Ν-Β. Στην εργασία αυτή ακολουθήθηκε η ίδια ομαδοποίηση των βυθοσκοπήσεων σε τομές.

Για κάθε μια από τις τομές υπάρχει διάγραμμα με την κατανομή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων σε σχέση με το ανάπτυγμα της απόστασης ΑΒ των ηλεκτροδίων ρεύματος.

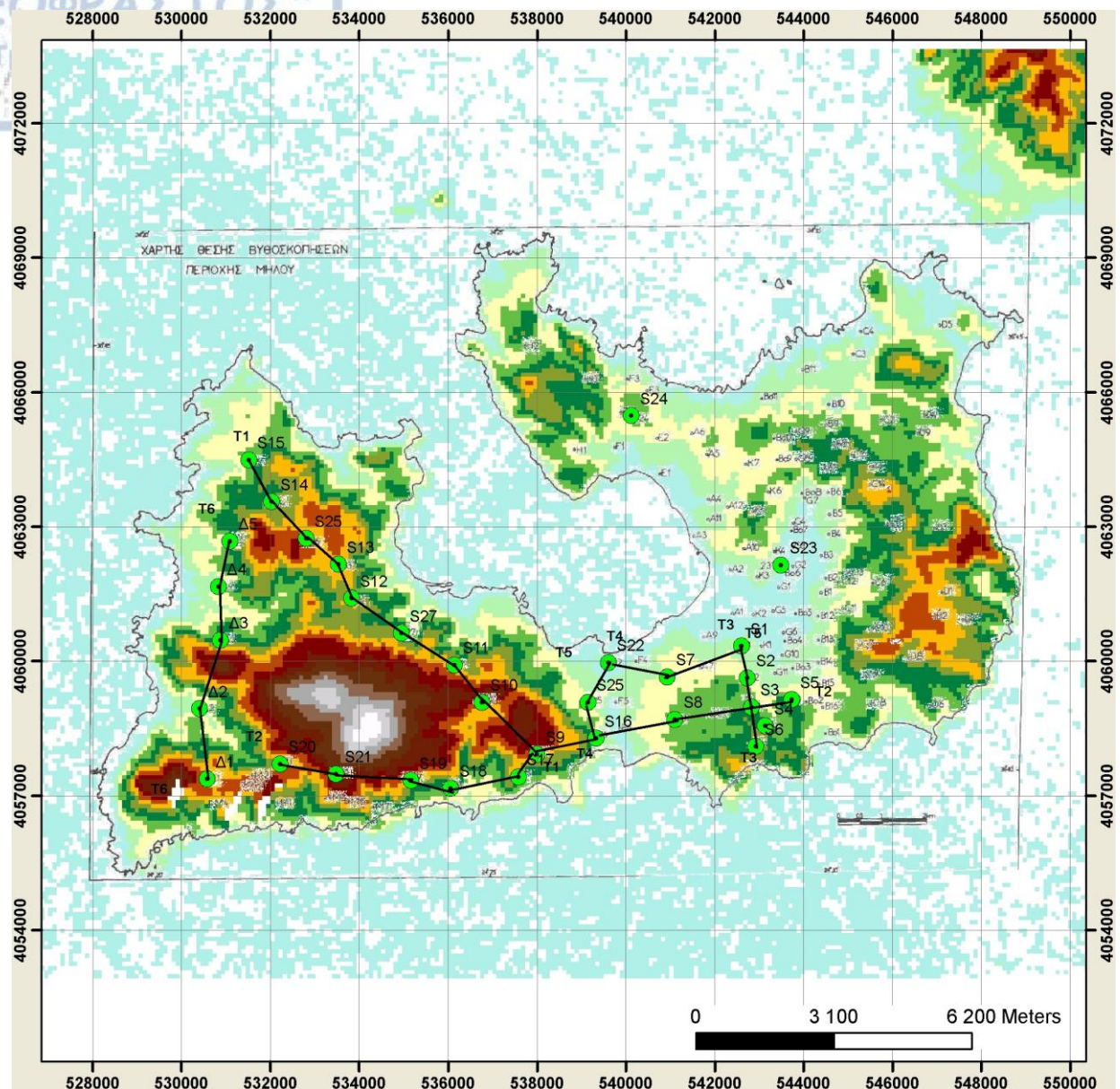
Εκτός από τα γεωφυσικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν και οι εικόνες που προέκυψαν από πέντε (5) γεωτρήσεις στο Β και ΒΑ τμήμα του νησιού οι οποίες δείχνουν την βασική, θα μπορούσαμε να πούμε, αλληλουχία των σχηματισμών και την θερμοβαθμίδα όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στο σχήμα 4.8 φαίνονται οι σταθμοί της γεωφυσικής διασκόπησης (γεωηλεκτρική και βαρυτομετρική) καθώς και οι θέσεις των γεωτρήσεων. Στις επόμενες παραγράφους δίνεται μια πιο αναλυτική περιγραφή της επεξεργασίας των δεδομένων.

Με την χρήση του προγράμματος ArcGis και με την βοήθεια του κ. Γ. Βαργεμέζη έγινε γεωαναφορά του γεωλογικού χάρτη της Μήλου καθώς επίσης τοποθετήθηκαν και τα σημεία των βυθοσκοπήσεων, με τις συντεταγμένες της κάθε μιας από αυτές. (Σχήμα 4.9, Προσαρμοσμένες οι τομές των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων σε τοπογραφικό χάρτη της Μήλου).



ΣΧΗΜΑ 4.8 Σταθμοί γεωφυσικής διασκόπησης (Βαρυτομετρικής και γεωηλεκτρικής)



ΣΧΗΜΑ 4.9 Τοπογραφικός χάρτης της Μήλου με προσαρμοσμένες τις τομές

4.3.1 Επεξεργασία δεδομένων

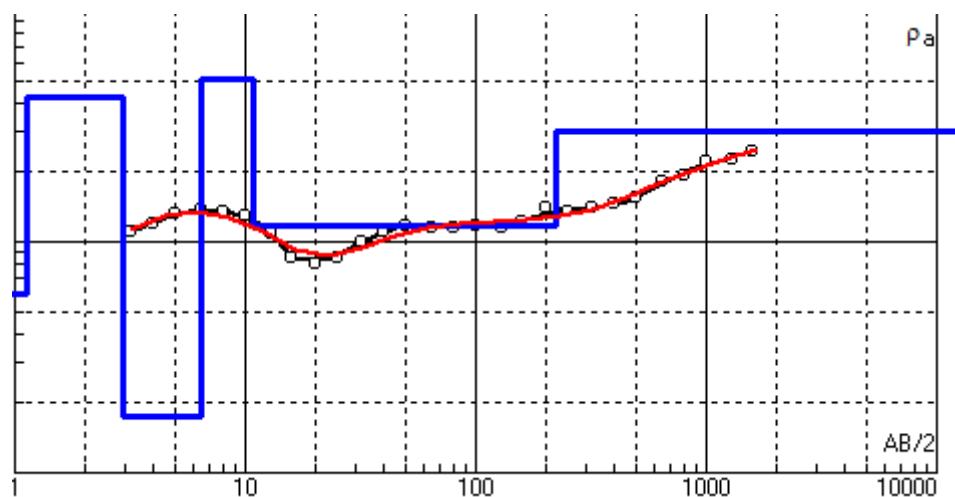
Αρχικά τα δεδομένα των βυθοσκοπήσεων, απόσταση AB/2 μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, οι μετρούμενες αντιστάσεις για κάθε απόσταση και η απόσταση MN μεταξύ των ηλεκτροδίων που μετρούν την διαφορά δυναμικού εισήχθησαν στο πρόγραμμα IPI2win και προέκυψαν πίνακες με τα δεδομένα όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα ως παράδειγμα (Πίνακας 2).

N	AB/2	MN	SP	V	I	K	Ro_a
1	2	2	-	-	-	-	178
2	4	2	-	-	-	-	174
3	5	2	-	-	-	-	168
4	6.4	2	-	-	-	-	182
5	8	2	-	-	-	-	199
6	10	2	-	-	-	-	223
7	13	2	-	-	-	-	286
8	16	2	-	-	-	-	324
9	20	2	-	-	-	-	372
10	25	2	-	-	-	-	415
11	32	2	-	-	-	-	420
12	40	2	-	-	-	-	344
13	50	2	-	-	-	-	263
14	64	2	-	-	-	-	214
15	80	2	-	-	-	-	178
16	100	2	-	-	-	-	145
17	100	20	-	-	-	-	157
18	130	20	-	-	-	-	95.3
19	160	20	-	-	-	-	65.7
20	200	20	-	-	-	-	28.4
21	250	20	-	-	-	-	6.74
22	320	20	-	-	-	-	2
23	320	80	-	-	-	-	2.1
24	400	80	-	-	-	-	2.1
25	400	200	-	-	-	-	1.86
26	500	200	-	-	-	-	0.81
27	640	200	-	-	-	-	1.12
28	800	200	-	-	-	-	1.88
29	1000	200	-	-	-	-	1.36

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Στη συνέχεια για κάθε μια από τις βυθοσκοπήσεις προέκυψε μια καμπύλη στην οποία έγινε αντιστροφή έτσι ώστε να προκύψουν οι τιμές των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων και να συνεχιστεί η ερμηνεία. Η μορφή της καμπύλης που προέκυψε φαίνεται στο σχήμα 4.10 για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος που

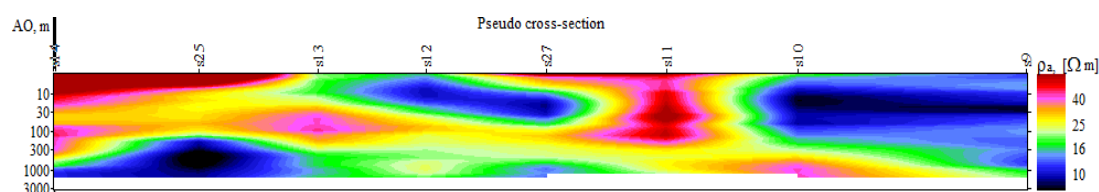
επεξεργάστηκαν τα δεδομένα. Στην εικόνα του παρακάτω σχήματος φαίνονται οι τρεις καμπύλες (θεωρητική, πρότυπη-πειραματική, καμπύλη μοντέλου ερμηνείας).



ΣΧΗΜΑ 4.10 Θεωρητική, πρότυπη-πειραματική και καμπύλη μοντέλου ερμηνείας

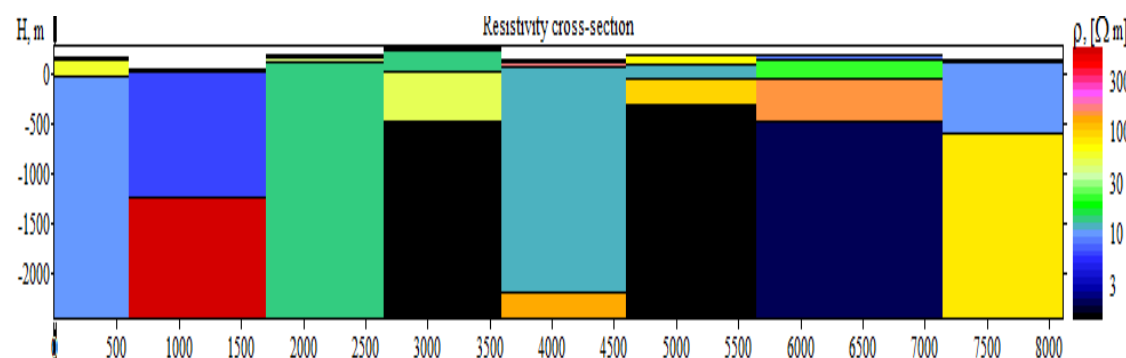
Σε κάποιες από τις καμπύλες χρειάστηκε να διορθωθούν μερικές μετρήσεις γιατί απέκλιναν σε μεγάλο βαθμό από την θεωρητική καμπύλη και το σφάλμα ήταν πολύ μεγάλο.

Μετά από την εισαγωγή των δεδομένων και την δημιουργία των καμπυλών οι αντίστοιχες βυθοσκοπήσεις κάθε τομής ομαδοποιήθηκαν στο ίδιο πρόγραμμα προσθέτοντας κάθε φορά την απόσταση μεταξύ δύο βυθοσκοπήσεων ανάλογα με την κλίμακα του χάρτη και το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται η κάθε μια. Οι εικόνες όμως που έδωσαν αυτές οι ομαδοποιημένες πλέον βυθοσκοπήσεις αντιστοιχούσαν στην κατανομή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όπως φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 4.11.



ΣΧΗΜΑ 4.11 Ψευδοτομή της κατανομής των φαινόμενων ε.η.α

Οι εικόνες αυτές όπως γίνεται σαφές, δεν παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες καθώς δεν αντιστοιχούν στην πραγματική κατανομή των αντιστάσεων αλλά στην κατανομή των φαινόμενων αντιστάσεων. Με την αντιστροφή όμως των δεδομένων που γίνεται αυτόματα στο IPI2win προέκυψαν και εικόνες στις οποίες φαίνεται η κατανομή των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων σε μορφή οριζόντιας στρωματογραφίας (Σχήμα 4.12).



ΣΧΗΜΑ 4.12 Αρχική μορφή της κατανομής της πραγματικής ε.η.α

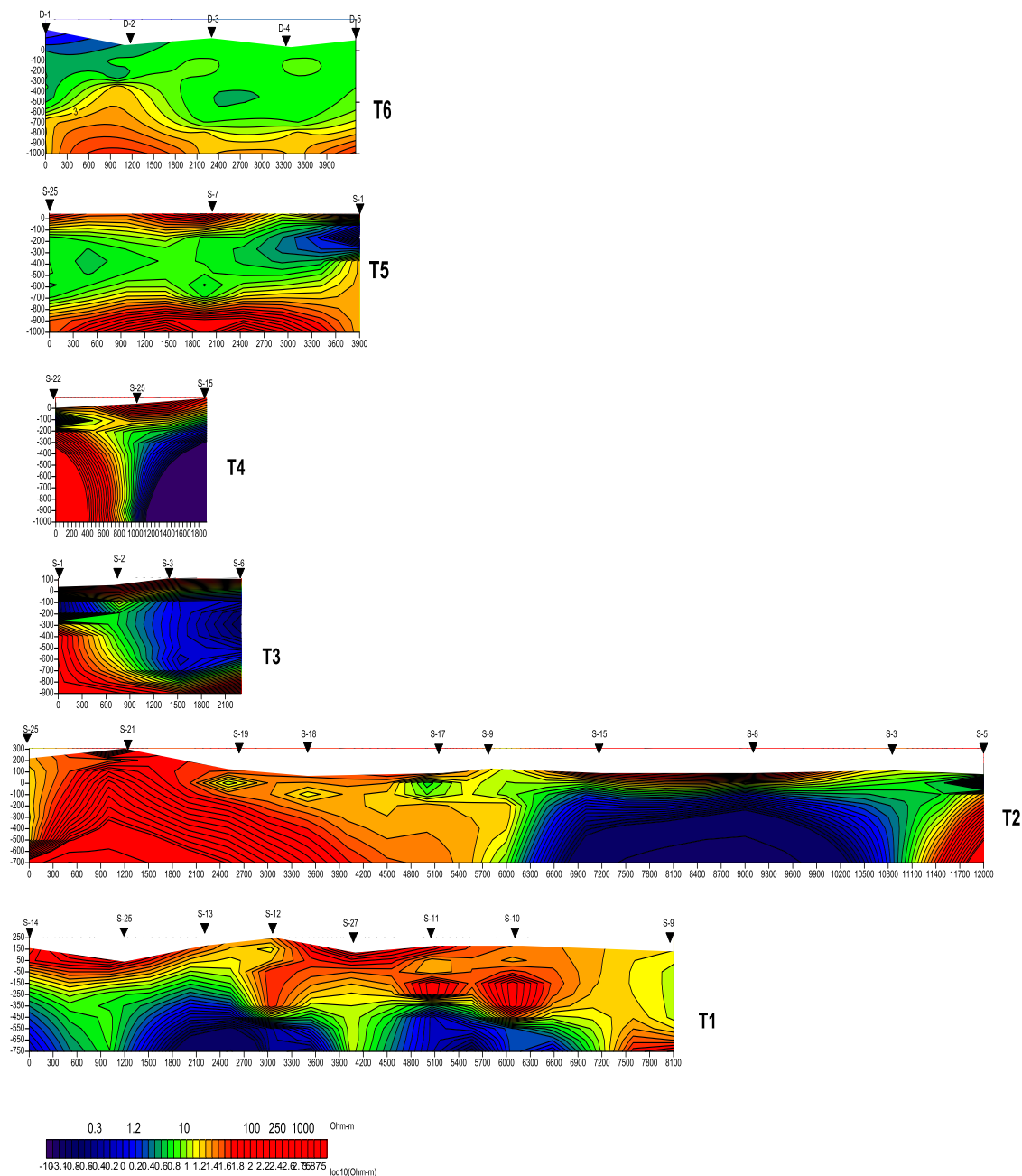
Πλέον, με την εξαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα SURFER, της οριζόντιας στρωματογραφίας των πραγματικών αντιστάσεων ειδικότερα, έγινε το πρώτο βήμα για την κατασκευή των τελικών τομών (βλ. Σχήμα 4.13)

Αφού πλέον υπήρχαν οι τομές του χάρτη και σε ηλεκτρονική μορφή ήταν εφικτό να δημιουργηθούν οριζόντιες τομές που απεικονίζουν την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την απόσταση των διαδοχικών βυθοσκοπήσεων κάθε τομής και φυσικά σε σχέση και με το υψόμετρο.

Η διαδικασία κατασκευής των οριζόντιων τομών έγινε με την χρήση του προγράμματος Surfer κάνοντας εισαγωγή των δεδομένων των τομών από το IPI2win, λόγω των μεγάλων διαφορών των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων, έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ο δεκαδικός λογάριθμος για τις τιμές των R_o έτσι ώστε οι τιμές να είναι στην ίδια κλίμακα και τα διαγράμματα που θα προκύψουν να είναι σαφή. Με άξονες επομένως, τον δεκαδικό λογάριθμο των αντιστάσεων, το υψόμετρο και την οριζόντια απόσταση μεταξύ των βυθοσκοπήσεων που συνιστούν κάθε τομή,

κατασκευάστηκαν χάρτες. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία των τομών, δηλαδή θέτοντας όριο στο βάθος τα 1000μ ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα και προσαρμογή της τομής στο αντίστοιχο τοπογραφικό ανάγλυφο με προσθήκη επιπέδου που ορίζει το ανάγλυφο σε μορφή αρχείου *.b1n , αυτές παρουσιάζονται παρακάτω (σχ.4.13) στην τελική τους μορφή και με την ανάλογη περιγραφή.

ΣΧΗΜΑ 4.13 Απεικόνιση των κατανομών της $\text{Log}_{10}R_o$ για κάθε μια τομή



Στο διπλανό σχήμα λοιπόν φαίνονται οι οριζόντιες κατανομές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με το υψόμετρο και την απόσταση AB. Επίσης, με μαύρο βέλος σημειώνονται οι θέσεις κάθε βυθοσκόπησης (S-x) και στο πλάι αναγράφεται το όνομα της κάθε τομής.

Για κάθε τομή το μέγιστο βάθος ορίστηκε μέχρι τα 1000 μέτρα ενώ η οριζόντια απόσταση είναι αντιστοιχη του μήκους της τομής στο ύπαιθρο όπως υπολογίστηκε με βάση την κλίμακα του χάρτη.

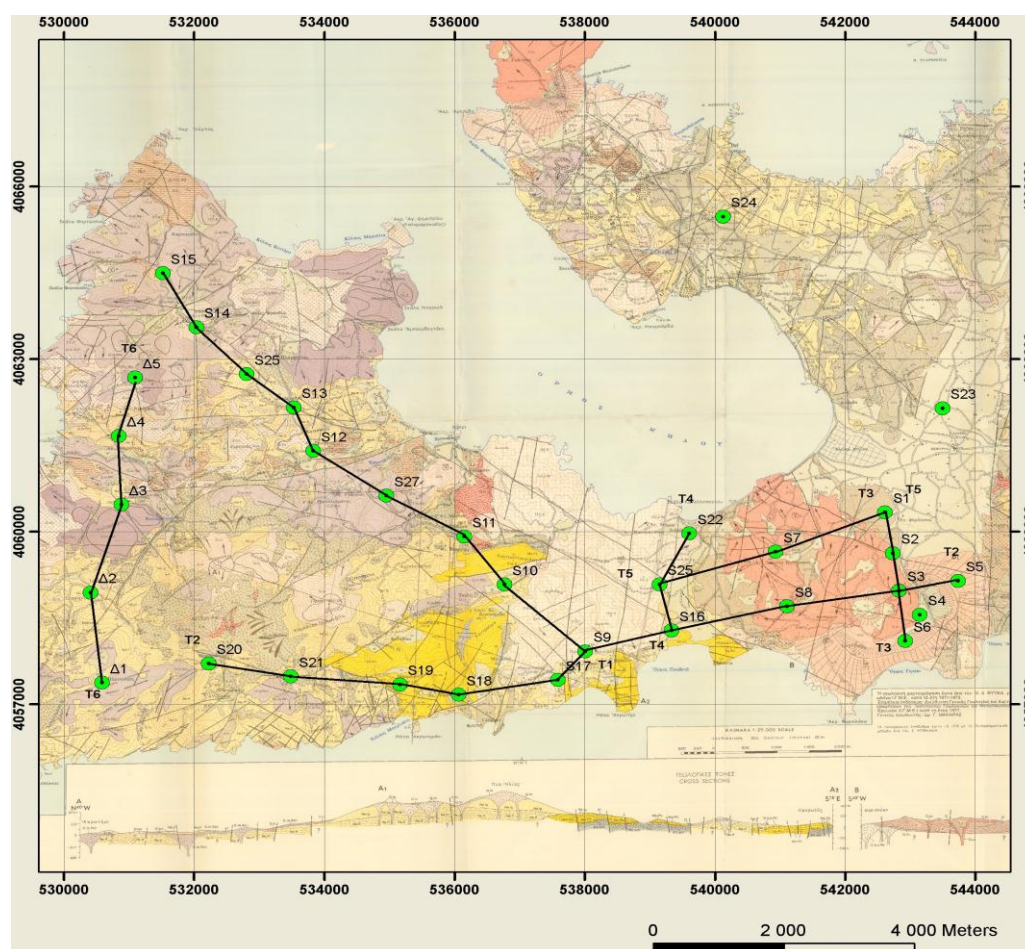
Οι αντιστάσεις σε σχέση με την χρωματική κλίμακα όπως φαίνεται, κατανέμονται ως εξής : κόκκινο= πολύ υψηλές αντιστάσεις και μωβ= πολύ χαμηλές αντιστάσεις. Με τους ενδιάμεσους τόνους να απεικονίζουν τις ενδιάμεσες τιμές.

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, για λόγους σαφήνειας χρησιμοποιήθηκε ο δεκαδικός λογάριθμος για κάθε τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και στην χρωματική κλίμακα φαίνεται η αντιστοιχία με τις πραγματικές τιμές. Σε αυτό το σημείο θα ήταν βοηθητικό να αντιστοιχηθούν οι σχηματισμοί του νησιού κατά προσέγγιση και όχι πολύ αναλυτικά, με τις αποχρώσεις της χρωματικής κλίμακας που χρησιμοποιείται. Άρα, με κόκκινο χρώμα αντικατοπτρίζεται το υπόβαθρο της περιοχής, δηλαδή οι πολυπτυχωμένοι μεταμορφωμένοι σχηματισμοί Μεσοζωικής ηλικίας. Με κίτρινες αποχρώσεις απεικονίζονται οι νεογενείς σχηματισμοί που αποτελούνται από επικλυσιγενή ιζήματα τόφφους, ασβεστόλιθους. Με πράσινα και σε όλη την κλίμακα του μπλέ φαίνονται οι σχηματισμοί που διαπερνώνται και από τα γεωθερμικά ρευστά και είναι όλοι οι σχηματισμοί νεώτερης ηλικίας (Τεταρτογενούς) αλλά και κάποιοι από τους νεογενείς σχηματισμούς οι οποίοι υπέστησαν την δράση της έντονης τεκτονικής.

4.3.2 Ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων και Συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη στη Μήλο

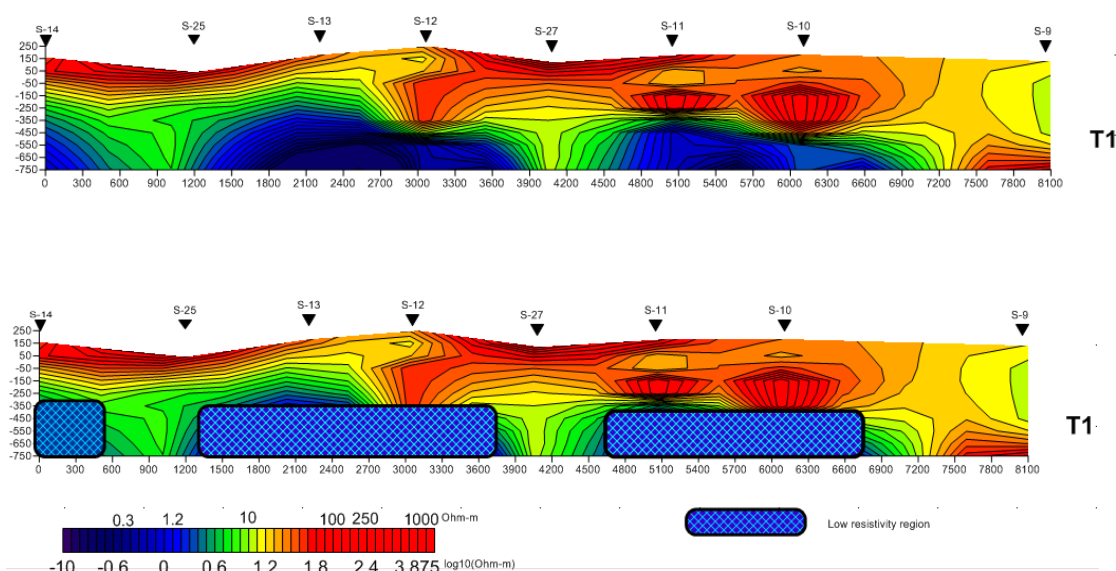
Στην παράγραφο αυτή θα σχολιαστούν και θα ερμηνευτούν τα διαγράμματα που προέκυψαν και θα βγουν συμπεράσματα όσον αφορά στο γεωθερμικό πεδίο της Μήλου, που μπορεί να οφείλεται αυτό βασιζόμενοι στη γεωλογία της περιοχής και όλα αυτά μέσα από τις εικόνες που δίνει η γεωφυσική διασκόπηση.

Αρχικά δίνεται παρακάτω ο γεωλογικός χάρτης της Μήλου με προσαρμοσμένες σε αυτόν τις θέσεις των τομών έτσι ώστε να είναι εύκολο στον αναγνώστη να αντιληφθεί την θέση της κάθε τομής (σχ.4.14).



ΣΧΗΜΑ 4.14 Ο γεωλογικός χάρτης της Μήλου με τοποθετημένες τις τομές

Τομή 1 (T1), η διεύθυνσή της είναι ΒΔ και περιλαμβάνει τις βυθοσκοπήσεις S-14, S-25, S-13, S-12, S-27, S-11, S-10 και S-9. Εκτείνεται από τα 0m ως τα 8100m και το μέγιστο υψόμετρο όπου έγινε βυθοσκόπηση είναι στα 250m. Σε αυτήν την τομή παρατηρούνται δύο (2) μεγάλες περιοχές χαμηλών αντιστάσεων και μια αρκετά μικρότερη από τα 0 ως τα 400 περίπου μέτρα με βάθος εμφάνισης στα 350m ως τα 750m. Από τον χάρτη παρατηρούμε πως πιθανό αίτιο της εμφάνισης χαμηλών αντιστάσεων είναι η ύπαρξη ενός μεγάλου ρήγματος που διαπερνά αυτό το σημείο της τομής και προφανώς λειτουργεί ως δίοδος των θερμών ρευστών. Στο σχήμα 4.15 απεικονίζεται η T1.



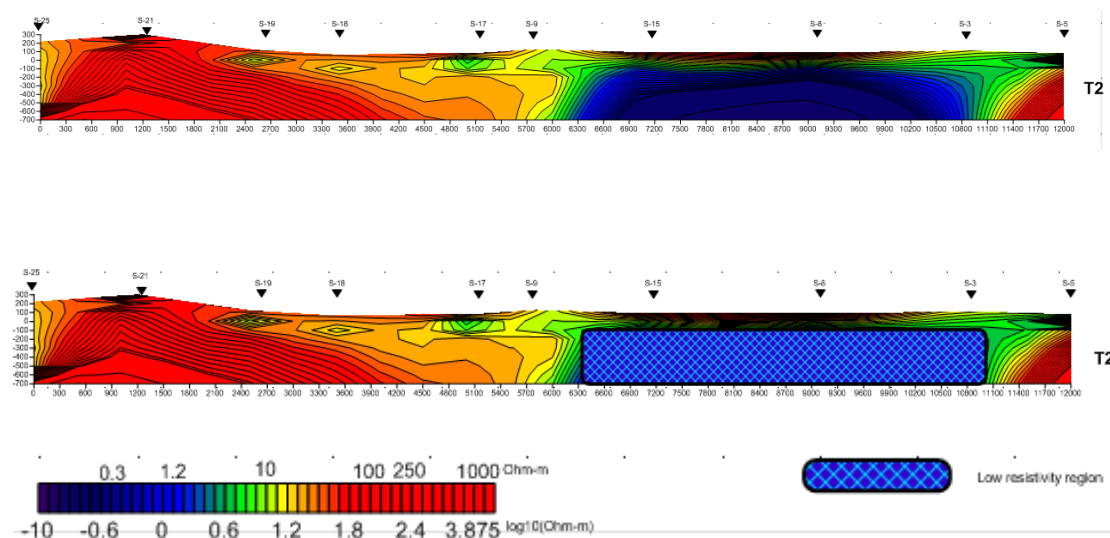
ΣΧΗΜΑ 4.15 Η T1 στην αρχική της μορφή και με τονισμένες τις περιοχές ενδιαφέροντος

Η πρώτη μεγάλη περιοχή χαμηλών αντιστάσεων ξεκινά από τα 1200m ως τα 3800m και από το βάθος των 250m ως τα 450m. Στο κέντρο αυτής της περιοχής πυκνώνουν οι χαμηλές αντιστάσεις και αυτό δικαιολογείται από την ύπαρξη ενός ρήγματος με ΒΒΑ διεύθυνση που υπάρχει στο σημείο αυτό της τομής.

Στην δεύτερη περιοχή που εκτείνεται από τα 4600m ως τα 6900m οι αντιστάσεις είναι λίγο υψηλότερες από πριν, το βάθος εμφάνισης του πεδίου υψηλής θερμικής ανωμαλίας είναι περίπου 350μ. και όπως διακρίνεται στον χάρτη ένα μεγάλο ρήγμα δικαιολογεί αυτήν την εικόνα.

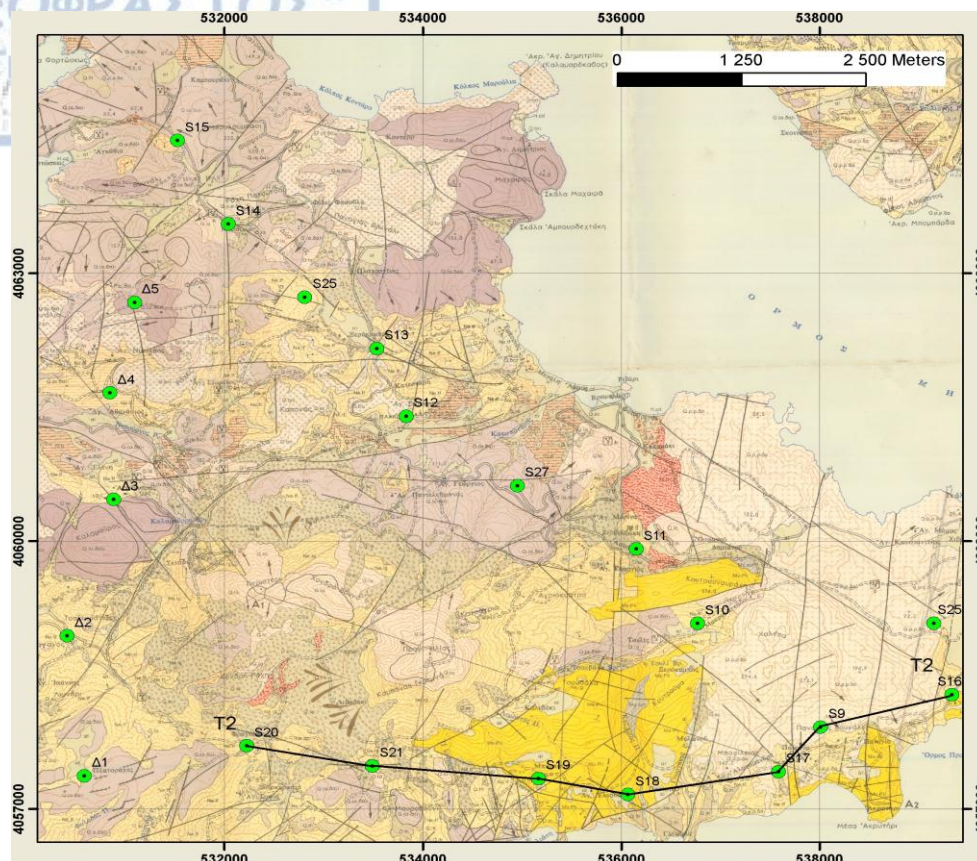
Γενικά τα πετρώματα είναι ανδεσιτικές, δακτιτικές, ρυοδακτιτικές λάβες, πυροκλαστικές αποθέσεις και πυροκλαστικά ρεύματα, ιγκνιμβρίτες.

Τομή 2 (T2), περιέχει τις βυθοσκοπήσεις S-20, S-21, S-19, S-18, S-17, S-9, S-15, S-8, S-3 και S-5. Έχει έκταση από τα 0μ. ως τα 12000μ. και από το υψόμετρο των 300μ. φτάνει ως το βάθος των 700 μέτρων. Όπως φαίνεται στον χάρτη η τομή αυτή βρίσκεται στο νότιο τμήμα του νησιού και έχει διεύθυνση Δ-Α. Στο σχήμα 4.16 απεικονίζεται η T2.



ΣΧΗΜΑ 4.16 Η T2 στην αρχική της μορφή και με τονισμένες τις περιοχές ενδιαφέροντος

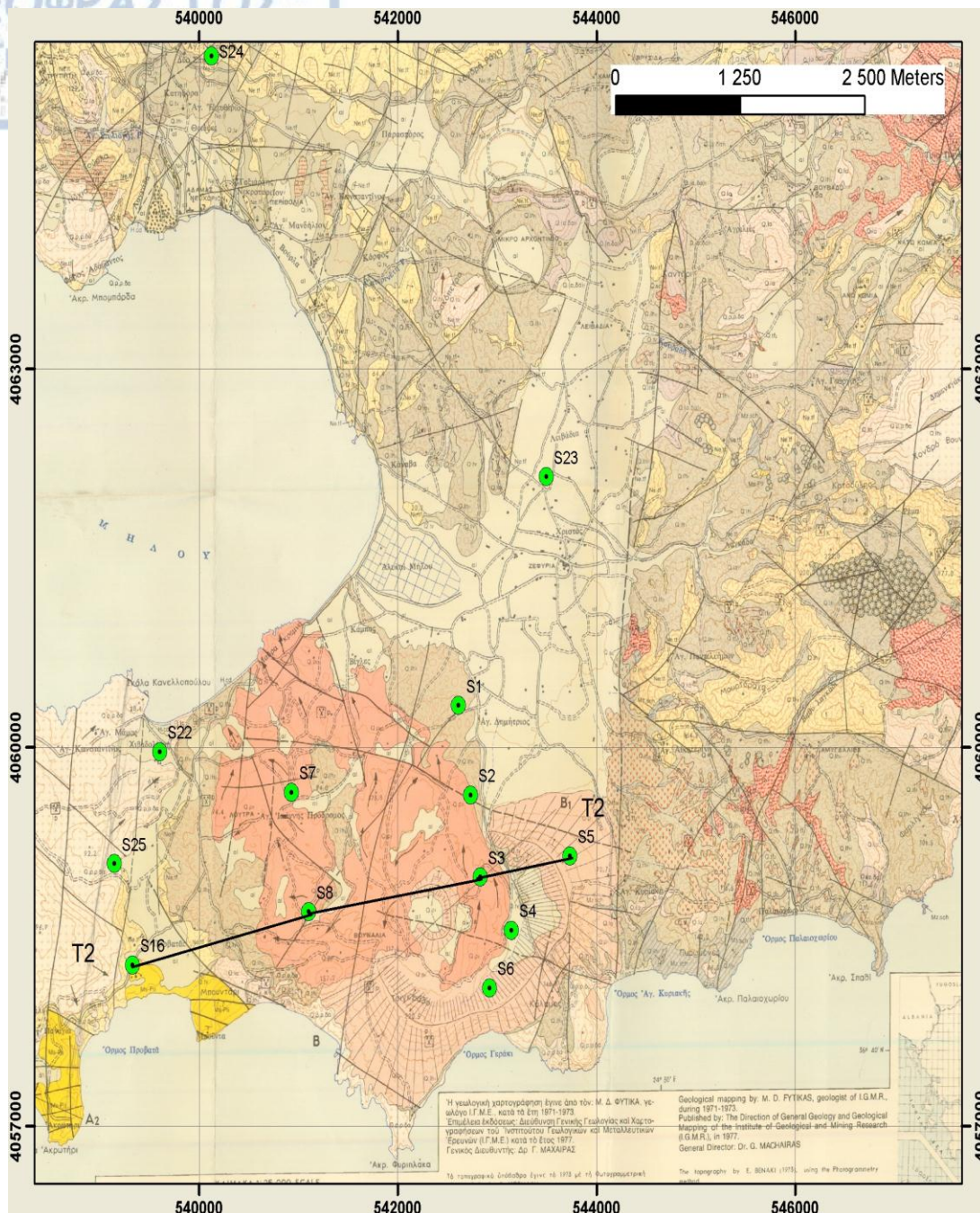
Αξιοσημείωτο σε αυτήν την τομή είναι η εκτενής εμφάνιση του υποβάθρου από τα 0μ. ως τα 4200μ. ("κόκκινη" περιοχή) το οποίο κυριαρχεί στο πρώτο κομμάτι της T2. (Σχ.4.17).



ΣΧΗΜΑ 4.17 Η T2 στο τμήμα της όπου καταγραφονται υψηλές ε.η.α (υπόβαθρο)

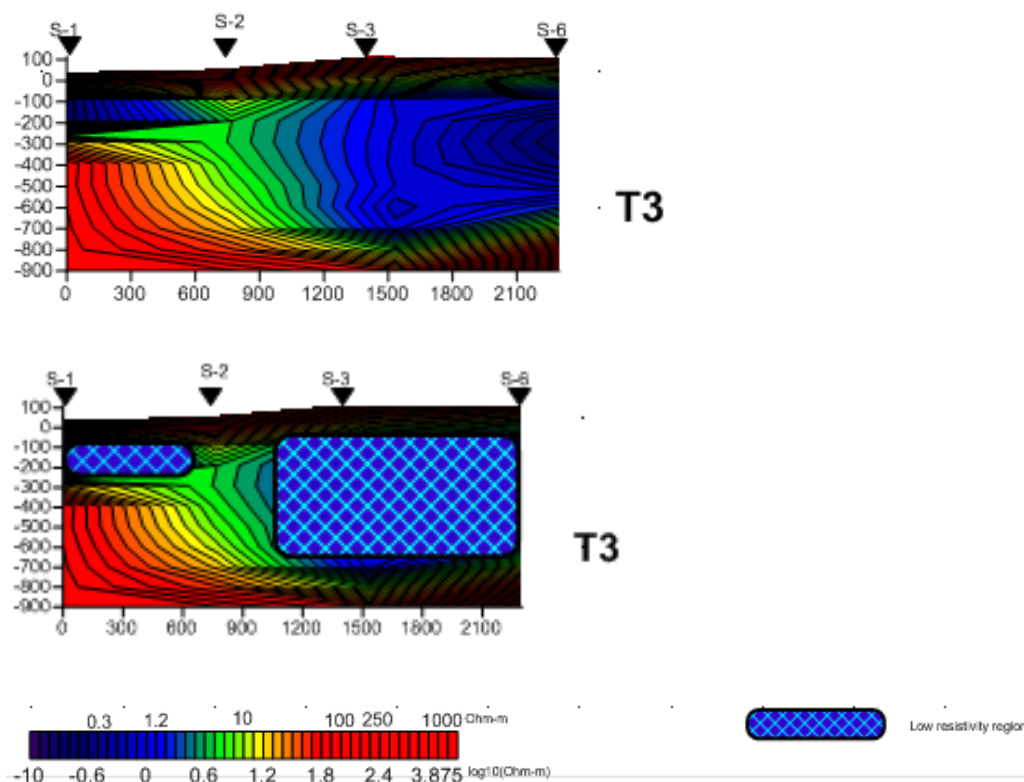
Ενώ στη συνέχεια βλέπουμε την αλλαγή στις αντιστάσεις σε πολύ χαμηλές, που απεικονίζουν την ύπαρξη υψηλής θερμικής ανωμαλίας. Η περιοχή αυτή ξεκινά από τα 6300μ. και φτάνει περίπου ως τα 10900μ. με βάθος 700μ. και πιθανώς δείχνει έναν ταμιευτήρα γεωθερμικών ρευστών.

Και σε αυτή την περίπτωση οι χαμηλές αντιστάσεις και συνεπώς το γεωθερμικό πεδίο οφείλεται στη έντονη τεκτονική του νησιού. Η λιθολογία εδώ συνιστάται κυρίως από λάβες ενδιάμεσης ως βασικής σύστασης και από πράσινο λαχάρ. Στον γεωλογικό χάρτη (σχ.4.18) φαίνεται το τμήμα της τομής 2 με τις χαμηλότερες αντιστάσεις.



ΣΧΗΜΑ 4.18 Η T2 στο τμήμα της με τις πολύ χαμηλές ε.η.α

Τομή 3 (T3) η τομή αυτή έχει διεύθυνση B-N και αποτελείται από τις βυθοσκοπήσεις S-1, S-2, S-3 και S-6. Το μήκος της φτάνει τα 2400μ. και με βάθος 900μ. Στο σχήμα 4.19 απεικονίζεται η τομή αυτή.



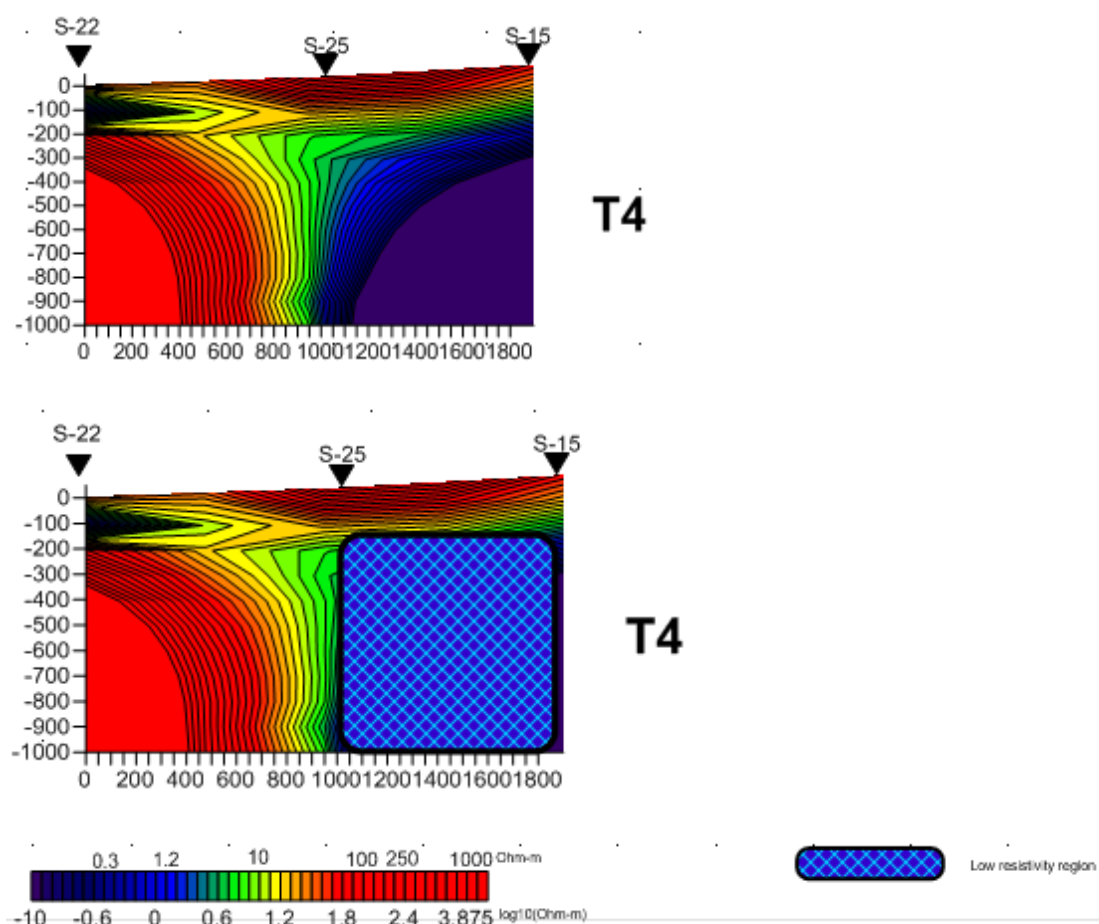
ΣΧΗΜΑ 4.19 Τομή T3 στην αρχική της μορφή και με τονισμένες τις περιοχές ενδιαφέροντος

Διακρίνεται στην τομή αυτή μια πρώτη περιοχή με χαμηλές αντιστάσεις στα 0-700μ. και από το βάθος των 70μ. ως το βάθος των 240μ. Ο λόγος που καταγράφονται χαμηλές αντιστάσεις είναι για ακόμη μια φορά η τεκτονική της περιοχής αλλά και οι μαγματικές διεισδύσεις που λαμβάνουν χώρα.

Η δεύτερη περιοχή χαμηλών αντιστάσεων ξεκινά από τα 1000μ και φτάνει ως και τα 2400μ. και αποτελείται από ένα δίκτυο πάρα πολύ χαμηλών αντιστάσεων, πιθανώς λόγω της εντονότερης παρουσίας των παραπάνω φαινομένων.

Τομή 4 (T4), αυτή αποτελείται από τις βυθοσκοπήσεις S-22, S-25 και S-15. Το μήκος της φτάνει τα 200μ. και το βάθος βυθοσκόπησης τα 1000μ. Η τομή αυτή έχει BBA-N διεύθυνση και βρίσκεται περίπου στο κεντρικό τμήμα του νησιού.

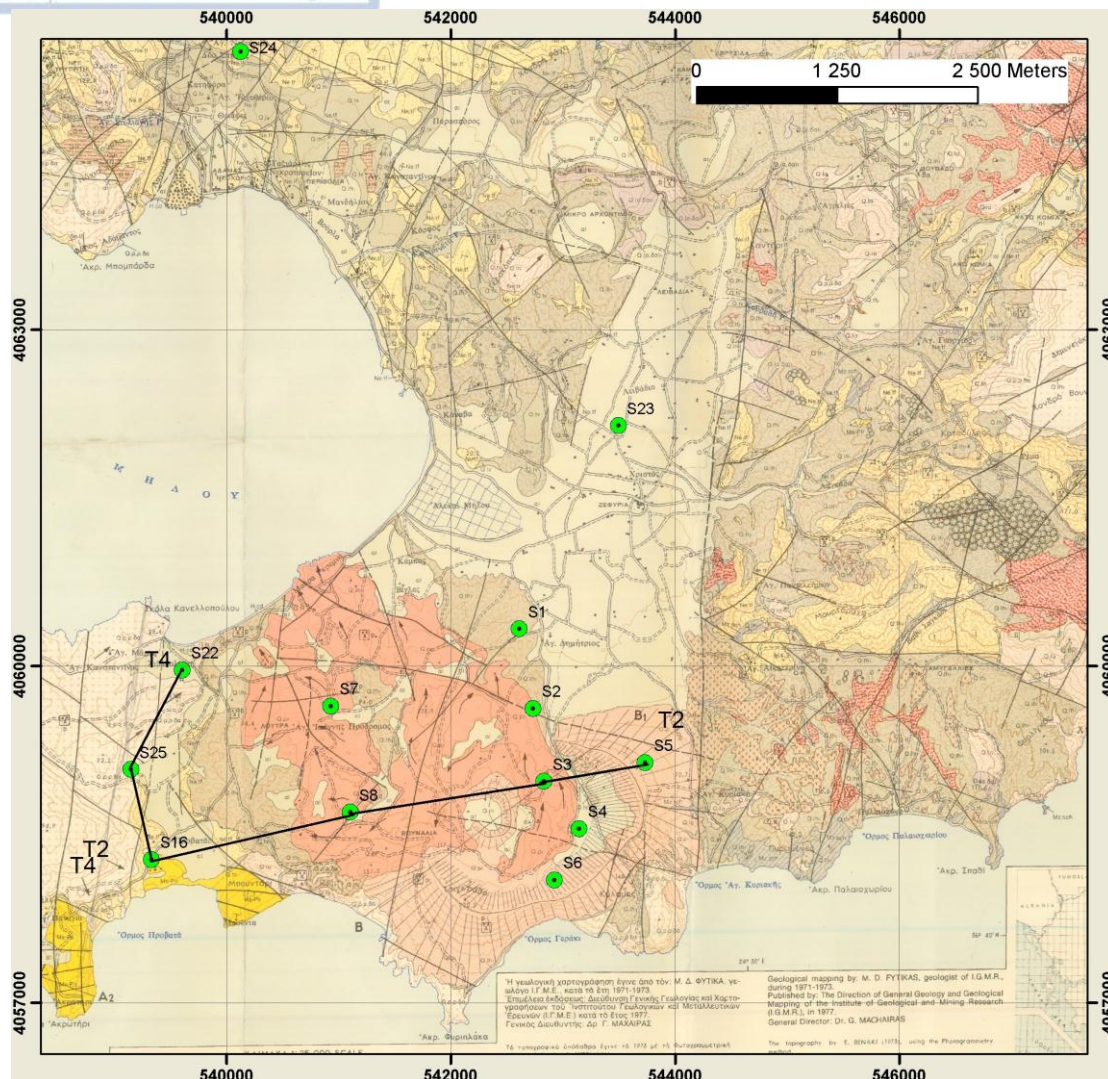
Εδώ παρατηρούνται 2 περιοχές με χαμηλές αντιστάσεις με την πρώτη από αυτές να εμφανίζεται στα 0-500μ. και από το βάθος των 30μ. ως το βάθος των 200μ. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο σχήμα 4.20.



ΣΧΗΜΑ 4.20 Η T4 στην αρχική της μορφή και με τονισμένες τις περιοχές ενδιαφέροντος

Παρατηρώντας και τον γεωλογικό χάρτη η υψηλή θερμική ανωμαλία οφείλεται σε ρήγματα B-N και ΒΔ-ΝΑ που βρίσκονται σε στρώματα από λάβες ενδιάμεσης ως βασικής σύστασης. Η δεύτερη περιοχή χαμηλών αντιστάσεων βρίσκεται μεταξύ των 1000-2000μ. της τομής και σε βάθος 200-1000μ. Μπορεί να διακριθεί από το σχήμα 4.20 πως στο κέντρο της περιοχής αυτής παρατηρούνται ακόμα πιο χαμηλές αντιστάσεις και πιθανόν αυτό να οφείλεται στη αλλαγή της σύστασης των πετρωμάτων και στην

εντονότερη τεκτονική της περιοχής. Δίνεται το τμήμα του χάρτη όπου βρίσκεται η τομή 4 (ΣΧ.4.21)

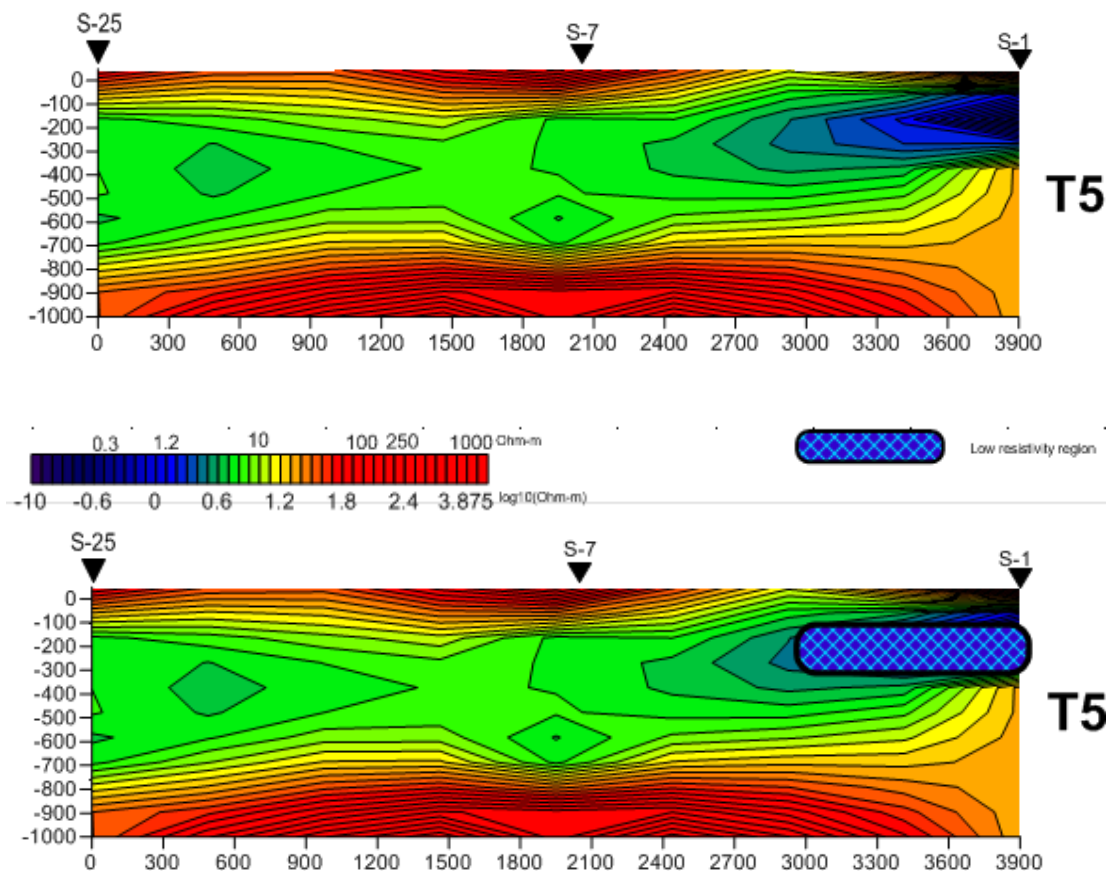


ΣΧΗΜΑ 4.21 Η T4 τομή στον γεωλογικό χάρτη

Τομή 5 (T5) , συνιστάται από τις βυθοσκοπήσεις S-25, S-7, S-1 και έχει ΔΔΝ-ΑΑΒ διεύθυνση. Ξεκινά σχεδόν από το κέντρο του νησιού και κατευθύνεται ανατολικά. Το συνολικό της μήκος είναι 3900μ. και η διασκόπηση έδωσε στοιχεία μέχρι το βάθος των 1000μ.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.22 οι περιοχές με χαμηλές αντιστάσεις είναι σαφώς λιγότερες από ότι στις προηγούμενες τομές με μια μόνο μικρή περιοχή η οποία διακρίνεται από τα 3600μ. μέχρι και τα 3900μ. Οι χαμηλές αυτές αντιστάσεις

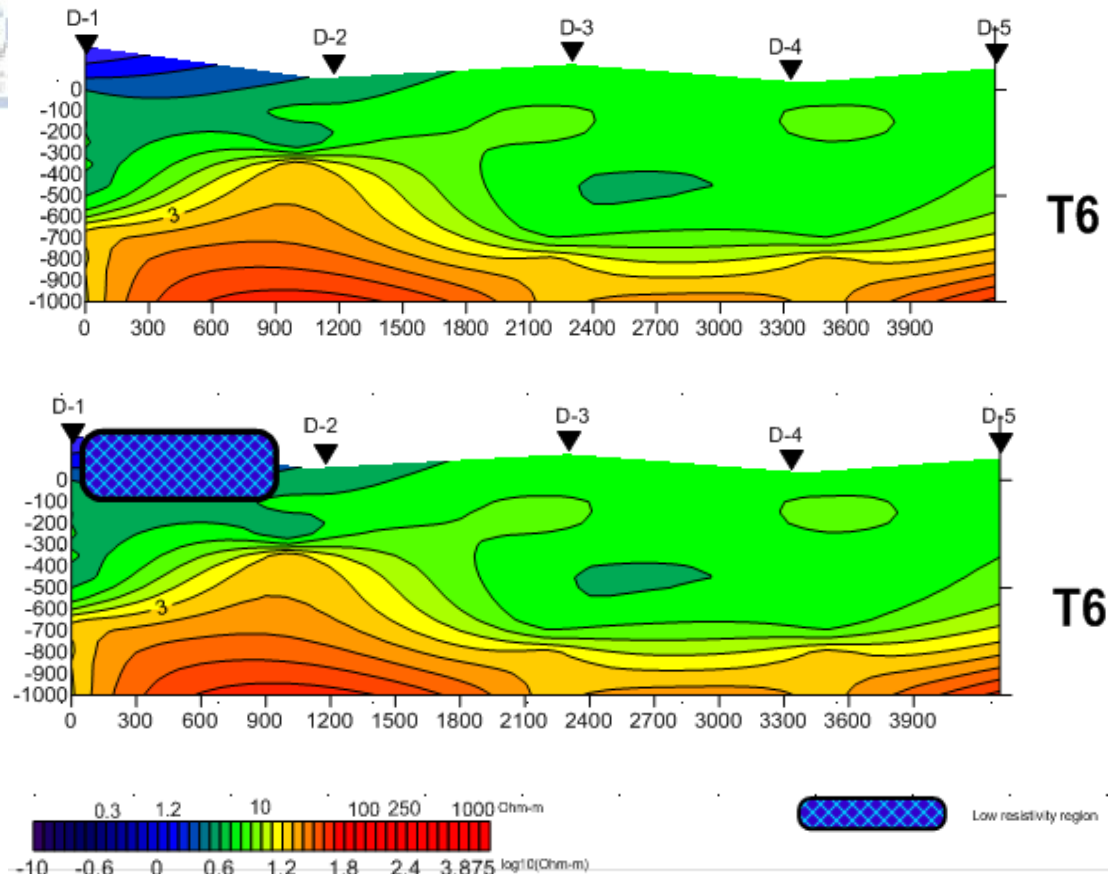
φαίνονται να ξεκινούν από το βάθος των 100μ. και να φτάνουν ως το βάθος των 300μ.



ΣΧΗΜΑ 4.22 Η T5 στην αρχική της μορφή και με τονισμένες τις περιοχές ενδιαφέροντος

Συγκρίνοντας την εικόνα που δίνει η τομή αυτή με τον γεωλογικό χάρτη συμπεραίνουμε ότι η περιοχή χαμηλών αντιστάσεων και άρα υψηλής θερμικής ανωμαλίας οφείλεται σε ένα μεγάλο ρήγμα BBA-NNΔ διεύθυνσης που φαίνεται να διαπερνά την τομή στο σημείο μεταξύ των βυθοσκοπήσεων S-7 και S-1. Τα πετρώματα στο σημείο αυτό είναι διάφορα λαχάρ μικρού πάχους και πρόσφατες ρυολιθικές λάβες.

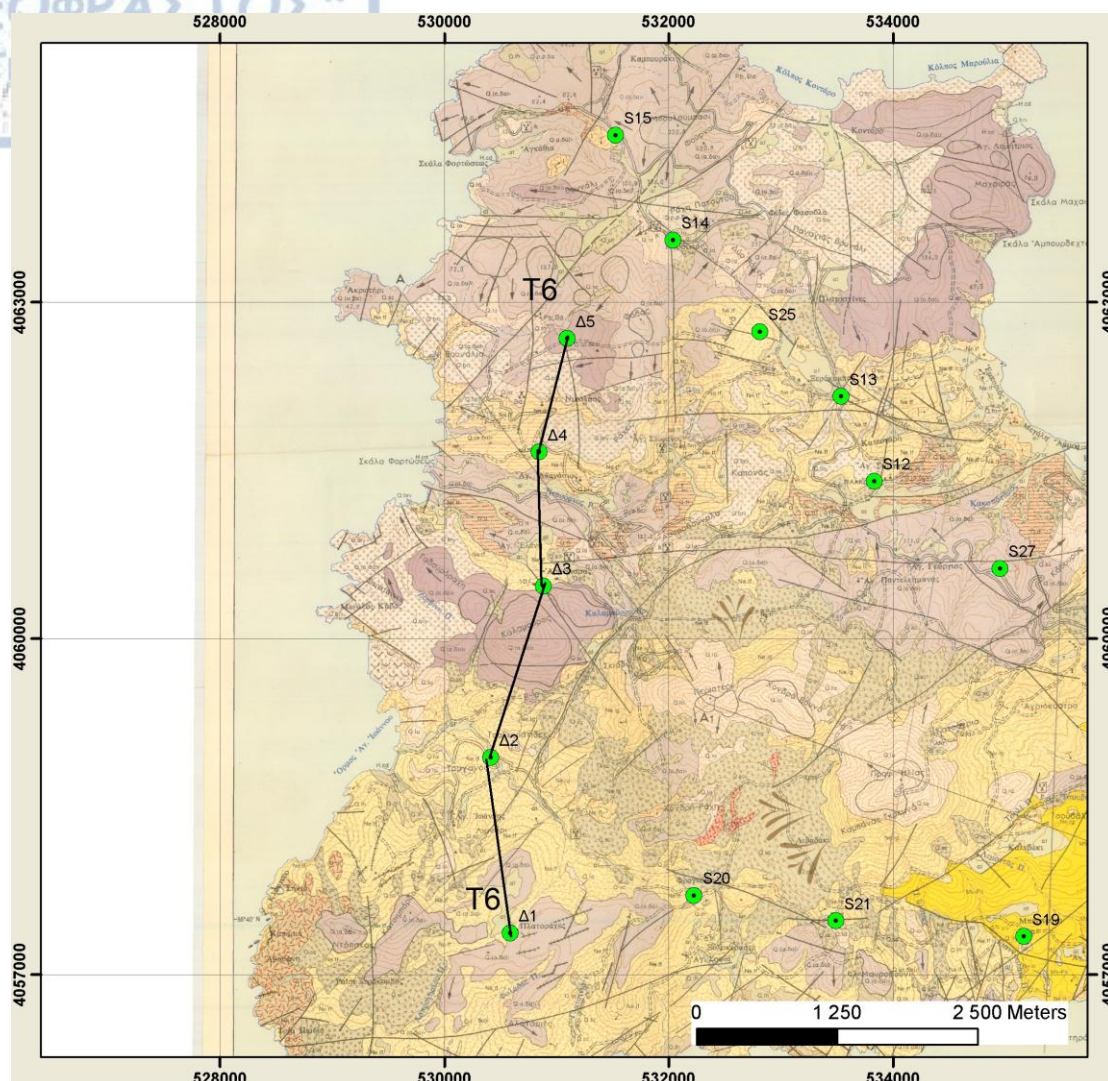
Τομή 6 (T6), αυτή βρίσκεται στο δυτικό μέρος του νησιού και έχει διεύθυνση N-B. Αποτελείται από τις βυθοσκοπήσεις d1, d2, d3, d4, d5 και στην ουσία δεν παρουσιάζει κάποιο ενδιαφέρον όσον αφορά την ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου, λόγω του ότι δεν βρέθηκαν καθοριστικά χαμηλές αντιστάσεις. Αυτό γίνεται κατανοητό παρατηρώντας και το σχήμα 4.23.



ΣΧΗΜΑ 4.23 Η T6 στην αρχική της μορφή και με τονισμένες τις περιοχές ενδιαφέροντος

Η τομή αυτή έχει έκταση 4200μ. και η εικόνα των αντιστάσεων φτάνει ως τα 1000μ. Μια περιοχή με αντιστάσεις που κυμαίνονται από 1 ως και 4 περίπου Ω-m διακρίνεται από τα 0 ως και τα 1000μ. με σχετικά μικρό βάθος περίπου ως τα 60μ. Οι χαμηλές αυτές τιμές της αντίστασης προφανώς δικαιολογούνται από την ύπαρξη στο σημείο αυτό ακριβώς μεταξύ των βυθοσκοπήσεων d1 και d2 εξαλλοιωμένων υδροθερμικά ηφαιστιτών. Η υδροθερμική εξαλλοίωση, όπως γνωρίζουμε, οφείλεται στην κυκλοφορία των υψηλότερης αλμυρότητας ρευστών σε μικρά σχετικά βάθη και την μετασώμπτωση -αντικατάσταση των στοιχείων των ορυκτών από άλλα που αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Δίνεται ο γεωλογικός χάρτης της Μήλου στο σημείο που είναι η τομή 6 για να φανούν καλύτερα οι σχηματισμοί που αναφέρονται.(Σχ.4.24)



ΣΧΗΜΑ 4.24 Η T6 τομή στον γεωλογικό χάρτη

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι το κυρίως γεωθερμικό πεδίο εμφανίζεται στην ανατολική κατά κύριο λόγο πλευρά του νησιού και λιγότερο στην δυτική με βάση την κατανομή των αντιστάσεων όπως φαίνονται στις 6 τομές. Εκτός από την έντονη τεκτονική του νησιού που ευνοεί την άνοδο μαγματικών υλικών και τελικά την ανάπτυξη θερμικής ανωμαλίας, στο ανατολικό τμήμα του νησιού σημαντικό ρόλο έχουν και τα ηφαιστειακά υλικά, που έχουν καλύψει το υπόβαθρο και παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση, στην εμφάνιση του γεωθερμικού πεδίου.

5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΟΨΗ

Στην εργασία αυτή στόχος ήταν να εξαχθούν συμπεράσματα για την γεωθερμία της Μήλου με την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν παλαιότερα.

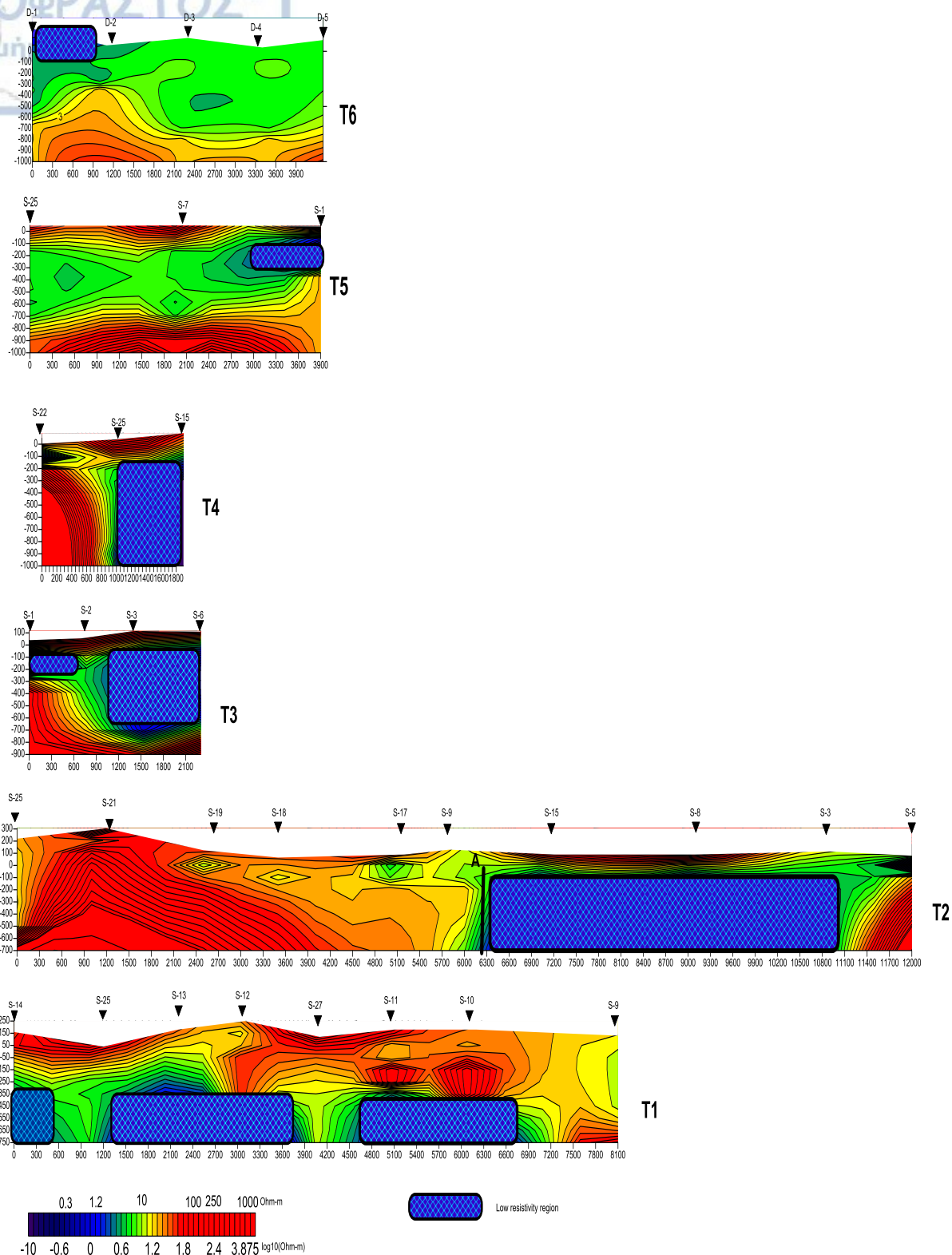
Λαμβάνοντας υπόψιν τις εικόνες που έδωσε η κατανομή των πραγματικών ηλεκτρικών αντιστάσεων σε σχέση με την απόσταση AB μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος γίνεται κατανοητό πως το μεγαλύτερο γεωθερμικό ενδιαφέρον βρίσκεται στο Ανατολικό και Κεντρικό τμήμα του νησιού. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με την γεωλογία αυτού του τμήματος του νησιού αφού παρατηρούμε στον γεωλογικό χάρτη πως, εκτός από την έντονη τεκτονική που διέπει όλο το νησί, υπάρχουν πολυάριθμοι μικροί κρατήρες φρεατικών εκρήξεων καθώς επίσης και υδροθερμικά εξαλλοιωμένοι ηφαιστίτες. Ένα άλλο πολύ σημαντικό στοιχείο είναι ότι στην ανατολική πλευρά του νησιού βρίσκονται και δύο μεγάλοι κρατήρες φρεατικών εκρήξεων που φαίνεται να δημιουργούν την υψηλή θερμική ανωμαλία που φαίνεται με ιδιαίτερα χαμηλές αντιστάσεις στην τομή 2 (T2). Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξης γεωθερμικού πεδίου και αύξησης της γεωθερμικής βαθμίδας σε μικρά βάθη.

Στο δυτικό κομμάτι παρόλ'αυτα, παρατηρούμε πως οι αντιστάσεις παρουσιάζουν κατά κύριο λόγο υψηλές τιμές και ιδιαίτερα στο ΝΔ κομμάτι του νησιού φαίνεται ξεκάθαρα μια έξαρση του υποβάθρου (τομή 2). Αυτό ίσως να οφείλεται στην ύπαρξη πολλών διαρρήξεων που αποτελούνται από ρήγματα Α-Δ. Είναι επίσης φανερό πως πλησιάζοντας προς το κεντρικό κομμάτι της Μήλου οι αντιστάσεις παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές.

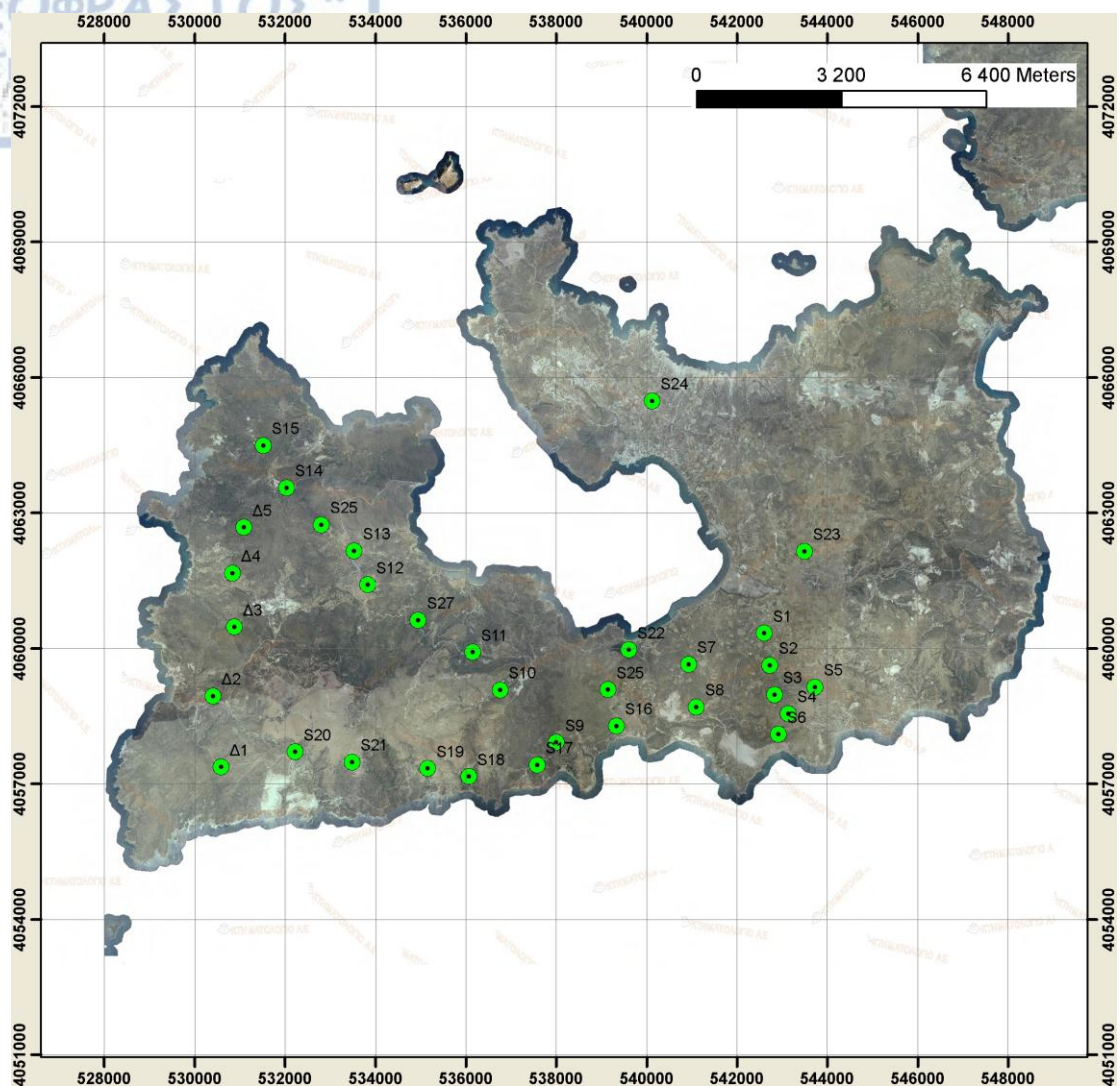
Γενικότερα, η εφελκυστική τεκτονική που υπάρχει στην περιοχή του Αιγαίου, η οποία περιλαμβάνει και το ηφαιστειακό τόξο, δρα κατά την διεύθυνση Β-Ν και έχει ως αποτέλεσμα να προκαλούνται διαρρήξεις στα κανονικά ρήγματα με διεύθυνση Α-Δ. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται δίοδοι για την άνοδο των γεωθερμικών

ρευστών και κατά συνέπεια καταγράφονται χαμηλές ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Σαν κατακλείδα, πρέπει να αναφερθεί πως με την γεωηλεκτρική μέθοδο και ειδικότερα με τις γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις όπως σε αυτήν την περίπτωση, είναι δυνατή η απεικόνιση της οριζόντιας στρωματογραφίας μιας περιοχής και η εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν σε διάφορα φαινόμενα, όπως η γεωθερμία, λαμβάνοντας πάντα όμως υπόψιν την γεωλογία, την τεκτονική και την γεωφυσική. Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι είναι δυνατή η απεικόνιση της οριζόντιας κατανομής των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μιας μεγάλης έκτασης και σε μεγάλο βάθος διασκόπησης και η αντιστοιχία των χρωματικών εικόνων που προκύπτουν με τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής, με αποτέλεσμα να μελετάται μια περιοχή με μεγαλύτερη ευκολία και σαφήνεια. Δίνονται παρακάτω οι τομές που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων με σκιαγραφημένες τις περιοχές χαμηλών αντιστάσεων (Σχ.5.1) καθώς και ο χάρτης της Μήλου με τα σημεία των βυθοσκοπήσεων οι οποίες επεξεργάστηκαν (Σχ. 5.2).



ΣΧΗΜΑ 5.1 Περιοχές χαμηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων



ΣΧΗΜΑ 5.2 Χάρτης αναγλύφου της Μήλου από το κτηματολόγιο με τις βυθοσκοπήσεις που επεξεργάστηκαν και με γεωαναφορά



Μουντράκης, Δ. *Γεωλογία της Ελλάδας*, 1985, Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη

Μουντράκης, Δ. *Γεωτεκτονική εξέλιξη του ελληνικού χώρου*, 1988, Θεσσαλονίκη

Παπαζάχος, Β.Κ. *Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη Γεωφυσική* 1986, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη

Τσόκας, Γ., *Γεωφυσική διασκόπηση των νησιών Μήλος και Κίμωλος 'Διδακτορική Διατριβή'*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1985

Φυτίκας, Μ. και Ανδρίτσος Ν., *Γεωθερμία*, 2004, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη

Alexei A. Bobachev, Igor. N. Modin, Vladimir A. Shevnin, Geoscan-M Ltd., Moscow, Russia, 1990-2001

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- <http://portal.onegeology.org/>
- <http://www.usgs.gov/>
- <http://eol.jsc.nasa.gov/>
- www.google.com
- www.maps.google.com