



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΛΙΣΣΑΒΕΤ Θ. ΝΙΚΟΛΑΙΔΟΥ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

**«ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΡΗΧΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ
ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΝΕΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΗΣΗΣ»**



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**Στα πλαίσια του προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Γεωλογίας
«Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία»**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Ιούνιος 2016

ΝΙΚΟΛΑΪΔΟΥ ΕΛΙΣΣΑΒΕΤ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

«Αξιολόγηση των ρηχών γεωθερμικών πόρων στη Σαντορίνη, με βάση νέα δεδομένα
θερμομέτρησης»

Υποβλήθηκε στο τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος
σπουδών «Γεωλογία και Γεωπεριβάλλον» με ειδίκευση στην «Εφαρμοσμένη και
Περιβαλλοντική Γεωλογία». Τομέας Γεωλογίας.

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

1. Βουδούρης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Επιβλέπων
2. Ανδρίτσος Νικόλαος, Καθηγητής, Μέλος τριμελούς επιτροπής
3. Κατσιφαράκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής, Μέλος τριμελούς επιτροπής

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

© Νικολαΐδου Θ. Ελिसσάβετ, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή. Αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΗΣΙΟΥ.....	11
1.1:ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ-ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ.....	11
1.2:ΚΛΙΜΑ.....	13
1.3:ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ	15
2.1:ΠΡΟΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	16
2.2:ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ.....	18
2.3:ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ.....	27
2.4:ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΝΕΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΘΕΡΜΟΜΕΤΡΩΝ.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:.....	85

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών σπουδών του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με ειδίκευση στην «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία». Η ανάθεση της έγινε από το Τμήμα Γεωλογίας, μετά από πρόταση του Αναπλ. Καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Βουδούρη. Η τριμελής εξεταστική επιτροπή αποτελείται από τους: Κωνσταντίνο Βουδούρη, Αν. Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. (Επιβλέπων), Νικόλαο Ανδρίτσο, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και Κωνσταντίνο Κατσιφαράκη, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ. Η διατριβή αφορά στη διερεύνηση των γεωθερμικών συνθηκών στη Σαντορίνη, εστιάζοντας στους ρηχούς κυρίως ταμιευτήρες με βάθη μέχρι 150-200m. Πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Αξιολόγηση Γεωθερμικών Πόρων και των τρόπων αξιοποίησής τους στη Σαντορίνη», το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το Δήμο Θήρας.

Οι υπαίθριες ερευνητικές εργασίες πραγματοποιήθηκαν κατά το διάστημα Απρίλιος-Οκτώβριος 2014 και περιελάμβαναν επιτόπιες μετρήσεις θερμοκρασίας, παροχής και βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων (pH, EC) καθώς και δειγματοληψίες ρευστών από υπάρχουσες γεωτρήσεις. Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., με υπεύθυνο τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μανασσή Μήτρακα.

Για την ολοκλήρωση της διατριβής αξιοποιήθηκε η υπάρχουσα βιβλιογραφία από την συστηματική γεωθερμική έρευνα που διεξήχθη από το ΙΓΜΕ στη Σαντορίνη τη δεκαετία του 1980, καθώς και πλήθος δημοσιεύσεων που αφορούν τη γεωλογική, τεκτονική και υδρογεωλογική κατάσταση του νησιού.

Στο πρώτο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για την περιοχή έρευνας, όπως τα γεωμορφολογικά, γεωγραφικά, κλιματικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η γεωλογική εξέλιξη του νησιού, το τεκτονικό καθεστώς καθώς και υδρογεωλογικά στοιχεία.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής αναφορά στις γεωθερμικές συνθήκες της περιοχής με βάση την προγενέστερη γεωθερμική έρευνα του ΙΓΜΕ, που κατέληξε στην οριοθέτηση του πιθανού γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας στο νότιο τμήμα του νησιού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πρόσφατα στοιχεία που προέκυψαν από την γεωθερμική έρευνα που έλαβε χώρα στα πλαίσια της διατριβής. Παρατίθενται οι γεωτρήσεις στην κεφαλή των οποίων έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, αλλά και όσες θερμομετρήθηκαν κατά βάθος. Οι μετρήσεις κάλυψαν όλο το εύρος του νησιού, ώστε να προκύψει όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική εικόνα για τη θερμοκρασιακή κατάσταση στη Σαντορίνη. Στο ίδιο κεφάλαιο αναλύονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα της θερμομετρικής έρευνας σε επιμέρους περιοχές, παρουσιάζεται χάρτης με τις ισόθερμες που προέκυψαν από τις μετρήσεις στην κεφαλή των γεωτρήσεων και καμπύλες μεταβολής της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος, από τις οποίες έγινε προσπάθεια για την εκτίμηση της γεωθερμικής βαθμίδας.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στην υδροχημεία των νερών της Σαντορίνης, με αναφορές σε παλαιότερες χημικές αναλύσεις και λεπτομερή περιγραφή των

αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων που συλλέχθηκαν κατά τις ερευνητικές εργασίες στα πλαίσια της διατριβής.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή γεωθερμομέτρων στα δείγματα που συλλέχθηκαν, ως μία προσπάθεια εκτίμησης της θερμοκρασίας του ταμειυτήρα των ρευστών σε μεγαλύτερα βάθη και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα των γεωθερμομέτρων που έχουν εφαρμοστεί από άλλους ερευνητές σε νερά της Σαντορίνης.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συνολική μελέτη και επεξεργασία των δεδομένων.

Με την ολοκλήρωση της διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπλ. Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Βουδούρη για την ανάθεση του θέματος και τη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, κυρίως όσον αφορά θέματα υδρογεωλογίας και υδροχημείας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Γεωθερμίας κ. Μαρία Παπαχρήστου, για την πολύτιμη καθοδήγησή της στην επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τις εργασίες υπαίθρου, για την στήριξή της καθ' όλη την διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας και για την επίλυση προβληματισμών που δημιουργήθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής. Πολλές ευχαριστίες οφείλω και στον Ομότιμο Καθηγητή κ. Μιχάλη Φυτίκα για την καθοδήγηση και βοήθειά του στις εργασίες υπαίθρου και για τους γνωστικούς ορίζοντες που μου άνοιξε.

Για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Ανδρίτσο Νικόλαο, επιστημονικώς υπεύθυνο του ερευνητικού έργου «Αξιολόγηση Γεωθερμικών Πόρων και των τρόπων αξιοποίησής τους στη Σαντορίνη», στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα διατριβή. Τον καθηγητή κ. Κατσιφαράκη Κωνσταντίνο για τις ευστοχές παρατηρήσεις του στο κείμενο.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου, για την συμπαράσταση και την απλόχερη υποστήριξη που μου πρόσφεραν κατά το διάστημα ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης είχε ως στόχο την αξιολόγηση και διερεύνηση των ρηχών γεωθερμικών πόρων στο νησί της Σαντορίνης βάσει νέων δεδομένων, τα οποία προέκυψαν έπειτα από την γεωθερμική έρευνα που διεξήχθη στο νησί κατά την περίοδο Απριλίου-Οκτωβρίου 2014. Η Σαντορίνη ανήκει στο ενεργό ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου και αποτελεί το νησί με την πιο πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Οι γεωλογικές, τεκτονικές και μαγματικές συνθήκες έχουν δημιουργήσει τις κατάλληλες προϋποθέσεις για τη δημιουργία αξιόλογων γεωθερμικών ταμιευτήρων σε διάφορα βάθη. Η παλαιότερη συστηματική έρευνα που διεξήγαγε το ΙΓΜΕ κατά τη δεκαετία του 1980 επιβεβαίωσε την ύπαρξη σημαντικών θερμών υδροφόρων στη νότια Σαντορίνη και οδήγησε στην οριοθέτηση του πιθανού γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας στην περιοχή Μεγαλοχωρίου-Περίσσας-Βλυχάδας-Ακρωτηρίου. Οι θερμοκρασίες που συναντήθηκαν φτάνουν τους 65°C σε βάθη περίπου 300m. Τα αποτελέσματα των πρόσφατων ερευνητικών εργασιών που περιγράφονται στη διατριβή δείχνουν ότι ρηχοί υδροφόροι με θερμοκρασίες πάνω από 20-21°C υπάρχουν σε όλο το νησί. Η θερμομετρική έρευνα αποκάλυψε επίσης μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περιοχή θερμικής ανωμαλίας στο κεντρικό τμήμα της Σαντορίνης, με θερμοκρασίες 26-27°C στην κεφαλή γεωτρήσεων, που τα βάθη τους κυμαίνονται από 40 έως 190m. Η μέτρηση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος οδήγησε σε εκτίμηση της γεωθερμικής βαθμίδας σε διάφορες περιοχές του νησιού. Η γεωθερμική βαθμίδα στην περιοχή του Μεγαλοχωρίου βρέθηκε περίπου ίση με αυτή που είχε υπολογιστεί παλαιότερα από το ΙΓΜΕ (28°C/100m), ενώ για τις υπόλοιπες θέσεις δεν κατέστη δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων λόγω του πολύ μικρού βάθους των γεωτρήσεων και της εισροής νερού στον πυθμένα τους. Οι χημικές αναλύσεις 8 δειγμάτων από διάφορα σημεία του νησιού και η εφαρμογή σχετικών δεικτών έδειξαν ότι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τα νερά προέρχονται από ανάμιξη βρόχινου και θαλασσινού νερού, ενώ παρουσιάζουν τάση για επικαθήσεις. Όλα τα ζεστά νερά της Σαντορίνης με θερμοκρασία μέχρι 65°C ανήκουν στην κατηγορία των Na-Cl νερών, ενώ τα νερά από τα δείγματα που συλλέχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής χαρακτηρίζονται ως Cl-SO₄. Από την εφαρμογή των γεωθερμομέτρων SiO₂, Na-K και Na-K-Ca, προέκυψαν θερμοκρασίες ταμιευτήρα μέχρι 150°C. Με βάση τα γεωλογικά και γεωφυσικά δεδομένα, σε συνάρτηση με τις γεωθερμικές βαθμίδες που επικρατούν στην περιοχή έρευνας, θεωρείται πολύ πιθανή η ύπαρξη θερμών ταμιευτήρων με θερμοκρασίες 140-150°C σε βάθη μέχρι 1000m, κυρίως στο νότιο τμήμα του νησιού. Το κεντρικό τμήμα του νησιού, στο οποίο υπάρχει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για αξιοποίηση της γεωθερμίας, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση για την οριοθέτηση της ζώνης θερμικής ανωμαλίας και τον εντοπισμό των θερμών ταμιευτήρων, ενώ η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί άμεσα σε κάθε σημείο του νησιού.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to evaluate and explore the shallow geothermal resources in Santorini, based on the results of the geothermal research, which was conducted during the period April – October 2014. Santorini belongs to the South Aegean Active Volcanic Arc and constitutes its most recent volcanic center. The geological, tectonic and magmatic regime has created favorable conditions for the development of significant geothermal reservoirs at various depths. The survey that had been conducted by IGME in the 1980s confirmed the existence of significant thermal aquifers in southern Santorini and led to the delineation of the low enthalpy geothermal field in the region Megalochori – Perissa – Vlychada – Akrotiri. The temperatures reached 65°C in depths approximately 300m. The results of the recent geothermal investigation show that shallow aquifers with temperatures above 20 - 21°C exist all over the island. Furthermore, the thermometric survey revealed a particularly interesting thermal anomaly zone in the central part of the island, with wellhead temperatures around 26 – 27°C in aquifers in depths ranging from 40 to 190m. The temperature vs. depth measurements in the interior of six boreholes led to the estimation of the geothermal gradient in various sites on the island. The geothermal gradient in Megalochori was almost identical to the gradient calculated by IGME in the same area (28°C/100m). On the other hand, the calculated gradients for the other five sites can not be regarded as totally reliable, due to the small depth of the wells and the inflow of water in the bottomhole. The chemical analysis of the collected samples and the application of several ionic ratios showed that, in almost all cases, the water is the product of rainwater and seawater mixing. All the hot waters of Santorini with temperature up to 65°C belong to the Na–Cl category. According to the Piper classification, the collected samples are characterized as Cl–SO₄ water. The application of the SiO₂, Na–K and Na–K–Ca geothermometers resulted in reservoir temperatures up to 150°C. Based on geological and geophysical data in correlation to the geothermal gradients prevailing in the study area, these temperatures (140-150°C) are likely to exist in depths up to 1000m, mainly in the southern part of Santorini. More systematic geothermal research is required for the central part of the island, in order to confirm the resource, evaluate its potential and delineate the geothermal anomaly.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νησί της Σαντορίνης (ή Θήρας) βρίσκεται περίπου 120Km βόρεια της Κρήτης και αποτελεί το νοτιότερο τμήμα του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου. Μαζί με τα νησιά Θηρασία, Ασπρονήσι, Παλαιά και Νέα Καμένη ανήκει στο νησιωτικό ηφαιστειακό σύμπλεγμα Θήρας, το οποίο θεωρείται ως το πλέον ενεργό ηφαιστειακό κέντρο του Νοτίου Αιγαίου και ένα από τα πιο βίαια ηφαίστεια στον κόσμο με δραστηριότητα σε πρόσφατους και ιστορικούς χρόνους.

Οι γεωλογικές, τεκτονικές και μαγματικές συνθήκες θεωρούνται ευνοϊκές για την ανάπτυξη σημαντικών γεωθερμικών ταμιευτήρων σε διάφορα βάθη. Για τον λόγο αυτό, κατά τη δεκαετία του 1980, το ΙΓΜΕ διεξήγαγε συστηματική γεωθερμική έρευνα στη Σαντορίνη που περιελάμβανε θερμομετρήσεις, δειγματοληψίες, χημικές αναλύσεις και κυρίως την κατασκευή έντεκα ερευνητικών και τριών παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων. Οι έρευνες αυτές έδειξαν αυξημένες θερμοκρασίες στο νότιο τμήμα του νησιού, όπου και επικεντρώθηκε η γεωτρητική έρευνα, αποκαλύπτοντας την ύπαρξη θερμών υδροφόρων (θερμοκρασία μέχρι 65°C) σε βάθη μέχρι 300m. Ακολούθησε η οριοθέτηση του γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας στην περιοχή που περικλείεται από τους οικισμούς Μεγαλοχώρι, Περίσσα, Βλυχάδα και Ακρωτήρι.

Δυστυχώς, μέχρι σήμερα δεν έχει υπάρξει καμία προσπάθεια για την αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων του νησιού, παρά την ύπαρξη του βεβαιωμένου γεωθερμικού δυναμικού.

Ο Δήμος Θήρας, σε μία προσπάθεια εφαρμογής ενεργειακής πολιτικής που περιλαμβάνει την αξιοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ανέθεσε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του πανεπιστημίου της Θεσσαλίας, την έρευνα για την αξιολόγηση των ρηχών γεωθερμικών πόρων του νησιού, καθώς και των τρόπων αξιοποίησής τους.

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του εν λόγω ερευνητικού προγράμματος και περιελάμβανε τέσσερις επισκέψεις στη Σαντορίνη, με σκοπό την συλλογή υπαρχόντων στοιχείων, την αναζήτηση γεωτρήσεων για μετρήσεις θερμοκρασίας και άλλων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των νερών, τον εντοπισμό κατάλληλων γεωτρήσεων για μετρήσεις θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος και συλλογή δειγμάτων νερού και, τέλος, μία πρώτη εκτίμηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας στο νησί.

Συγκεκριμένα, στην πρώτη επίσκεψη που έλαβε χώρα τον Απριλίου του 2014 υπήρξε συνεργασία με στελέχη του Δήμου Θήρας, της Περιφερειακής Διοίκησης και της ΔΕΥΑΘ για τη συλλογή στοιχείων και την καλύτερη οργάνωση των γεωθερμικών μετρήσεων που θα πραγματοποιούνταν στις αμέσως επόμενες επισκέψεις.

Το Μάιο του 2014, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες εργασίες υπαίθρου, με επιτόπιες μετρήσεις θερμοκρασίας, καθώς και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και παροχής (όπου αυτό κατέστη δυνατό). Χρησιμοποιήθηκαν τα αρχεία του Δήμου με τις καταγεγραμμένες ιδιωτικές και δημοτικές γεωτρήσεις, ενώ παράλληλα αναζητήθηκαν γεωτρήσεις αλλά και πηγάδια σε θέσεις που θεωρούνται απαραίτητες για την καλή χωρική κατανομή των στοιχείων και την πληρέστερη εικόνα της γεωθερμικής κατάστασης στη Σαντορίνη.

Κατά το διάστημα Ιουνίου-Ιουλίου του 2014, πραγματοποιήθηκαν συμπληρωματικές εργασίες υπαίθρου, στις οποίες ολοκληρώθηκαν οι μετρήσεις στις δημοτικές γεωτρήσεις, αναζητήθηκαν και μετρήθηκαν γεωτρήσεις σε περιοχές για τις οποίες δεν υπήρχαν καθόλου στοιχεία, οριστικοποιήθηκαν, μετά από εκτίμηση των δεδομένων, οι γεωτρήσεις από τις οποίες θα γινόταν δειγματοληψία για διενέργεια λεπτομερών

χημικών αναλύσεων και εντοπίστηκαν οι θέσεις όπου θα πραγματοποιούνταν μέτρηση θερμοκρασιών σε συνάρτηση με το βάθος με κατάλληλα θερμόμετρα. Έγινε επίσης επίσκεψη στη Θηρασία, για αναζήτηση γεωτρήσεων πιθανού ενδιαφέροντος.

Οι κατά βάθος θερμομετρήσεις σε 6 γεωτρήσεις και οι δειγματοληψίες από 8 αντιπροσωπευτικές (χωρικά) γεωτρήσεις έλαβαν χώρα τον Οκτώβριο του 2014. Την ίδια περίοδο πραγματοποιήθηκαν και επισκέψεις σε χώρους στους οποίους θα μπορούσε να γίνει άμεσα αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας, με βάση τα αποτελέσματα της μέχρι τότε έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΗΣΙΟΥ

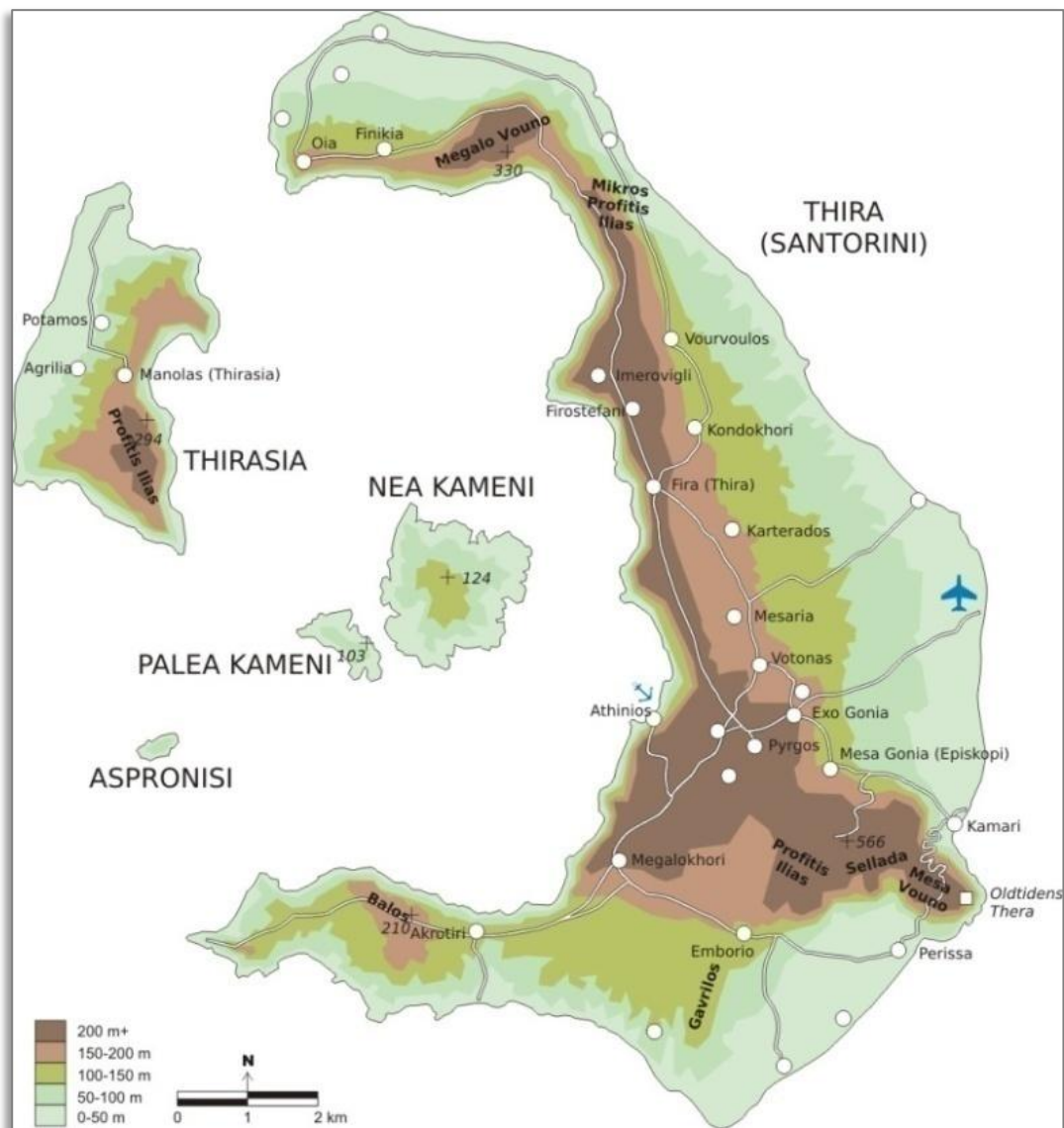
Η Σαντορίνη (ή Θήρα) ανήκει στις Κυκλάδες και αποτελεί μαζί με την Ανάφη τα νοτιοανατολικότερα νησιά των Κυκλάδων. Βρίσκεται 120Km βόρεια της Κρήτης και απέχει 68 ναυτικά μίλια από τον Πειραιά. Στο νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης ανήκουν ακόμη η Θηρασία, το Ασπρονήσι, η Παλαιά και η Νέα Καμένη καθώς και τα νησιά των Χριστιανών. Το νησί στο παρελθόν ονομαζόταν Στρογγύλη (Papageorgiou et al., 2010) λόγω του κυκλικού σχήματος του. Μετά την καταστρεπτική έκρηξη του ηφαιστείου που έλαβε χώρα τον 17^ο αιώνα π.Χ. (Μινωική έκρηξη), το κεντρικό της τμήμα καταβυθίστηκε, δημιουργώντας την εντυπωσιακή σημερινή εικόνα με την ύπαρξη της καλδέρας.

Η Σαντορίνη κατοικείται από την αρχαιότητα μέχρι τους σημερινούς χρόνους συνεχώς. Μέχρι την δεκαετία του 1960 η οικονομία της βασιζόταν κυρίως σε αγροτικές, εμπορικές και ναυτιλιακές δραστηριότητες. Από τη δεκαετία του 1970, ξεκίνησε σταδιακά να αναπτύσσεται ο τουρισμός και έκτοτε ο τουριστικός τομέας απέκτησε κυρίαρχο ρόλο στον οικονομικό, οικιστικό και κοινωνικό χαρακτήρα του νησιού. Σήμερα, η Σαντορίνη αποτελεί έναν από τους πλέον δημοφιλείς προορισμούς σε παγκόσμιο επίπεδο.

1.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ-ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

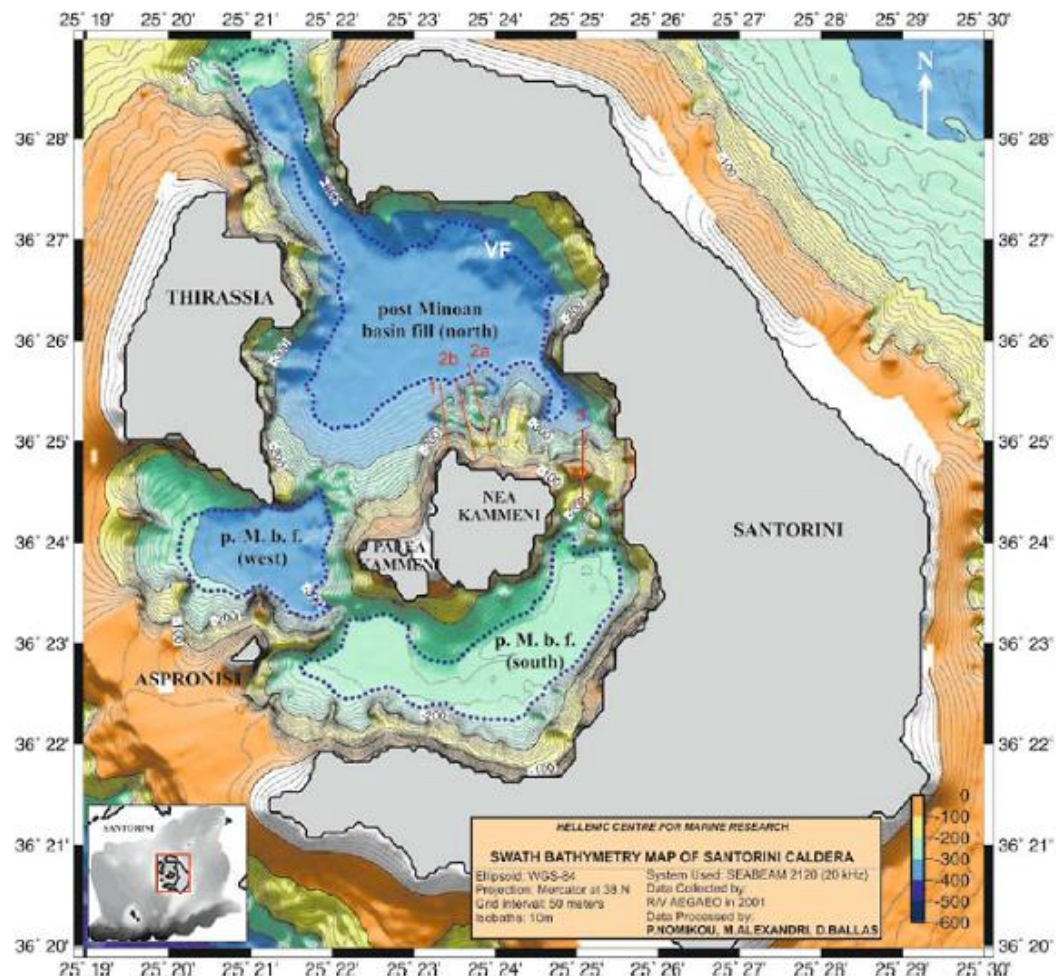
Η Σαντορίνη καλύπτει έκταση 75,8Km² με περίμετρο 36 ναυτικά μίλια και βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος από 36° 19' 56" έως 36° 28' 40" Βόρεια και γεωγραφικό μήκος από 25° 19' 22" έως 25° 29' 13" Ανατολικά. Το μέγιστο μήκος του νησιού, από το ακρωτήριο Μαυρόπετρα στον Βορρά έως το ακρωτήριο Εξωμύτης στον Νότο, είναι 17,4Km. Το πλάτος της κυμαίνεται από 1,2Km στα βόρεια έως περίπου 6Km στο νότιο τμήμα (Λ.Ρόγκου, 2003). Η σημερινή ημικυκλική-πεταλοειδής μορφή της είναι αποτέλεσμα της ηφαιστειακής δραστηριότητας στην ευρύτερη περιοχή, η οποία προκάλεσε αλληπάλληλες μεταβολές στο σχήμα του νησιού. Το ανάγλυφο στο δυτικό τμήμα είναι βραχώδες και απότομο, ενώ κατά θέσεις το υψόμετρο υπερβαίνει τα 300m (Tattaris, 1964). Αντίθετα, στην ανατολική πλευρά το ανάγλυφο είναι ήπιο, με ομαλές και χωρίς έντονο διαμελισμό ακτές. Στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού αναπτύσσεται ο ορεινός όγκος του Προφήτη Ηλία, ο οποίος έχει υψόμετρο 565m και δυτικά αυτού είναι το Μέσα Βουνό ή Βουνό του Αγίου Στεφάνου, το οποίο έχει υψόμετρο 366m (Μπεζές, 2010) (Σχήμα 1.1).

Στη Σαντορίνη έχουν σχηματιστεί έξι όρμοι: το Αμμούδι ή Άγιος Νικόλαος, η Αρμένη και το Μουζάκι στα βόρεια του νησιού, οι όρμοι Φηρών και Αθηνιού στο κεντρικό τμήμα και ο όρμος του Μπάλου στο Ακρωτήριο.



Σχήμα 1.1: Μορφολογικός Χάρτης της Σαντορίνης (πηγή: www.worldofmaps.net)

Η καлдέρα αποτελεί το κυρίαρχο μορφολογικό χαρακτηριστικό του νησιού. Έχει έκταση περίπου 84,5Km² με μέγιστο μήκος κατά τη διεύθυνση Β-Ν περίπου 11Km και Α-Δ περίπου 8Km (Nomikou et al., 2012b). Ο πυθμένας της καлдέρας αποτελείται από τρεις επιμέρους λεκάνες (Σχήμα 1.2), οι οποίες αποτελούν χωριστά περιβάλλοντα απόθεσης, διαιρούμενες από τα ηφαιστειακά νησιά των Καμένων (Nomikou et al., 2012b).



Σχήμα 1.2: Βυθομετρικός χάρτης της καλδέρας της Σαντορίνης, που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ισοβαθείς των 10m. Παρουσιάζονται οι τρεις επιμέρους λεκάνες της καλδέρας (Nomikou et al., 2012b)

1.2 ΚΛΙΜΑ

Σύμφωνα με την ανανεωμένη κατάταξη Koppen (M.CPeel, B.L. Finlayson & T.A. McMahon, 2007), το κλίμα της Σαντορίνης ανήκει στον θερμό-ξηρό ερημικό τύπο και συγκεκριμένα στον τύπο BWh. Σε αυτού του τύπου τα κλίματα, οι βροχοπτώσεις είναι μικρής διάρκειας και μεγάλης έντασης, δημιουργώντας μεγάλη απορροή. Το ετήσιο ύψος βροχής υποστηρίζει αραιή βλάστηση κυρίως από ξηρόφυτα και είδη φυτών που αναπτύσσονται μόνο κατά την υγρή περίοδο, όπως είναι τα εκτεταμένου ριζικού συστήματος αμπέλια.

Στη Σαντορίνη η υγρή περίοδος ξεκινά το μήνα Οκτώβριο και τελειώνει τον Απρίλιο, με μεγάλες όμως αποκλίσεις στις βροχοπτώσεις από έτος σε έτος. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται στα 460mm και η συνολική ετήσια εξατμισοδιαπνοή φθάνει τα 1100mm (Γιούργα, 1991).

Λόγω των ΒΑ ανέμων που επικρατούν στην περιοχή, η Σαντορίνη, παρόλο που είναι το νοτιότερο νησί των Κυκλάδων, είναι και το ψυχρότερο. Ωστόσο, τον χειμώνα η μέση θερμοκρασία είναι περίπου 10°C. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, η ημερήσια θερμοκρασία τους μήνες Δεκέμβριο έως Μάρτιο κυμαίνεται από 8 έως 15°C, τους μήνες Νοέμβριο, Απρίλιο και Μάιο από 16 έως 22°C ενώ τους θερινούς μήνες από 23 έως 30°C.

Πίνακας I: Διακύμανση Θερμοκρασίας (Αποστολάκη, 2007)

<u>Μήνες</u>	<u>Θερμοκρασία (°C)</u>
Δεκέμβριος - Ιανουάριος – Φεβρουάριος – Μάρτιος	8 – 15
Νοέμβριος – Απρίλιος – Μάιος	16- 22
Ιούνιος – Ιούλιος – Αύγουστος	23 – 30

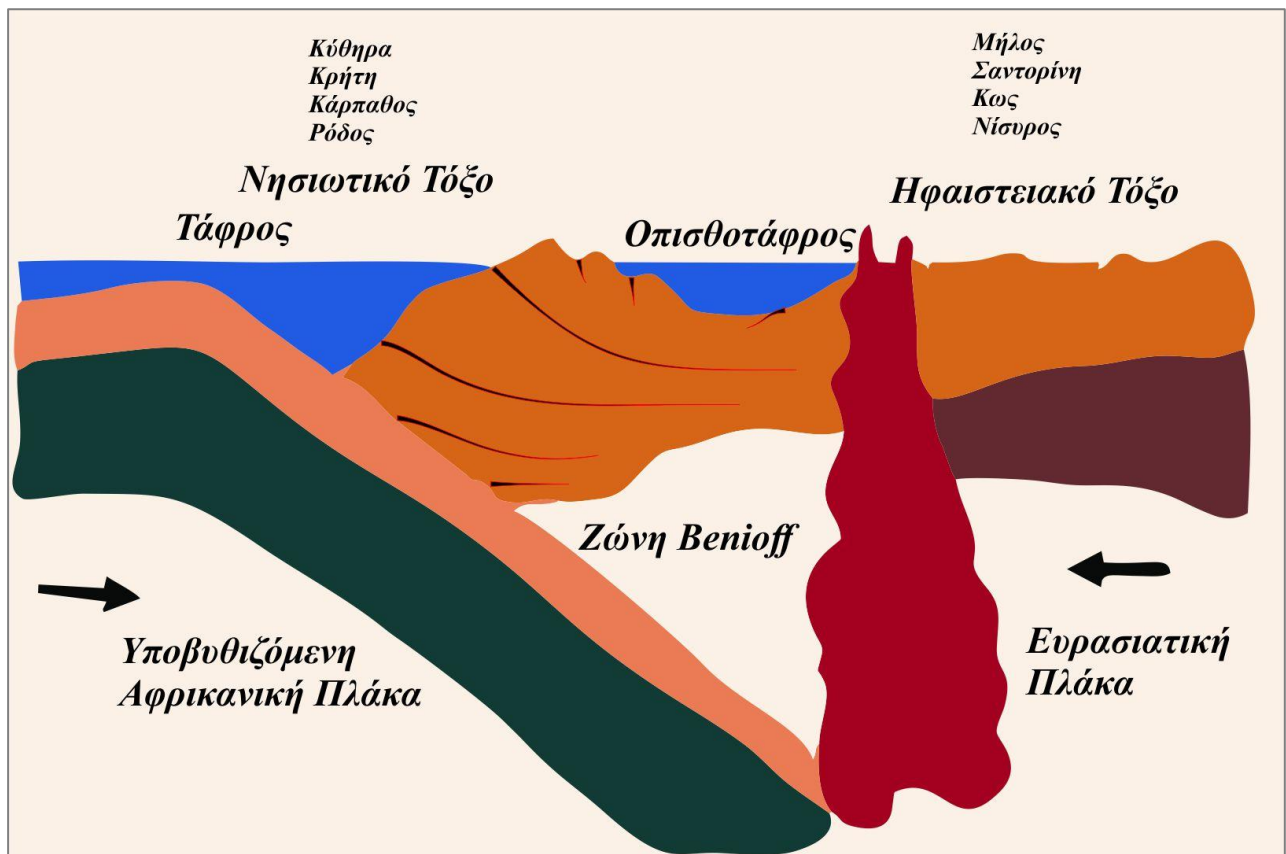
1.3 ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ

Η Σαντορίνη και τα νησιά Θηρασία, Ασπρονήσι, Άνδρος, Χρυστιανά και η Παλαιά με τη Νέα Καμένη αποτελούν διοικητικά τον ενιαίο Δήμο Θήρας με πρωτεύουσα τα Φηρά. Υπάρχουν δύο δημοτικές ενότητες, η Θήρα και η Οία. Το μεγαλύτερο μέρος του μόνιμου πληθυσμού κατοικεί στο κεντρικό και νότιο τμήμα του νησιού. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία, www.statistics.gr) οι μόνιμοι κάτοικοι της περιφερειακής ενότητας της Θήρας ανέρχονται σε 18883. Σε σύγκριση με το παρελθόν (απογραφές 1991 και 2001), παρατηρείται αύξηση του μόνιμου πληθυσμού κατά 100% την τελευταία εικοσαετία. Λόγω του τουρισμού, ο οποίος καταγράφει άνοδο 141,8%, και του τεράστιου αριθμού επισκεπτών, ο πληθυσμός πολλαπλασιάζεται κυρίως κατά τους θερινούς μήνες και ιδιαίτερα τον Αύγουστο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ

Η γεωλογική εξέλιξη της Σαντορίνης έχει αποτελέσει ήδη από το τέλος του 19ου αιώνα αντικείμενο λεπτομερούς μελέτης από πολλούς ερευνητές (Papachristou et al., 2013). Το νησί δομείται σχεδόν αποκλειστικά από Πλειοκαινικά έως πρόσφατα πυροκλαστικά υλικά και λάβες (Σκαρπέλης & Λιάτη, 1990), ως αποτέλεσμα της περίπλοκης ηφαιστειακής δράσης για περισσότερο από 0,7 εκ. έτη (Papachristou et al., 2013).

Η Σαντορίνη ανήκει στο Ενεργό Ηφαιστειακό Τόξο του Νοτίου Αιγαίου (Mayley and Johnson, 1971; Papazachos and Comninakis, 1971) και βρίσκεται στο νοτιότερο άκρο του. Το ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου δημιουργήθηκε λόγω σύγκλισης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής τεκτονικής πλάκας με ρυθμό 2,5cm/έτος (Papazachos and Comninakis, 1971; McKenzie, 1972). Εκτείνεται από το Σουσάκι Κορινθίας ως το νότιο άκρο της Κω (Σχήμα 2.1), περιλαμβάνοντας επίσης τα Μέθανα, τη Μήλο, την Κίμωλο και τη Νίσυρο (Fytikas, 1980). Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται, εκτός από την ηφαιστειακή και από γεωθερμική δραστηριότητα.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση του ηφαιστειακού τόξου του Ν. Αιγαίου (Παπανικολάου, 1998)

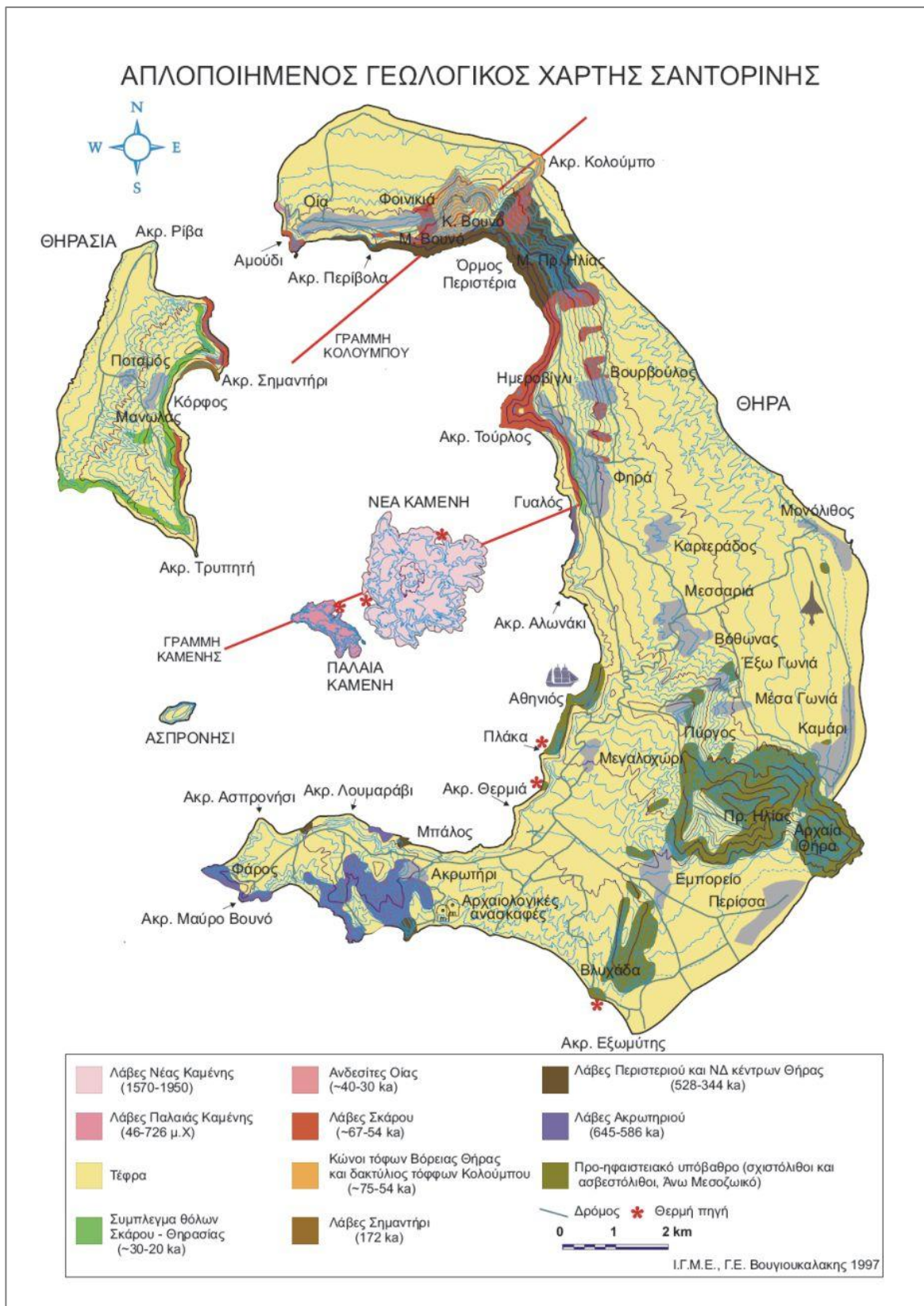
2.1 ΠΡΟΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το προηφαιστειακό υπόβαθρο της Σαντορίνης ανήκει στην Αττικοκυκλαδική Ζώνη (Fytikas et al., 1990a; 1990b) και εμφανίζεται κυρίως στο νότιο τμήμα του νησιού, όπως στον Προφήτη Ηλία, στα υψώματα του Γαβρίλου, στο Μέσα Βουνό στην περιοχή του Πύργου και του Μονόλιθου, καθώς επίσης και στα εσωτερικά τοιχώματα της καλδέρας στην περιοχή του Αθηνιού, της Πλάκας και του Ακρωτηρίου (Βουγιουκαλάκης, 2005).

Η Αττικοκυκλαδική Ζώνη αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα όπως σχιστόλιθους και φυλλίτες ηλικίας Άνω Ιουρασικού-Κατώτερου Κρητιδικού (Tattaris, 1964, Fytikas et al., 1990), επάνω στους οποίους βρίσκονται επωθημένοι μικροκρυσταλλικοί παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι, ηλικίας Ανώτερου Τριαδικού-Ανώτερου Κρητιδικού (Papastamatiou, 1958, Blake et al., 1981, Fytikas et al., 1990), οι οποίοι πτυχώθηκαν κατά την Αλπική περίοδο (Σχήμα 2.2).

Οι ασβεστόλιθοι έχουν τη μεγαλύτερη επιφανειακή εμφάνιση σε σχέση με τα υπόλοιπα προ-ηφαιστειακά πετρώματα και εμφανίζονται σε όλες τις προαναφερθείσες περιοχές, εκτός από αυτή του Αθηνιού, όπου απουσιάζουν τελείως. Έχουν ηλικία Ανώτερου Τριαδικού (Papastamatiou 1956, Blake et al., 1981), είναι παχυστρωματώδεις, ισχυρά τεκτονισμένοι και το χρώμα τους είναι κατά θέσεις κοκκινωπό, λευκοκίτρινο ως ερυθροκίτρινο. Το πάχος τους φτάνει τα 600m και αποτελούν καρστικούς σχηματισμούς με μεγάλη περατότητα (Skarpelis et al., 1988).

Οι φυλλίτες εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή του Αθηνιού και περιμετρικά του Προφήτη Ηλία. Είναι ασβετιτικοί με ενστρώσεις μεταμορφωμένου γραουβάκη και φακούς κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και πρασινοσχιστόλιθων (Skarpelis et al., 1988). Στις περιοχές του Αθηνιού και των Θερμιών παρατηρείται θερμομεταμόρφωση επαφής (Skarn), η οποία έχει προκαλέσει μικρή μεταλλοφορία από τάλκη, χαλκοπυρίτη, μαγνητίτη κ.α. Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται στην διείσδυση ενός γρανίτη Μειοκαινικής ηλικίας (9.5 εκ. έτη), ο οποίος εμφανίζεται στην περιοχή του Μεγαλοχωρίου (Skarpelis and Liati, 1987).



Σχήμα 2.2: Γεωλογικός χάρτης της Σαντορίνης (ΙΓΜΕ, Βουγιουκαλάκης, 1997)

2.2 ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Η ηφαιστειότητα στην ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνης ξεκίνησε πριν από περίπου 2-2.5 εκ. έτη (Fytikas, 1989), και συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Περιλαμβάνει κυρίως πλινιακές εκρήξεις, εκχύσεις λαβών και κώνους σκωριών. Όμως, ο πιο χαρακτηριστικός τύπος ηφαιστειότητας, τα τελευταία 200.000 έτη, είναι ο σχηματισμός ασπιδόμορφων ηφαιστείων, ο οποίος διακοπτόταν από βίαιες εκρήξεις. (Σολδάτος, 2011).

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα ξεκίνησε από το Ακρωτήριο, και συνεχίστηκε στην περιοχή Περιστερίας και Θήρας. Στη συνέχεια ακολούθησαν δύο κύκλοι εκρηκτικής δραστηριότητας (Σχήμα 2.3), οι οποίοι κυρίως επηρέασαν περιοχές στην κεντρική και ανατολική Σαντορίνη φθάνοντας ως το ακρωτήριο του Ακρωτηρίου. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται συνοπτικά το στρωματογραφικό προφίλ των εκρηκτικών ηφαιστειακών κύκλων στη Σαντορίνη.

Αναλυτικότερα, τα στάδια της προ-μινωικής ηφαιστειακής δράσης σύμφωνα με τους Βουγιουκαλάκη (2005), Σολδάτο (2011) και Druitt et al. (1999), είναι τα κάτωθι:

▪ Ηφαιστειότητα Ακρωτηρίου

Τα παλαιότερα ηφαιστειακά πετρώματα (2 εκ.–500 χιλ. έτη πριν από σήμερα) του συμπλέγματος της Σαντορίνης εντοπίζονται στη χερσόνησο του Ακρωτηρίου και στις νησίδες των Χριστιανών, νοτιοδυτικά της Σαντορίνης.

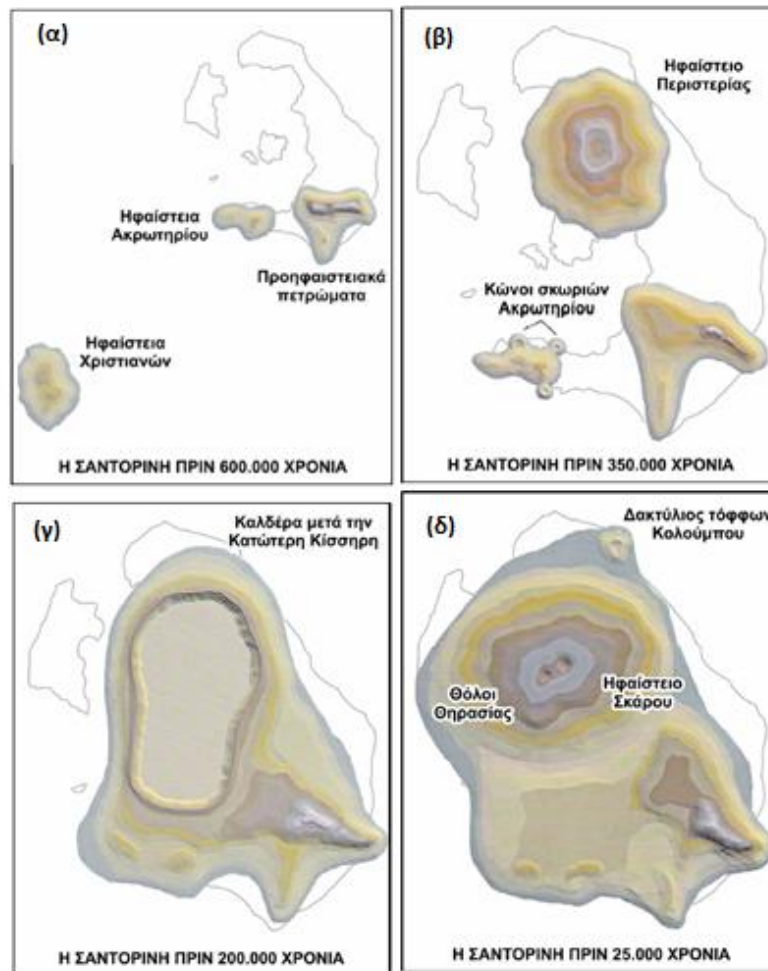
Πρόκειται για δακτιλικές και ανδεσιτικές λάβες, οι οποίες με τη μορφή θόλων εξήλθαν από τον θαλάσσιο πυθμένα και σχημάτισαν ροές λαβών και πυροκλαστικές αποθέσεις, που εμφανίζονται στην περιοχή του Ακρωτηρίου. Τα ηφαιστειακά προϊόντα είναι έντονα αλλοιωμένα από υδροθερμική δράση (Σχήμα 2.3-α).

▪ Ηφαιστειότητα Περιστερίας και Θήρας

Πριν από 530-430 χιλ. έτη σχηματίστηκε στο βόρειο τμήμα της σημερινής καλδέρας ένα μεγάλο στρωματοηφαίστειο διαμέτρου 4Km και ύψους 400m (Vougioukalakis, 2005), το ηφαίστειο της Περιστερίας (Σχήμα 2.3-β). Τα προϊόντα του είναι κυρίως ανδεσιτικές–βασαλτικές λάβες με λίγα πυροκλαστικά στρώματα τέφρας.

Συγχρόνως περίπου με το ηφαίστειο της Περιστερίας (450-340 χιλ. έτη), η στρομπόλια ηφαιστειακή δραστηριότητα σχημάτισε κώνους σκωριών, βασαλτικής-ανδεσιτικής σύστασης, νοτιότερα στις περιοχές των ακρωτηρίων Μπάλος, Κοκκινόπετρα, Μαυροραχίδι (Κόκκινη Παραλία).

Πριν από 350-250 χιλ. έτη, στο κέντρο της σημερινής καλδέρας, δημιουργήθηκε ένα ασπιδόμορφο ηφαίστειο, αυτό της Θήρας. Τα προϊόντα αυτού του ηφαιστείου ήταν εκχύσεις λαβών, οι οποίες είχαν ανδεσιτική έως ρυοδακτιλική σύσταση και φαίνονται μέχρι σήμερα στην περιοχή του ακρωτηρίου Αλωνάκι κοντά στα Φηρά.



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της ηφαιστειακής δραστηριότητας. (α) η ηφαιστειότητα του Ακρωτηρίου και των Χριστιανών (β) η ηφαιστειότητα της Περιστερίας και της Θήρας (γ) ο πρώτος κύκλος εκρηκτικής δράσης και ο σχηματισμός της πρώτης καλδέρας (δ) ο δεύτερος κύκλος εκρηκτικής δράσης που οδήγησε στο σχηματισμό της σημερινής καλδέρας (Vougioukalakis, 2005)

▪ Πρώτος κύκλος εκρηκτικής δράσης

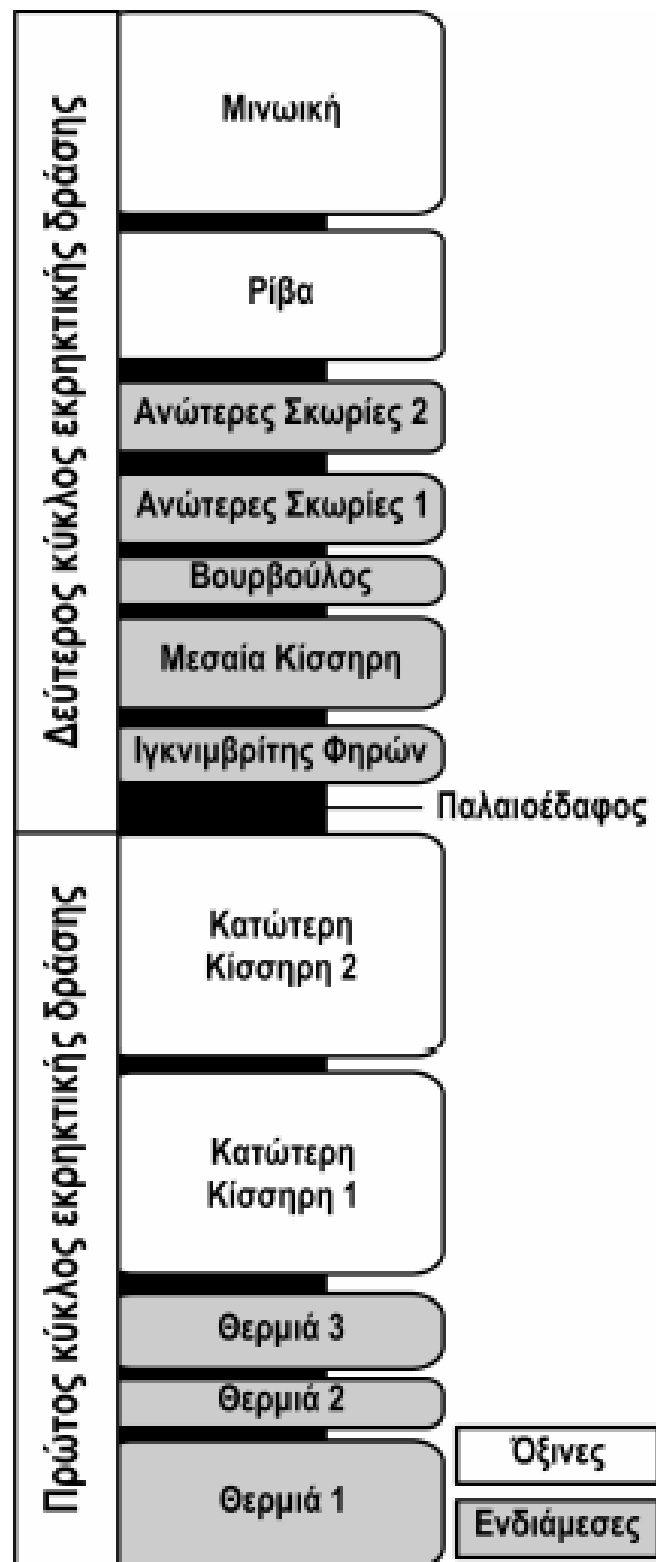
Ο πρώτος κύκλος ξεκίνησε πριν από 360-180 χιλ. έτη και περιελάμβανε πέντε (5) μεγάλες εκρήξεις (Σχήμα 2.4). Άρχισε με τις εκρήξεις Θερμιά 1, 2 και 3, που απέθεσαν μεγάλου πάχους ρεύματα σκωριών ανδεσιτικής σύστασης (ανδεσιτικοί ιγκνιμβρίτες). Εμφανίζονται στα νότια πρανή της καλδέρας από το ακρωτήρι Θερμιά μέχρι τα Φηρά.

▪ Δεύτερος κύκλος εκρηκτικής δράσης

Ο δεύτερος κύκλος ηφαιστειακής δράσης ξεκίνησε πριν 180 χιλ. έτη και έκλεισε με την Μινωική έκρηξη το 1613 π.Χ. και το σχηματισμό της σημερινής καλδέρας (Σχήμα 2.3-δ). Τα προϊόντα ήταν βασαλτικής–ανδεσιτικής έως ρυοδακτιτικής σύστασης (Σολδάτος, 2011).

Η απόθεση της Μεσαίας Σειράς Κίσσηρης πιθανολογείται πως έλαβε χώρα πριν από 50 χιλ. έτη (Σολδάτος, 2011), με προϊόντα δακτιτικής σύστασης και πάχος περίπου 4-5m. Αυτή η σειρά κίσσηρης αποτελεί τον σημαντικότερο υδροφόρο σχηματισμό στην κεντρική και ανατολική Σαντορίνη.

Στον Πίνακα 2.1 απεικονίζονται τα εκρηκτικά επεισόδια των δύο κύκλων, από το παλαιότερο στο πιο πρόσφατο, με τα αντίστοιχα προϊόντα τους.



Σχήμα 2.4: Στρωματογραφικό προφίλ των αποθέσεων των 12 κύριων πυροκλαστικών εκρήξεων της Σαντορίνης. (Druitt et al., 1999)

Πριν από 200-180 χιλ. έτη, έλαβαν χώρα πλινιακές εκρήξεις που απέθεσαν τη Σειρά Κατώτερης Κίσσηρης (1 και 2), με προϊόντα ρυοδακτιτικής σύστασης, κυρίως ιγκνιμβρίτες, αποθέσεις μεγακυματισμών και πτώσεις κίσσηρης, με πάχος περίπου 70m. Εμφανίζονται στα νότια πρηνή της καλδέρας από το Ακρωτήριο έως τα Φηρά, αλλά και στην περιοχή της Οίας. Ο σχηματισμός αυτός μπορεί να χαρακτηριστεί ως ημιπερατός και παίζει το ρόλο του αδιαπέρατου υποβάθρου των ηφαιστειακών σχηματισμών και παρεμποδίζει την διείσδυση του θαλασσινού νερού. Αυτός ο κύκλος ολοκληρώθηκε με τον σχηματισμό μίας πρώτης καλδέρας (Σχήμα 2.3-γ), υπολείμματα της οποίας φαίνονται σήμερα στη νότια πλευρά του λιμανιού των Φηρών.

▪ Μινωική Έκρηξη

Η Μινωική έκρηξη συνέβη το 1613 π.Χ. κατά την Ύστερη Εποχή του Χαλκού (Bond and Sparks, 1976: Heiken and McCoy, 1984: Sparks and Wilson, 1990: Doumas, 1983). Ήταν μια τεράστια πλινιακή έκρηξη, με ύψος εκρηκτικής στήλης 36-39Km, κατά την οποία εκτινάχθηκαν περίπου 60Km³ μάγματος σε χρονικό διάστημα περίπου 18 ωρών. Τα χαρακτηριστικά αυτά την κατατάσσουν ως τη δεύτερη μεγαλύτερη έκρηξη της ιστορικής εποχής, μετά το Tambora (Ινδονησία, 1815), με δείκτη ηφαιστειακής εκρηκτικότητας VEI=6 (Σολδάτος, 2011). Οι αποθέσεις τέφρας στη Σαντορίνη αποτελούνται από στάχτη και κίσσηρη με πάχος 50m. Επακόλουθο της έκρηξης ήταν η κατάρρευση του μαγματικού θαλάμου και ο σχηματισμός καλδέρας, που διέυρνε μια προϋπάρχουσα.

• Φάσεις της Μινωικής Έκρηξης

Η Μινωική έκρηξη διακρίνεται σε τέσσερις (4) φάσεις, ανάλογα με τα προϊόντα που αποτέθηκαν από την έκρηξη. Το κέντρο της εντοπίζεται ανάμεσα από τα σημερινά Φηρά και τη Ν. Καμένη.

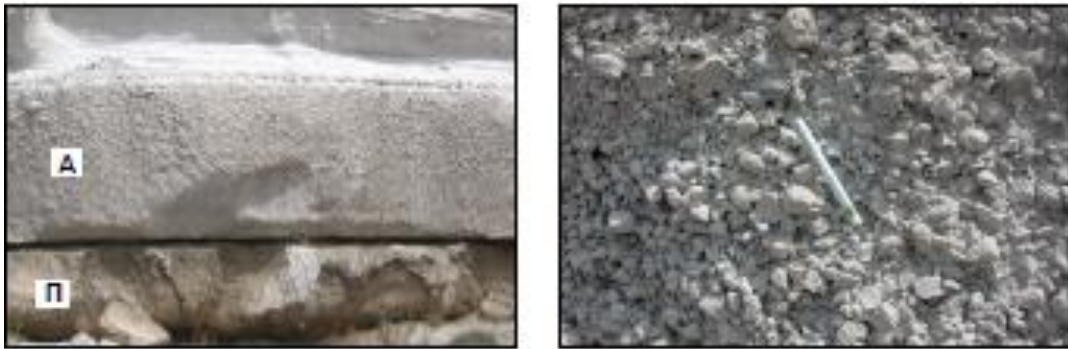
Πάνω από το μεταμορφωμένο υπόβαθρο, υπάρχει μια λεπτή φάση λίγων εκατοστών, αποτελούμενη από αποθέσεις τέφρας, κίσσηρης και λιθικών, η οποία αντιστοιχεί σε μια πρόδρομη φρεατική ή υδροηφαιστειακή έκρηξη. Προηγήθηκε κατά λίγους μήνες της κύριας έκρηξης και μαζί με σεισμούς αποτέλεσε πρόδρομο φαινόμενο της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Η πρώτη φάση της έκρηξης ονομάζεται Μινωική Α και αντιστοιχεί σε αποθέσεις κίσσηρης που κατέπεσε από μια εκρηκτική στήλη ύψους 36-39Km (Σχήμα 2.5). Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βρίσκονται στα νοτιοανατολικά, γεγονός που δείχνει ότι οι αποθέσεις επηρεάστηκαν από ισχυρούς ανέμους.

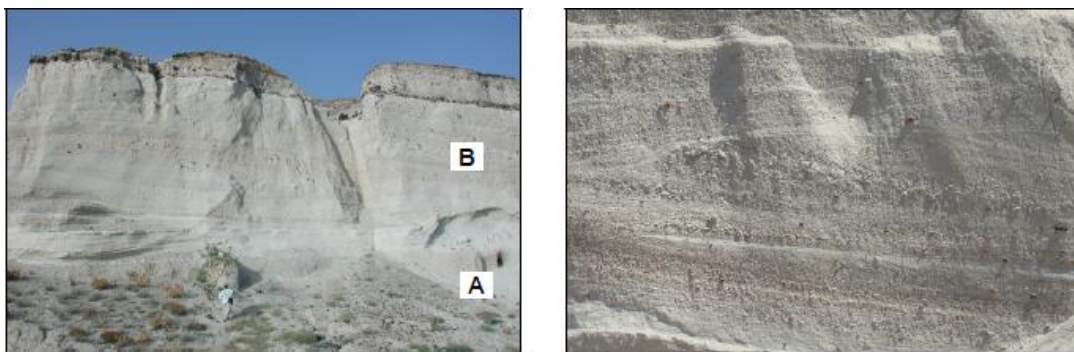
Η επόμενη φάση Μινωική Β, αντιστοιχεί σε mega-πυροκλαστικές αποθέσεις (base surge deposits), με πολυάριθμα λευκά στρώματα, που αποτελούνται από λεπτόκοκκη τέφρα με αποστρογγυλεμένα λιθάρια κίσσηρης, λιθικά τεμάχια και ογκόλιθους (Σχήμα 2.6). Το πάχος των αποθέσεων κυμαίνεται από 0,1-12m ανάλογα με το τοπογραφικό ανάγλυφο.

Πίνακας 2.1: Συνοπτικός πίνακας της ηφαιστειακής δραστηριότητας (Druitt et al., 1998)

ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ		
Ηφαιστειακό γεγονός	Μάγμα *	Χρονολόγηση**
Παλαιά και Νέα Καμένη	Δ	197π.Χ -1950 μ.Χ
ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ		
Δημιουργία καλδέρας 4		
Μινωική έκρηξη	P	3,6 Ka
Δημιουργία καλδέρας 3		
Ιγκνιμβρίτης Ρίβα	P	21 Ka
Ανδεσίτες Οία	A	
Λάβες Θηρασία P		
Ανώτερες Σκωρίες 2	A	79±8,54±3 Ka
Λάβες Σκάρος	B,A,Δ	67±9 Ka
Δημιουργία καλδέρας 2		
Ανώτερες Σκωρίες 1	A	
Βουρβούλος A,Δ		
Κώνοι σκωριών Μεγάλο και Κόκκινο Βουνό, Δακτύλιος τόφφων Κολούμπος	A	76±28, 54±23 Ka
Μεσαία Κίσηρη Δ,A		~100 Ka
Θήρα	A	
Λάβες Σημαντήρι	A	173±33, 172±4 Ka
ΠΡΩΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ		
Δημιουργία καλδέρας 1		
Κατώτερη Κίσηρη 2	P	
Κατώτερη Κίσηρη 1	P	203±24 Ka
Θερμιά 3	A	
Λάβες Ακρωτήρι Αλωνάκι + ΒΑ Θήρα	P	257±36, 224±5 Ka
Θερμιά 2	P	
Θερμιά 1	A	
Λάβες Ακρωτήρι Αλαί A		456±138,364±62,345±8 Ka
Κώνοι σκωριών Μπάλος, Κοκκινόπετρα, Μαυροραχίδι	B,A	522±104,451±27,344±24 Ka
Λάβες Περιστερία 3	B,A,Δ	480±5,478±3,464±8,433±8,308±10 Ka
Θόλοι και λάβες Περιστερία 2	A	496±16 Ka
Περιστερία 1	A	528±23 Ka
Υποθαλάσσιο κέντρο Ακρωτήρι	Δ,P	645±92, 619±35,586±15,582±24,553±10 Ka
Σχιστολιθικό και ασβεστολιθικό υπόβαθρο		
*B: Βασαλτικό, A: Ανδεσιτικό, Δ: Δακτιτικό, P: Ρυολιθικό		
** Χρονολόγηση με K-Ar και Ar-Ar		



Σχήμα 2.5: Αριστερά: Η πρώτη φάση Μινωική Α πάνω από το παλαιοέδαφος. Δεξιά: Αδρόκοκκα κλάσματα κίσσηρης (ορυχείο Μεγαλοχωρίου) (Σολδάτος, 2011)



Σχήμα 2.6: Αριστερά: Η Μινωική Β πάνω από την Μινωική Α. Δεξιά: Αποτελείται από πολυάριθμα λευκά στρώματα λεπτόκοκκης τέφρας. (Σολδάτος, 2011)

Η τρίτη φάση της έκρηξης (Μινωική Γ), αποτελείται από ροές τέφρας. Οι αποθέσεις συνίστανται σε μεγάλου πάχους στρώματα λεπτόκοκκης τέφρας και κίσσηρης πλουσίων σε λιθικά, μεγέθους έως και 10m, με χαοτική και μη ταξινομημένη διάταξη (Σχήμα 2.7). Το πάχος των αποθέσεων είναι μεγαλύτερο στις τοπογραφικά χαμηλές περιοχές. Στα πρανή της καλδέρας το μέγιστο πάχος είναι 40m, στη νότια Σαντορίνη 55m και μειώνεται σημαντικά με την απόσταση, ενώ απουσιάζουν από το βουνό του Προφήτη Ηλία.

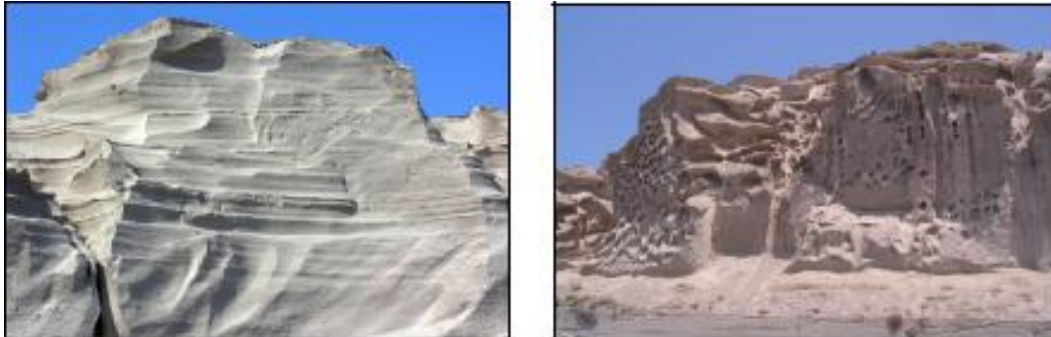
Ανάμεσα στα λιθικά υπάρχει μια πληθώρα ξενολίθων μη ηφαιστειακής προέλευσης, η οποία μαρτυρά πως κατά τη φάση αυτή άρχισε η κατάρρευση μεγάλων τμημάτων του ηφαιστειακού οικοδομήματος και ο σχηματισμός της σημερινής καλδέρας.



Σχήμα 2.7: Αριστερά: Η τρίτη φάση Μινωική Γ βρίσκεται πάνω από τη Μινωική Β (ορυχείο Μεγαλοχωρίου). Δεξιά: Λιθικό από βαλλιστική πρόπτωση. (Σολδάτος, 2011)

Οι αποθέσεις της τέταρτης φάσης της έκρηξης (Μινωική Δ) διαφέρουν αρκετά από τις αποθέσεις των προηγούμενων φάσεων. Έχουν διαφορετικό χρώμα και αποτελούνται από πιο λεπτόκοκκα υλικά, που περιέχουν πολύ περισσότερα και μικρότερα λιθικά,

καθώς και από κλάσματα κίσηρης (Σχήμα 2.8). Οι αποθέσεις στα πρανή της καλδέρας έχουν μικρό πάχος (0.7-2m) ή απουσιάζουν, ενώ στα παράλια απλώνονται σε σχήμα βεντάλιας και αποκτούν μεγάλο πάχος που φθάνει έως τα 40m. Διαβρώνονται πολύ εύκολα, για αυτό και σε κάποια σημεία του νησιού δεν εμφανίζονται καθόλου.



Σχήμα 2.8: Αριστερά: Η τέταρτη φάση Μινωική Δ Δεξιά: Χαρακτηριστικές μορφές κυψελοειδούς αποσάθρωσης (Bulchada) (Σολδάτος, 2011)

• Μετα-Μινωική ηφαιστειακή δραστηριότητα

Μετά τη Μινωική έκρηξη, η ηφαιστειακή δραστηριότητα συνεχίστηκε πολύ πιο ήπια και οικοδόμησε σταδιακά μέσα στην καλδέρα τα νησιά της Παλαιάς και Νέας Καμένης (Fytikas and Vougioukalakis, 1995). Το μάγμα προήρθε από ρηχούς μαγματικούς θαλάμους, σε βάθη μεταξύ 2-4Km και θερμοκρασίες 950-1000°C. Έξω από το καλδερικό βύθισμα, η ηφαιστειακή δραστηριότητα εκδηλώθηκε μόνο τον Σεπτέμβριο του 1650, στην περιοχή όπου βρίσκεται ο ύφαλος Κολούμπος, 8Km ΒΑ από το ομώνυμο ακρωτήριο (Fytikas & Vougioukalakis, 1995).

Το 197 π.Χ., δημιουργήθηκε στη θέση που είναι σήμερα η Παλαιά Καμένη, ένα μικρό νησάκι που ονομάστηκε Ιερά. Αποτελούνταν από θραύσματα λάβας και κίσηρης, τα οποία διαβρώθηκαν σύντομα από τα κύματα και στην θέση τους άφησαν έναν ύφαλο, γνωστό ως 'Μπάγκος' (Βουγιουκαλάκης, 2005).

Κατά το 46-47 μ.Χ. μεγάλες ποσότητες από παχύρευστο μάγμα αναβλύζουν 2Km ΝΔ της Ιεράς και δημιουργούν την Παλαιά Καμένη (Βουγιουκαλάκης, 2005).

Το 726 μ.Χ. το ηφαίστειο επαναδραστηριοποιείται, με εκρήξεις υπο-πλινιακού τύπου, οι οποίες εκτόξευσαν τέφρα και κίσηρη σε αρκετά χιλιόμετρα ύψος (Βουγιουκαλάκης, 2005).

Από το 726 μ.Χ. έως το 1570, το ηφαίστειο βρισκόταν σε φάση ηρεμίας. Επαναδραστηριοποιείται σε μια περιοχή κοντά στον ύφαλο Μπάγκο, ο οποίος είχε πάρει τη θέση της Ιεράς στο κεντρικό τμήμα της καλδέρας, με εκχύσεις παχύρευστου μάγματος και πολυάριθμες εκρήξεις. Στη συνέχεια, από το 1707 έως το 1711 μ.Χ., η ηφαιστειακή δράση εκδηλώνεται με τη μορφή ισχυρών υδροηφαιστειακών εκρήξεων και εκχύσεις λάβας. Ακολουθούν σε σύντομο χρόνο ηφαιστειακές εκρήξεις που εκσφενδονίζουν σε ύψος 2Km ηφαιστειακή τέφρα και βολίδες, οι οποίες σε διάρκεια 4 ετών δημιούργησαν τη Νέα Καμένη.

Τον Ιανουάριο του 1950 ελάβε χώρα η τελευταία ηφαιστειακή έκρηξη στη Σαντορίνη, η οποία περιλάμβανε φρεατικές εκρήξεις και μικρές εκχύσεις λαβών. Η τέφρα εκτινάχθηκε σε ύψος 1000m και οι βολίδες σε απόσταση 850m. Η έκρηξη αυτή έδωσε και το σημερινό σχήμα των Καμένων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.9.

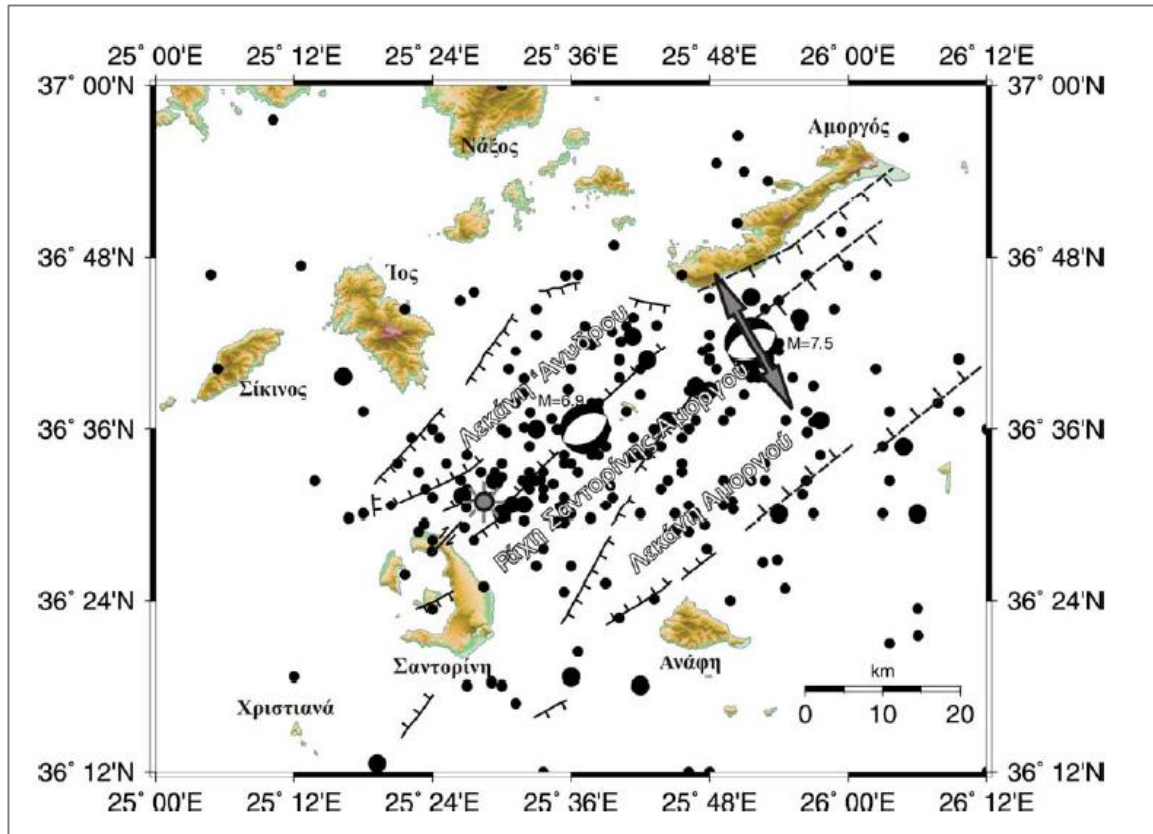
Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι φάσεις της μετα-μινωικής ηφαιστειακής δραστηριότητας με χρονική σειρά από την παλαιότερη στην νεότερη.

Πίνακας 2.2: Συνοπτικός πίνακας της Μετά-Μινωικής ηφαιστειακής δραστηριότητας στη Σαντορίνη. (Σολδάτος, 2011)

ΜΕΤΑ-ΜΙΝΩΙΚΗ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ					
Έναρξη	Λήξη	VEI	Όγκος Λάβας (x 10 ³ m ³)	Χαρακτηριστικά έκρηξης	
Ιερά Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, Υποθαλάσσιες εκρήξεις, δημιουργία νέου νησιού, εκρηκτική δράση					
197 π.Χ	Άγνωστη	3			
Θεία (Παλαιά Καμένη) Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, Υποθαλάσσιες εκρήξεις, δημιουργία νέου νησιού, εκρηκτική δράση, ροές λάβας, θόλοι λάβας, τσουνάμι					
31 Δεκ. 46 μ.Χ	1 Φεβρ. 47 μ.Χ	3			
Θεία (Παλαιά Καμένη) Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, Υποθαλάσσιες εκρήξεις, δημιουργία νέου νησιού, εκρηκτική δράση, ροές λάβας, θόλοι λάβας, ζημιές					
15 Ιουλ. 726 μ.Χ	Άγνωστη	4	50		
Μικρή Καμένη Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, Υποθαλάσσιες εκρήξεις, δημιουργία νέου νησιού, εκρηκτική δράση, ροές λάβας, θόλοι λάβας					
1570	1573	3	1.2		
Κολούμπος Πλευρικός πόρος, Υποθαλάσσιες εκρήξεις, Δημιουργία νέου νησιού, εκρηκτική δράση, ροές λάβας, θύματα, ζημιές, τσουνάμι					
27 Σεπ 1650	6 Δεκ 1650	4	>550±500		
Νέα Καμένη Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, Υποθαλάσσιες εκρήξεις, δημιουργία νέου νησιού, εκρηκτική δράση, ροές λάβας, θόλοι λάβας, θύματα, ζημιές					
23 Μαΐου 1707	14 Σεπ 1711	3	81		
Νέα Καμένη(Γεώργιος, Αφρόεσσα, Νησίδες Μάη) Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, Υποθαλάσσιες εκρήξεις, δημιουργία νέου νησιού, εκρηκτική δράση, ροές λάβας, θόλοι λάβας, θύματα, ζημιές, εκκένωση					
26 Ιαν 1866	15 Οκτ. 1870	2	140		
Νέα Καμένη(Δάφνη, Ναυτίλος) Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, εκρηκτική δράση, φρεατικές εκρήξεις, ροές λάβας, θόλοι λάβας					
11 Αυγ 1925	17 Μαρ 1928	2	100		
Νέα Καμένη(Τρίτων, Κτενάς, Φουκέ, Σμιθ, Ρεκ, Νίκη) Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, υποθαλάσσιες εκρήξεις, εκρηκτική δράση, φρεατικές εκρήξεις, ροές λάβας, θόλοι λάβας, ζημιές					
20 Αυγ 1939	2 Ιουλ 1941	2	64		
Νέα Καμένη (Λιάτσικας) Εκρήξεις από κεντρικό πόρο, υποθαλάσσιες εκρήξεις, εκρηκτική δράση, φρεατικές εκρήξεις, ροές λάβας, θόλοι λάβας					
10 Ιαν 1950	2 Φεβρ 1950	2	0.07		

2.3 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ

Το κεντρικό τμήμα του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου κυριαρχείται από ένα εφελκυστικό πεδίο τάσεων διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ έως ΒΔ-ΝΑ (Σχήμα 2.10), το οποίο δημιουργεί κανονικά ρήγματα με παρατάξεις διεύθυνσης ΑΒΑ-ΔΝΔ έως ΒΑ-ΝΔ (Kiratzi & Papazachos, 1995; Papazachos et al., 2001). Η συγκεκριμένη περιοχή θεωρείται τεκτονικά ενεργή από τα τέλη του Μειόκαινου έως και σήμερα (Perissoratis, 1990, 1995; Piper and Perissoratis, 1995).



Σχήμα 2.10: Λεπτομερής τεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής. (Perissoratis, 1995, Mountrakis et al., 1996)

Η τεκτονική δομή της Σαντορίνης είναι πολύπλοκη και αντανακλά τις πολλές και διαδοχικές φάσεις κατάρρευσης της καλδέρας (Fytikas et al., 1990b). Οι εκτενείς τεκτονικές ζώνες (ρήγματα) που υπάρχουν στην περιοχή, αποτέλεσαν τις διόδους ανόδου του μάγματος προς την επιφάνεια.

Το κύριο τεκτονικό στοιχείο της ευρύτερης περιοχής του ηφαιστειακού συμπλέγματος της Σαντορίνης είναι μια τεκτονική ζώνη διάρρηξης με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση και μετατόπιση των διαφόρων ηφαιστειακών κέντρων, ενώ παράλληλα έχει επηρεάσει τις κυριότερες τεκτονικές διαρρήξεις που παρατηρούνται στην επιφάνεια του νησιού (Mountrakis et al., 1996). Η ζώνη αυτή έχει μήκος περίπου 70Km και εκτείνεται ΒΑ της Σαντορίνης προς το νησί της Αμοργού και ΝΔ προς τα ηφαιστειακά νησιά των Χριστιανών (Papazachos and Panagiotopoulos, 1993, Mountrakis et al., 1996).

Συγκεκριμένα, τα ηφαιστειακά κέντρα της Μετά-Μινωικής ενδοκαλδερικής δραστηριότητας κατανέμονται σε μια ζώνη πλάτους 600m και μήκους 4500m με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση, η οποία ονομάζεται Τεκτονική Γραμμή Καμένης (Fytikas et al., 1990) (Σχήμα 2.11). Η Γραμμή Καμένης συνδέεται με τις εκρήξεις που έλαβαν χώρα μεταξύ

197 π.Χ. και 1950 μ.Χ. (Perissoratis, 1995). Επίσης στο χώρο αυτό εστιάστηκαν και οι μικρού μεγέθους σεισμοί, έως 3.2 της κλίμακας Ρίχτερ (Panagiotopoulos et.al., 2012), που καταγράφηκαν κατά την πρόσφατη «ανησυχία» του ηφαιστείου που έλαβε χώρα την περίοδο 2011-2012.

Μια δεύτερη τεκτονική γραμμή με διεύθυνση BA-NΔ ορίζεται από τους κώνους σκωριών του Μεγάλου Βουνού στην BA μεριά του νησιού και από το ηφαιστειακό κέντρο Κολούμπο και ονομάζεται Τεκτονική γραμμή Κολούμπου (Fytikas et al., 1990) (Σχήμα 2.11). Η γραμμή αυτή κυριαρχείται από ένα κύριο δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, διεύθυνσης 30° - 40° από το Βορρά. Αυτό ορίζει τη ζώνη παραμόρφωσης στο βόρειο τμήμα του νησιού μαζί και με άλλα μικρότερα κανονικά ρήγματα διεύθυνσης BA-NΔ (Σχήμα 2.12). Το ηφαιστειακό κέντρο του Κολούμπου εκτείνεται σε BA-NΔ διεύθυνση με τον μέγιστο άξονά του να φτάνει τα 3Km μήκος (Vougioukalakis et al., 1994, 1995; Francalanci et al, 2005; Vougioukalakis and Fytikas, 2005; Sigourdsson et al, 2006). Η συνέχεια της παραπάνω ζώνης στο ακρωτήριο του Κολούμπου είναι ορατή με την μορφή μικρών κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης BBA-NNΔ (Mountrakis et al., 1996).

Οι μαγματικές φλέβες που υπάρχουν κατά μήκος των BA τοιχωμάτων της καλδέρας της Σαντορίνης φαίνεται να είναι τεκτονικής προέλευσης και μάλιστα να ανήκουν στην ίδια τεκτονική ζώνη με τα ρήγματα της περιοχής του βόρειου τμήματος του νησιού. Η εκτατική τάση επέτρεψε στις φλέβες τροφοδοσίας να αναπτυχθούν σε μια διεύθυνση BA-NΔ, η οποία υποδηλώνει έναν κύριο άξονα εφελκυσμού, διεύθυνσης BBA-NNΔ (Mountrakis et al., 1996).

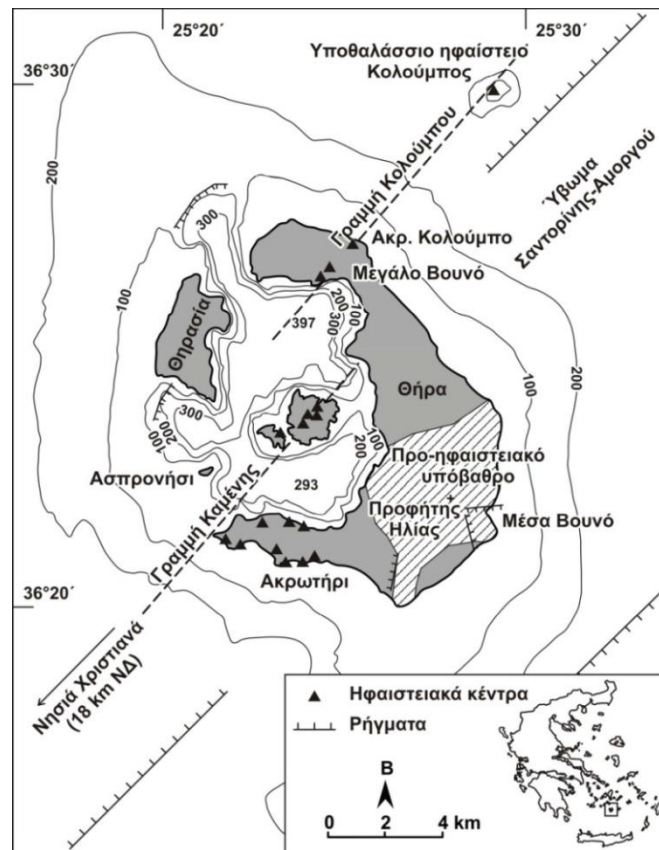
Στην περιοχή του βουνού του Προφήτη Ηλία, κυριάρχουν κανονικά ρήγματα διεύθυνσης είτε ΔΒΔ-ΑΝΑ, τα όποια χωρίζουν το προηφαιστειακό υπόβαθρο από τα ηφαιστειακά πετρώματα, είτε BA-NΔ, που βρίσκονται μέσα στον ασβεστόλιθο (Mountrakis et al., 1996). Το νότιο τμήμα της Σαντορίνης, κοντά στο χωριό του Ακρωτηρίου, κυριαρχείται από κανονικά ρήγματα διεύθυνσης από τον $B100^{\circ}$ - 170° (Mountrakis et al., 1996).

Κάποιες από τις μεγαλύτερες καταστροφικές προϊστορικές εκρήξεις βρίσκονται πάνω στη Γραμμή Καμένης, μεταξύ Ν. Καμένης και Φηρών, και στη Γραμμή Κολούμπου, μεταξύ Οίας-BA Θηρασίας (Fytikas et al., 1990).

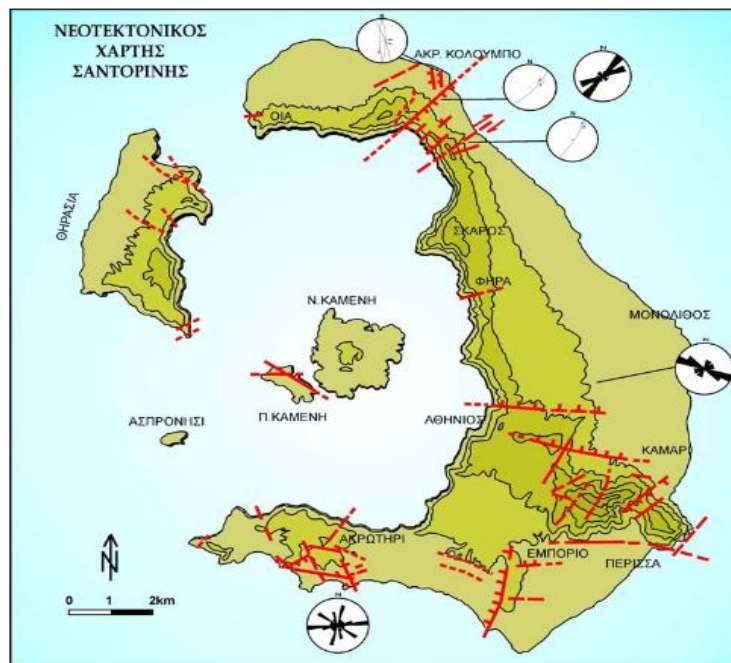
Η ύπαρξη των δύο αυτών τεκτονικών γραμμών επιβεβαιώνονται και από πρόσφατες νεοτεκτονικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες θέσεις στο νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης (Mountrakis et al., 1996).

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις που έγιναν στην περιοχή της Σαντορίνης, κυρίως στο νότιο τμήμα, στα πλαίσια της γεωθερμικής διερεύνησης του νησιού κατά τη δεκαετία του 1980 (Fytikas et al, 1990a), έδειξαν ότι μεταξύ του Μεγαλοχωρίου και της Βλυχάδας υπάρχει ένα τεκτονικό βύθισμα (graben) (Σχήμα 2.13) με διεύθυνση B-N και μέγιστο βάθος περίπου 1500m. Το βύθισμα αυτό επηρεάζει τους παλαιότερους σχηματισμούς του υποβάθρου και συνδέεται άμεσα με τη σημαντική γεωθερμική ανωμαλία σε αυτό το τμήμα του νησιού, που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

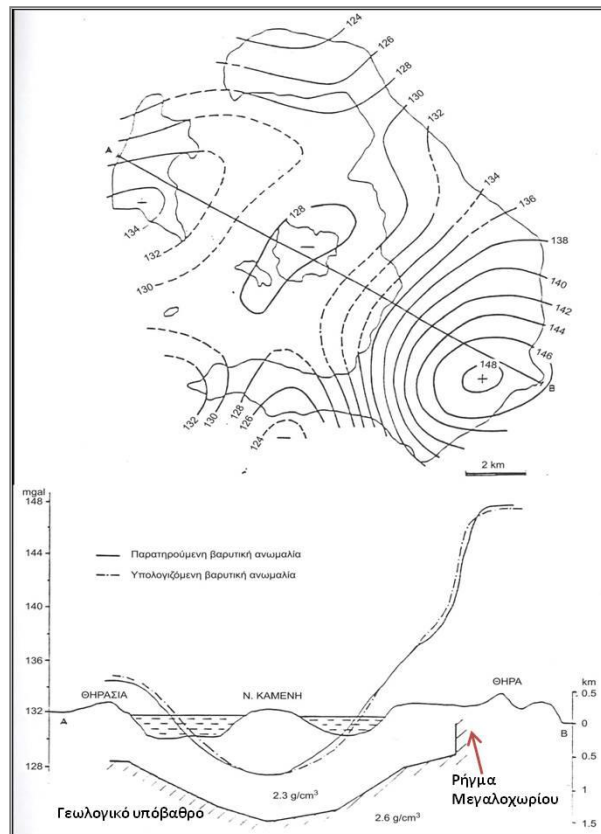
Εκτός από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις έγινε και γεωηλεκτρική έρευνα (Budetta et al, 1984) που έδειξε πολύ χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 2.14). Συγκεκριμένα, στην περιοχή νότια του Μεγαλοχωρίου, κοντά στην Αγία Άννα μετρήθηκαν τιμές της τάξης των $1.5 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ σε βάθη 700-800m. Γεγονός που αποδεικνύει την ύπαρξη στρωμάτων που περιέχουν ρευστά μεγάλης αλατότητας και αυξημένης θερμοκρασίας, περίπου στους 150°C .



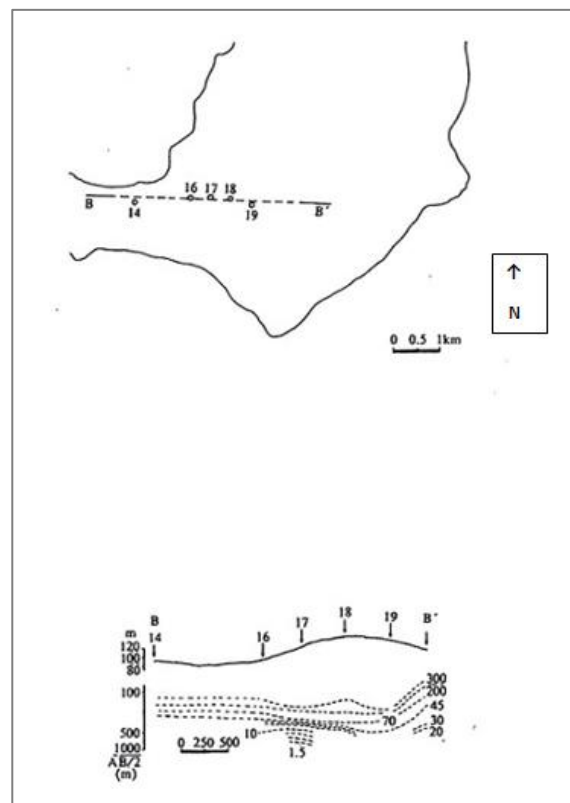
Σχήμα 2.11: Η τεκτονική κατάσταση του ηφαιστειακού συμπλέγματος της Σαντορίνης (Βουγιουκαλάκης, 2005)



Σχήμα 2.12: Νεοτεκτονικός χάρτης της Σαντορίνης (Mountrakis et al. 1996, Βουγιουκαλάκης, 2007)



Σχήμα 2.13: Η δομή της Σαντορίνης με βάση τις βαρυντομετρικές μετρήσεις, το υπόβαθρο και το ρήγμα Μεγαλοχωρίου (Fytikas et al, 1990a)



Σχήμα 2.14: Γεωηλεκτρική έρευνα κατά μήκος της τομής B-B'. (Budetta et al, 1984)

2.4 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σύμφωνα με τους Μπεζέ & Κουρμούλη (2003), οι οποίοι πραγματοποίησαν λεπτομερή υδρογεωλογική έρευνα στη Σαντορίνη, το νησί δεν διαθέτει πολλά επιφανειακά νερά λόγω χαμηλού ύψους βροχοπτώσεων. Η ποσότητα τους εκτιμάται σε 300.000 m³/έτος, η οποία όμως διπλασιάζεται ή τριπλασιάζεται στην περίπτωση βροχερών ετών.

Η κύρια υδροφορία αναπτύσσεται σε βάθη κοντά ή κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων δεν διατηρείται σταθερό κατά τη διάρκεια του έτους. Το καλοκαίρι μειώνεται λόγω της εκφόρτισης του υδροφόρου ορίζοντα προς τη θάλασσα και λόγω των αντλήσεων. Αντίθετα, τον χειμώνα παρατηρείται αύξηση των αποθεμάτων εξαιτίας των βροχοπτώσεων και της μείωσης των αντλήσεων.

Οι πιο σημαντικοί υδροφόροι ορίζοντες του νησιού σχηματίζονται μέσα στα στρώματα κίσσηρης. Πρόκειται για ελεύθερους υδροφορείς που εντοπίζονται στις πεδινές περιοχές, οι οποίες βρίσκονται υψομετρικά λίγο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Υδροφορία εντοπίζεται επίσης μέσα στους τριαδικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι εκφορτίζονται ταχύτατα είτε προς την θάλασσα είτε προς τους γειτονικούς ηφαιστειακούς σχηματισμούς.

Διακρίνονται τέσσερις κύριοι υπόγειοι υδροφορείς: της Οίας, των Φηρών, της Μεσαριάς και του Εμπορείου.

i. Υδροφορέας της Οίας

Στην περιοχή της Οίας η επιφάνεια του εδάφους έχει κλίση προς τον Βορρά και καλύπτεται από λεπτό στρώμα (10-15m) της ανώτερης κίσσηρης και ένα επίσης μικρού πάχους στρώμα της μεσαίας κίσσηρης. Το βάθος της υπόγειας στάθμης βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας. Παρατηρούνται φαινόμενα υφαλμύρισης λόγω διείσδυσης του θαλασσινού νερού στον παράκτιο και πορώδη υδροφορέα που αναπτύσσεται μέσα σε αυτούς τους σχηματισμούς. Στην περιοχή αυτή, οι περισσότερες γεωτρήσεις είτε αντλούν αναγκαστικά πολύ μικρές ποσότητες νερού είτε δεν λειτουργούν πλέον, λόγω του ποιοτικά υποβαθμισμένου υπόγειου νερού.

ii. Υδροφορέας των Φηρών

Ο υδροφόρος ορίζοντας των Φηρών εκτείνεται στις περιοχές του Ημεροβιγλίου, του Βουρβούλου, των Φηρών και του Καρτεράδου. Οι υδροφόροι σχηματισμοί εντοπίζονται στα στρώματα της μεσαίας κίσσηρης, που παρουσιάζουν γενική κλίση προς τα ανατολικά. Στην συγκεκριμένη περιοχή κοντά στην παραλία σε υψόμετρο 60-80m κατασκευάστηκαν από το ΙΓΜΕ ερευνητικές γεωτρήσεις, με σκοπό να εντοπιστεί το στρώμα της μεταφερμένης κίσσηρης.

Η έρευνα έδειξε ότι και το μεσαίο και το κατώτερο στρώμα κίσσηρης εμφανίζουν υδροφορία, δεν έχουν όμως μεγάλη περατότητα. Για τον λόγο αυτό, οι μεταγενέστερες γεωτρήσεις κατασκευάστηκαν σε υψόμετρο 100-120m στο κέντρο του νησιού, όπου ο υδροφορέας του γλυκού νερού έχει μεγαλύτερο πάχος (Μπεζές, 2003).

Οι γεωτρήσεις που λειτουργούν στην περιοχή του υδροφόρου ορίζοντα των Φηρών είναι συγκεντρωμένες σε πολύ μικρή έκταση και αντλούν περισσότερά κυβικά από όσα θα έπρεπε, ώστε να αποφεύγεται η υφαλμύριση του υδροφορέα. Σύμφωνα με τον Μπεζέ (2003), η μέγιστη παροχή άντλησης ανά γεώτρηση, ώστε να εξασφαλίζεται ανεκτή ποιότητα νερού, είναι της τάξης των 5-7m³/h. Εάν ξεπεραστεί αυτός ο ρυθμός, τότε η γεώτρηση αντλεί και θαλασσινό νερό που προέρχεται από τα βαθύτερα

στρώματα, κάτω από την διαχωριστική επιφάνεια (διεπιφάνεια) γλυκού-αλμυρού νερού. Έχει παρατηρηθεί ότι η υφαλμύριση είναι συνάρτηση περισσότερο της παροχής άντλησης και λιγότερο της διάρκειας της άντλησης.

iii. Υδροφορέας της Μεσαριάς

Ο υδροφορέας της Μεσαριάς εκτείνεται στις περιοχές της Μεσαριάς, του Βόθωνα, της Έξω Γωνιάς και της Επισκοπής Γωνιάς. Λόγω μιας γενικής αναθόλωσης των πετρωμάτων, τα στρώματα της κίσσηρης βρίσκονται λίγο υψηλότερα από ότι στην περιοχή των Φηρών.

Η περιοχή αυτή παρουσιάζεται «ευνοημένη», διότι δέχεται πολλά επιφανειακά νερά που προέρχονται από τον ορεινό όγκο του Προφήτη Ηλία και καταλήγουν σε χείμαρρους που διασχίζουν την πεδιάδα και εμπλουτίζουν τους υδροφόρους ορίζοντες. Παρόλα αυτά, η περιοχή έχει υποστεί έντονες ανθρωπογενείς επεμβάσεις, με την κατασκευή του αεροδρομίου και την κατασκευή δρόμων στη θέση των χειμάρρων, οι οποίες έχουν προκαλέσει σημαντική μείωση στον εμπλουτισμό των υπόγειων οριζόντων.

iv. Υδροφόρας του Εμπορείου

Ο υδροφόρος ορίζοντας του Εμπορείου εκτείνεται στις περιοχές του Εμπορείου και του Μεγαλοχωρίου (Μπεζές, 2003). Ουσιαστικά περιλαμβάνει την πεδινή χαμηλή περιοχή νότια του Προφήτη Ηλία, νότια του Εμπορείου και του βουνού Γαβρίλος. Το βουνό Γαβρίλος φθάνει μέχρι τις νότιες ακτές της Σαντορίνης, στον οικισμό της Βλυχάδας και χωρίζει την περιοχή σε δυο τμήματα, ανατολικά και δυτικά.

Τα όρη Προφήτης Ηλίας και Γαβρίλος καλύπτονται από τριαδικούς ασβεστόλιθους, που είναι επωθημένοι πάνω σε ένα σύστημα σχιστολίθων-φυλλιτών. Στον Προφήτη Ηλία σχηματίζεται ένα αντίκλινο, του οποίου η αναθόλωση οδηγεί τα υπόγεια νερά των ασβεστόλιθων είτε προς το Καμάρι είτε προς την Περίσσα, σχηματίζοντας έναν υπόγειο υδροκρίτη, ο οποίος διαχωρίζει τους υπόγειους υδροφορείς που σχηματίζονται μέσα την κίσσηρη. Ταυτόχρονα, στους συγκεκριμένους υδροφορείς παρατηρούνται φαινόμενα υφαλμύρισης, λόγω της έντονης άντλησης για αρδευτικούς σκοπούς.

Στην περιοχή της Βλυχάδας και του Εξωμύτη, ο ασβεστόλιθος βυθίζεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εύκολη διείσδυση της θάλασσας μέσα στον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα και την υφαλμύριση όλων των υπόγειων νερών της περιοχής, ακόμη και των αλλουβιακών υδροφόρων οριζόντων που επικοινωνούν με τον καρστικό ασβεστόλιθο.

Οι υδροφόροι ορίζοντες του νησιού θα μπορούσαν να εμπλουτίζονται τεχνητά αντί το υπόγειο νερό να διοχετεύεται κατευθείαν στην θάλασσα. Η καταλληλότερη μέθοδος για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι είναι η μέθοδος των λεκανών διήθησης ή κατάκλυσης. Για εμπλουτισμό θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν και τα απορρέοντα νερά από την πίστα του αεροδρομίου.

Οι αντλήσεις των υπόγειων νερών, η αποθήκευση του βρόχινου νερού σε δεξαμενές και οι πέντε (5) μονάδες αφαλάτωσης που λειτουργούν από το 2002 συνεισφέρουν στην κάλυψη των συνολικών υδατικών αναγκών του νησιού σε νερό χρήσης. Οι μονάδες αφαλάτωσης βρίσκονται στην Οία, στα Φηρά και στο Ακρωτήρι, λειτουργούν με τη μέθοδο της αντιστροφής ώσμωσης και έχουν ελάχιστη δυνατότητα παραγωγής. Η μονάδα των Φηρών έχει δυναμικότητα αφαλάτωσης ως και 2000 m³/h, της Οίας ως 900 m³/h και τέλος του Ακρωτηρίου ανέρχεται μόλις στα 250 m³/day (Σιγάλας, 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ

ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ

Οι γεωτεκτονικές και μαγματικές συνθήκες που επικρατούν στη Σαντορίνη έχουν δημιουργήσει ευνοϊκές προϋποθέσεις για σημαντική γεωθερμική και υδροθερμική δραστηριότητα, η οποία αποδεικνύεται από την ύπαρξη μαγματικών θαλάμων σε μικρά βάθη (3-4Km κάτω από την καλδέρα) και αρκετών παράκτιων και υποθαλάσσιων θερμών πηγών (Fytikas et al., 1990a). Οι θερμές πηγές και ατμίδες (φουμαρόλες) που βρίσκονται στην Παλαιά και τη Νέα Καμένη έχουν μέγιστη θερμοκρασία 97°C, ενώ η θερμοκρασία των ρευστών που διαφεύγουν από τον πυθμένα του κρατήρα του Κολούμπου φτάνει τους 230°C. Στο κέντρο της Νέας Καμένης εντοπίζονται μικροί υδροθερμικοί κρατήρες που σχηματίζονται λόγω υπερθέρμανσης του νερού που περιέχεται μέσα στα πετρώματα και η οποία προκαλεί απότομες «υδροθερμικές» εκρήξεις, τινάζοντας στον αέρα πέτρες, λάσπη, ατμό και υπέρθερμο νερό.

Όσον αφορά το νησί της Σαντορίνης, οι θερμές πηγές αναβλύζουν στο εσωτερικό μέρος της καλδέρας κατά μήκος ρηγμάτων και ρωγμών που υπάρχουν μέσα στο προ-ηφαιστειακό υπόβαθρο. Οι κυριότερες πηγές βρίσκονται νότια του Αθηνιού στη θέση Πλάκα (33.6°C), στα πρανή της καλδέρας, στο Αθήρμι Χριστού (56°C) και στην Βλυχάδα (32°C) στο νοτιότερο άκρο του νησιού. Η ύπαρξη επιφανειακών πολύ πρόσφατων και υδροπερατών ηφαιστειακών στρωμάτων επιτρέπει τη διείσδυση του θαλασσινού νερού, τη μείωση της θερμοκρασίας των ανερχόμενων ρευστών, εμποδίζοντας ταυτόχρονα την εμφάνιση πιο εντυπωσιακών επιφανειακών γεωθερμικών εκδηλώσεων σε ένα τόσο ενεργό ηφαιστειακό νησί.

Η γεωθερμική έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το ΙΓΜΕ τη δεκαετία του 1980 έδειξε την ύπαρξη γεωθερμικής ανωμαλίας εντός ή πολύ κοντά στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο, μέσα στο οποίο αναπτύσσεται το υδροθερμικό σύστημα τουλάχιστον χαμηλής και πιθανότατα μέσης ενθαλπίας. Τα θερμά ρευστά προστατεύονται και απομονώνονται, λόγω των αδιαπέρατων πετρωμάτων του υποβάθρου, από το ψυχρό επιφανειακό μετεωρικό ή θαλασσινό νερό. Τα «ανοικτά» κανονικά ρήγματα που υπάρχουν στην περιοχή, λειτουργούν ως οδοί κυκλοφορίας των «γεωθερμικών» νερών και επιτρέπουν την άνοδό τους προς την επιφάνεια.

Στη βόρεια Σαντορίνη επικρατούν χαμηλές θερμοκρασιακές βαθμίδες (Fytikas et al., 1990a). Γεωηλεκτρική έρευνα επιβεβαίωσε την παρουσία ενός σημαντικού γεωθερμικού συστήματος χαμηλής ενθαλπίας στο νότιο τμήμα της Σαντορίνης, μεταξύ Ακρωτηρίου, Εμπορείου και Μεγαλοχωρίου και οδήγησε στη χωροθέτηση ενός πιθανού γεωθερμικού πεδίου (Σχήμα 3.1) (ΥΑ Δ9Β/Φ166/12647/ΓΔΦΠ3557/193, ΦΕΚ 1012/Β, 19-7-2005). Η γεωθερμική ανωμαλία σε αυτό το τμήμα του νησιού οφείλεται πιθανότατα στην ύπαρξη του τεκτονικού βυθίσματος διεύθυνσης Β-Ν (όπως έδειξε η γεωφυσική έρευνα) και τη δράση μικρότερων ρηγμάτων με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση, που είναι παράλληλα στη γραμμή Καμένης. Το γεωθερμικό πεδίο έχει έκταση 25Km² και θερμοκρασίες ταμιευτήρα 30-65°C σε μικρά σχετικά βάθη (50-250m). Οι συντεταγμένες των σημείων οριοθέτησης του γεωθερμικού πεδίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 και των ερευνητικών γεωτρήσεων του ΙΓΜΕ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.



Σχήμα3.1: Όρια του πιθανού γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας της Σαντορίνης (πηγή: ΙΓΜΕ, Δ/ΝΣΗ Γεωθερμίας και Θεμομεταλλικών Υδάτων)

Πίνακας 3.1: Οριοθέτηση πιθανού γεωθερμικού πεδίου.

ΚΟΡΥΦΗ ΠΟΛΥΓΩΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ (ΕΓΣΑ 87)	
	X	Ψ
A	628403,08	4028066,48
B	632294,97	4024320,53
Γ	629203,08	4021439,46
Δ	627273,49	4023064,55
E	624091,48	4023144,77
Z	623636,90	4025150,24
H	626725,33	4024495,12

Πίνακας 3.2: Συντεταγμένες ερευνητικών γεωτρήσεων του πεδίου (ΙΓΜΕ).

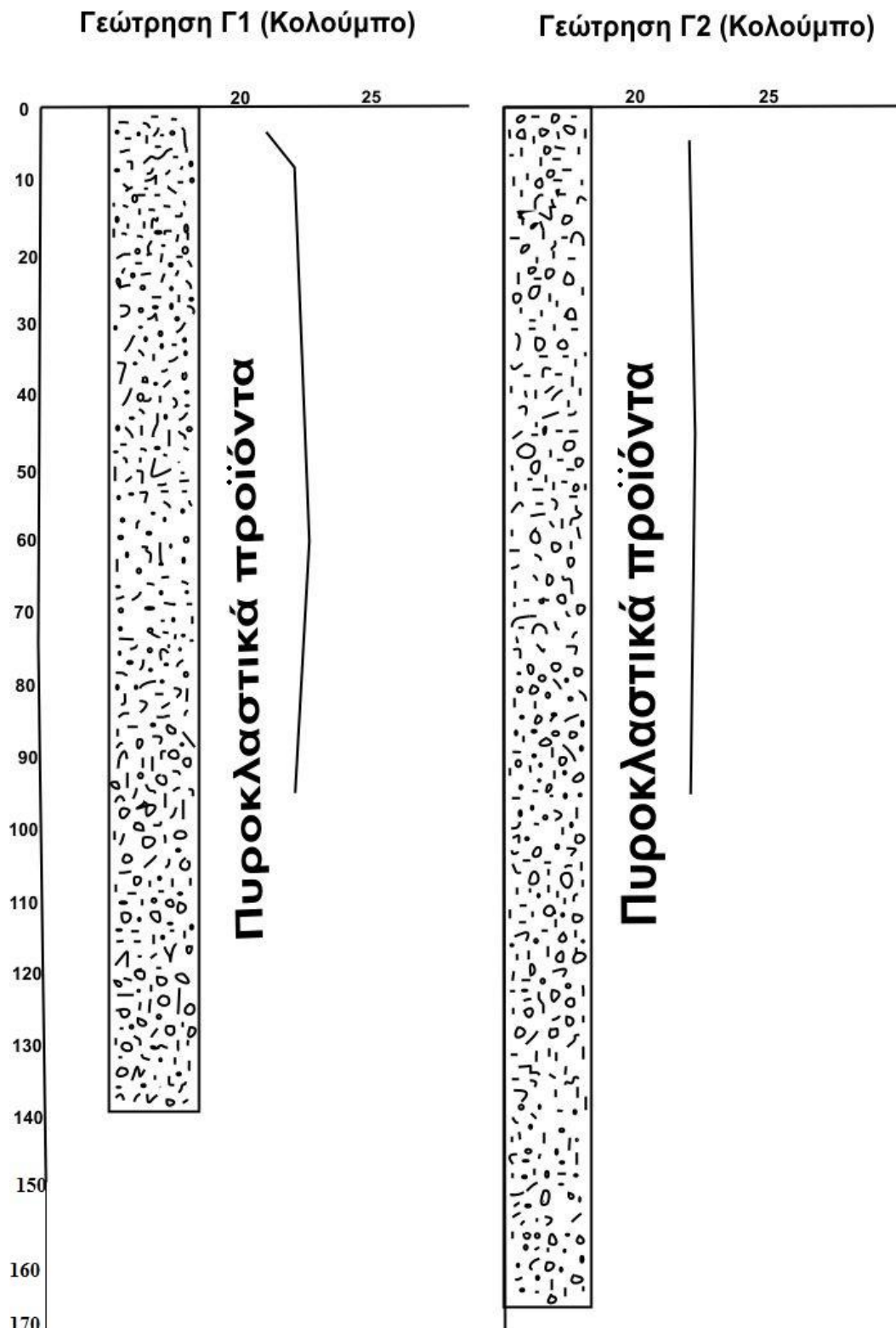
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ(ΕΓΣΑ87)		ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΕ m	ΕΙΔΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ
	X	Ψ		
S1	628221,75	4025916,00	180	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
S-2	627077,56	4024155,25	70	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
S-3	628321,69	4024936,00	140	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-10	628390,63	4027235,00	178	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-11	625138,63	4023552,50	182	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-3	629527,56	4022872,50	138	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-4	629701,19	4024823,25	156	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-5	628606,50	4022400,75	160	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-6	624282,06	4024536,25	183	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-7	625491,44	4023350,25	180	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-8	627004,25	4024144,00	172	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ
Γ-9	628249,50	4025839,00	180	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ

• Γεωθερμικές Γεωτρήσεις

Κατά το διάστημα της γεωθερμικής έρευνας κατασκευάστηκαν από το ΙΓΜΕ 11 ερευνητικές, μικρής διαμέτρου γεωτρήσεις, με σκοπό τη μέλετη της στρωματογραφίας, τη μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας και τη δειγματοληψία ρευστών από βαθύτερους υδροφόρους ορίζοντες (Καβουρίδης κ.α., 1982). Στον χάρτη του σχήματος 3.1 παρουσιάζονται οι εννέα (9) ερευνητικές γεωτρήσεις που κατασκευάστηκαν από το ΙΓΜΕ και αντίστοιχα οι τρεις (3) παραγωγικές.

Στο βόρειο τμήμα του νησιού, στη θέση Κολούμπο, έγιναν δυο γεωτρήσεις, κατά μήκος ενός συστήματος ρηγμάτων ΒΒΑ/ΝΝΔ διεύθυνσης, οι οποίες έφτασαν σε βάθος 140 και 170m αντίστοιχα και διέτρησαν τους πυροκλαστικούς σχηματισμούς της σειράς Κολούμπο. Οι γεωτρήσεις αυτές δεν έδωσαν κάποια θετική γεωθερμική βαθμίδα, γιατί οι σχηματισμοί παρουσιάζουν μεγάλη περατότητα, επιτρέποντας την διείσδυση της θάλασσας, με αποτέλεσμα την εξάλειψη κάθε αξιόπιστης ένδειξης ροής

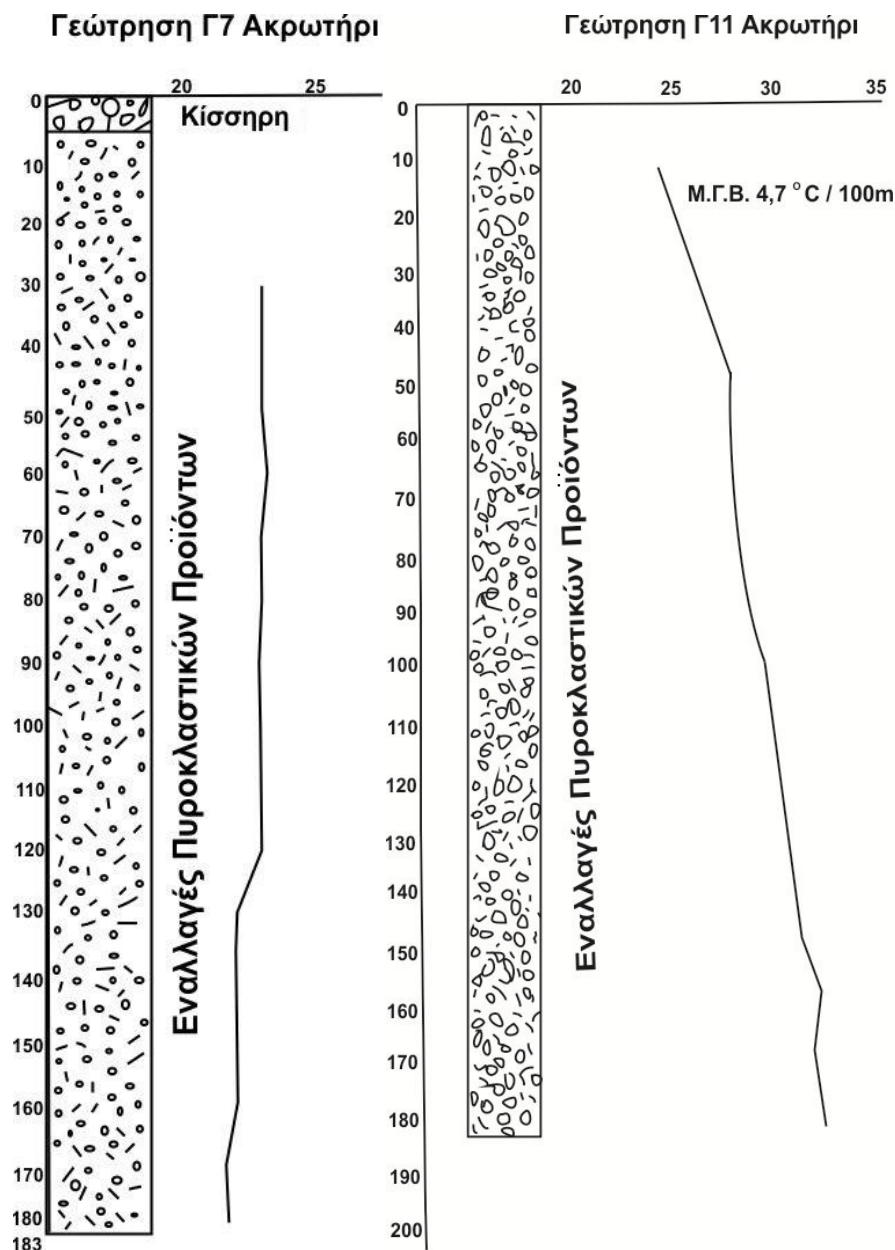
θερμότητας από τα βαθύτερα στρώματα προς την επιφάνεια (Σχήμα 3.2) (Καβουρίδης κ.α., 1982).



Σχήμα 3.2: Λιθολογική στήλη των Γ1 και Γ2 και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

Στο νότιο τμήμα της Σαντορίνης, όπου οι προηγούμενες έρευνες έδειξαν αυξημένη πιθανότητα ύπαρξης γεωθερμικής ανωμαλίας, έγιναν συνολικά 9 ερευνητικές γεωτρήσεις, τα βάθη των οποίων κυμαίνονται μεταξύ 138m και 182m (Καβουρίδης κ.α., 1982).

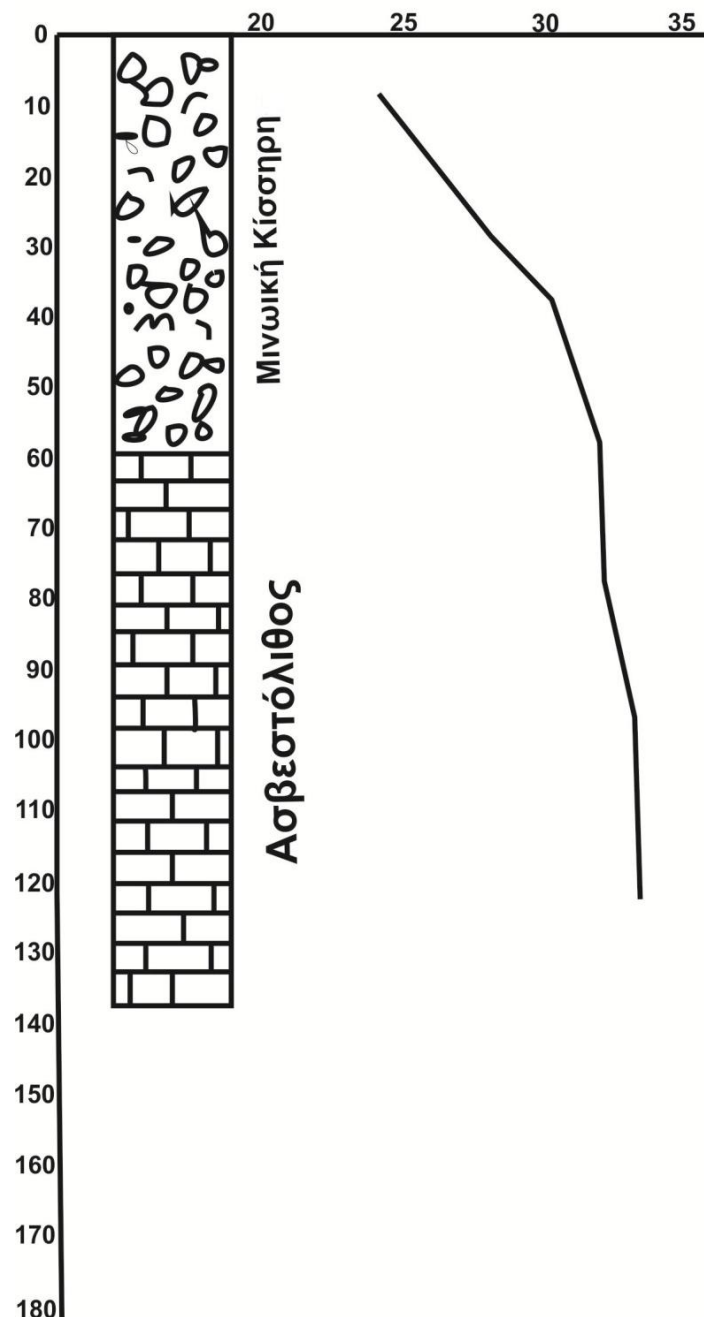
Δύο γεωτρήσεις έγιναν στην περιοχή του Ακρωτηρίου (Γ7 180m) και (Γ11 182m), μέσα σε εναλλαγές πυροκλαστικών προϊόντων (Σχήμα 3.3). Στην γεώτρηση Γ7 δεν ήταν δυνατόν να μετρηθεί η γεωθερμική βαθμίδα, επειδή οι σχηματισμοί ήταν πολύ περατοί. Η γεώτρηση Γ11 διέτρησε ελαφρά εξαλλοιωμένους ηφαιστειακούς σχηματισμούς και παρουσίασε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος, με τη γεωθερμική βαθμίδα να διαμορφώνεται στους $4,7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.



Σχήμα 3.3: Λιθολογική στήλη των Γ11 και Γ7 και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

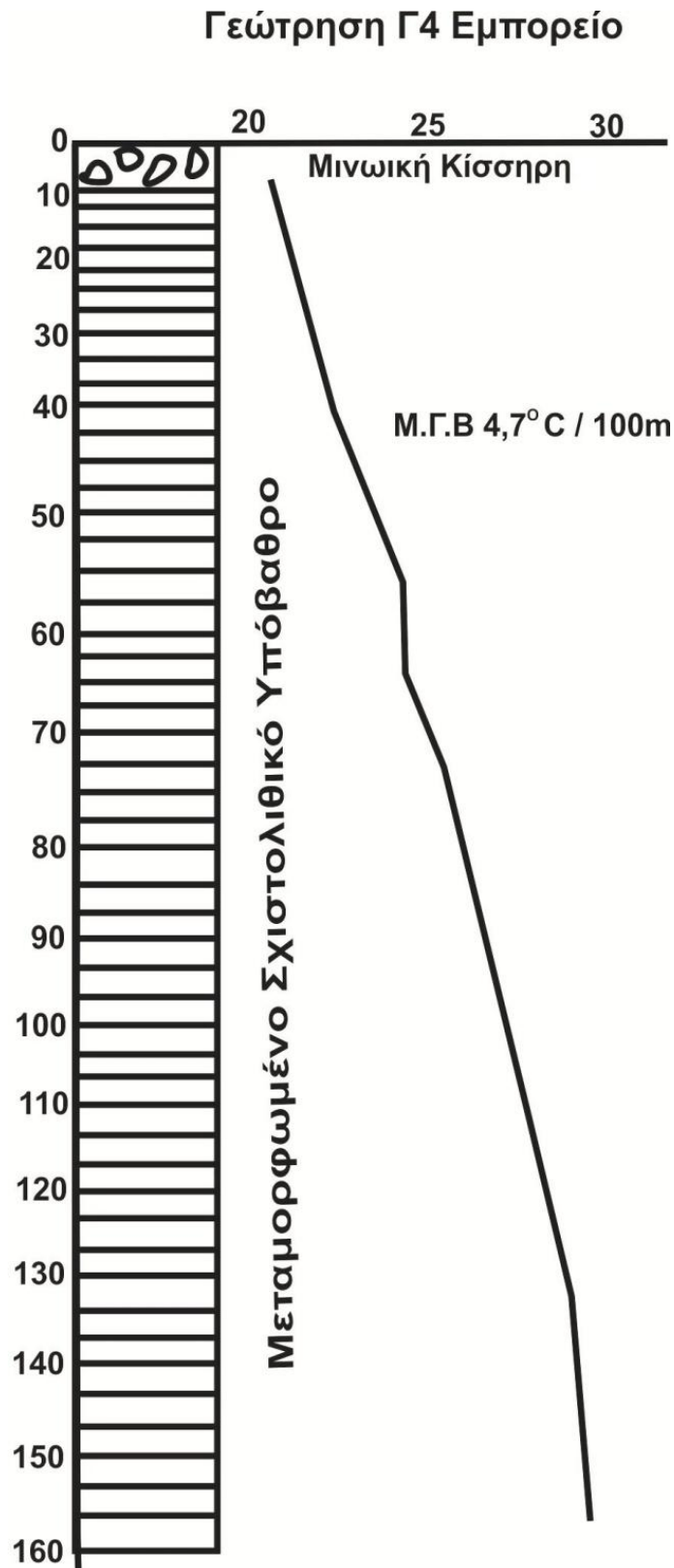
Στην περιοχή του Εξωμύτη η ερευνητική γεώτρηση Γ3 έφτασε σε βάθος 138m. Μέχρι τα 60m διέτρησε Μινωική κίσσηρη, ενώ στη συνέχεια (60-138m) συναντήθηκαν ασβεστόλιθοι (Σχήμα 3.4). Παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στην κίσσηρη με «ρυθμό» $18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, όμως μόλις η γεώτρηση συνάντησε πολύ περατούς ασβεστόλιθους σταθεροποιήθηκε στους 35°C , λόγω διεύδυσης της θάλασσας.

Γεώτρηση Γ3 Εξωμύτης



Σχήμα 3.4: Λιθολογική στήλη και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης Γ3 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

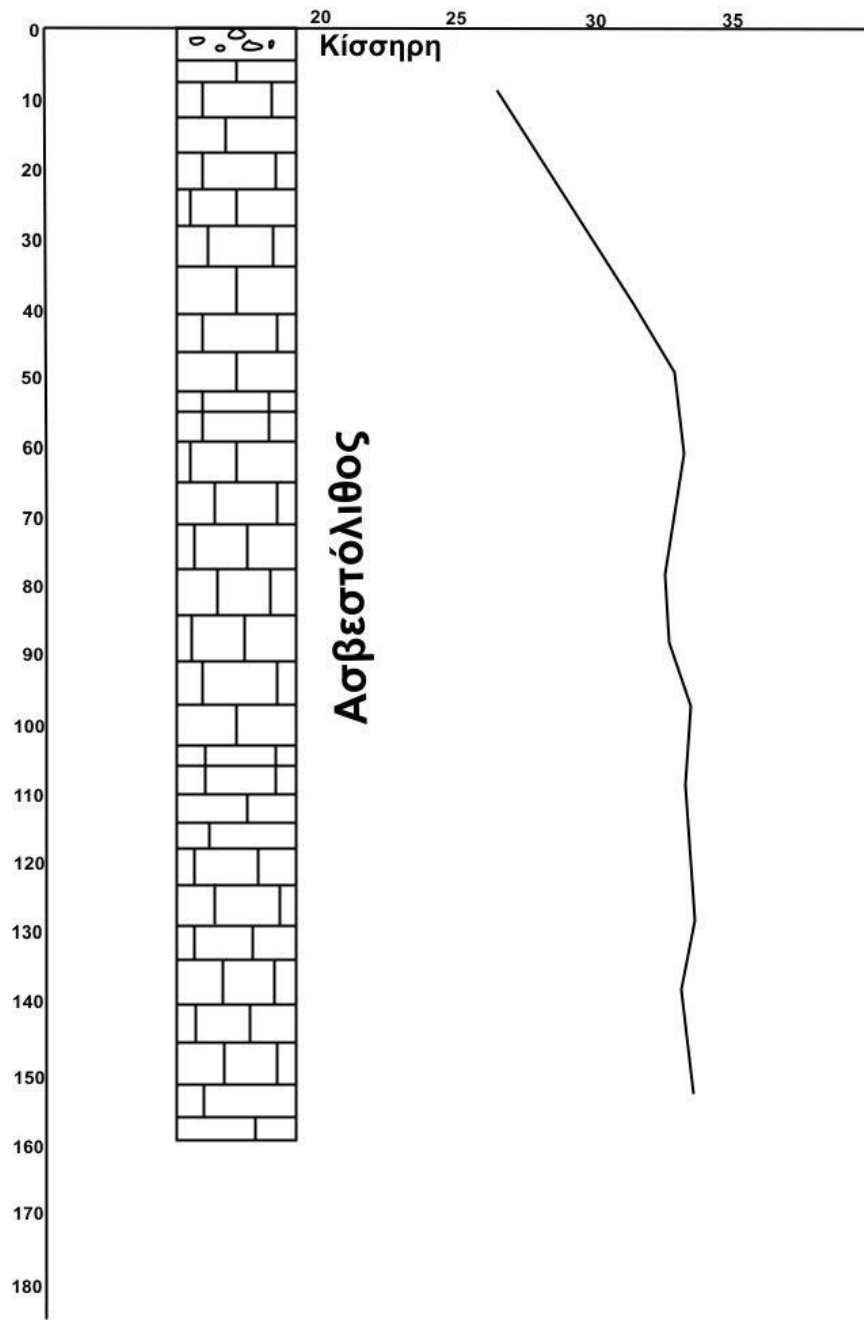
Η γεώτρηση Γ4, που διανοίχθηκε στην περιοχή του Εμπορείου, έφτασε σε βάθος 156m, μέσα στο μεταμορφωμένο σχιστολιθικό υπόβαθρο. Η γεωθερμική βαθμίδα υπολογίστηκε ίση με $4,7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Λιθολογική στήλη και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης Γ4 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

Η γεώτρηση Γ5 κατασκευάστηκε στην περιοχή της Βλυχάδας, σε βάθος 160m. Στα πρώτα 5m συνάντησε ένα στρώμα κίσηρης και έπειτα, μέχρι το τελικό της βάθος, ασβεστόλιθους (Σχήμα 3.6). Παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στην κίσηρη, μόλις η γεώτρηση συνάντησε τους ασβεστόλιθους παρατηρήθηκε μικρή πτώση της θερμοκρασίας και στη συνέχεια σταθεροποίησή της περίπου στους 35°C, η οποία οφείλεται στην διείσδυση της θάλασσας λόγω μεγάλης περατότητας των ασβεστόλιθων. Για τους λόγους αυτούς, η μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας δεν θεωρείται αξιόπιστη.

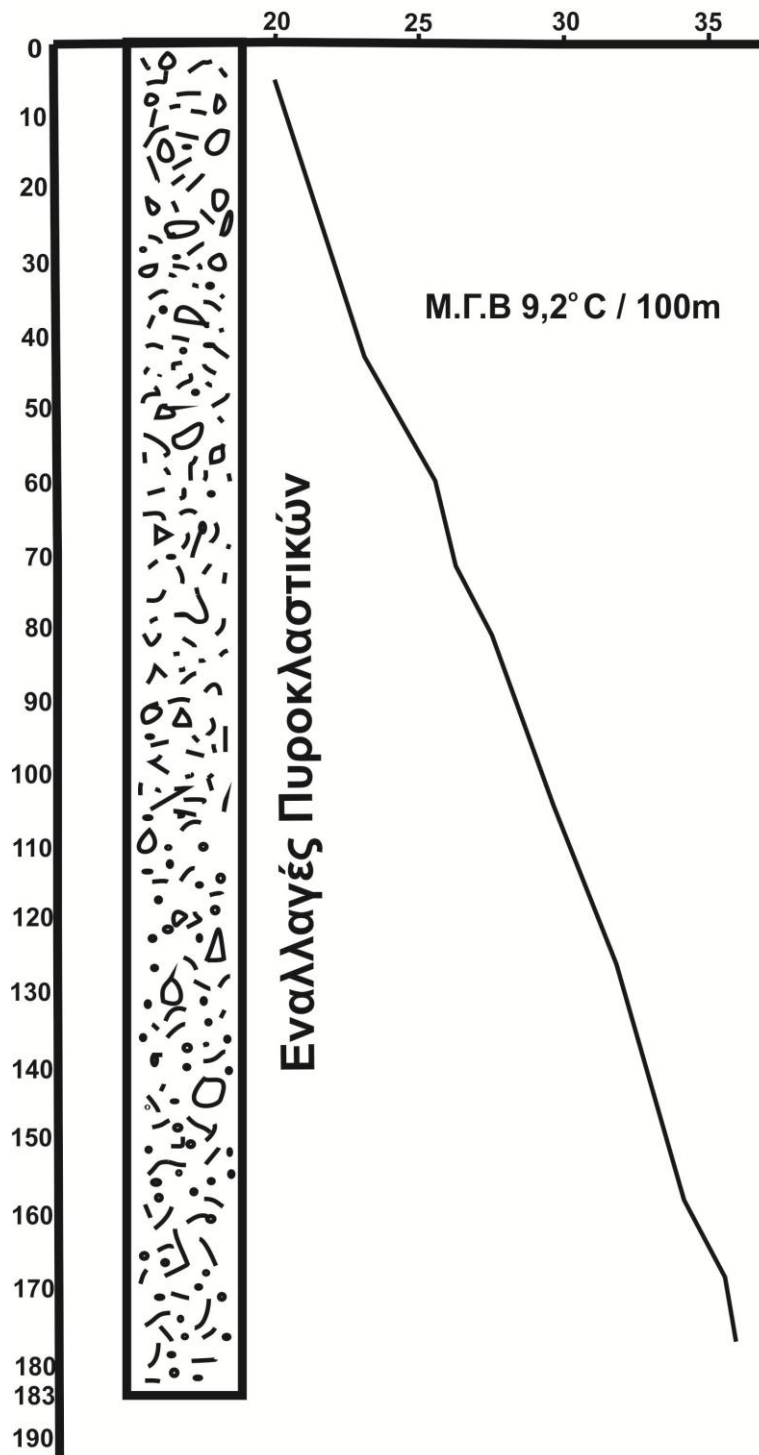
Γεώτρηση Γ5



Σχήμα 3.6: Λιθολογική στήλη και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης Γ5 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

Η γεώτρηση Γ6 κατασκευάστηκε στην περιοχή του Φαναρίου, με βάθος 183m. Συνάντησε σε όλο της το μήκος εναλλαγές πυροκλαστικών προϊόντων (Σχήμα 3.7). Παρατηρήθηκε σταθερή άνοδος της θερμοκρασίας με το βάθος και η γεωθερμική βαθμίδα υπολογίστηκε στους 9,2°C/100m.

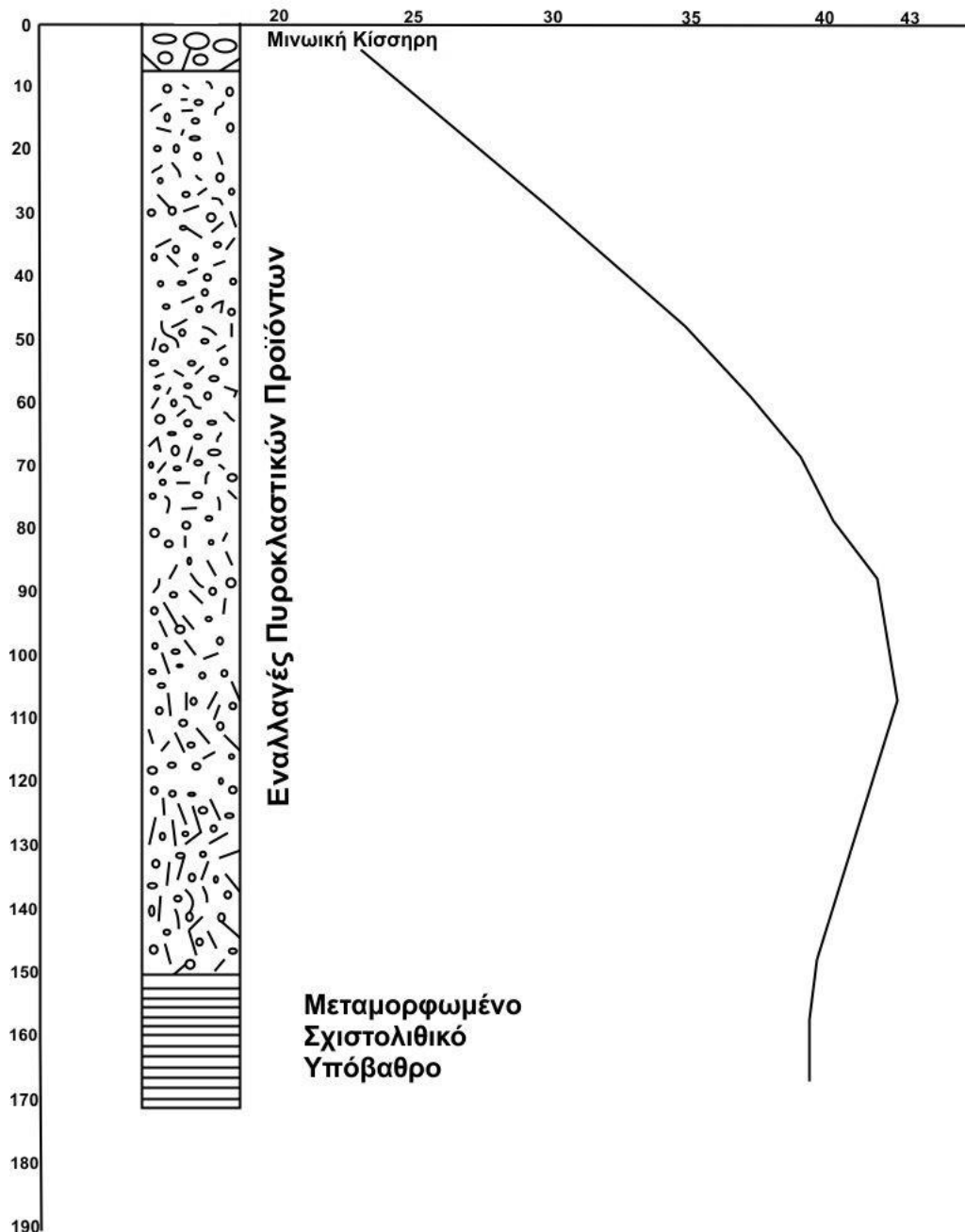
Γεώτρηση Γ6 Φανάρι



Σχήμα 3.7: Λιθολογική στήλη και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης Γ6 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

Στην περιοχή της Αγίας Άννας διανοίχθηκε η γεώτρηση Γ8. Μέχρι τα 150m διέτρησε εναλλαγές πυροκλαστικών και στη συνέχεια, ως τα 172m, το μεταμορφωμένο σχιστολιθικό υπόβαθρο (Σχήμα 3.8). Μέχρι το βάθος των 110m παρατηρείται θεαματική αύξηση της θερμοκρασίας ($\approx 19^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), με μέγιστη τιμή τους $42,5^{\circ}\text{C}$, ενώ στη συνέχεια η θερμοκρασία μειώνεται λόγω πλευρικής διείσδυσης κρύων υδροφόρων οριζόντων. Μόλις η γεώτρηση συνάντησε το μεταμορφωμένο σχιστολιθικό υπόβαθρο, παρατηρήθηκε πάλι θετική τάση της γεωθερμικής βαθμίδας.

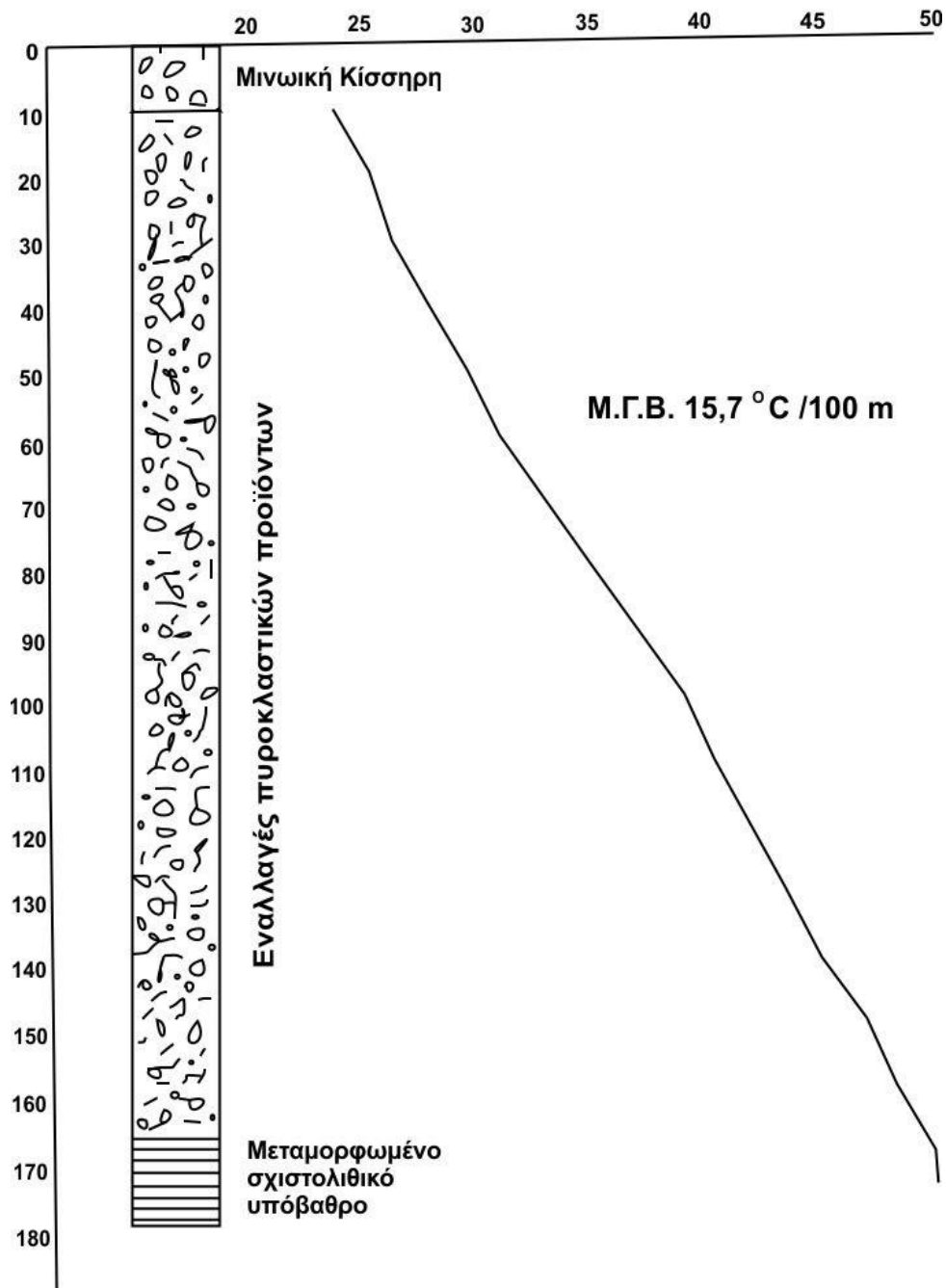
Γεώτρηση Γ8 Αγία Άννα



Σχήμα 3.8: Λιθολογική στήλη και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης Γ8 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

Η γεώτρηση Γ9 κατασκευάστηκε στο Μεγαλοχώρι σε βάθος 180m. Στα πρώτα 10m συνάντησε τη Μινωική κίσσηρη, στη συνέχεια (έως τα 166m) εναλλαγές πυροκλαστικών προϊόντων, μετά τα οποία βρέθηκε το μεταμορφωμένο σχιστολιθικό υπόβαθρο (Σχήμα 3.9). Η γεώτρηση αυτή παρείχε την πιο αξιόπιστη γεωθερμική βαθμίδα, γιατί αφενός ήταν στεγανή και αφετέρου η αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος ήταν σταθερή, τόσο μέσα στα ηφαιστειακά προϊόντα όσο και στο υπόβαθρο. Η μέση γεωθερμική βαθμίδα υπολογίστηκε στους $15,7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

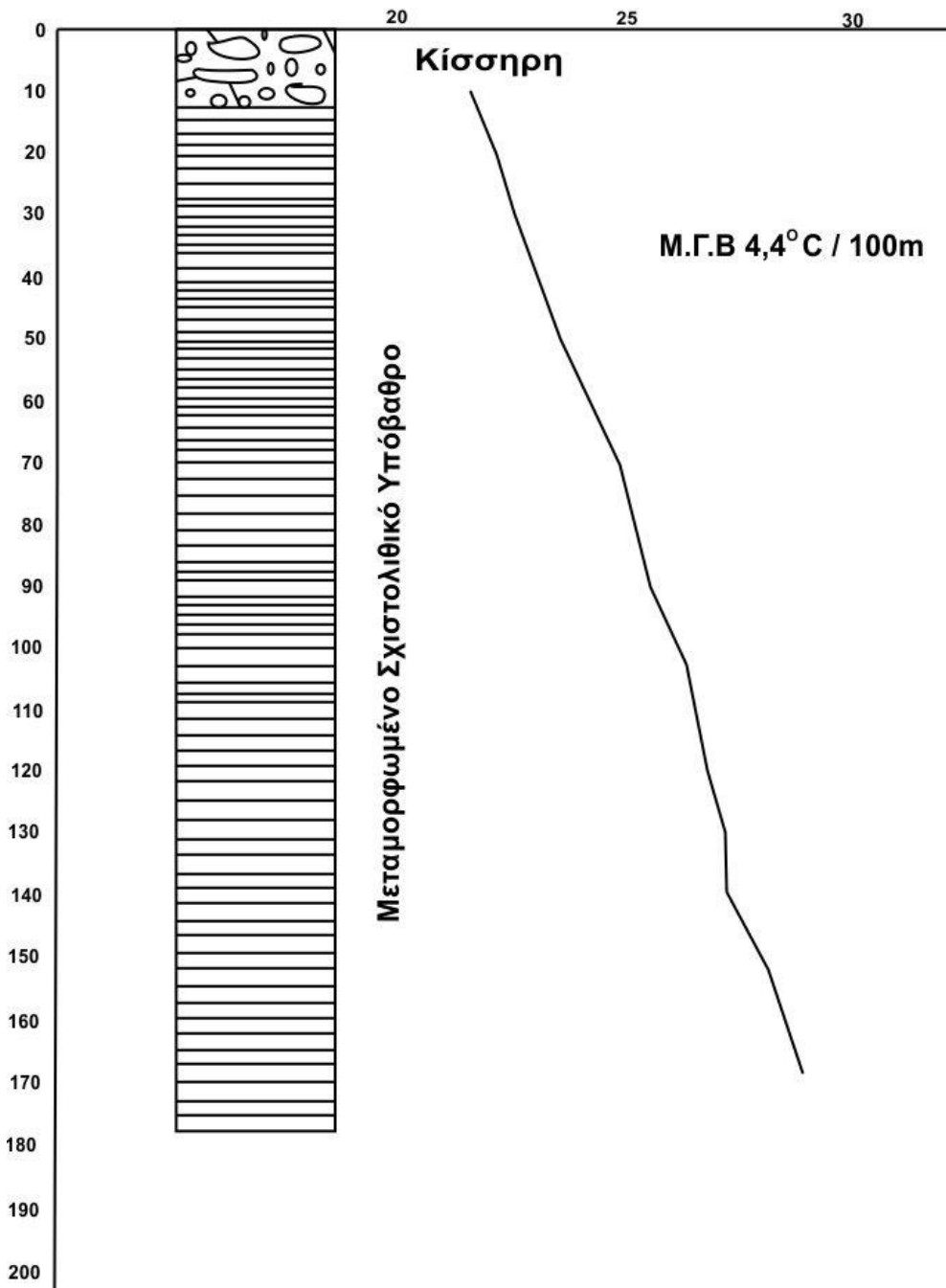
Γεώτρηση Γ9 Μεγαλοχώρι



Σχήμα 3.9: Λιθολογική στήλη και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης Γ9 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

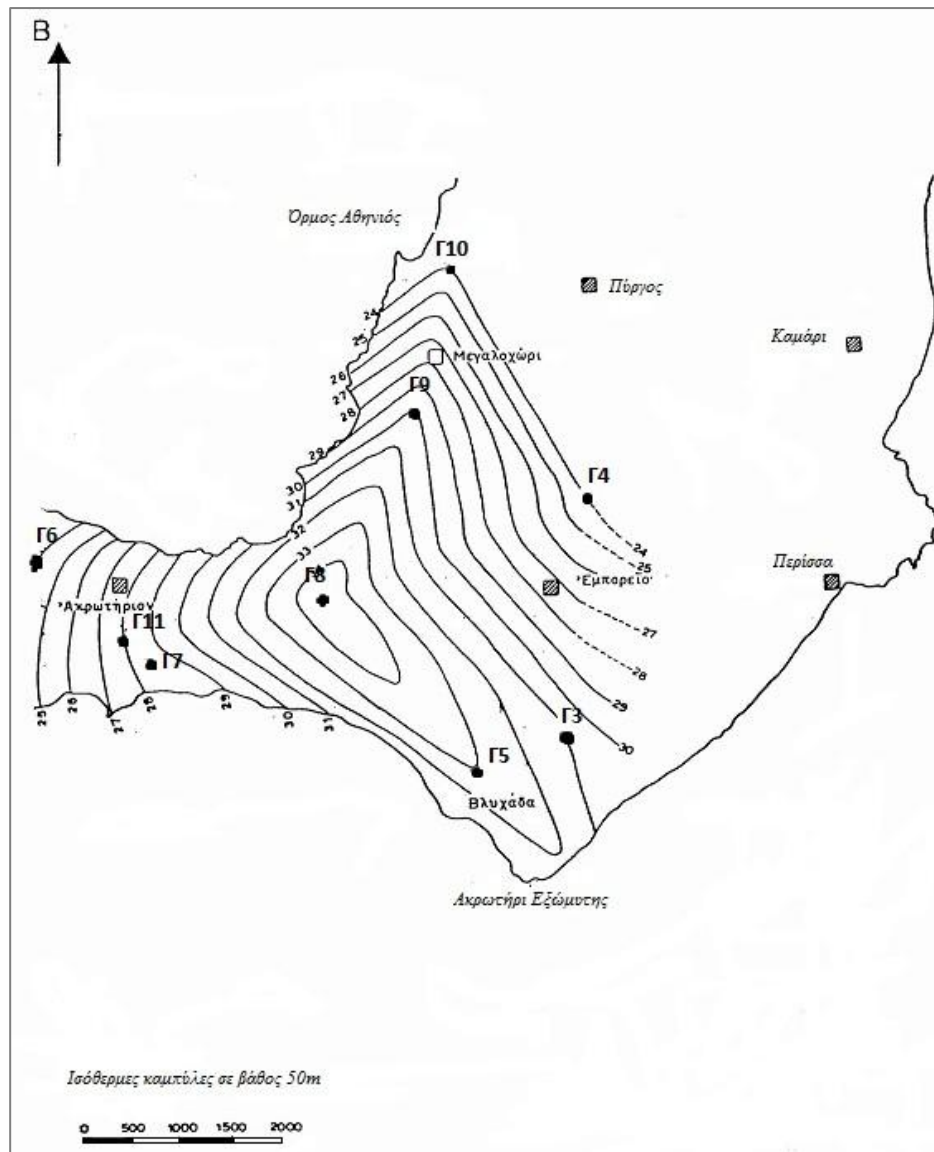
Η γεώτρηση Γ10 έγινε στην περιοχή του Αθηνιού και έφτασε σε βάθος 178m. Ως τα 12m συνάντησε ένα στρώμα κίσσηρης και στη συνέχεια, μέχρι το τελικό βάθος, διέτρησε τους σχηματισμούς του υποβάθρου (Σχήμα 3.10). Λόγω της θέσης της, στα όρια της καλδέρας κοντά στην θάλασσα, παρουσιάζει μια σχετικά χαμηλή γεωθερμική βαθμίδα, της τάξεως $4,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, αλλά η αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος χαρακτηρίζεται σταθερή.

Γεώτρηση Γ10 Αθηνιός

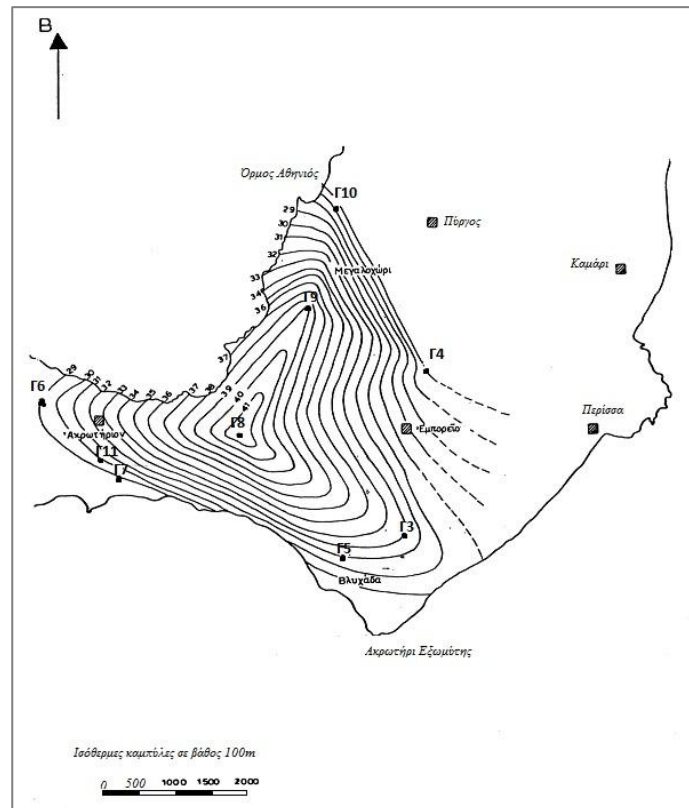


Σχήμα 3.10: Λιθολογική στήλη και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης Γ10 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).

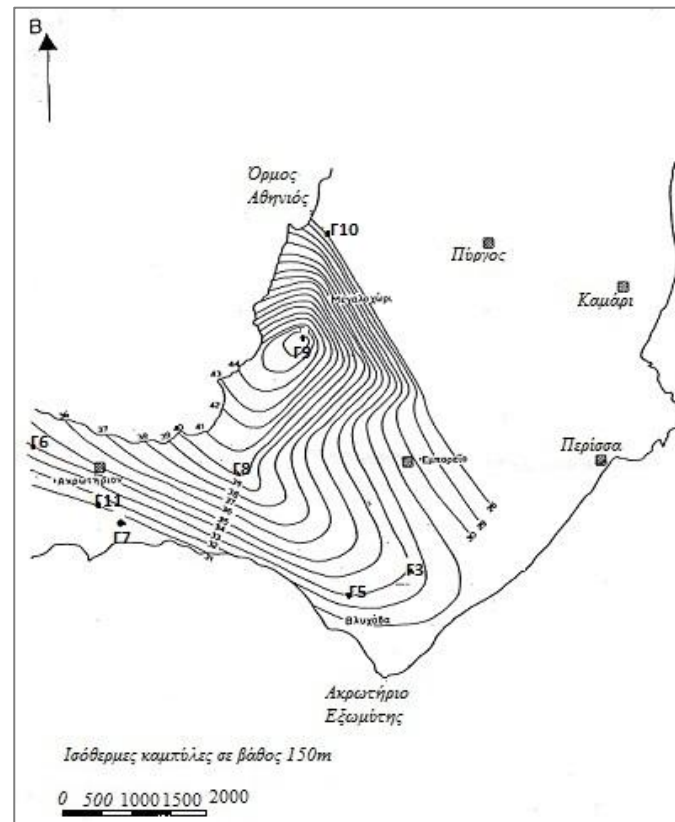
Από την εξέταση της γεωθερμικής βαθμίδας, τις μετρήσεις των θερμοκρασιών και τη μορφή των ισόθερμων καμπυλών σε βάθη 50m, 100m και 150m, η κύρια ζώνη γεωθερμικού ενδιαφέροντος εντοπίστηκε στην περιοχή μεταξύ Μεγαλόχωριου και Αγίας Άννας.



Σχήμα 3.11: Ισόθερμες καμπύλες στο βάθος των 50m στην κύρια ζώνη ενδιαφέροντος μεταξύ Μεγαλόχωριου, Εμπορείου και Ακρωτηρίου (Καβουρίδης κ.α., 1982).



Σχήμα 3.12: Ισόθερμες καμπύλες στο βάθος των 100m στην κύρια ζώνη ενδιαφέροντος μεταξύ Μεγαλόχωριου, Εμπορείου και Ακρωτηρίου (Καβουρίδης κ.α., 1982).



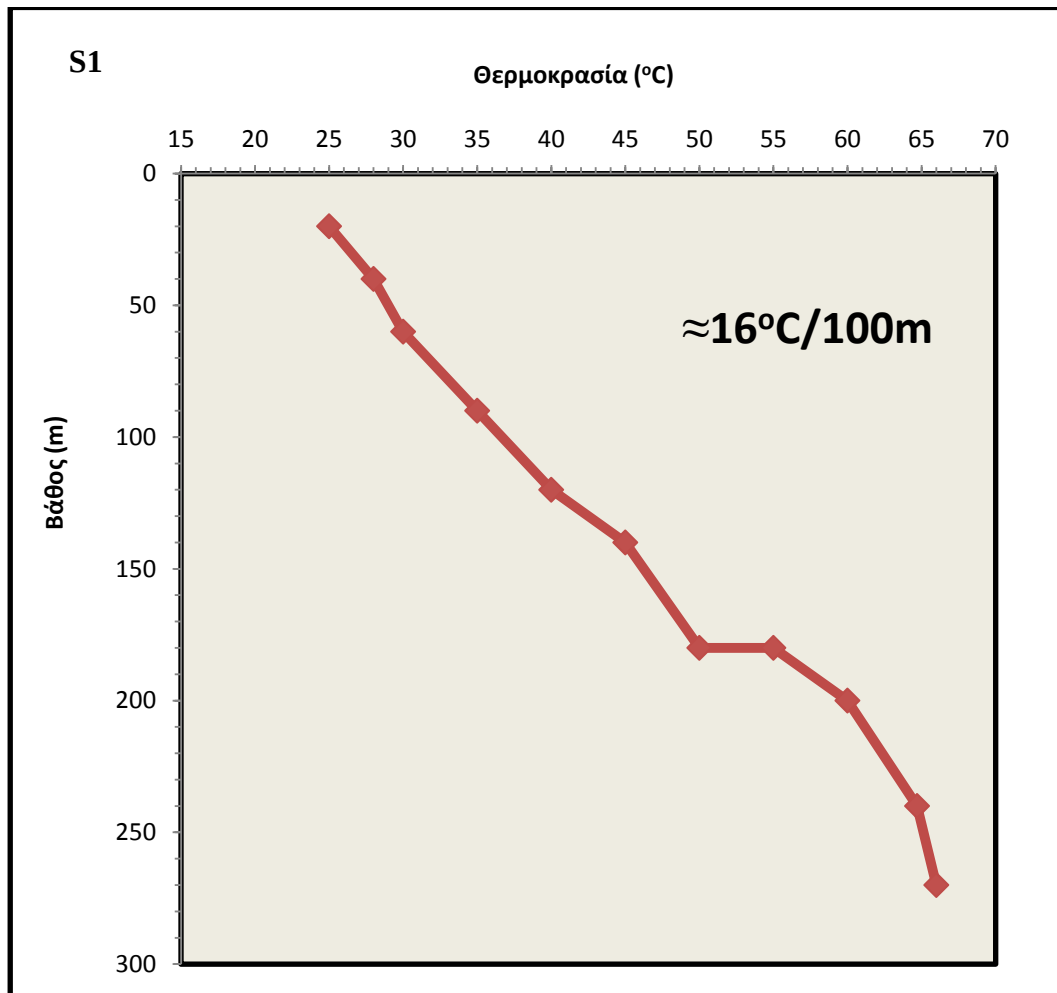
Σχήμα 3.13: Ισόθερμες καμπύλες στο βάθος των 150m στην κύρια ζώνη ενδιαφέροντος μεταξύ Μεγαλόχωριου, Εμπορείου και Ακρωτηρίου (Καβουρίδης κ.α., 1982).

Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις ερευνητικές γεωτρήσεις, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα όλων των προηγούμενων ερευνητικών εργασιών, οδήγησαν στη χωροθέτηση τριών βαθύτερων ερευνητικών/παραγωγικών γεωτρήσεων που κατασκευάστηκαν από το ΙΓΜΕ το 1985.

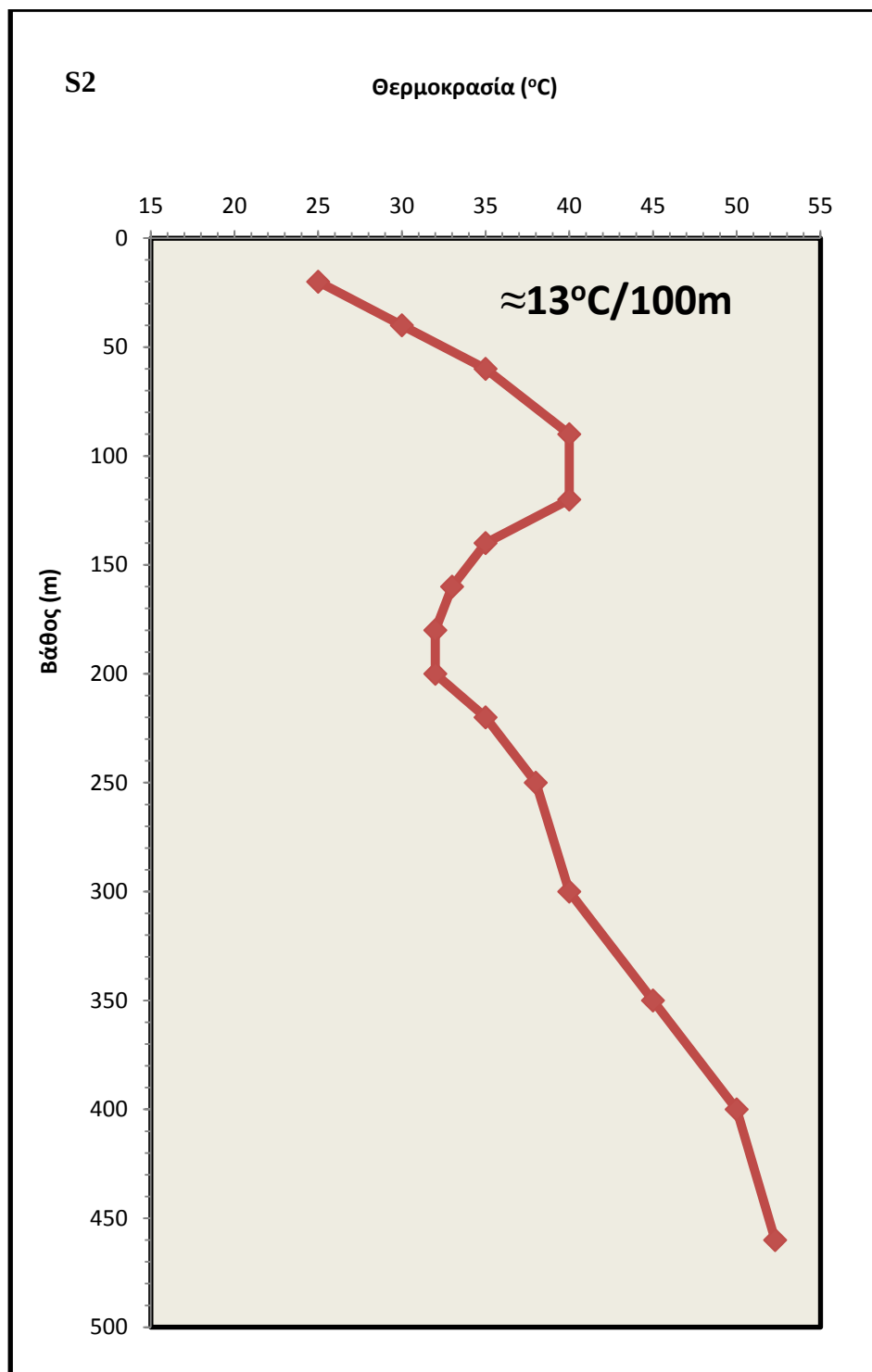
Η γεώτρηση S-1 (Σχήμα 3.1) βρίσκεται πολύ κοντά στην ερευνητική γεώτρηση Γ-9 κοντά στο Μεγαλοχώρι στο νότιο τμήμα του νησιού και έφτασε σε βάθος 270m. Στην εν λόγω γεώτρηση παρατηρήθηκε συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος η οποία έφτασε στους 64,7°C σε βάθος 240m με γ/θ βαθμίδα 16°C/100m (Fytikas et al., 1990a) (Σχήμα 3.14).

Η γεώτρηση S-2 (Σχήμα 3.1) βρίσκεται ΝΔ της S-1 και έφτασε σε βάθος 460m. Σε αυτή τη γεώτρηση η θερμοκρασία αυξάνεται σταθερά περίπου ως το βάθος των 90m. Στο βάθος αυτό η εκτιμώμενη γ/θ βαθμίδα της περιοχής φθάνει τους 13°C/100m (Fytikas et al., 1990a). Ακολουθεί θερμοκρασιακή αναστροφή μέχρι το βάθος των 200m, ενώ από εκείνο το σημείο και μετά η θερμοκρασία αρχίζει πάλι να αυξάνεται φτάνοντας τους 52,3°C στα 460m (Σχήμα 3.15).

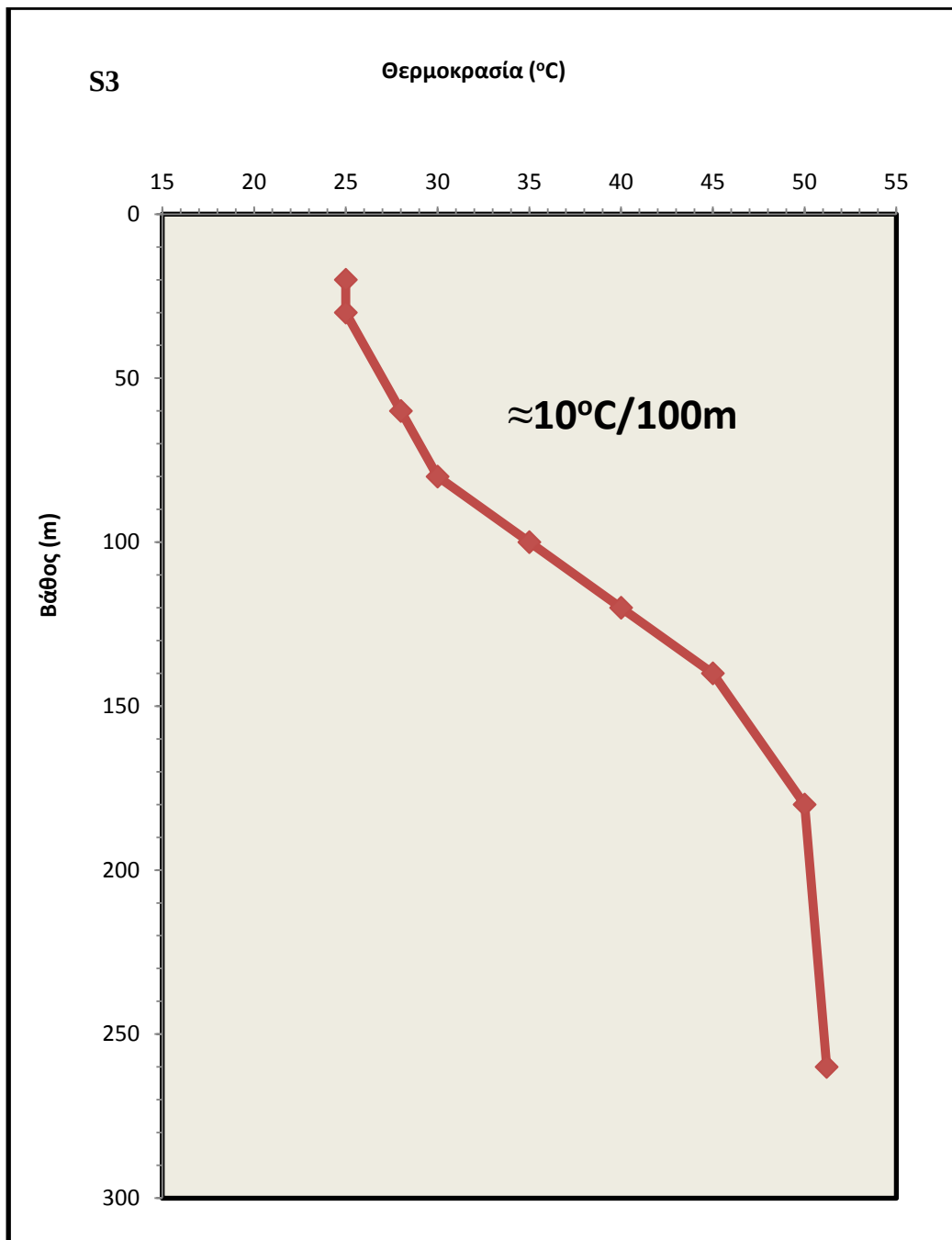
Η γεώτρηση S-3 κατασκευάστηκε 1.25Km νότια της S-1 (Σχήμα 3.1) και έφτασε σε βάθος 260m με μέγιστη θερμοκρασία στους 51,2°C (Fytikas et al., 1990a). Η εκτιμώμενη γεωθερμική βαθμίδα φθάνει τους 10°C/100m.



Σχήμα 3.14: Μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης S-1 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).



Σχήμα 3.15: Μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης S-2 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982).



Σχήμα 3.15: Μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος της γεώτρησης S-3 (τροποποίηση από ΙΓΜΕ, Καβουρίδης κ.α., 1982)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

ΝΕΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ

ΕΡΕΥΝΑ

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο συλλέχθηκαν την περίοδο από τον Απρίλιο έως τον Οκτώβριο του 2014 και αφορούν επιτόπιες μετρήσεις κυρίως της θερμοκρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Συνολικά μετρήθηκαν 149 γεωτρήσεις και ρηχά πηγάδια σε όλο το νησί της Σαντορίνης (Σχήμα 4.1), από την Οία έως το Ακρωτήρι. Δόθηκε έμφαση στις περιοχές που βρίσκονται εντός των ορίων του πιθανού γεωθερμικού πεδίου (Εμπορείο, Μεγαλοχώρι, Μεσσαριά, Βλυχάδα), καθώς και στην περιοχή των Φηρών, εξαιτίας της μεγαλύτερης πιθανότητας και δυνατότητας αξιοποίησης της γεωθερμίας, λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών (πυκνότερη δόμηση, αυξημένες ενεργειακές ανάγκες λόγω τουρισμού κλπ). Έγινε προσπάθεια διεξαγωγής μετρήσεων και στη Θηρασία, όμως οι γεωτρήσεις, εκτός μίας που χρησιμοποιείται για αφαλάτωση, ήταν κατά το διάστημα των εργασιών υπαίθρου εκτός λειτουργίας.

Η πλειονότητα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στην κεφαλή των γεωτρήσεων μετά από την πάροδο ικανού χρόνου άντλησης, ώστε να ληφθεί αξιόπιστο δείγμα προς μέτρηση, ενώ μόλις σε έξι (6) γεωτρήσεις μπόρεσε να πραγματοποιηθεί μέτρηση σε βάθος. Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα εντοπίστηκε κοντά ή ακριβώς στο επίπεδο της θάλασσας (25 έως 190m κάτω από το επίπεδο του εδάφους) σε όλες σχεδόν τις γεωτρήσεις. Τα δεδομένα των μετρήσεων παρατίθενται στον Πίνακα 4.1. Στα σχήματα 4.2 έως 4.10 απεικονίζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων σε κάθε περιοχή έρευνας. Με πράσινο χρώμα συμβολίζονται οι γεωτρήσεις στις οποίες έγινε μέτρηση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος. Σε έξι γεωτρήσεις, οι οποίες συμβολίζονται με αστερίσκο, δεν κατέστη δυνατή η διεξαγωγή μετρήσεων για διάφορους λόγους (κατεστραμμένες, κλειστές κλπ). Παρόλα αυτά, η θερμοκρασία που αναγράφεται στον Πίνακα 4.1. προέκυψε από μαρτυρίες, οι οποίες αξιολογήθηκαν ως αξιόπιστες ή από δεδομένα παλαιότερων μετρήσεων.

Οι κωδικοί των γεωτρήσεων αντιστοιχούν στο όνομα της περιοχής, ως εξής:

A:	Ακρωτήρι	K:	Καρτεράδος
B:	Βουρβούλος	Km:	Καμάρι
Bth:	Βόθωνας	M:	Μεσαριά
Eg:	Έξω Γωνιά	Mg:	Μεγαλοχώρι
E:	Εμπορείο	Mon:	Μονόλιθος
F:	Φηρά	Pr:	Περίσσα
Ia:	Οία	Th:	Θηρασία
Im:	Ημεροβίγλι	Vl:	Βλυχάδα



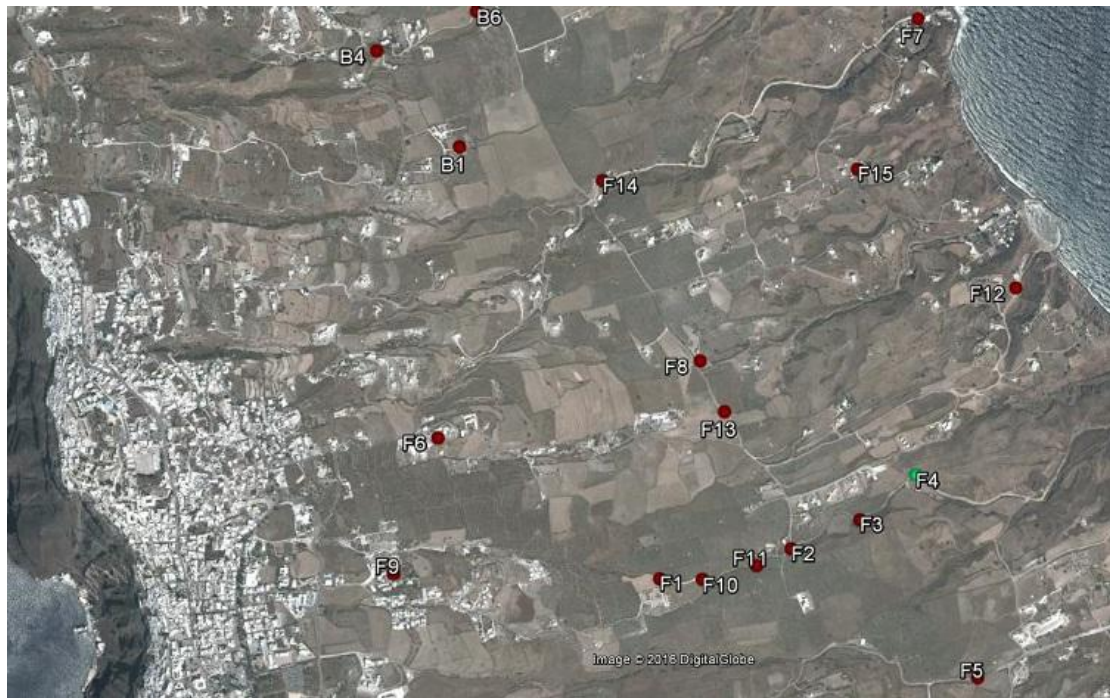
Σχήμα4.1: Χωρική κατανομή των γεωτρήσεων που μετρήθηκαν κατά την έρευνα πεδίου κατά το διάστημα Μάιος-Ιούνιος 2014 (κόκκινο: μετρημένες γεωτρήσεις, πράσινο: μέτρηση σε βάθος, ονομασία*: στοιχεία από μαρτυρίες)



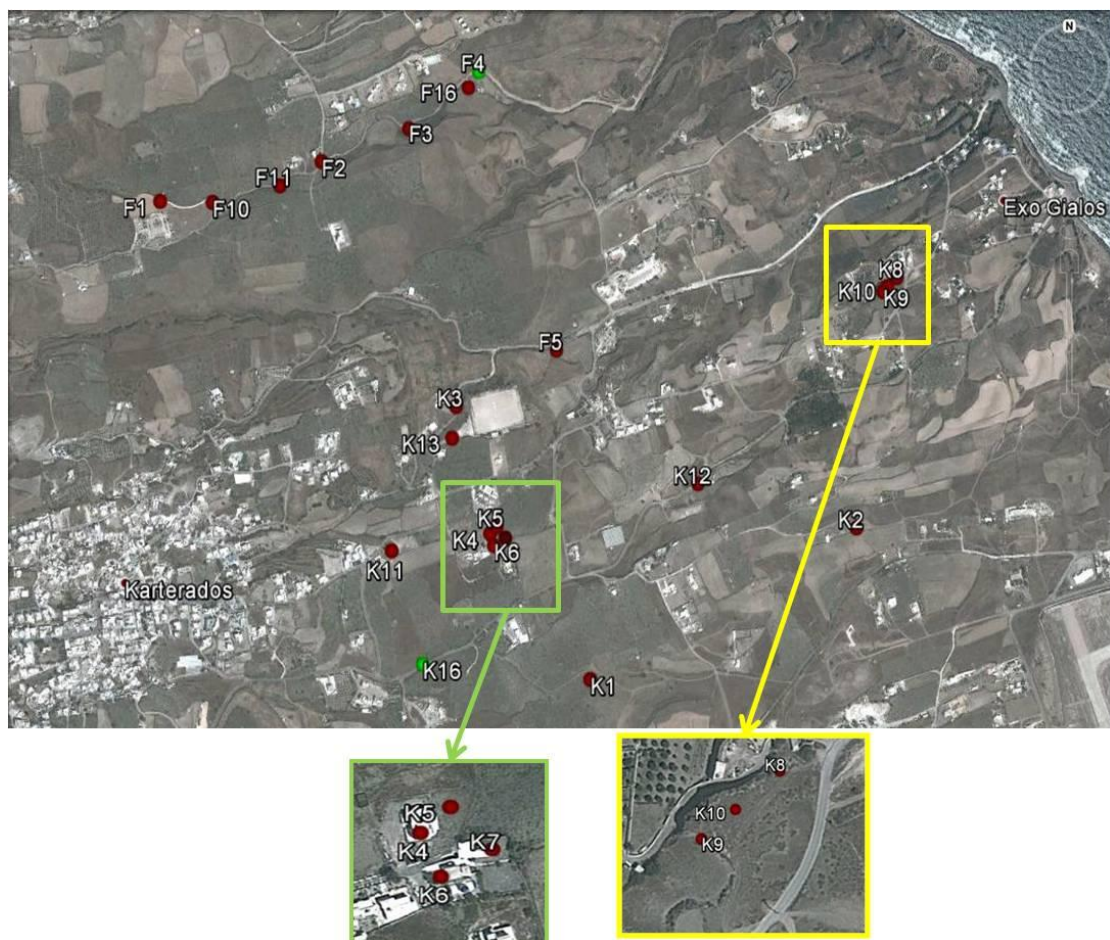
Σχήμα 4.2: Θέσεις γεωτρήσεων στις περιοχές Οίας και Ημεροβιγλίου (Ia, Im)



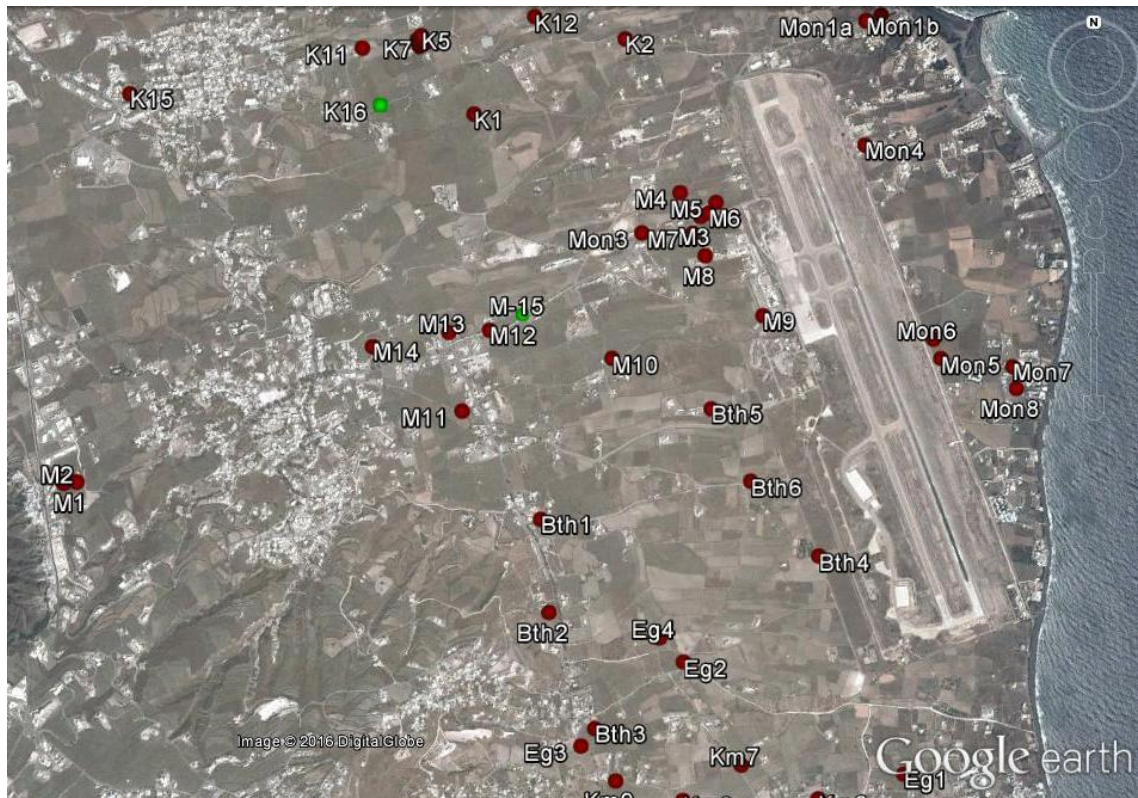
Σχήμα 4.3: Θέσεις γεωτρήσεων στην περιοχή Βουρβούλου (B)



Σχήμα 4.4: Θέσεις γεωτρήσεων στην περιοχή Φηρών (F)



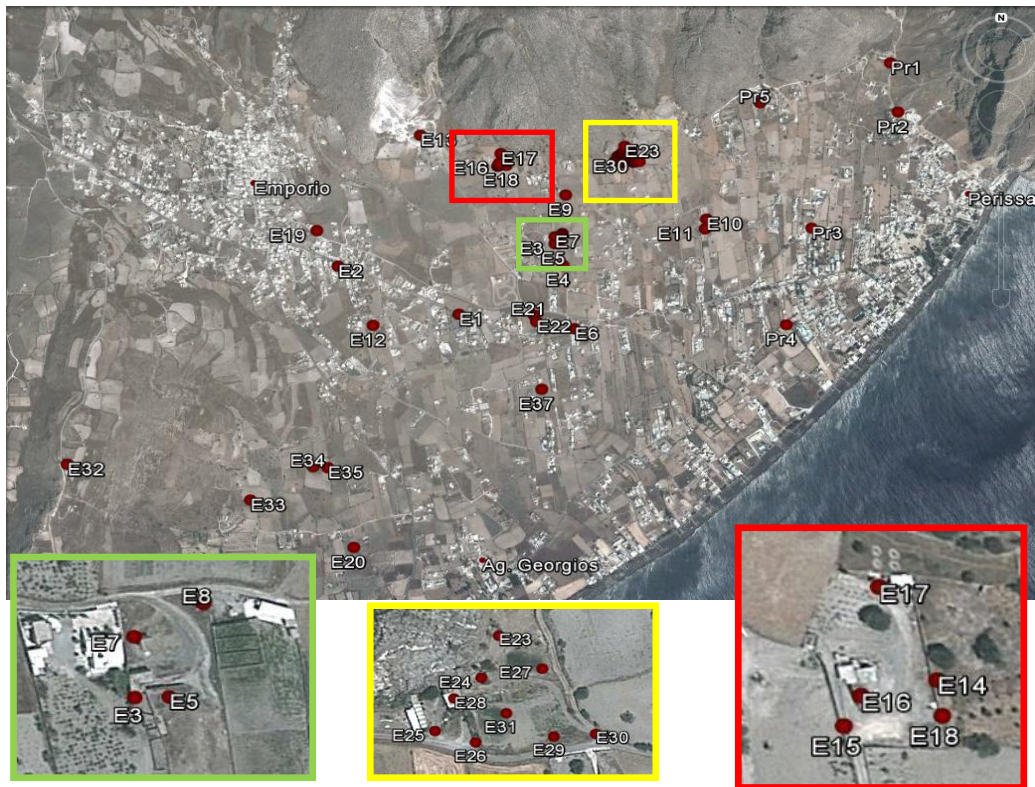
Σχήμα 4.5: Θέσεις γεωτρήσεων στην περιοχή του Καρτεράδου (K)



Σχήμα 4.6: Θέσεις γεωτρήσεων στις περιοχές Μονόλιθου (Mon), Έξω Γωνιάς (Eg), Βόθωνα (Bth) και Μεσαριάς (M)



Σχήμα 4.7: Θέσεις γεωτρήσεων στην περιοχή Καμαρίου (Km)



Σχήμα 4.8: Θέσεις γεωτρήσεων στις περιοχές Εμπορείου (E) και Περίσας (Pr)



Σχήμα 4.9: Θέσεις γεωτρήσεων στις περιοχές Μεγαλοχωρίου (Mg), Βλυχάδας (VI), Ακρωτηρίου (A) και θέση γεώτρησης E-36 (Εμπορείο)

Πίνακας 4.1: Στοιχεία γεωτρήσεων που μετρήθηκαν κατά την έρευνα πεδίου

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑ	ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΒΑΘΟΣ (m)	T (°C)	EC (mS/cm)
A1	ΔΕΥΑΘ	78	90	24.2	>20
B1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	103	120	23.8	2.6
B2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	80.6	90	24.3	3.09
B3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	95.4	98	23.6	2.68
B4	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	103	120	23.9	4.29
B5	ΔΕΥΑΘ	71	80	23.8	4.69
B6	ΔΕΥΑΘ	81.2	90	26.3	5.06
B7	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	109	120	24.8	3.26
Bth1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	83.5	105	27.7	
Bth2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	80.7	90	25.9	
Bth3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	75.5	85	25.3	
Bth4	ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ	40.6	55	23.4	1.52
Bth5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	54.6	60	27.0	1.20
Bth6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	50.8	70	25.2	1.94
E1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	32	30	24.5	1.7

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑ	ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΒΑΘΟΣ (m)	T (°C)	EC (mS/cm)
E2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	68	57	26.5	1.9
E3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	25.4	30	24.1	
E4	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	18.1	22	24.6	
E5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	23.2	25	26.2	
E6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	19	25	24.5	
E7	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	27.8	30	26.7	
E8	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	22.2	25	26.4	
E9	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	33.4	35	26.1	
E10	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	26.5	30	24.0	
E11	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	26.5	12.5	20.4	
E12	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	35.7	47	25.7	
E13	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	50.3	60	27.6	
E14	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	44.8	53	27.5	
E15	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	43	53	27.2	
E16	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	47.3	53	27.2	
E17	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	49.9	53	27.1	
E18	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	43.5	53	27.0	
E19	ΔΕΥΑΘ	45.3	55	29.0	2.9
E20	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	17.9	30	24.1	1.01
E21	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	16	25	25.3	2.13
E22	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	19.3	30	25.0	1.94
E23	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	40	50	26.3	4.09
E24	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	33	40	26.1	3.49
E25	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	33.9	45	26.0	4.92
E26	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	29.5	40	25.4	4.36
E27	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	36.5	40	26.0	3.47
E28	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	32.5	40	26.1	3.03
E29	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	29	40	25.6	3.21
E30	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	33.1	40	25.4	2.97
E31	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	31	40	26.5	11.93
E32	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	157	160	28.3	3.7
E33	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	24.7	27	29.3	4.45
E34	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	27.3	40	24.6	5.06
E35	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	26.6	35	25.8	3.44
E37	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	27	32	23.7	3.73
Eg1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	36.1	36	23.3	1.08
Eg1	ΔΕΥΑΘ	54.8	60	24.0	2.11
Eg3	ΔΕΥΑΘ	70	76	25.7	2.87
Eg4	ΔΕΥΑΘ	57.5	70	23.5	
F1	ΔΕΥΑΘ	104	119	25.5	3.25
F2	ΔΕΥΑΘ	101	110	25.4	4.47
F3	ΔΕΥΑΘ	74.9	85	26.4	3.19

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑ	ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΒΑΘΟΣ (m)	T (°C)	EC (mS/cm)
F5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	157.0	186	25.4	4.81
F6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	17.0	7	20.9	1.94
F7	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	96.0	90	24.6	2.98
F8	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	175	190	26.1	5.7
F9	ΔΕΥΑΘ	101.0	110	25.0	3.38
F10	ΔΕΥΑΘ	93	95	25.9	6.78
F11	ΔΕΥΑΘ	39	40	23.4	>20
F12	ΔΕΥΑΘ	75	80	27.7	3.68
F13	ΔΕΥΑΘ	68	75	23.5	2.22
F14	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	64	72	22.1	1.34
F15	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	60.1	65	25.9	3.19
Ia1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	30	40	21.7	4.32
Ia2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	11	20	21.8	1.75
Ia3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	29.2	30	21.7	1.88
Ia4	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	42.2	50	21.3	2.61
Ia5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	32	25	20.6	4.91
Ia6	ΔΕΥΑΘ	163	182	24.2	>20
Im1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	54.9	60	23.2	3.34
Im2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	28.5	37	22.8	4.68
Im3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	28	24	22.4	2.24
K1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	93.8	100	26.0	1.3
K2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	59.6	68	25.4	0.9
K3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	66.7	85	26.8	3.8
K4	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	97.1	105	26.8	1.6
K5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	104	105	26.7	1.6
K6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	85.4	105	26.3	2.5
K7	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	83.1	105	26.7	1.5
K8	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	50.9	65	23.7	1.5
K9	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	60.8	65	24.4	0.9
K10	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	55.2	65	24.6	1.4
K11	ΔΕΥΑΘ	102	110	26.6	2.37
K12	ΔΕΥΑΘ	49.5	60	26.5	3.01
K13	ΔΕΥΑΘ	95.7	110	25.8	2.35
K14	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	156	170	25.3	2.81
K15	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	162	170	24.5	1.4
Km1	ΔΕΥΑΘ	23	17	24.9	2.97
Km2	ΔΕΥΑΘ	58	60	24.7	2.86
Km3	ΔΕΥΑΘ	47.8	50	24.6	1.8
Km4	ΔΕΥΑΘ	48.3	50	24.4	1.91
Km5	ΔΕΥΑΘ	38.1	40	24.2	3.34
Km6	ΔΕΥΑΘ	37.5	40	24.0	2.56
Km7	ΔΕΥΑΘ	57.2	65	22.7	2.07

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑ	ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΒΑΘΟΣ (m)	T (°C)	EC (mS/cm)
Km8	ΔΕΥΑΘ	62.4	65	24.8	2.09
Km9	ΔΕΥΑΘ	61	70	26.2	2.51
Mg1*	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	209	208	52.0	14.5
Mg2*	ΙΔΙΩΤΙΚΗ		240	50	
Mg3*	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	108	115	>50	
Mg4*	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	108	115	>50	
Mg5*	ΔΕΥΑΘ	195	210	>60	
Mg6*	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	80	90	≈40	
Mg7	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	69	79	44.8	
Mon1a	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	10	11	19.7	2.4
Mon1b	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	10	9	18.3	2.4
Mon2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	6.5	6	21.0	1.9
Mon3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	67.2	75	25.8	1.8
Mon4	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	29	35	23.4	1.97
Mon5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	35	40	23.4	1.73
Mon6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	34	40	24.6	1.76
Mon7	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	15	20	24.0	12.370
Mon8	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	7	2	22.5	6.4
Pr1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	46	55	24.6	1.32
Pr2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	55	50	24.2	3.85
Pr3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	6	5	24.0	6.72
Pr4	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	2	4	21.4	10,570
Pr5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	23	25	23.0	2.65
VL1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	7.4	8.4	26.5	5.7
VL2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	26.5	30	31.3	11.6
VL3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	28.1	27	31.9	4.6
VL4	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	20.5	35	29.5	-
VL5	ΠΗΓΗ	1	-	26.4-29.2	5.79
M1	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	204.0	200	27.6	4.2
M2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	210	205	27.2	2.8
M3	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	55	60	25.4	1.3
M4	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	66	70	25.3	5.6
M5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	56	60	25.8	3
M6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	55	60	26.1	1.2
M7	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	61	65	26.3	1.6
M8	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	49	63	26.5	5.2
M9	ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ	53	65	26.2	3.8
M10	ΔΕΥΑΘ	61.3	70	25.6	1.5
M11	ΔΕΥΑΘ	115	120	26.0	1.74
M12	ΔΕΥΑΘ	108	115	25.2	2.03
M13	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	107	117	24.2	0.91
M14	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	126	149	24.9	
Th1	ΔΕΥΑΘ	20	40	20.9	>20

Στο βόρειο τμήμα της Σαντορίνης, στην ευρύτερη περιοχή της Οίας, μετρήθηκαν οι μικρότερες θερμοκρασίες, οι οποίες δεν υπερβαίνουν τους 22 °C σε γεωτρήσεις που έχουν βάθος 25 έως 40m. Η δημοτική γεώτρηση (Ia₆) που χρησιμοποιείται για αφαλάτωση είναι η μόνη με σχετικά μεγάλο βάθος (182m) και η θερμοκρασία της μετρήθηκε στους 24.2°C. Για την αφαλάτωση χρησιμοποιείται απευθείας θαλασσινό νερό.

Στην περιοχή του Βουρβούλου, οι θερμοκρασίες αυξάνονται κατά τουλάχιστον 1.8°C και κυμαίνονται από 23.8 έως 24.8°C σε βάθη από 80 έως 120m. Εξαίρεση αποτελεί μια δημοτική γεώτρηση (B₆) που έχει βάθος 90m και η θερμοκρασία της είναι 26.3°C, γεγονός που δείχνει ότι η περιοχή παρουσιάζει γεωθερμικό ενδιαφέρον.

Στην περιοχή των Φηρών, στο κεντρικό τμήμα του νησιού, όπου υπάρχει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για αξιοποίηση της γεωθερμίας, μετρήθηκαν 15 γεωτρήσεις με πολύ θετικά αποτελέσματα. Σε γεωτρήσεις με βάθος από 95 έως 120m μετρήθηκαν θερμοκρασίες της τάξης των 25°C, ενώ σε αυτές που έχουν μεγαλύτερο βάθος (έως 190m) οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες από 26°C. Αξιοσημείωτη είναι η θερμοκρασία σε ένα ρηχό πηγάδι (F₆), βάθους μόλις 7m, η οποία μετρήθηκε στους 20.9°C. Στη δημοτική γεώτρηση (F₁₂), βάθους 80m, μετρήθηκε η υψηλότερη θερμοκρασία της περιοχής, η οποία είναι ίση με 27.7°C. Η γεώτρηση αυτή βρίσκεται 2.6Km ανατολικά των Φηρών.

Νότια των Φηρών, στην περιοχή του Καρτεράδου έγιναν 16 μετρήσεις σε αντίστοιχες γεωτρήσεις, βάθους 60-170m, οι οποίες είχαν θερμοκρασίες από 23.8 ως 26.9°C. Ειδικότερα, σε γεωτρήσεις βάθους 60 έως 70m από την επιφάνεια του εδάφους, οι τιμές της θερμοκρασίας ξεκινάνε από 23.7°C και φθάνουν στους 26.5°C, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη ρευστών χαμηλής ενθαλπίας στην περιοχή. Σε γεωτρήσεις με βάθος από 85 έως 120m, οι θερμοκρασίες είναι επίσης μεγαλύτερες από 26°C. Δύο εκ των γεωτρήσεων η (K₁₅) και η (K₁₄), που φθάνουν στα 170m, έχουν θερμοκρασία 24.5°C και 25.3°C αντίστοιχα. Οι δύο αυτές γεωτρήσεις, αν και βαθύτερες, έχουν μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με άλλες, μικρότερου βάθους στην ίδια περιοχή, γεγονός που πιθανότατα αποδίδεται στην εισροή ψυχρότερων υδάτων.

Στην περιοχή της Μεσαριάς, νοτιοανατολικά του Καρτεράδου, μετρήθηκαν 15 γεωτρήσεις που είχαν βάθος από 60 έως 205m. Σε γεωτρήσεις βάθους 60-70m μετρήθηκαν σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, που κυμαίνονται από 25.3°C έως 26.5 °C. Σε γεωτρήσεις με βάθη 110-120m παρατηρείται μικρή πτώση των θερμοκρασιών (24 με 25 °C), ενώ σε όσες ο υδροφόρος βρέθηκε στα 200m, οι θερμοκρασίες πλησιάζουν τους 27.6 °C που αποτελεί και την υψηλότερη τιμή της περιοχής. Η παρατηρούμενη μείωση της θερμοκρασίας στα ενδιάμεσα βάθη δείχνει την επίδραση της διεξόδου του θαλασσινού νερού.

Τα στοιχεία για τις θερμοκρασίες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή του Μεγαλοχωρίου (νότια της Μεσαριάς) προέρχονται κυρίως από μαρτυρίες των κατοίκων και των ερευνητικών γεωτρήσεων του ΙΓΜΕ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γεωτρήσεις της περιοχής τέθηκαν εκτός λειτουργίας επειδή δεν υπήρχε η γνώση αφενός για τον τρόπο αξιοποίησής τους και αφετέρου για τα κατάλληλα αντλητικά συγκροτήματα με αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Σύμφωνα με τις μαρτυρίες, όλες οι γεωτρήσεις που είχαν κατασκευαστεί στο παρελθόν, και έφτασαν σε βάθη 90-240m, είχαν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50°C. Στη γεώτρηση (Mg₇) που κατέστη δυνατή η διεξαγωγή θερμομέτρησης στην κεφαλή, βρέθηκαν 44.8°C. Σημειώνεται ότι το βάθος της συγκεκριμένης γεώτρησης δεν ξεπερνά τα 80m.

Νοτιότερα του Μεγαλοχωρίου, γύρω από τον οικισμό «Εμπορείο», μετρήθηκαν 37 γεωτρήσεις και πηγάδια. Η θερμοκρασία στην κεφαλή των γεωτρήσεων, των οποίων το βάθος κυμαίνεται από 25 έως 50m, είναι μεγαλύτερη των 23-25°C, με εξαίρεση

μία, τη γεώτρηση (E_{11}), που σε βάθος μόλις 12.5m έχει 20.4°C. Συγκεκριμένα, σε γεωτρήσεις με βάθη από 20 έως 40m, οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 23.7°C έως 26.7°C, εκτός της γεώτρησης (E_{33}) βάθους 27m, όπου μετρήθηκε η υψηλότερη θερμοκρασία της περιοχής (29.3°C). Στις περιπτώσεις όπου οι υδροφόροι συναντήθηκαν σε βάθη 40m έως 60m, οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες από 26°C, με υψηλότερη αυτή που μετρήθηκε στη γεώτρηση (E_{19}) βάθους 55m και ήταν 29°C. Τέλος στην γεώτρηση (E_{32}), η οποία έχει το μεγαλύτερο βάθος (160m) από όσες μετρήθηκαν στην περιοχή, η θερμοκρασία ήταν 28.8°C.

Δυτικά του Εμπορείου, στην ευρύτερη περιοχή Καμαρίου και Περίσσας, σε 14 γεωτρήσεις βάθους 40-60m μετρήθηκαν θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 24 έως 25°C. Σε γεωτρήσεις μικρότερου βάθους, οι θερμοκρασίες δεν υπερβαίνουν τους 23°C, με δύο αξιοσημείωτες εξαιρέσεις: (i) μιας ιδιωτικής γεώτρησης στην περιοχή της Περίσσας (Pr_3) στην οποία μετρήθηκαν 24°C σε βάθος 5m και (ii) μιας δημοτικής γεώτρησης στο Καμάρι (Km_1) όπου σε 17m βάθος μετρήθηκαν 24.9°C.

Στην περιοχή της Βλυχάδας, οι τιμές της θερμοκρασίας σε όλες τις γεωτρήσεις κυμαίνονται από 27°C έως 32°C περίπου, παρά το πολύ μικρό τους βάθος (έως 35m). Όπως προαναφέρθηκε, στη Θηρασία μετρήθηκε μόνο μία ρηχή δημοτική γεώτρηση (Th_1) με θερμοκρασία 20.9°C, το νερό της οποίας χρησιμοποιείται στη μονάδα αφαλάτωσης του νησιού. Επιπλέον εντοπίστηκαν δύο ιδιωτικές γεωτρήσεις, οι οποίες βρίσκονται σε λειτουργία, όμως ήταν σε περιφραγμένο χώρο χωρίς δυνατότητα πρόσβασης. Οι υπόλοιπες ιδιωτικές γεωτρήσεις ήταν κλειστές και εγκαταλειμμένες και δεν κατέστη δυνατή η μέτρησή τους.

Με βάση τις μετρήσεις στην κεφαλή των γεωτρήσεων (Πίνακας 4.1), σχεδιάστηκαν καμπύλες ίσης θερμοκρασίας (Σχήμα 4.17), που αναφέρονται περίπου στο απόλυτο υψόμετρο 0, δεδομένου ότι στο υψόμετρο αυτό συναντήθηκε η υδροφορία σε όλες τις περιπτώσεις. Η χωρική κατανομή των θερμοκρασιών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18. Σημειώνεται ότι οι γεωτρήσεις του ΙΓΜΕ που απεικονίζονται στους χάρτες, καθώς και όσες μετρήσεις έγιναν στο εσωτερικό των γεωτρήσεων δεν ελήφθησαν υπόψη κατά τον σχεδιασμό των ισόθερμων καμπυλών.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος κατέστη δυνατή σε μόλις έξι γεωτρήσεις (Σχήμα 4.10), διότι στις περισσότερες περιπτώσεις υπήρχαν εσωτερικά αντλητικά συγκροτήματα, γεγονός που κατέστησε αδύνατη την εισαγωγή του ειδικού οργάνου καταμέτρησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους. Σε κάποιες άλλες γεωτρήσεις, οι μετρήσεις δεν πραγματοποιήθηκαν είτε για τεχνικούς λόγους (φραγμένες γεωτρήσεις), είτε διότι οι θέσεις δεν ήταν προσβάσιμες ή δεν υπήρχε η άδεια των ιδιοκτητών.



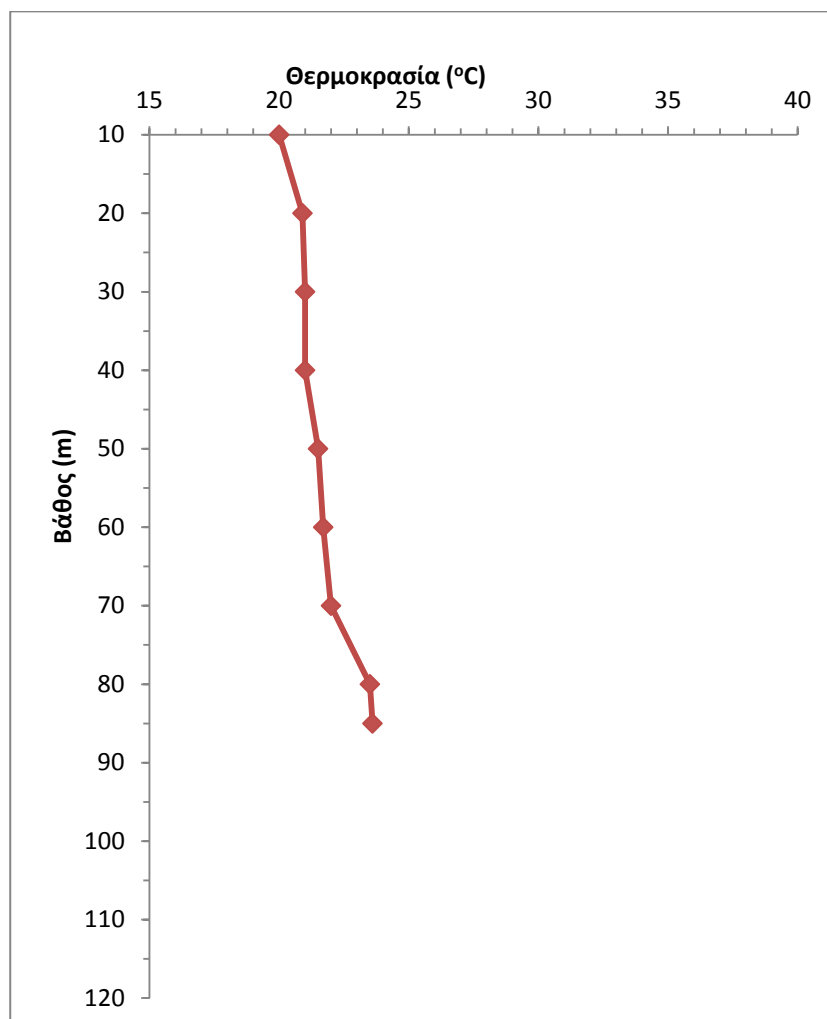
Σχήμα 4.10: Θέσεις γεωτρήσεων που μετρήθηκαν στο βάθος.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας κατά βάθος έγινε με τη βοήθεια ειδικού ηλεκτρικού θερμομέτρου. Οι καταγραφές πραγματοποιήθηκαν κάθε 10m, με την είσοδο ειδικού αισθητήρα μέτρησης στο εσωτερικό της γεώτρησης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα βάθους-θερμοκρασίας, με σκοπό την αξιολόγηση της γεωθερμικής βαθμίδας στις αντίστοιχες περιοχές (Σχήμα 4.11 έως 4.16). Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία των έξι αυτών γεωτρήσεων, καθώς και η θερμοκρασία στο τελικό βάθος μέτρησης. Σημειώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις, η μέση ετήσια θερμοκρασία σε 10m βάθος από την επιφάνεια λήφθηκε ίση με 20°C, ενώ η μέτρηση σταμάτησε όταν συναντήθηκε ο υδροφόρος ορίζοντας.

Πίνακας 4.2: Στοιχεία γεωτρήσεων που μετρήθηκαν σε βάθος κατά την έρευνα πεδίου

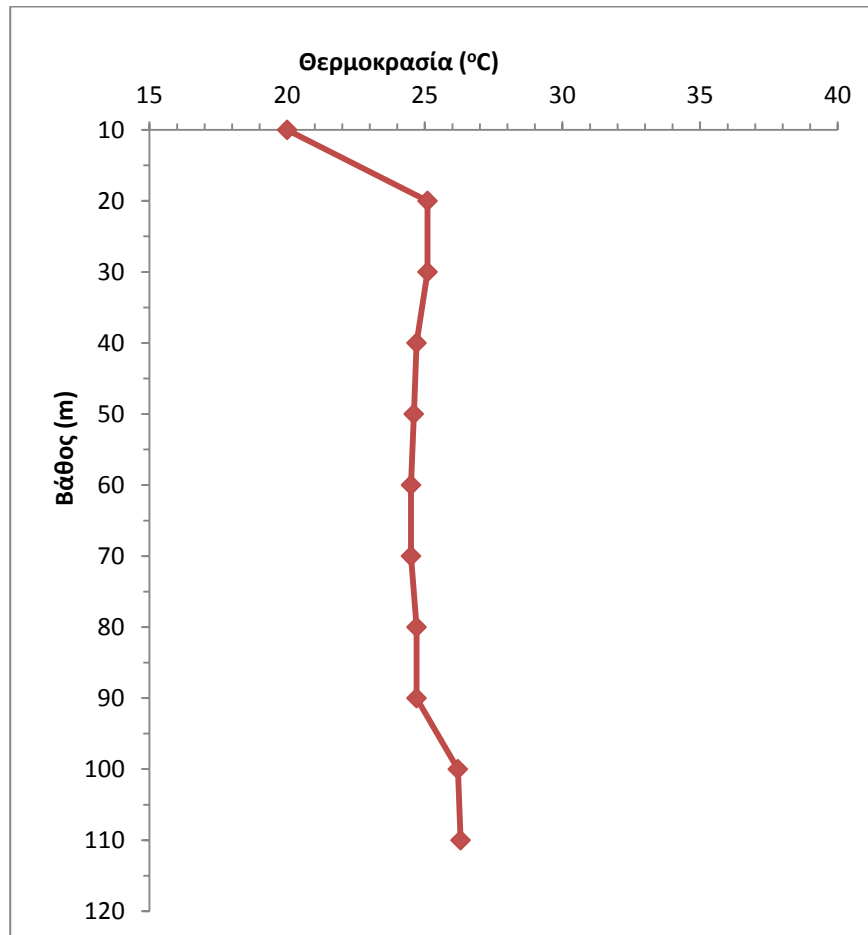
ΚΩΔΙΚΟΣ	ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑ	ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΒΑΘΟΣ (m)	T (°C)
B ₈	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	95	85	23.6
F ₄	ΔΕΥΑΘ	60.3	110	26.2
K ₁₆	ΔΕΥΑΘ	110	120	26.9
M ₁₅	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	87	120	25
Mg ₈	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	63	90	49.3
E ₃₆	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	120	124	42.2

Για τη γεώτρηση B₈ που βρίσκεται στην περιοχή του Βουρβούλου, λήφθηκε υπόψη ότι η μέση θερμοκρασία των νερών σε βάθος 10m από την επιφάνεια είναι 20°C. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11, στη γεώτρηση B₈ η θερμοκρασία στο βάθος των 85m, είναι 23.6°C. Η αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος γίνεται περίπου με «ρυθμό» 4,8°C/100m. Η τιμή των 23,6°C είναι ενδεικτική αβαθούς γεωθερμίας (μέχρι 25°C). Στο βάθος των 85m που συναντήθηκε η υδροφορία, η γεωθερμική βαθμίδα σταματά την ανάπτυξή της και δεν υπάρχουν περαιτέρω πληροφορίες για την τιμή της πέραν του βάθους αυτού.



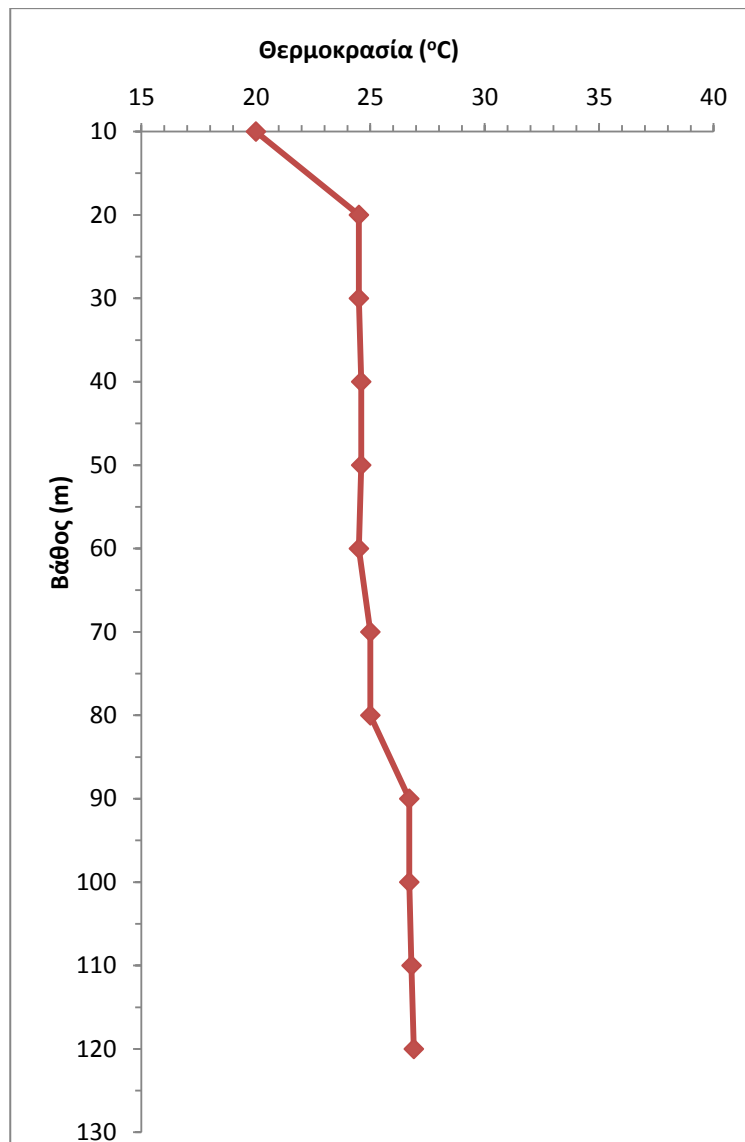
Σχήμα 4.11: Θερμομέτρηση σε βάθος της B₈.

Η καμπύλη βάθους-θερμοκρασίας που αφορά τη δημοτική γεώτρηση των Φηρών (F₄), δείχνει απότομη άνοδο της θερμοκρασίας από τα 10 μέχρι τα 20m, όπου και διαμορφώνεται στους 25.1°C. Από τα 20 μέχρι τα 70m η θερμοκρασία σταθεροποιείται στους 24.5°C, ενώ στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει τους 26,3°C στο τελικό βάθος των 110m, όπου συναντήθηκε και ο υδροφόρος ορίζοντας. Η γεωθερμική βαθμίδα στην γεώτρηση (F₄) υπολογίζεται στους 6.3°C/100m, γεγονός που αποδεικνύει την ύπαρξη θετικής γεωθερμικής ανωμαλίας και στην περιοχή των Φηρών.



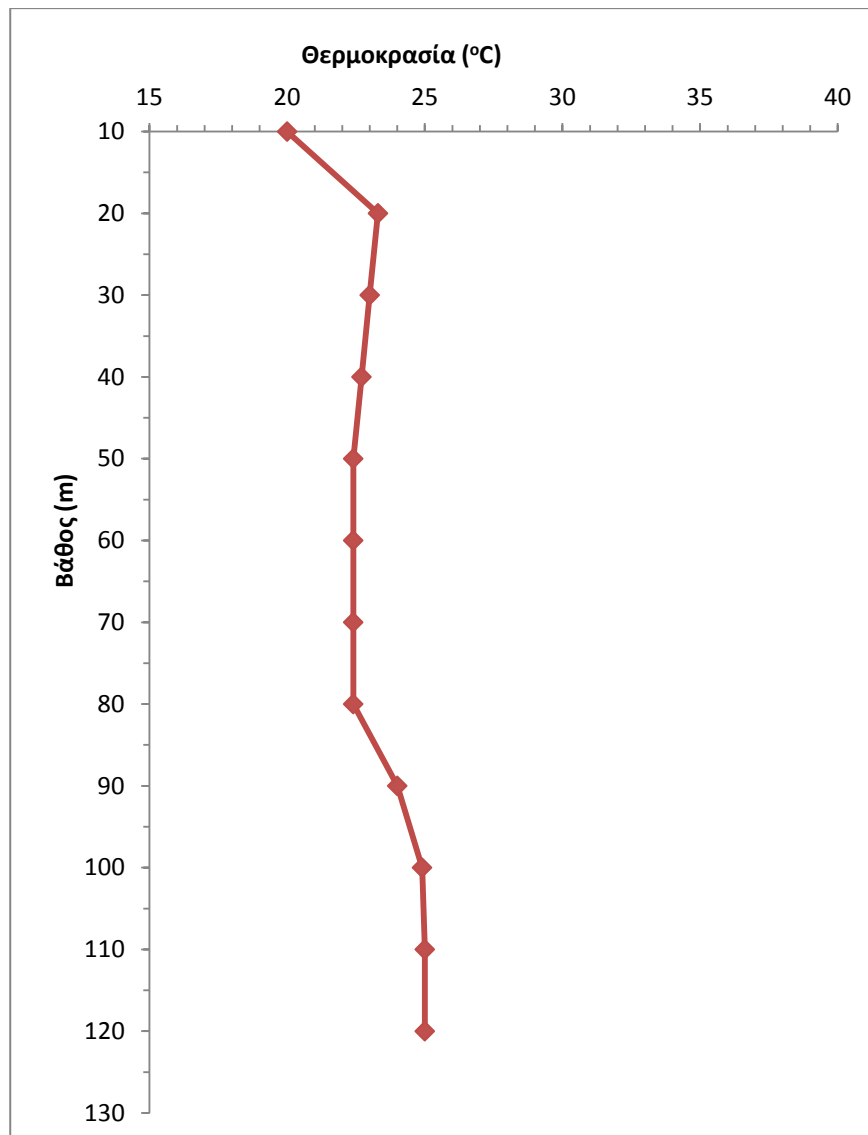
Σχήμα 4.12: Θερμομέτρηση σε βάθος της F₄.

Η κατά βάθος θερμομέτρηση που έγινε στην γεώτρηση K₁₆ στην περιοχή του Καρτεράδου έδειξε αυξημένη θερμοκρασία στο βάθος των 20m, η οποία διαμορφώθηκε στους 24.5°C. Στο βάθος των 120m, η θερμοκρασία έφτασε τους 26,9°C, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.13. Στα 120m συναντήθηκε η υδροφορία και η γεωθερμική βαθμίδα σταμάτησε την ανάπτυξη της κάτω από αυτό το βάθος. Στην εν λόγω γεώτρηση η γεωθερμική βαθμίδα είναι ίση με 6.3°C/100m.



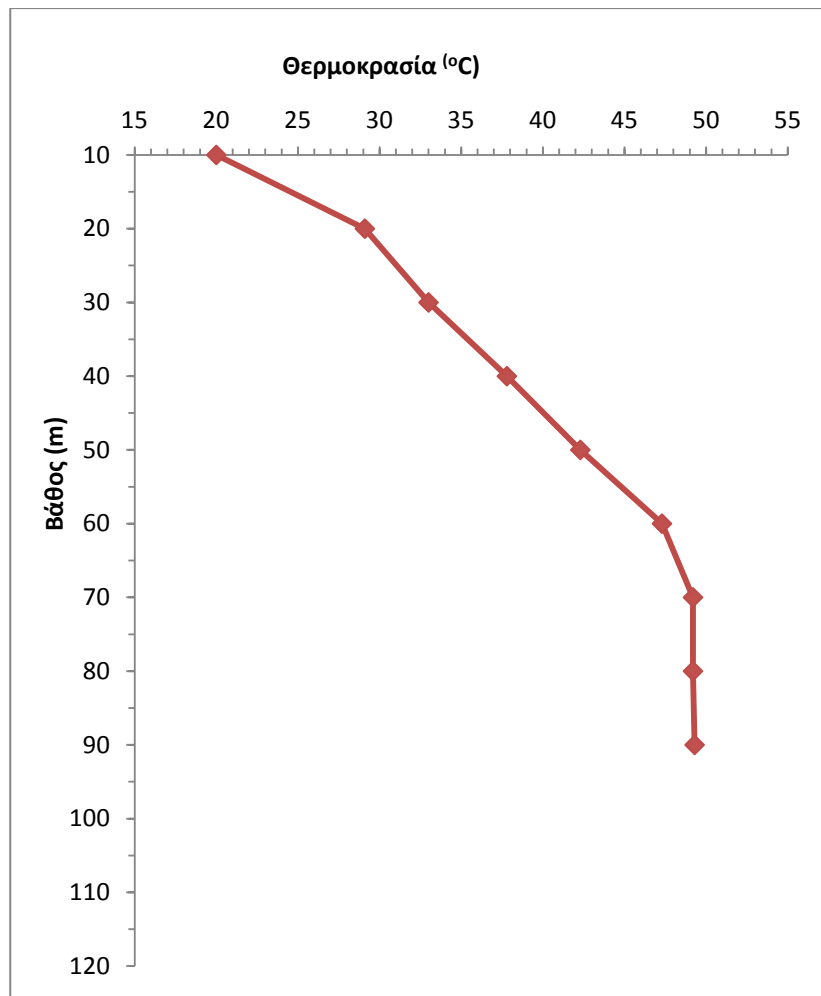
Σχήμα 4.13:Θερμομέτρηση σε βάθος της K₁₆.

Στην περιοχή της Μεσαριάς η κατανομή της θερμοκρασίας με το βάθος στη γεώτρηση (M₁₅) φαίνεται στο σχήμα 4.14. Στα 20m βάθος μετρήθηκε η τιμή των 23.3°C, ενώ στη συνέχεια και ως τα 80m παρατηρήθηκε μικρή μείωση της θερμοκρασίας, η οποία έφτασε τους 22.4°C. Έπειτα από τα 80 έως τα 100m η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 2.5 βαθμούς, δηλαδή ήταν σταθερή στους 25°C. Η γεωθερμική βαθμίδα για τη γεώτρηση αυτή, δεν θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας σε μικρά σχετικά βάθη.



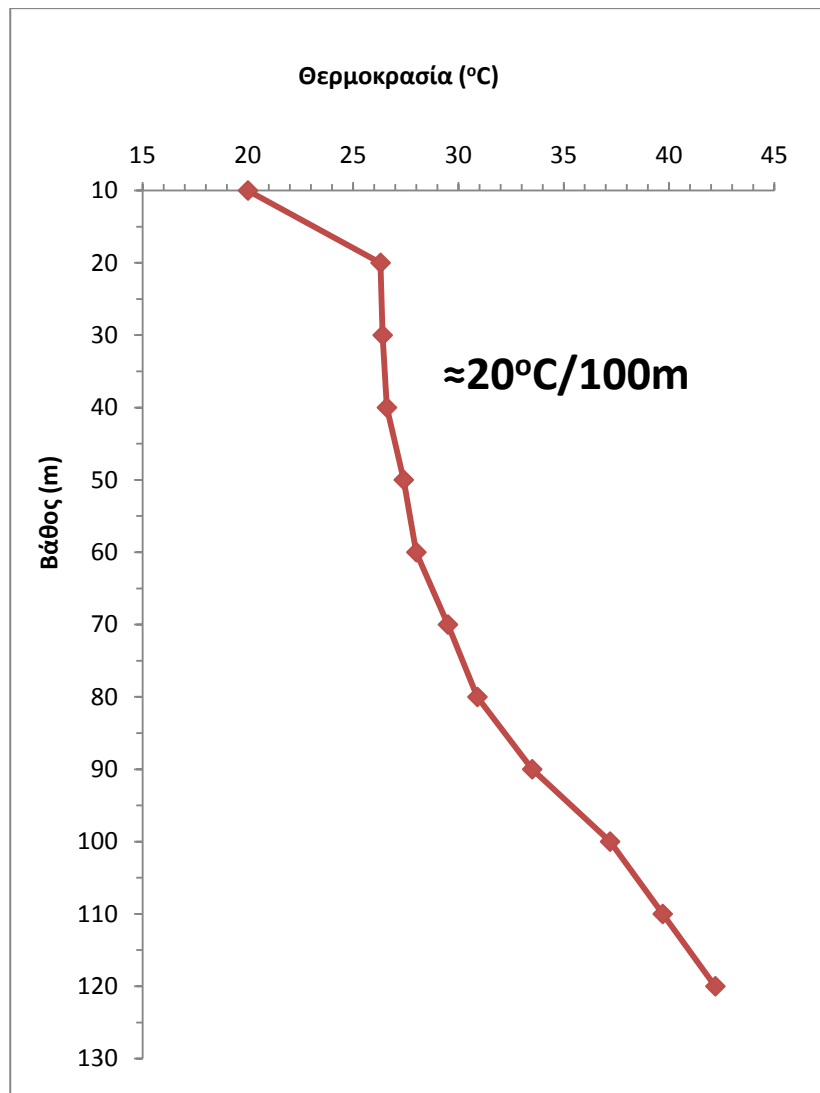
Σχήμα 4.14:Θερμομέτρηση σε βάθος της M_{15} .

Στην περιοχή του Μεγαλοχωρίου, εντός του πιθανού γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας, η γεώτρηση που μετρήθηκε σε βάθος είναι η Mg_8 . Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15, παρατηρήθηκε συνεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος, ξεκινώντας από τους 29.1°C στα 10m και κατέληξε στους 49.3°C στα 90m, όπου η γεώτρηση συνάντησε τον υδροφόρο ορίζοντα και σταμάτησε η ανάπτυξη της γεωθερμικής βαθμίδας. Η γεωθερμική βαθμίδα που προέκυψε είναι περίπου στους 40°C/100m. Παρόλα αυτά, δεν θεωρείται πραγματική ή έστω αντιπροσωπευτική λόγω του μικρού βάθους της γεώτρησης.



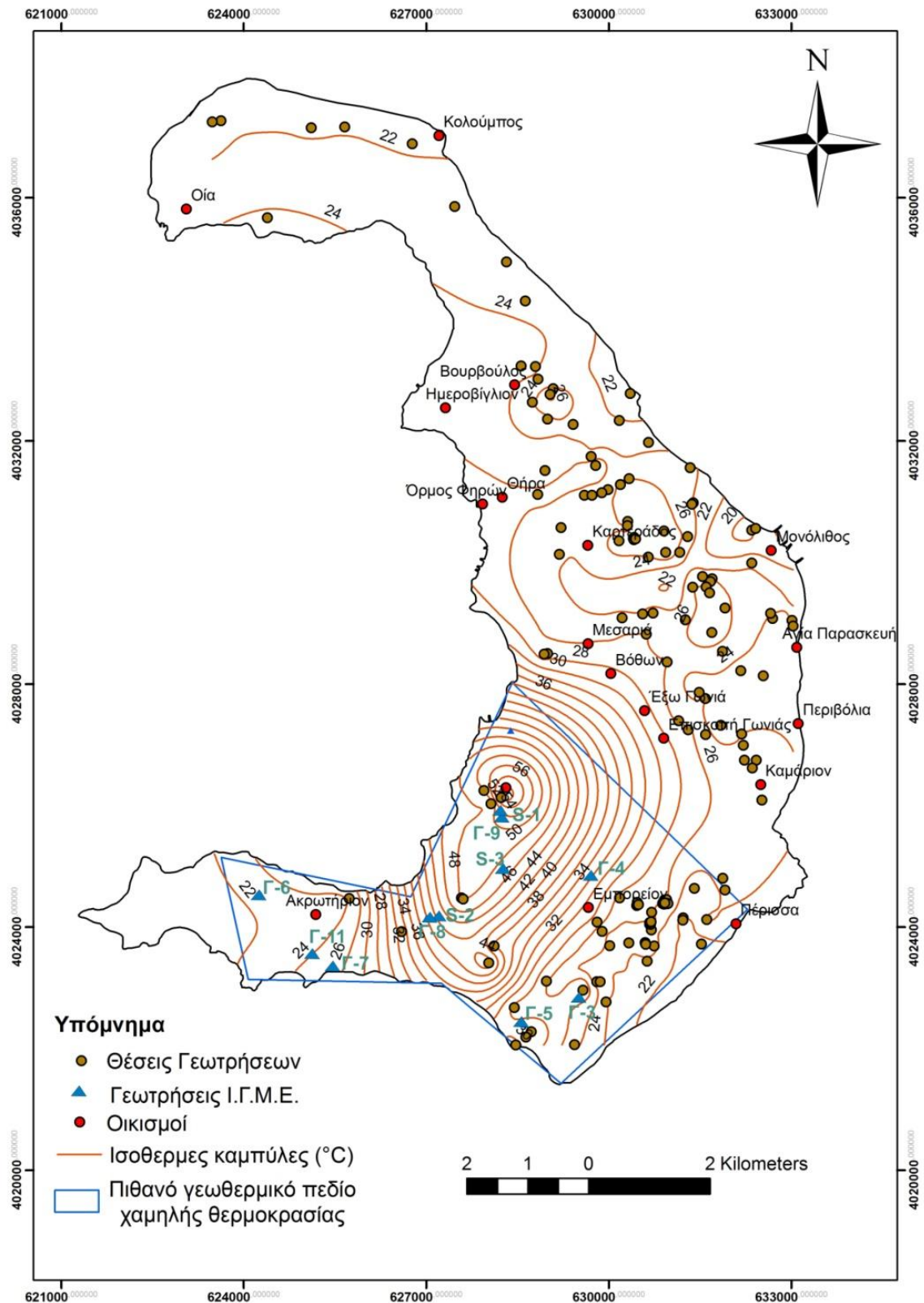
Σχήμα 4.15: Θερμομέτρηση σε βάθος της Mg₈.

Στην γεώτρηση (E₃₆) μετρήθηκε η θερμοκρασία των 42.2°C στο βάθος των 120m. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι σταδιακή και ήπια σε όλο το βάθος της γεώτρησης. Η γεωθερμική βαθμίδα υπολογίστηκε περίπου στους 20°C/100m, δηλαδή επταπλάσια της μέσης γεωθερμικής βαθμίδας. Αυτό το αποτέλεσμα συμφωνεί με τις παλαιότερες μετρήσεις γεωθερμικής βαθμίδας που είχαν γίνει από το ΙΓΜΕ στην περιοχή του Εμπορείου.

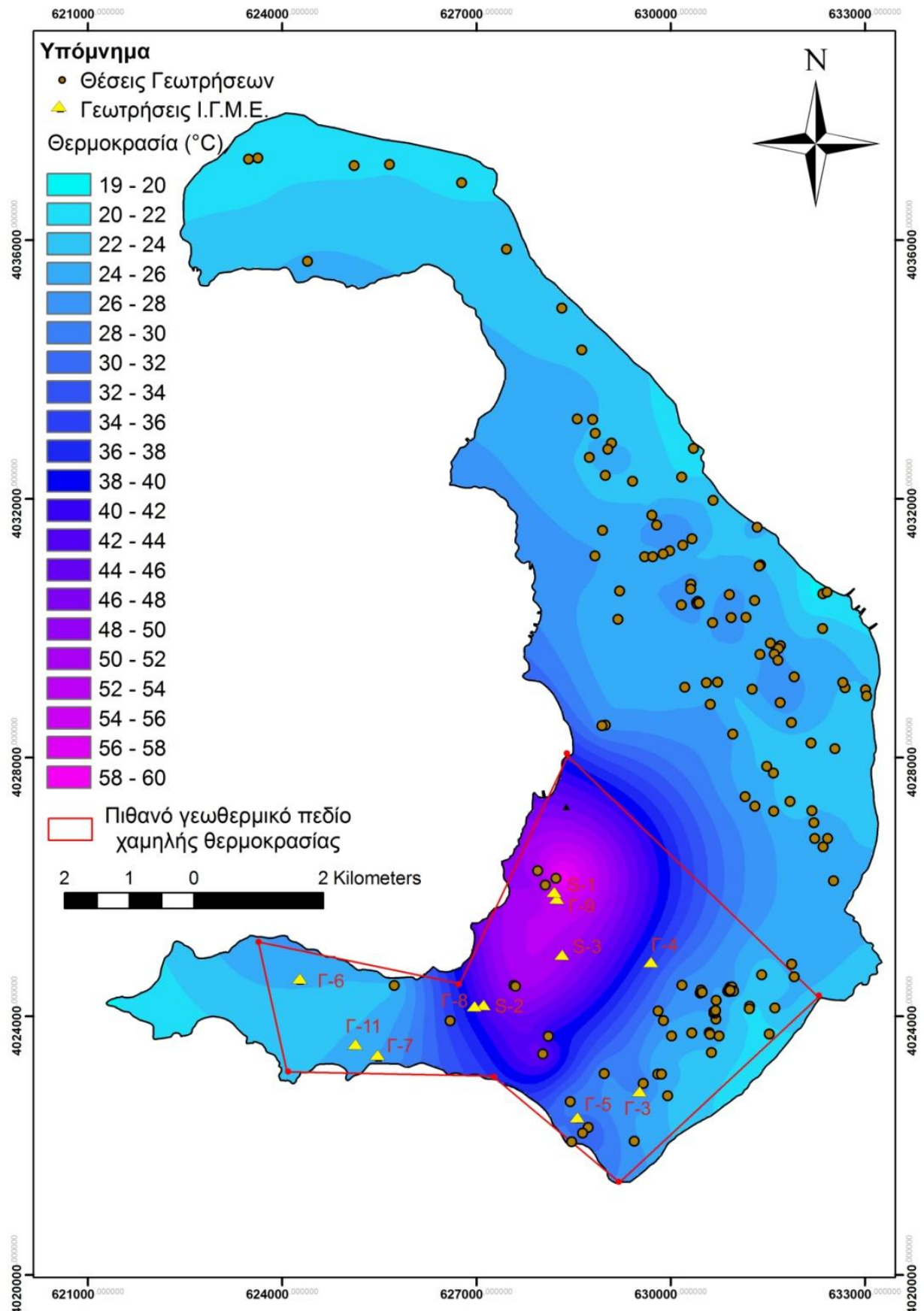


Σχήμα 4.16: Θερμομέτρηση σε βάθος της E₃₆.

Όπως φαίνεται από τους χάρτες των ισόθερμων, εκτός της περιοχής του οριοθετημένου γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας, αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών στο κεντρικό τμήμα της Σαντορίνης, δηλαδή από την περιοχή του Βουρβούλου και νοτιότερα. Οι θερμοκρασίες στην περιοχή αυτή φτάνουν τους 26 και 27°C σε βάθη που κυμαίνονται από 60 έως 110m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι στο κεντρικό μέρος της Σαντορίνης υπάρχουν έντονες ενδείξεις ύπαρξης γεωθερμικής ανωμαλίας, που πιθανώς συνδέεται με κάποιο βαθύτερο σύστημα χαμηλής ενθαλπίας. Στο βόρειο μέρος της Σαντορίνης (Οία έως Βουρβούλο), παρατηρήθηκαν χαμηλότερες θερμοκρασίες της τάξης των 23-24°C σε βάθη που κυμαίνονται από 90 έως 180m.



Σχήμα 4.17: Καμπύλες ίσης θερμοκρασίας στη Σαντορίνη (βάθος=0m)(Papachristou et al., 2014).



Σχήμα 4.18: Χωρική κατανομή της θερμοκρασίας στην περιοχή της Σαντορίνης (Papachristou et al., 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Οι χημικές αναλύσεις των γεωθερμικών ρευστών αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στη γεωθερμική έρευνα, επειδή δίνουν τη δυνατότητα μιας σχετικά γρήγορης και αξιόπιστης εκτίμησης των χαρακτηριστικών τους. Τα γεωχημικά δεδομένα που προκύπτουν συνεκτιμώνται μαζί με άλλα στοιχεία της έρευνας και βοηθούν, εκτός των άλλων, στον εντοπισμό του γεωθερμικού συστήματος, στον καθορισμό του μηχανισμού τροφοδοσίας του ταμιευτήρα και στην εκτίμηση της αρχικής θερμοκρασίας των υπόγειων θερμών ρευστών.

Κατά τη δεκαετία του 1980, στα πλαίσια της συστηματικής γεωθερμικής έρευνας και της κατασκευής των ερευνητικών γεωτρήσεων, το ΙΓΜΕ διεξήγαγε δειγματοληψία νερών σε πολλές πηγές, γεωτρήσεις και πηγάδια που υπήρχαν στο νησί.

Συνολικά συλλέχθηκαν 117 δείγματα και έγιναν χημικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό διάφορων στοιχείων όπως Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Cl, SO_4 , NO_3 , B, NH_4 , SiO_2 , Fe, Sr, Li, του pH, της αγωγιμότητας και του συνόλου των διαλυμένων αλάτων (Καβουρίδης κ.ά., 1982). Διαπιστώθηκε πως όλα τα θερμά νερά της Σαντορίνης με θερμοκρασία μέχρι τους 65°C ανήκουν στην κατηγορία των χλωρονατρίουχων, με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα, η οποία σε ορισμένα δείγματα ξεπερνά και αυτή της θάλασσας, με μέγιστη τιμή 54.223mg/L (Καβουρίδης κ.ά., 1982).

Παρατηρήθηκε μια συνεχής μίξη του ζεστού νερού με το θαλασσίνο και το επιφανειακό νερό, η οποία επιδρά μεταβάλλοντας την περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα και κυρίως επηρεάζει τις μεταβολές στη συγκέντρωση ιόντων Na και Cl. Ο λόγος Cl/Na στα επιφανειακά νερά είναι περίπου 1, ενώ στα δείγματα θερμού νερού είναι μεγαλύτερος από 1, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της διαλυτότητας των αλάτων. Επομένως, στα θερμά νερά υπάρχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα Cl σε σύγκριση με το Na (Καβουρίδης κ.ά., 1982).

Σύμφωνα με το μοντέλο τροφοδοσίας που προτάθηκε από το ΙΓΜΕ (Καβουρίδης κ.α., 1982), το νερό του ταμιευτήρα βρίσκεται σε περιβάλλον όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και παρατηρείται μια αμοιβαία ανταλλαγή ιόντων μεταξύ νερού και πετρωμάτων, η οποία επιφέρει αύξηση στην περιεκτικότητα των διαλυμένων αλάτων. Στη συνέχεια, το ζεστό νερό ανέρχεται προς την επιφάνεια, όπου αναμιγνύεται με θαλασσίνο και επιφανειακό νερό, και η έξοδός του στην επιφάνεια πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος ρηγμάτων. Η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας σε άλατα των θερμών πηγών (Θερμά, Βλυχάδα κλπ) οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα με την οποία κινούνται τα ρευστά στο υπέδαφος και τον χρόνο παραμονής τους μέσα σε αυτό. Εκεί που η διαδρομή τους είναι σύντομη (π.χ. στα Θερμά), εμφανίζονται υψηλότερες θερμοκρασίες (56°C) και συγκεντρώσεις αλάτων, ενώ το αντίθετο συμβαίνει εκεί που το νερό ακολουθεί μακρύτερα κανάλια, δηλαδή μένει περισσότερο χρόνο κάτω από την επιφάνεια όπως στη Βλυχάδα (32°C) (Καβουρίδης κ.α., 1982).

Σύμφωνα με την Ντότσικα (2009), η οποία ανέλυσε 5 δείγματα, τα νερά των θερμών πηγών της Σαντορίνης (Πλάκια, Θερμά Χριστού, Βλυχάδα) βρίσκονται κοντά στην νοητή γραμμή θαλασσινού-επιφανειακού νερού, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι προέρχονται από ρηχούς υδροφόρους ορίζοντες. Από την άλλη, η υψηλή συγκέντρωση HCO_3^- σε κάποια δείγματα οφείλεται στη διάλυση CO_2 , το οποίο, τουλάχιστον στα νερά των πηγών, είναι βιογενούς προέλευσης (Dotsika et al., 2009). Οι Chiodini et al. (1998) αναφέρουν ότι υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας

(50,000 μ S/cm) και TDS στα νερά της Σαντορίνης ενδεχομένως συνδέονται με την ύπαρξη ρευστών από τον μανδύα.

Στα πλαίσια των ερευνητικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στη Σαντορίνη την περίοδο Απρίλιος-Οκτώβριος 2014 μετρήθηκαν οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην κεφαλή 114 γεωτρήσεων, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Παρατηρείται ότι η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αυξάνεται όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία του νερού, όποτε εξάγεται το συμπέρασμα ότι σε όλο το εύρος του νησιού οι τιμές θα είναι πάνω από το επιτρεπτό όριο του πόσιμου νερού, με λίγες μόνο εξαιρέσεις. Εκτός από τη θερμοκρασία, ένας ακόμα λόγος για την ύπαρξη υψηλής αγωγιμότητας είναι ότι τα νερά των γεωτρήσεων και των πηγαδιών αντλούνται από ρηχούς υδροφόρους ορίζοντες και επηρεάζονται από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού οι αντλήσεις σε όλο το νησί περιορίζονται στα λίγα κυβικά την ημέρα, ώστε οι γεωτρήσεις να μην αχρηστευθούν εντελώς. Στις γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται για αφαλάτωση (A_1 , Ia_6 , F_{11}), η αγωγιμότητα ξεπερνάει τα 20.000 μ S/cm. Στις υπόλοιπες, οι τιμές κυμαίνονται από 900 έως 7600 μ S/cm, εκτός από δύο περιπτώσεις ιδιωτικών γεωτρήσεων, στον Μονόλιθο (Mon_7) και την Περίσσα (Pr_4), στις οποίες η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη από 10.000 μ S/cm. Επίσης παρατηρείται πως οι τιμές του pH είναι μεγαλύτερες από 7.5 γεγονός που αποδεικνύει ότι το νερό είναι ελαφρά αλκαλικό.

Τον Οκτώβριο του 2014 έγινε δειγματοληψία από οκτώ (8) γεωτρήσεις που βρίσκονται σε λειτουργία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή των θέσεων δειγματοληψίας έγινε ώστε να υπάρχει σαφής και αντιπροσωπευτική εικόνα για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περιοχή. Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων αυτών πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο αναλυτικής χημείας του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, όπου μετρήθηκαν οι φυσικοχημικές παράμετροι των ρευστών (pH, αγωγιμότητα, σκληρότητα), τα κύρια ιόντα, ιχνοστοιχεία και χημικές ενώσεις.

Οι τιμές των κυριότερων παραμέτρων σε κάθε γεώτρηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Οι γεωτρήσεις από το βορρά προς το νότο είναι η B_6 στον Βουρβούλο, η F_{10} στα Φηρά, η K_{12} στον Καρτεράδο, η M_{13} στην Μεσαριά, η Bth_6 στον Βόθωνα, η Eg_2 στην Έξω Γωνιά, η E_{19} στο Εμπορείο και τέλος η Mg_7 που βρίσκεται στο Μεγαλοχώρι. Οι θέσεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στον χάρτη του Σχήματος 5.1.



Σχήμα 5.1: Θέσεις δειγματοληψίας κατά την περίοδο Απρίλιος – Οκτώβριος 2014

Πίνακας 5.1: Τα κυριότερα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων από τα δείγματα νερού από γεωτρήσεις της Σαντορίνης.

	Mg ₇	F ₁₀	B ₆	K ₁₂	M ₁₃	Bth ₆	E ₁₉	Eg ₂
Αγωγιμότητα (μS/cm)	7545	3814	5284	2493	925	3645	3380	3228
pH	7,5	7,7	7,6	7,8	8,1	7,8	7,7	7,8
Na ⁺ (mg/L)	1150	482	649	319	111	535	435	396
K ⁺ (mg/L)	49	23	24	16	9	23	20	20
Ca ²⁺ (mg/L)	155	202	255	127	78	139	206	125
Mg ²⁺ (mg/L)	108	39	58	32	6	44	56	47
Li ⁺ (mg/L)	0,1	0,2	0,2	0,1	0,04	0,11	0,04	0,08
Sr ²⁺ (mg/L)	0,6	0,95	1,3	0,6	0,18	0,51	0,54	0,51
NH ₄ ⁺ (mg/L)	-	-	-	0,05	-	-	-	-
Cl ⁻ (mg/L)	2080	959	1325	568	135	657	846	657
As(μg/L)	19	14	46	22	18	20	3	6
Zn (μg/L)	27	12	21	5	5	24	27	5
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	308	315	401	161,7	55	587	267	320
HCO ₃ ⁻	183	171	153	207	238	195	153	116
Br ⁻ (mg/L)	7,2	4,1	5	3,5	0,7	2,2	2,2	1,4
SiO ₂ (mg/L)	73	52	46	52	58	54	40	39
B(mg/L)	0,7	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4

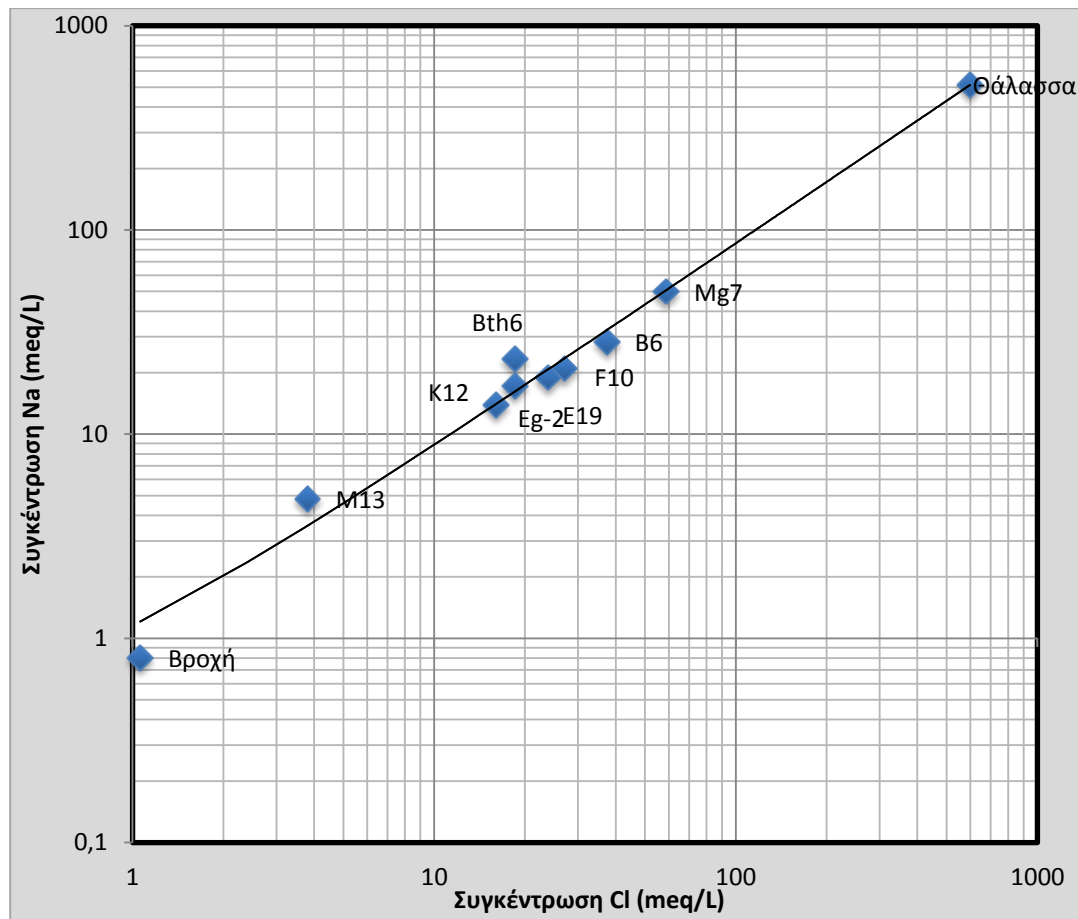
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων παρατηρούνται υψηλές τιμές στις συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- , οι οποίες κατατάσσουν τα θερμά νερά μέχρι 65°C που βρέθηκαν στη Σαντορίνη στην κατηγορία των χλωρο-νατριούχων, όπως επιβεβαιώθηκε και από τις χημικές αναλύσεις που είχε πραγματοποιήσει το ΙΓΜΕ. Τα ανιόντα του Cl^- είναι ευδιάλυτα και η υψηλή περιεκτικότητά τους υποδηλώνει διείσδυση του θαλασσινού νερού και σε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις θεωρείται ακατάλληλο για πόση ($>250\text{mg/L}$), ενώ σε ενδιάμεσες τιμές απλά κάνει την γεύση του νερού πιο γλυφή. Στο νησί της Σαντορίνης οι τιμές των ανιόντων του Cl^- κυμαίνονται από 135 έως 2080mg/L και το ορίζουν ως το επικρατέστερο ανιόν. Από αυτές τις τιμές παρατηρείται ότι σε ορισμένες περιοχές το νερό μπορεί να διατεθεί προς χρήση, ενώ σε άλλες είναι απαγορευτικό λόγω της συγκέντρωσης του Cl^- .

Η υψηλή συγκέντρωση στα κατιόντα του Na^+ , η οποία κυμαίνεται από 110 έως 1150mg/L , επίσης υποδηλώνει διείσδυση του θαλασσινού νερού και οι τιμές πάνω από 200mg/L είναι απαγορευτικές για χρήση ως πόσιμο νερό. Παρατηρείται επίσης ότι δεν υπάρχει αμμωνία στα δείγματα, εκτός από μια ελάχιστη τιμή στην γεώτρηση του Καρτεράδου (0.05mg/L), η οποία δεν επηρεάζει καθόλου την ποιότητα του υπόγειου νερού.

Έπειτα, θετικό θεωρείται το γεγονός ότι δεν υπάρχουν στοιχεία υδραργύρου σε κανένα από τα δείγματα, διότι είναι ένα επιβλαβές ιχνοστοιχείο για το περιβάλλον και πρέπει να περιορίζεται σε τιμές κάτω του $1\mu\text{g/L}$. Όμως, υπάρχουν ενδείξεις ιχνοστοιχείων αρσενικού που κυμαίνονται από 3 έως $23\mu\text{g/L}$ στις περιοχές από όπου πάρθηκαν τα δείγματα. Τα περισσότερα νερά που βρίσκονται σε ηφαιστειογενείς περιοχές περιέχουν αρσενικό, με αποδεκτή τιμή μέχρι $10\mu\text{g/L}$ διότι σε τιμές μεγαλύτερες από αυτή προκαλεί βλάβες στον οργανισμό και αλλοιώσεις στο δέρμα. Οπότε, στις περιοχές όπου η τιμή του αρσενικού υπερβαίνει το επιτρεπτό όριο πρέπει να αποφευχθεί η χρήση του νερού ως πόσιμο.

Σύμφωνα με την UNESCO (1975), η συγκέντρωση του Na^+ και του Cl^- στο βρόχινο νερό σε σχέση με την απόσταση από τη θάλασσα είναι καθορισμένη και στην περίπτωση της Σαντορίνης λήφθηκαν ως τιμές αυτές που δίνονται για αποστάσεις 200m από την ακτή. Αντίστοιχα, η συγκέντρωση των δυο συστατικών είναι καθορισμένη και στο θαλασσινό νερό. Οι τιμές του βρόχινου και του θαλασσινού νερού προβάλλονται στο Σχήμα 5.2 σε λογαριθμικούς άξονες και γίνεται η μεταξύ τους συσχέτιση. Έπειτα στο ίδιο διάγραμμα προβάλλονται και οι τιμές των συγκεντρώσεων των δυο συστατικών για κάθε γεώτρηση που έχει πραγματοποιηθεί χημική ανάλυση. Παρατηρείται ότι οι γεωτρήσεις απεικονίζονται πάνω στη γραμμική σχέση μεταξύ θάλασσας και βροχής, γεγονός που αποδεικνύει ότι το νερό αυτών των γεωτρήσεων έχει ανάμειξη με το θαλασσινό και συνεπώς προέρχεται από θαλάσσια διείσδυση. Μόνο δυο γεωτρήσεις, η M_{13} και η B_{th6} , αποκλίνουν από τη γραμμή έχοντας μικρότερες τιμές στις συγκεντρώσεις αυτών των συστατικών.

Παράλληλα με το διάγραμμα υπολογίστηκε ο λόγος Na^+/Cl^- , ο οποίος στις περισσότερες γεωτρήσεις είναι <1 και εξάγεται το ίδιο συμπέρασμα με το διάγραμμα, δηλαδή ότι συμβαίνει ρύπανση του υδροφόρου από θαλάσσια διείσδυση. Οι δύο που απέκλιναν από τη γραμμή έχουν λόγο Na^+/Cl^- μεγαλύτερο του 1, γεγονός που υποδηλώνει υδροφορέα από αλκαλικά μαγματικά ή μεταμορφωμένα πετρώματα (Σούλιος, 2004).



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ (meq/L)

Εκτός από το λόγο Na^+/Cl^- υπολογίστηκαν και άλλοι ιοντικοί λόγοι για να βοηθήσουν στην κατάταξη του νερού της Σαντορίνης, οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Ο λόγος $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ (meq/L) στο θαλασσινό νερό είναι περίπου 0,20, σε υφάλμυρα νερά 1,5-3,7, ενώ σε ασβεστολιθικά νερά 1,6 (1,5-2,0) και σε δολομιτικά νερά 1,25 (1,0-1,4). Με βάση τις τιμές του λόγου αυτού (Πίν. 5.2) προκύπτει ότι τα νερά είναι υφάλμυρα.

Από το λόγο $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ παρατηρείται ότι τα νερά ανήκουν στα χλωριούχα – χλωροθειούχα, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης των ιόντων του χλωρίου και των θεικών. Επίσης το υπόγειο νερό θεωρείται παλιό, στάσιμο στα κατάντη του υδροφορέα. Εφόσον οι τιμές κυμαίνονται από 4 έως 10 (meq/L) το νερό θεωρείται υφάλμυρο. Η Mg_7 έχει τιμή 9,15 πλησιέστερη στο 10, που είναι και η τιμή του παίρνει ο συγκεκριμένος λόγος για το θαλασσινό νερό. Ενώ οι Bth_6 , Eg_2 και η M_{13} έχουν τιμές κάτω από το όριο του υφάλμυρου.

Επίσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής Revelle (1941), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την διαπίστωση της θαλάσσιας διείσδυσης (Σούλιος, 2004) και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R = \text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) \text{ (meq/L)}$$

Αν η τιμή του λόγου ξεπεράσει το 1 τότε θεωρείται ότι υπάρχει θαλάσσια διείσδυση. Στο νησί της Σαντορίνης παρατηρείται σε όλο το εύρος της, ότι η τιμή του λόγου είναι στα όρια της θαλάσσιας διείσδυσης βάσει των υπολογισμών, εκτός από την περιοχή

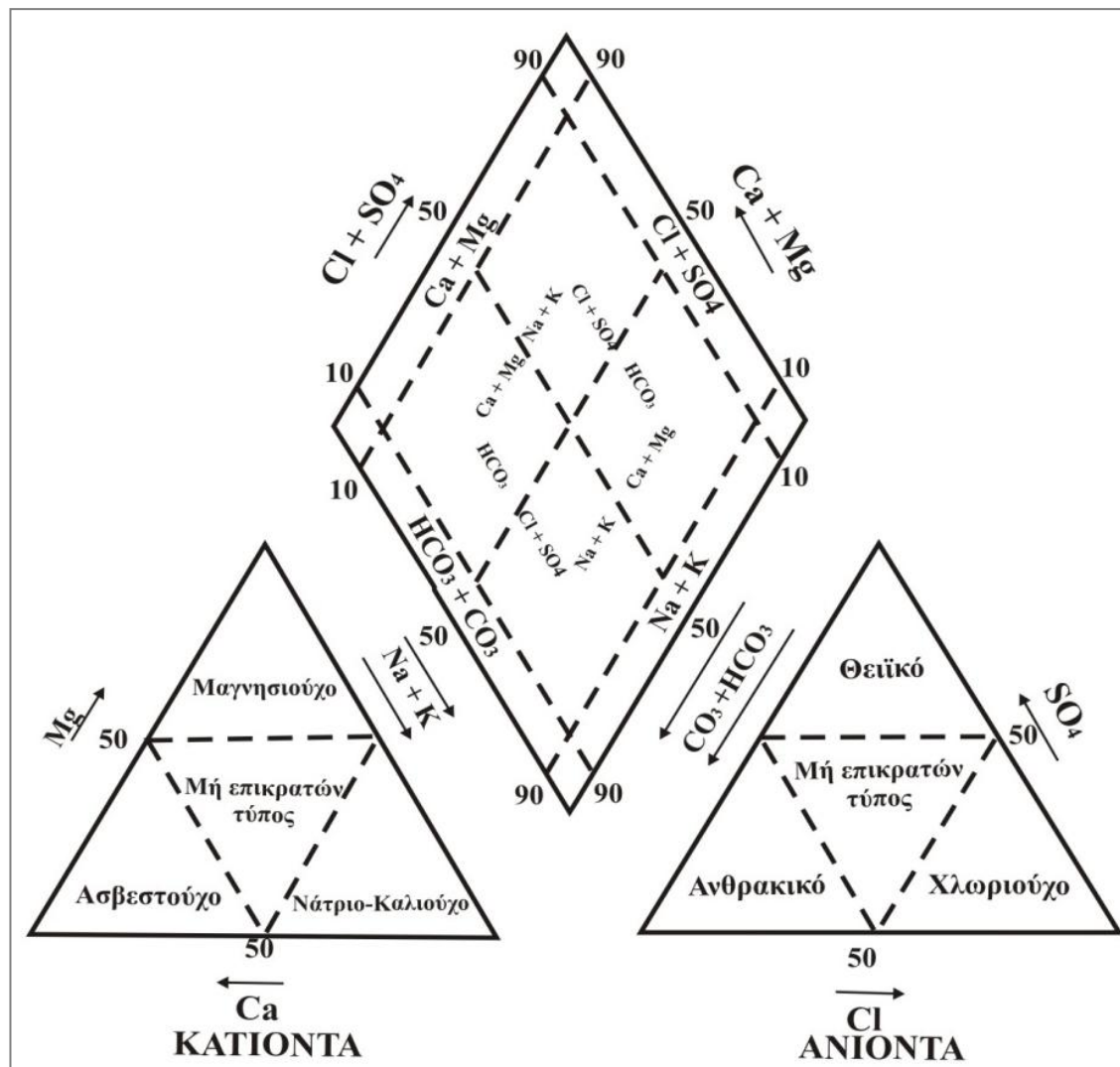
της Μεσαριάς (M_{13}), όπου ο συντελεστής έχει τιμή κάτω από 1 και υποδεικνύει την ύπαρξη γλυκού νερού.

Πίνακας 5.2: Οι τιμές των ιοντικών λόγων.

(meq/L)	Na^+/Cl^-	Ca^{2+}/Mg^{2+}	Cl^-/SO_4^{2+}	Revelle
Mg_7	0.85	0.87	9.15	19.6
F_{10}	0.77	3.15	4.12	9.66
B_6	0.75	2.66	4.47	14.88
K_{12}	0.86	2.41	4.75	4.72
M_{13}	1.26	7.8	3.33	0.97
Bth_6	1.25	1.92	1.52	5.81
E_{19}	0.79	2.23	4.3	9.50
Eg_2	0.92	1.61	2.78	9.75

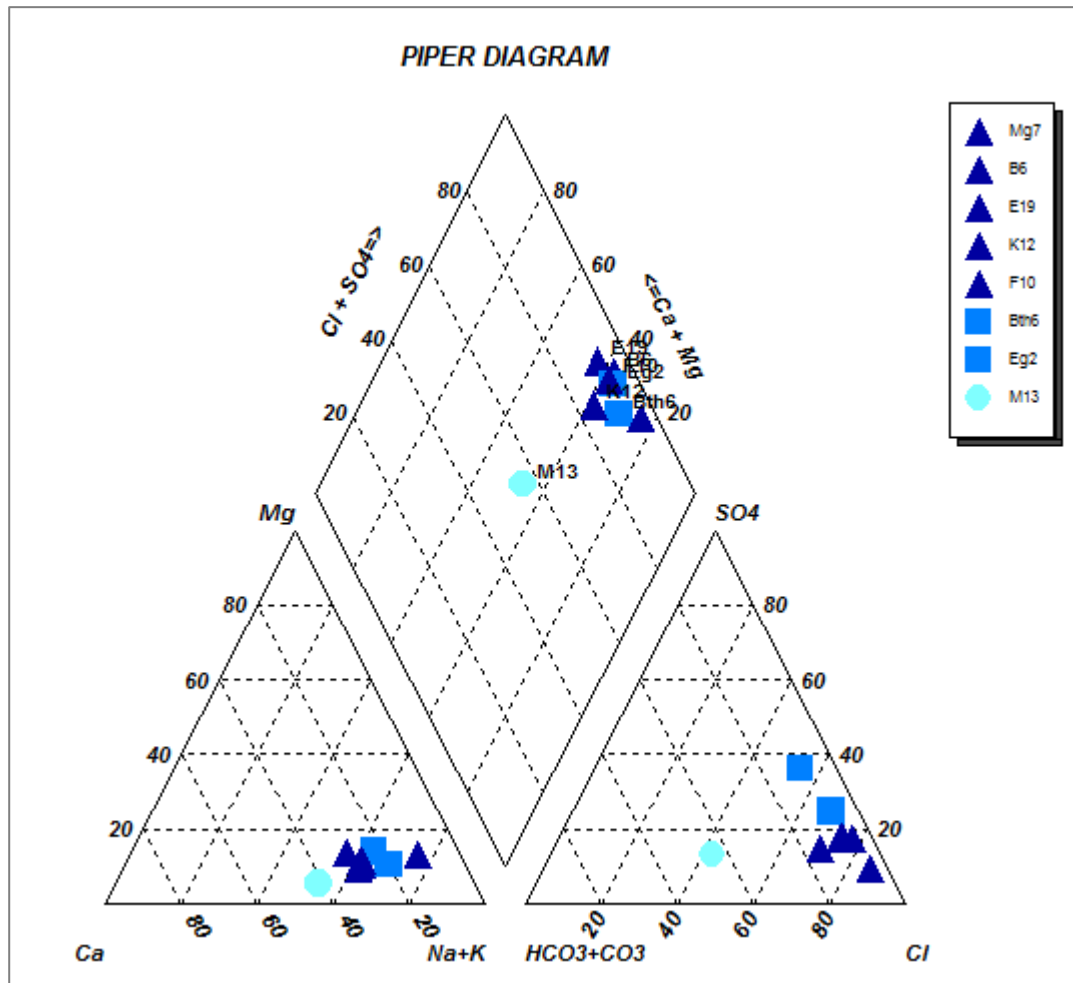
Τέλος εξήχθησαν ένα διάγραμμα Piper (Σχήμα 5.4) και ένα διάγραμμα Durov (Σχήμα 5.5), τα οποία χρησιμεύουν στην αναγνώριση διάφορων γεωχημικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την ρύπανση των υπόγειων νερών είτε άμεσα από θαλάσσια διείσδυση είτε έμμεσα, όπως στην περίπτωση της Σαντορίνης, μέσω γεωτρήσεων που φέρνουν σε επικοινωνία τους υδροφόρους ορίζοντες με νερό διαφορετικής ποιότητας (Καλλέργης, 2001).

Το διάγραμμα Piper αποτελείται από δύο τριγωνικά διαγράμματα ένα για τα κατιόντα και ένα για τα ανιόντα και ένα κεντρικό σχήματος ρόμβου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Τα ασβεστούχα-οξυανθρακικά ($Ca-HCO_3$) νερά βρίσκονται στην αριστερή γωνία του ρόμβου, ενώ τα υφάλμυρα νερά ($Na-Cl$) βρίσκονται στη δεξιά γωνία του ρόμβου. Στην επάνω γωνία του ρόμβου τοποθετούνται νερά με υδροχημικό τύπο $Ca(Mg)-Cl(SO_4)$ και στην κάτω γωνία νερά με τύπο $Na(K)-HCO_3$ (Βουδούρης, 2009).

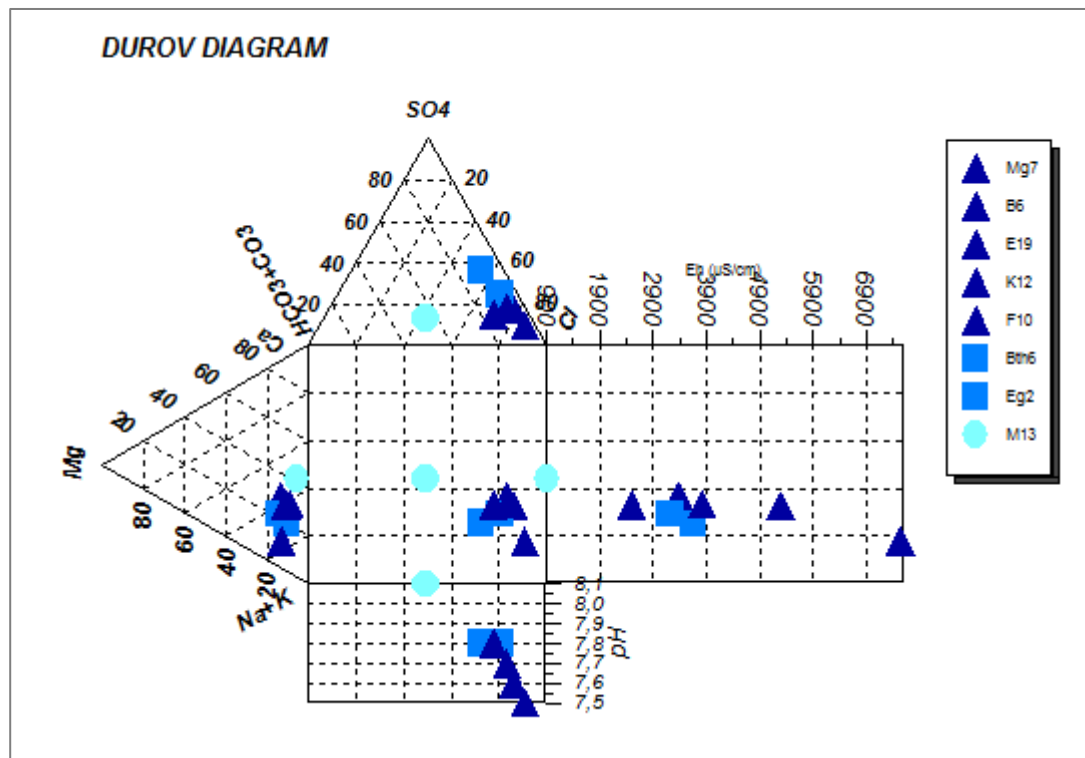


Σχήμα 5.3: Κύριοι υδροχημικοί τύποι νερών στο διάγραμμα Piper (Βουδούρης, 2009).

Από τα παρακάτω διαγράμματα (Σχ. 5.4 και 5.5) προκύπτει ότι ο κυρίαρχος υδροχημικός τύπος των υπόγειων νερών της Σαντορίνης είναι $\text{Cl}-\text{SO}_4^{2-}$. Παρατηρείται ότι τα πέντε από τα οχτώ δείγματα που αναλύθηκαν, έχουν αυτόν τον υδροχημικό τύπο. Δύο από αυτά, το Bth₆ και το Eg₂, έχουν προσθήκη θεικών (SO_4^{2-}) που αλλάζουν τον τύπο σε Na-Cl-SO₄. Μόνο ένα δείγμα (M₁₃) εμπεριέχει Ca-HCO₃ και είναι αυτό που διαφέρει εντελώς από όλα τα υπόλοιπα εφόσον έχει υδροχημικό τύπο Na-Ca-HCO₃. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Papachristou et al. (2014).



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα Piper από τις χημικές αναλύσεις των γεωτρήσεων.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα Durov από τις χημικές αναλύσεις των γεωτρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΘΕΡΜΟΜΕΤΡΩΝ

Οι χημικές αναλύσεις των γεωθερμικών ρευστών μπορούν κατά περίπτωση να χρησιμοποιηθούν και για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα. Οι πληροφορίες αυτές είναι πολύ χρήσιμες και ενδιαφέρουσες, ιδιαίτερα σε περιοχές που απουσιάζουν στοιχεία από βαθιές γεωτρήσεις, όπως δηλαδή συμβαίνει στη Σαντορίνη. Η εκτίμηση της θερμοκρασίας των ταμιευτήρων πραγματοποιείται με τη βοήθεια εμπειρικών χημικών γεωθερμομέτρων.

Η γεωθερμομετρία νερών βασίζεται στα διάφορα συστατικά τους, και κυρίως στη χημική ισορροπία πετρώματος-ρευστού (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004). Κατά την άνοδο των γεωθερμικών ρευστών από το βαθύ ταμιευτήρα προς την επιφάνεια, το νερό μπορεί να ψυχθεί λόγω απώλειας της θερμότητας καθώς ταξιδεύει δια μέσου των ψυχρότερων πετρωμάτων. Η ψύξη προξενεί αλλαγές στη χημική και ισοτοπική σύνθεση του νερού από τα περιβάλλοντα ορυκτά που υπάρχουν στα πετρώματα και είναι ευδιάλυτα (Karingithi, 2009). Η απώλεια της θερμότητας από το γεωθερμικό νερό είναι ανάλογη με την απόσταση που χρειάζεται να διανύσει ως την επιφάνεια και αντιστρόφως ανάλογη προς τον ρυθμό ροής (Karingithi, 2009). Για κατακόρυφη ροή έχει υπολογιστεί ότι η θερμοκρασία μειώνεται στο μισό της τιμής της για νερά που ρέουν με 0,4l/s από ταμιευτήρα βάθους 1Km (Truesdell et al., 1977).

Τα πιο σημαντικά γεωθερμόμετρα νερού και αυτά που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία, είναι του SiO₂ (χαλαζίας και χαλκηδόνιος), του Na/K και του Na/K/Ca. Το γεωθερμόμετρο του πυριτίου βασίζεται στις διακυμάνσεις της διαλυτότητας των διαφορετικών στοιχείων του πυριτίου που βρίσκονται στο νερό, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης (Karingithi, 2009). Το διοξείδιο του πυριτίου είναι ένα συστατικό του οποίου η διαλυτότητα μεταβάλλεται σε σχέση με τη θερμοκρασία. Γενικά, η περιεκτικότητα σε SiO₂ των γεωθερμικών ρευστών περιορίζεται πάνω από τους 160°C από τη διαλυτότητα του ορυκτού χαλαζία και κάτω από τους 164°C από τη διαλυτότητα του άμορφου SiO₂ (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004). Τα περισσότερα γεωθερμικά συστήματα όπου οι θερμοκρασίες του ταμιευτήρα υπερβαίνουν τους 180°C είναι σε ισορροπία με τον χαλαζία και αυτή παραμένει σταθερή ως τους 870°C. Ο χαλαζίας έχει χαμηλότερη διαλυτότητα από άλλα ορυκτά όπως ο χαλκηδόνιος, ο οπάλιος και ο χριστοβαλίτης, τα οποία εμφανίζονται σε συστήματα με χαμηλότερες θερμοκρασίες (<180°C) (Karingithi, 2009). Η καλή γνώση των πυριτικών ορυκτών που υπάρχουν στα πετρώματα του ταμιευτήρα είναι απαραίτητη.

Το γεωθερμόμετρο Na/K δεν λειτουργεί αξιόπιστα όταν οι θερμοκρασίες του ταμιευτήρα είναι κάτω από τους 140°C, γιατί στηρίζεται στην αρχή της αλβιτίωσης των αστρίων που συμβαίνει σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (Fytikas & Andritsos, 2004). Το γεωθερμόμετρο αυτό είναι κατάλληλο για ταμιευτήρες υψηλής θερμοκρασίας και το κύριο πλεονέκτημά του είναι ότι επηρεάζεται λιγότερο από την διαλυτότητα ή την απώλεια ατμού, γεγονός που συμβαίνει διότι βασίζεται στην αναλογία των δύο στοιχείων. Εφαρμόζεται στους 350°C και δίνει ενδείξεις για το βαθύτερο τμήμα του ταμιευτήρα, μόνο αν υπάρξει αργή ισορροπημένη άνοδος του ρευστού μπορεί να υπολογίσει σε ρηχά επίπεδα χαμηλότερες θερμοκρασίες (Karingithi, 2009).

Τέλος το γεωθερμόμετρο του Na/K/Ca αναπτύχθηκε από τους Fournier & Truesdell (1973) για εφαρμογή σε νερά με υψηλές συγκεντρώσεις σε Ca. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι σε σύγκριση με τα άλλα δύο γεωθερμόμετρα δεν δίνει παραπλανητικά αποτελέσματα για τα κρύα μη ισορροπημένα ρευστά.

Θεωρείται ισάξια αξιόπιστο με αυτό του διοξειδίου του πυριτίου και δίνει σχετικά παρόμοιες τιμές με το γεωθερμόμετρο Na/K αλλά λειτουργεί καλύτερα σε χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας μέσα στον ταμιευτήρα (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004). Τέτοιες τιμές αναμένονται και στην περιοχή έρευνας.

Κατά την προγενέστερη έρευνα του ΙΓΜΕ στη Σαντορίνη εφαρμόστηκαν τα γεωθερμόμετρα SiO₂ και Na/K/Ca στα δείγματα από ρηχές γεωτρήσεις, όπου υπάρχει ισορροπία μεταξύ νερού και των ορυκτών των πετρωμάτων (Fytikas et al., 1989). Το γεωθερμόμετρο Na/K/Ca έδειξε πιθανές τιμές θερμοκρασίας που κυμαίνονται από 160 έως 190°C σε κατάσταση ισορροπίας διαλύματος-πετρώματος στον βαθύ ταμιευτήρα. Το γεωθερμόμετρο SiO₂ έδωσε την τιμή των 130°C κοντά στην έξοδό του προς την επιφάνεια. Τις ίδιες περίπου θερμοκρασίες με αυτές του SiO₂, δίνει και το γεωθερμόμετρο του Na/K με το οποίο εκτιμήθηκε η θερμοκρασία των ρευστών σε βάθος γύρω στους 140°C.

Σύμφωνα με το γεωθερμόμετρο K/Na/Mg που εφαρμόστηκε επίσης σε ρηχούς ταμιευτήρες (Mendrinios et al., 2010), οι θερμοκρασίες βάθους κυμαίνονται από 110°C έως 175°C. Και στις τρεις περιπτώσεις ο γεωθερμικός ταμιευτήρας εκτιμάται ότι βρίσκεται σε βάθη μεταξύ 800 και 1000m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων που συλλέχθηκαν τον Οκτώβριο του 2014, εφαρμόστηκαν τα γεωθερμόμετρα του πυριτίου (SiO₂), του Na/K και του Na/K/Ca.

Αρχικά, για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας με το γεωθερμόμετρο του SiO₂, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση :

$$T (^{\circ}C) = \frac{1309}{5,19 - \log SiO_2} - 273, 15 \text{ με } T < 250^{\circ}C \text{ (Fournier, 1977)} \quad (1)$$

από την οποία προέκυψαν οι θερμοκρασίες ταμιευτήρα για κάθε γεώτρηση που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Έπειτα για την εφαρμογή του γεωθερμομέτρου Na/K χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$T (^{\circ}C) = \frac{1217}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 1,483} - 273, 15 \text{ με } T > 120^{\circ}C \text{ (Fournier, 1979)} \quad (2)$$

από την οποία προέκυψαν οι θερμοκρασίες ταμιευτήρα που επίσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Τέλος, η εκτίμηση της θερμοκρασίας με βάση το γεωθερμόμετρο Na/K/Ca προκύπτει από την εξίσωση:

$$T (^{\circ}C) = \frac{1647}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + \beta \left[\log\left(\frac{\sqrt{Ca}}{Na}\right) + 2,06 \right] + 2,47} - 273, 15 \text{ (Fournier \& Truesdell, 1979)} \quad (3) \text{ με}$$

τους εξής περιορισμούς $\beta=4/3$ για $\frac{\sqrt{Ca}}{Na} > 1$ και $T < 100^{\circ}C$

Ή $\beta=1/3$ για $\frac{\sqrt{Ca}}{Na} < 1$ και $T > 100^{\circ}C$

Στον υπολογισμό αυτού του γεωθερμομέτρου, ο περιορισμός που λήφθηκε υπόψη είναι ο $\beta=4/3$ και λαμβάνοντας αυτή την τιμή λύθηκε η εξίσωση δίνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Εκτιμώμενες θερμοκρασίες ταμιευτήρα με βάση τα γεωθερμόμετρα SiO₂, Na/K, Na/K/Ca

	Mg ₈	F ₁₀	B ₆	K ₁₂	M ₁₃	Bth ₈	E ₁₉	Eg ₂
SiO ₂	119,9	103,6	97,9	103,6	108,8	105,4	91,6	90,5
Na/K	153,2	160,6	144,4	163,9	199,8	153,8	158,4	161,3
Na/K/Ca	153,4	147,8	133,7	141,3	153,4	141,5	138,7	142,9

Η ερμηνεία και ο έλεγχος αξιοπιστίας των παραπάνω γεωθερμομέτρων βασίζεται προφανώς και στη συνεκτίμηση πολλών άλλων γεωχημικών και γεωλογικών δεδομένων από την εκάστοτε περιοχή έρευνας. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του γεωθερμόμετρου του SiO₂ επηρεάζονται από τις ακραίες τιμές του pH. Στα δείγματα που συλλέχθηκαν από τη Σαντορίνη τον Οκτώβριο του 2014 οι τιμές του pH κυμαίνονται από 7,5 έως 8,1, και δεν θεωρείται ότι επηρεάζουν την συγκέντρωση του SiO₂ και κατ' επέκταση τις εκτιμώμενες θερμοκρασίες.

Επίσης, οι θερμοκρασίες που υπολογίζονται από το γεωθερμόμετρο του Na/K/Ca μπορεί να εμπεριέχουν σοβαρό λάθος, αν οι συγκεντρώσεις του CO₂ ή του Mg είναι υψηλές ή έχουν προστεθεί κάποια από αυτά τα στοιχεία στο ρευστό καθώς αυτό ανεβαίνει στην επιφάνεια, μέσω της αλληλεπίδρασης του ρευστού με τα πετρώματα που βρίσκονται στα τοιχώματα ή με τα ορυκτά που παρουσιάζουν εύκολη ιοντο-ανταλλαγή (Fytikas & Andritsos, 2004). Για τα νερά που είναι πλούσια σε Mg υπάρχει τρόπος να γίνει διόρθωση του γεωθερμομέτρου με μια διαδικασία που πρότειναν οι Fournier & Potter (1979).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, για την πιο αξιόπιστη εκτίμηση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα λήφθηκαν κυρίως υπόψη τα γεωθερμόμετρα του SiO₂ και του Na/K/Ca. Οι θερμοκρασίες που προέκυψαν από το γεωθερμόμετρο του Na/K/Ca (>130-150°C) μπορούν να θεωρηθούν πολύ πιθανές για το κεντρικό και κυρίως το νότιο τμήμα του νησιού. Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας μέσης ενθαλπίας εντοπίζεται στο προηφαιστεικό γεωλογικό υπόβαθρο, σε βάθη 700-1000m, κατά πάσα πιθανότητα μέσα στους κρυσταλλικούς καρστικοποιημένους ή/και τεκτονισμένους ασβεστόλιθους.

Οι γεωφυσικές έρευνες που έγιναν στη νότια Σαντορίνη δείχνουν ακριβώς την ύπαρξη σχηματισμών με πολύ χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις (1,5 Ohm·m) στην περιοχή της Αγίας Άννας, σε βάθη περίπου 700m (Fytikas et al., 1989). Τέτοιες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης υποδεικνύουν σχηματισμούς με υψηλή αλατότητα και πολύ υψηλή θερμοκρασία (ίσως και 150°C), κάτι που συνηγορεί στα ευρήματα από την εφαρμογή των γεωθερμομέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η Σαντορίνη (ή Θήρα) ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων και αποτελεί το νοτιότερο άκρο του Ενεργού Ηφαιστειακού Τόξου του Νοτίου Αιγαίου.

Οι γεωλογικές, τεκτονικές και μαγματικές συνθήκες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή (πρόσφατη ηφαιστειότητα, ενεργά ρήγματα, ύπαρξη μαγματικών θαλάμων σε μικρά σχετικά βάθη κλπ), ευνοούν την ανάπτυξη σημαντικών γεωθερμικών ταμιευτήρων, η ύπαρξη των οποίων επιβεβαιώθηκε στο νότιο τμήμα του νησιού μετά από συστηματική έρευνα που διεξήγαγε το ΙΓΜΕ τη δεκαετία του 1980.

Συγκεκριμένα, μετά τη διάνοιξη εννέα (9) ερευνητικών και τριών (3) παραγωγικών γεωτρήσεων στο νότιο τμήμα της Σαντορίνης εντοπίστηκαν γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας, με θερμοκρασίες 30-65°C σε σχετικά μικρά βάθη (50-300m) και οριοθετήθηκε το πιθανό γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας έκτασης 25Km², στην περιοχή μεταξύ των οικισμών Μεγαλοχώρι, Περίσσα, Βλυχάδα και Ακρωτήρι. Τα γεωφυσικά, γεωλογικά και γεωχημικά δεδομένα (γεωθερμόμετρα) συνηγορούν στην ύπαρξη ταμιευτήρων μέσης ενθαλπίας (T=100-140°C) σε μεγαλύτερα βάθη μέσα στο προ-ηφαιστειακό υπόβαθρο (καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι/τεκτονισμένοι σχιστόλιθοι) σε βάθη, που σύμφωνα και με τη γεωθερμική βαθμίδα στη νότια Σαντορίνη, θα πρέπει να ξεπερνούν τα 800m.

Η πρόσφατη γεωθερμική έρευνα διεξήχθη στην Σαντορίνη, από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο του 2014, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Αξιολόγηση των γεωθερμικών πόρων και των τρόπων αξιοποίησής τους στη Σαντορίνη». Κατά τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου, έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συνολικά 149 γεωτρήσεις και πηγάδια σε όλο το νησί. Η πλειονότητα των μετρήσεων έγινε στην κεφαλή των γεωτρήσεων, που σχεδόν όλες συνάντησαν τον ρηχότερο υδροφόρο ακριβώς ή κοντά στο επίπεδο της θάλασσας. Σε έξι (6) από τις καταγεγραμμένες γεωτρήσεις, δεν κατέστη δυνατή η μέτρηση της θερμοκρασίας και τα αναγραφόμενα δεδομένα προήλθαν από μαρτυρίες των ιδιοκτητών ή από βιβλιογραφικά δεδομένα. Μέτρηση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος πραγματοποιήθηκε σε έξι (6) μόνο γεωτρήσεις σε διάφορα σημεία της περιοχής έρευνας, διότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι γεωτρήσεις βρισκόταν εν λειτουργία την περίοδο των μετρήσεων ή δεν ήταν διαθέσιμες από τους ιδιοκτήτες. Λόγω του μικρού βάθους των γεωτρήσεων, το εύρος των καμπυλών θερμοκρασίας-βάθους που προέκυψαν είναι περιορισμένο. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι όλες οι γεωτρήσεις που μετρήθηκαν συνάντησαν τον υδροφόρο ορίζοντα και επηρεάζονται από την υπόγεια κυκλοφορία του νερού. Επιτόπιες μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν στην κεφαλή 114 γεωτρήσεων, ενώ δείγματα νερού συλλέχθηκαν από 8 γεωτρήσεις, τα οποία αναλύθηκαν στη συνέχεια για τη μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων, των κυρίων ιόντων, των βαρέων μετάλλων και ιχνοστοιχείων.

Τα αποτελέσματα της επιτόπιας και εργαστηριακής έρευνας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Οι υψηλότερες θερμοκρασίες επικρατούν, όπως ήταν αναμενόμενο, εντός του γεωθερμικού πεδίου. Στην περιοχή του Μεγαλοχωρίου κυμαίνονται από 45 έως 65°C, σε γεωτρήσεις με βάθη από 80 έως 240m. Κοντά στο Εμπορείο ξεπερνούν τους 27°C, σε πολύ ρηχές γεωτρήσεις (25-60m), ενώ στη Βλυχάδα κυμαίνονται από 27 έως 32°C, επίσης σε μικρού βάθους γεωτρήσεις (έως 35m).

- Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μετρήθηκαν στο βόρειο τμήμα της Σαντορίνης, στην ευρύτερη περιοχή της Οίας, οι οποίες ανέρχονται στους 22°C σε γεωτρήσεις με βάθη 25-40m, εκτός μίας βαθύτερης (182m) δημοτικής γεώτρησης που χρησιμοποιείται για αφαλάτωση και η θερμοκρασία της ξεπερνά τους 24°C.
- Στο κεντρικό τμήμα του νησιού, στην περιοχή νότια του Βουρβούλου και μέχρι τα βόρεια περιθώρια του γεωθερμικού πεδίου αποκαλύπτεται μία ευρεία ζώνη θερμικής ανωμαλίας με θερμοκρασίες που στην περιοχή Φηρών-Μεσαριάς ξεπερνούν τους 27°C στην κεφαλή των γεωτρήσεων και αυξάνονται μεταβαίνοντας νοτιότερα.
- Σε όλο το νησί υπάρχουν πολύ ρηχοί υδροφόροι με θερμοκρασίες μέχρι 25°C, ενδεικτικές αβαθούς γεωθερμίας.
- Οι γεωθερμικές βαθμίδες που υπολογίστηκαν από την κατά βάθος μέτρηση της θερμοκρασίας σε έξι (6) γεωτρήσεις κυμαίνονται από 4.8 έως 40°C/100m. Παρόλα αυτά, οι βαθμίδες αυτές δεν θεωρούνται απολύτως αξιόπιστες λόγω του μικρού βάθους των γεωτρήσεων και της εισροής νερού στον πυθμένα τους, γεγονός που επηρεάζει την κατανομή των θερμοκρασιών στο εσωτερικό τους. Στην περιοχή του γεωθερμικού πεδίου, οι υπολογιζόμενες βαθμίδες σχεδόν ταυτίζονται με αυτές που είχαν υπολογιστεί από τις ερευνητικές γεωτρήσεις του ΙΓΜΕ.
- Από τα εφαρμοζόμενα γεωθερμόμετρα SiO₂, Na/K και Na/K/Ca, προέκυψαν θερμοκρασίες ταμιευτήρα 130-150°C. Οι θερμοκρασίες αυτές, με βάση τα γεωφυσικά και γεωλογικά στοιχεία αλλά και τη γεωθερμική βαθμίδα στη νότια Σαντορίνη, είναι πολύ πιθανόν να εντοπιστούν σε βάθη 700-1000m.
- Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που μετρήθηκαν επιτόπου στην κεφαλή των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 900 έως 6700μS/cm, εκτός από τρεις γεωτρήσεις στις περιοχές Περίσσας, Μονόλιθου και Εμπορείου που η τιμή τους ξεπερνά τα 10000μS/cm, και τις δημοτικές γεωτρήσεις των μονάδων αφαλάτωσης, στις οποίες η ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν πάνω από 20000μS/cm.
- Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων από οκτώ (8) γεωτρήσεις δείχνουν ότι όλα τα δείγματα είναι εμπλουτισμένα σε ιόντα Cl και Na, ενώ σύμφωνα με την κατάταξη Piper ανήκουν στην κατηγορία των Cl-SO₄ νερών. Δεν ανιχνεύθηκαν τοξικά στοιχεία όπως Pb, Cu, Cr, Sb, Zn και Cd, όμως αυξημένες συγκεντρώσεις As (πάνω από το όριο ποσιμότητας) βρέθηκαν σε 5 από τα 8 δείγματα. Η εφαρμογή ιοντικών λόγων, δείχνει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα νερά προέρχονται από ανάμιξη επιφανειακού και θαλασσινού νερού.

Το δύο βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν (i) στην ύπαρξη μιας εκτεταμένης ζώνης θερμικής ανωμαλίας χαμηλής ενθαλπίας βόρεια της περιοχής του γεωθερμικού πεδίου, στο κεντρικό τμήμα του νησιού, (ii) στην παρουσία πολύ ρηχών και καλής απόδοσης υδροφόρων με θερμοκρασίες από 20 έως 25°C σε όλο το νησί.

Δεδομένων των ενεργειακών αναγκών της Σαντορίνης, οι οποίες πολλαπλασιάζονται κατά την εκτεταμένη τουριστική περίοδο, καθώς και της προσπάθειας του Δήμου Θήρας για χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε δημόσιους, αλλά και ιδιωτικούς, χώρους, η αξιοποίηση του υπάρχοντος γεωθερμικού δυναμικού αποτελεί μια πολύ ελκυστική προοπτική.

Η εκμετάλλευση των ρηχών υδροφόρων με τη βοήθεια γεωθερμικών αντλιών θερμότητας μπορεί να γίνει άμεσα με χρήση των υπαρχουσών γεωτρήσεων για τον κλιματισμό κτιρίων (σχολείων, κέντρων υγείας, δημοτικών κτιρίων κλπ), τη θέρμανση πισίνων κλπ, ακόμη και στην οινοποίηση.

Η περιοχή νότια του Βουρβούλου και μέχρι τα βόρεια περιθώρια του γεωθερμικού πεδίου χρειάζεται περαιτέρω συστηματική διερεύνηση για τον εντοπισμό της έκτασης της γεωθερμικής ανωμαλίας και του βάθους/θερμοκρασίας των θερμών ρευστών. Οι έρευνες αυτές θα πρέπει σίγουρα να περιλαμβάνουν κατάλληλες γεωφυσικές διασκοπήσεις καθώς και μικρής διαμέτρου γεωθερμικές γεωτρήσεις για τον ακριβή υπολογισμό της γεωθερμικής βαθμίδας.

Στην περίπτωση που εντοπιστούν ρευστά θερμοκρασίας έως 90°C, η αξιοποίησή τους θα μπορούσε να αφορά σε εφαρμογές που συνάδουν με τις κύριες οικονομικές δραστηριότητες στο νησί, δηλ. με τον τουριστικό και αγροτικό τομέα. Ενδεικτικά αναφέρονται η χρήση της γεωθερμίας για λουτροθεραπεία, πρωίμιση και ξήρανση αγροτικών προϊόντων, σε θερμοκήπια κλπ.

Προτεραιότητα, τόσο στην έρευνα όσο και στην αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας θα πρέπει να δοθεί στην ευρύτερη περιοχή των Φηρών, που αποτελούν το διοικητικό αλλά και τουριστικό κέντρο του νησιού, αλλά και στην περιοχή του Μονόλιθου όπου υπάρχει το στρατιωτικό και πολιτικό αεροδρόμιο της Σαντορίνης, το οποίο μάλιστα προβλέπεται άμεσα να επεκταθεί.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αποστολάκη Μ. (2007), <<Δίκτυο Αειφόρων Νήσων Δάφνη, Σαντορίνη>>.Ερευνητικό έργο:Αειφόρος ανάπτυξη στο νησί Σαντορίνη (Θήρα),Αθήνα.
- Βουγιουκαλάκης Γ. (2005), «Στα γαλάζια ηφαίστεια». Σαντορίνη. Δημοτική Επιχείρηση Πολιτιστικής και Τουριστικής Ανάπτυξης Δήμου Θήρας. Ινστιτούτο Μελέτης και Παρακολούθησης Ηφαιστείου Σαντορίνης.
- Βουδούρης Κ. (2009), Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα.
- Γιούργα Χ. (1991), διδακτορική διατριβή, ‘‘Η αλλαγή του παραδοσιακού προτύπου διαχείρισης της γης στο αρχιπέλαγος του Αιγαίου: Επιπτώσεις στα νησιωτικά οικοσυστήματα, Μυτιλήνη.
- Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών, Τομέας Υδατικών πόρων και περιβάλλοντος, Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων. (2007), Τα γεωθερμικά πεδία της χώρας, Αθήνα.
- Καλλέργης Γ. (2001), Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Δεύτερη Έκδοση, Τόμος Γ΄, Αθήνα.
- Μπεζές Κάρολος. (2003), Υδρογεωλογική – Υδρολογική μελέτη, Νήσος Σαντορίνη, Υδρολογικό τμήμα, Αθήνα.
- Ρόκκου Λίνα., (2003), <<Ένας πλήρης ταξιδιωτικός οδηγός – Σαντορίνη>>,Explorer.
- Σιγάλας Ι. (2012), <<Ποιότητα νερού από τις μονάδες αφαλάτωσης στη Σαντορίνη>>.ΤεχνολογικόΕκπαιδευτικόΊδρυμαΗρακλείου. Ηράκλειο.
- Σολδάτος Τ. (2011), <<Ηφαιστειολογικός Οδηγός- Σαντορίνη>>. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Σούλιος Γ. (2004), Γενική Υδρογεωλογία – Τόμος Γ΄ Αποθέματα και διάχειριση του υπόγειου νερού, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη.
- Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν. (2004) , Γεωθερμία, Εκδόσεις Τζιόλα.

ΑΓΓΛΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Blake, M.C., Bonneau, M., Geussant, J., Kienast, J.R., Lepvier, C., Maluski, H., Papanikolaou, D., 1981, A geologic reconnaissance of the Cycladic blueschists belt, Greece, Geological Society of America Bulletin, 92, 247-254.
- Bond, A., Sparks, R. S. J., 1976, The Minoan eruption of Santorini, Greece, Geological Society of London Journal, 132, 1-16.
- Budetta, G., Condarelli, D., Fytikas, M., Kolios, N., Pascare, G., Rapolla, A. and Pinna, E., 1984, Geophysical Prospecting on the Santorini Islands. *Bull. Volcanol*, Vol. 47, pp. 447-466.
- Chiodini, G., Cioni, R., Di Paola, G.M., Dotsika, E., Fytikas, M., Guidi, M., Leonis, C., Lyberopoulou, V., Magro, G., Marini, L., Meletlidis, S., Michelot, J.L., Poutoukis, D., Raco, B., Russo, M. and Virgili, G., 1998. Geochemistry of Santorini fluids. In Casale R., Fytikas M., Sigvaldasson, G. and Vougioukalakis, G.E., (Eds) "The European Laboratory Volcanoes", Proceedings of the 2d Workshop, Santorini, Greece – 2 to 4 May 1996. EUR 18161 EN, European Commission, Luxembourg, pp. 193-232.
- Dotsika, E., Poutoukis, D., Michelot, J.L., Raco, B., 2009, Natural tracers for identifying the origin of the thermal fluids emerging along the Aegean volcanic arc (Greece): Evidence of arc-type magmatic water (ATMW) participation, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 179, 19-32.
- Dumas, Ch., 1983. Thira: Pompeii of the ancient Aegean, London 1983. Thames and Hudson.
- Druitt, T.H., Edwards, L., Mellors, R.M., Pyle, D.M., Sparks, R.S.J., Lanphere, M., Davies, M. and Barreirio, B., 1999. Santorini Volcano. *Geol. Soc. Mem.*, 19:165.
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H. 1973: An empirical Na-K-Cageothermometer for natural waters, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, 1225-1275.
- Fournier, R.O. 1979: A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geothermal Resources Council Transactions*, 3, 221-224.
- Francalanci L., Vougioukalakis, G.E., Perini G., Manetti, P., 2005, A West-East Traverse along the magmatism of the south Aegean volcanic arc in the light of volcanological, chemical and isotope data, in: M. Fytikas, G.E. Vougioukalakis (eds), *The South Aegean Active Volcanic Arc, Present Knowledge and Future Perspectives*, Developments in Volcanology, Elsevier, Amsterdam.
- Fytikas, M., 1980, Geothermal exploration in Greece, in Strub, a & Ungemach P. (eds), *Proceedings of the 2nd International Seminar on Results of EC Geothermal Research*, Strasbourg, 4-6 March, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 213-237.
- Fytikas, M., Karydakis, G., Kavouridis, Th., Kolios, N., Vougioukalakis, G., 1990a, Geothermal research on Santorini, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos, V.P., Fleming N.C., Druitt, T.H. (eds), *Thera and the Aegean World III*, The Thera Foundation, London, 2, 241-249.
- Fytikas, M., Kolios, N., Vougioukalakis, G.E., 1990b, Post-Minoan volcanic activity of the Santorini Volcano. *Volcanic Hazard and Risk. Forecasting possibilities*, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos, V.P., Fleming N.C., Druitt, T.H. (eds), *Thera and the Aegean World III*, The Thera Foundation, London, 2, 183-198.

- Fytikas, M. and Vougioukalakis, G., 1995. Volcanic hazard in the Aegean Islands. In: T. Horlick-Jones, A. Amendola and R. Casale, Natural Risk and Civil Protection. E & FN Spon, Brussels, pp. 117-130.
- Heiken, G., McCoy, F., 1990, Precursory activity to the Minoan eruption, Thera, Greece, in: Hardy DA, Keller J., Galanopoulos, VP, Fleming NC, Druitt, TH (eds), Thera and the Aegean World III, The Thera Foundation, London, 2, 79-88.
- Karingithi Cyrus W., 2009, Chemical Geothermometers for Geothermal Exploration. In: Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, November 1-22.
- Kavouridis, Th., Karydakis, G., Kolios, N., Kouri, D., Fytikas, M., 1982: Geothermal investigation in Santorini Island. *Internal Report IGME*, Athens.
- Kiratzi, A. A. and Papazachos, C. B., 1995. Active seismic deformation in the southern Aegean Benioff zone. *Journal of Geodynamics*, 19, pp. 65-78.
- Maley, T.S. and Johnson, G.L., 1971. Morphology and Structure of the Aegean Sea. *Deep-Sea Res.*, 18.
- McKenzie, D., 1972, Active tectonics of the Mediterranean region, *Geoph. J. R. Astr. Soc.*, 30.
- M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon., 2007, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*.
- Mendrinos, D., Chorapanitis, I., Polyzou, O., Karytsas, C., 2010, Exploring for geothermal resources in Greece, *Geothermics*, 39, 124-137.
- Mountrakis D, Pavlides S., Chatzipetros A, Meletlidis S, Tranos M, Viougioukalakis G and Kilias A, 1998. Active deformation of Santorini. In: *European Laboratory Volcanoes, Proceedings of the 2nd workshop on European Laboratory Volcanoes*, eds: R. Casale, M. Fytikas, G. Sigvaldsson and G. Vougioukalakis, European Commission, Sci. Res. Development, p. 13-22.
- Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D. & Alexandri M., Bejelou K., 2012: Submarine Volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece. *Glob. Planet. Change*, doi:10.1016/j.gloplacha.2012.01.001.
- Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D. & Rousakis G., 2012b. Submarine volcanoes along the Aegean Volcanic Arc. Special Issue of *Tectonophysics*: "The Aegean: a natural laboratory for tectonics" 2011 (accepted).
- Papachristou M, Voudouris K, Karakatsanis S, Walter D'Alessandro, Konstantinos Kyriakopoulos, 2013: Geological setting, geothermal conditions and hydrochemistry of south and southeastern Aegean geothermal systems, Thessaloniki.
- Papachristou M., Nikolaidou E., Fytikas M., Andritsos N., Kolios N., 2014: Evaluation of Geothermal Resources and their Utilization in Santorini Island.
- Papageorgiou E, Tzanis A, Sotiropoulos P, and Lagios E., 2010: DGPS and magnetotelluric constraints on the contemporary tectonics of the Santorini volcanic complex, Greece. *Proceedings of the 12th International Congress Patras*.

- Papanikolaou D., Lekkas E., Sakellariou D. & Nomikou P., 1998: 2. The geotectonic position of Nisyros within the Hellenic Arc: The Nisyros Volcano (Progress report of research project): Newsletter of the European Centre on Prevention and Forecasting of Earthquakes.
- Papastamatiou, J. 1958. Sur l'âge des calcaires cristallines del' ile de Thera (Santorin). Bull. Geol. Soc. Greece, 3: 104-113.
- Papazachos, B.C., Comninakis, P.E., 1971, Geophysical and tectonic features of the Aegean arc, Journal of Geophysical Research, 76, 8517-8533.
- Papazachos B.C. and Panagiotopoulos D.G., 1993: Normal faults associated with volcanic activity and deep rupture zones in the southern Aegean volcanic arc, Tectonophysics, 220: 301-308.
- Papazachos B.C., Dimitriadis S.T., Panagiotopoulos D.G., Papazachos C.B. and Papadimitriou E.E., 2005: Deep structure and active tectonics of the southern Aegean volcanic arc. Int. Conf. of The South Aegean Active Volcanic Arc: Present Knowledge and Future Perspectives (SAAVA 2003), 17-20 Sept., Milos, Greece, (ed), Elsevier Book Series: Development in Volcanology, 7:47-64.
- Panagiotopoulos D.G., Papazachos C., Vougioukalakis G., Stiros S.C., Laopoulos Th., Fytikas M., Karagianni E., Vamvakaris D., Moschas F., Saltogianni V., Albanakis K., (2015). Santorini Volcano: The intra-caldera unrest of the period of 2011 - 2012, as revealed by seismicity, temperature, sea-level, geochemical and GPS data. Greece.
- Perissoratis, C., 1990. Marine geological research on Santorini: preliminary results. In: D.A. Hardy (Editor), Thera and the Aegean World, III. The Thera Foundation, London, pp. 300-304.
- Perissoratis, C., 1995: The Santorini volcanic complex and its relation to the stratigraphy and structure of the Aegean arc, Greece, Marine Geology, 128, 37-58.
- Piper, A.M., 1944: A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis, Eos Transactions American Geophysical Union, 25(6).
- Sigurdsson, H., Carey, S., Alexandri, M., Vougioukalakis, G., Croff, K., Roman, C., Sakellariou, D., Anagnostou, C., Rousakis, G., Ioakim, C., Gogou, A., Ballas, D., Misaridis, T., and P., Nomikou, 2006: Marine Investigations of Greece's Santorini Volcanic Field. EOS, Vol. 87, No. 34, 22 August 2006, pp. 337-348.
- Skarpelis, N., Liati, A., 1990, The prevolcanic basement of Thera at Athinios: Metamorphism, Plutonism and Mineralization, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos, V.P., Fleming N.C., Druitt, T.H. (eds), Thera and the Aegean World III, The Thera Foundation, London, 2, 172-182.
- Sparks, R.S.J. and Wilson, C.J.N., 1990: The Minoan Deposits: a Review of their Characteristics and Interpretation. In: D.A. Hardy (Editor), Thera and the Aegean World. III, 11: 89-99.
- Tataris, A., 1964: The iron and manganese in the sands of Thera coasts, Bulletin of Greek Geological Society, 6(1), 65-83.
- Vougioukalakis, G.E., 1994: Volcanic hazard estimation of Santorini, Aegean Sea, Greece. In F. Barberi, R. Casale, and R. Fantechi (Eds) "The Mitigation of Volcanic Hazards", Proceedings of the course, EUR 16804 EN, 1996, 471-484.
- Vougioukalakis, G., Mitropoulos, D., Perissoratis, C., Andrinopoulos, A. and

- Fytikas, M., 1994: The submarine volcanic centre of Kolombo, Santorini (Hellas). VII Cong.Geol. Sot. Greece, Abstr., pp. 1044105.
- Vougioukalakis, G., Francalanci, L., Sbrana, A. and Mitropoulos, D. 1995: The 1649-1650 Kolumbo submarine volcano activity, Santorini, Greece. In: Barberi, F., Casale, R. and Fratta, M., (eds): "The European Laboratory Volcanoes, Workshop Proceeding", European Commission, European Science Fondation, Luxembourg, p. 189-192.
 - Vougioukalakis, G.E., Fytikas, M., 2005: Volcanic hazards in the Aegean area, relative risk, evaluation, monitoring and present state of the active volcanic centers in M. Fytikas, G.E. Vougioukalakis (eds), The South Aegean Active Volcanic Arc, Present Knowledge and Future Perspectives, Developments in Volcanology, Elsevier, Amsterdam, 161-163.
 - Vougioukalakis, G.E., 2007: Santorini Guide to Volcano, Institute for the Study and Monitoring of the Santorini Volcano.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Τριαντάφυλλος Σολδάτος: Ηφαιστειολογία, Ηφαιστειότητα και δημιουργία της Σαντορίνης (www.geo.auth.gr) Πηγή: Santorini Guidebook 2011 (Ένα ανοιχτό ηφαιστειακό βιβλίο).

ISMOSAV (2008): web site of the Institute for the Study and Monitoring of the Santorini Volcano (<http://ismosav.santorini.net>).

UNESCO's International Hydrological Programme 1975: (www.en.unesco.org).

www.oasp.gr

www.en.wikipedia.gr

www.statistics.gr

www.worldofmaps.net