



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -  
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΜΕΤΑΛΛΕΙΔΗΣ

ΑΠΟΘΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΕΝΕΡΓΑ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ  
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2019





ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΜΕΤΑΛΛΕΙΔΗΣ

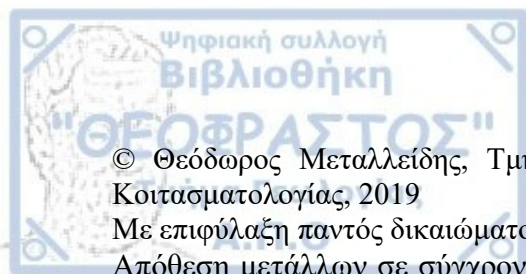
Απόθεση μετάλλων σε σύγχρονα ενεργά υδροθερμικά συστήματα του Νοτίου Αιγαίου στην Ελλάδα

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας  
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

**Επιβλέπων Καθηγητής**

Μέλφος Βασίλειος

© Θεόδωρος Μεταλλεΐδης, 2019  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Θεόδωρος Μεταλλείδης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απόθεση μετάλλων σε σύγχρονα ενεργά υδροθερμικά συστήματα του Νοτίου Αιγαίου στην Ελλάδα – *Διπλωματική Εργασία*

© Theodore Metalleidis, School of Geology, Dept. of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, 2019

All rights reserved.

Metal deposition in contemporary active hydrothermal systems of South Aegean in Greece–*Bachelor Thesis*

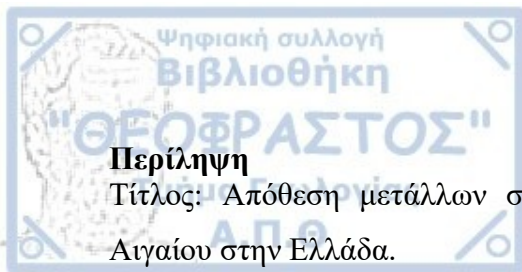
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



## Πίνακας περιεχομένων

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Περίληψη .....                                                                  | 1  |
| Πρόλογος – Αντικείμενο της Εργασίας .....                                       | 3  |
| 1. Εισαγωγή-Σημασία των μετάλλων στα υδροθερμικά συστήματα .....                | 4  |
| 2. Γενική γεωλογία της περιοχής του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου ..... | 6  |
| 3. Ενεργά υδροθερμικά συστήματα και απόθεση μετάλλων .....                      | 10 |
| 3.1 Μέθανα-Σουσάκι-Πελοπόννησος .....                                           | 10 |
| 3.1.1 Η γεωλογία του συγκροτήματος .....                                        | 11 |
| 3.1.2 Υδροθερμική δραστηριότητα .....                                           | 13 |
| 3.2 Μήλος .....                                                                 | 15 |
| 3.2.1 Γεωλογία της Μήλου .....                                                  | 15 |
| 3.2.2 Τεκτονική .....                                                           | 18 |
| 3.2.3 Υδροθερμική δραστηριότητα .....                                           | 18 |
| 3.3 Σαντορίνη-Κολούμπο .....                                                    | 22 |
| 3.3.1 Γεωλογία .....                                                            | 22 |
| 3.3.2 Υδροθερμική Δραστηριότητα .....                                           | 25 |
| 3.4 Νίσυρος .....                                                               | 28 |
| 3.4.1 Γεωλογία .....                                                            | 28 |
| 3.4.2 Υδροθερμική δραστηριότητα .....                                           | 29 |
| 4. Σύγκριση με αντίστοιχα συστήματα σε άλλες περιοχές του κόσμου .....          | 33 |
| 5. Συμπεράσματα και συζήτηση .....                                              | 36 |
| 6. Βιβλιογραφία .....                                                           | 38 |



### Περίληψη

Τίτλος: Απόθεση μετάλλων σε σύγχρονα ενεργά υδροθερμικά συστήματα του Νοτίου Αιγαίου στην Ελλάδα.

Όνομα: Θεόδωρος Μεταλλείδης.

Το Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο είναι μια γεωλογική δομή που οφείλει το σχηματισμό της στη σύγκρουση της Ευρασιατικής με την Αφρικανική τεκτονική πλάκα. Εμφανίζεται περίπου 120km βόρεια του σημείου υποβύθισης και το σχήμα του είναι τοξοειδές, με το κοίλο μέρος προς το Βορρά. Αποτελείται από τα ηφαιστειακά κέντρα των Μεθάνων, της Μήλου, της Σαντορίνης, του Κολούμπο, της Νισύρου και της Κω. Στα κέντρα αυτά, έχει παρατηρηθεί, η εκδήλωση υδροθερμικών φαινομένων στο παρελθόν, αλλά και η παρουσία σύγχρονης υδροθερμικής δραστηριότητας. Παράλληλα, έχει βρεθεί πως τα υδροθερμικά ρευστά που εκλύονται στα παραπάνω συστήματα είναι εμπλουτισμένα σε μεταλλικά στοιχεία, με συνηθέστερα τα Zn, Pb, As και άλλα, και ο σχηματισμός σε πολλές περιπτώσεις σουλφιδικών μεταλλικών κοιτασμάτων, όπως στο Κολούμπο. Η υδροθερμική δραστηριότητα και η σύσταση των ρευστών της, ελέγχεται από το γεωλογικό και τεκτονικό καθεστώς της εκάστοτε περιοχής, ακολουθώντας όμως τον γεωτεκτονικό χαρακτήρα που διέπει το τόξο στο σύνολό του. Σύγχρονα ενεργά ρήγματα κατεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ εμφανίζονται σε όλα τα ηφαιστειακά κέντρα του ηφαιστειακού τόξου και αποτελούν τις κύριες διόδους ανόδου των ρευστών. Πρόκειται για το αποτέλεσμα της εκτατικής τεκτονικής, με κατεύθυνση ΒΔ-ΝΑ που έλαβε χώρα στον Αιγαίο χώρο και παραμένει ενεργή έως σήμερα. Τα ρευστά φαίνεται να προέρχονται τόσο από μετεωρικό αλλά και θαλάσσιο νερό που κατεισδύει βαθύτερα μέσω ρωγμών, όσο και από τους μαγματικούς θαλάμους, όπως έχουν δείξει χημικές αναλύσεις. Κύρια χαρακτηριστικά των υδροθερμικών συστημάτων στο Νότιο Αιγαίο είναι οι υψηλές θερμοκρασίες ρευστών ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$  σε ορισμένες περιπτώσεις), το όξινο pH (μεταξύ 4 και 8, συνήθως όμως όξινο), η μεγάλη συμμετοχή του As και η εμφάνιση δραστηριότητας ρηχού υποθαλάσσιου τύπου. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν μοναδικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με αντίστοιχα συστήματα σε άλλες περιοχές του κόσμου, όπως στην Ιαπωνία και τη Νέα Ζηλανδία και χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης.



# **Abstract**

Title: Metal deposition in active hydrothermal systems of South Aegean in Greece.

By: Theodore Metalleidis.

The Hellenic volcanic arc is a geological feature that formed as the result of the collision of the Eurasian tectonic plate with the African plate. It appears at about 120km North of the subduction zone and its shape resembles a bow-like structure pointing to the South. The arc include the volcanic centers of Methana, Milos island, Santorini island, Kolumbo, Nisiros island and Kos island. At these centers, past and recent hydrothermal activity has been observed. The hydrothermal fluids of all these active systems in Aegean are enriched in metallic elements, most commonly Zn, Pb, As etc, and sometimes they form sulfide deposits like in Kolumbo. The hydrothermal activity and the composition of the fluids are controlled by the geological setting and the tectonics of each region, which are closely related with the the geotectonics that rule the evolution of the volcanic arc. Recent active faults, with a NE-SW direction occur at all these active centers of the volcanic arc, and are the main diodes for the fluid flow. These faults are the result of a still active extensional tectonic event that takes place in the Aegean region, with a NW-SE direction. The hydrothermal fluids are mainly derived from meteoric and sea water, which circulate deep into the crust along the faults. Part of the fluids has also a magmatic origin. The main features of the hydrothermal systems of South Aegean are the high fluid temperature ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$  in some cases), the acidic pH (although measurements have shown pH between 4 and 8), the extreme As concentration and the shallow submarine hydrothermal activity. These systems display some unique features compared to other systems of the same type in different parts of the world, like in Japan and New Zealand, and should be further studied.

## Πρόλογος – Αντικείμενο της Εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η συγκέντρωση και η ένταξη δεδομένων που αφορούν την υδροθερμική δραστηριότητα κατά μήκος του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου και την απόθεση μεταλλικών στοιχείων στα συστήματα αυτά, σε ένα ενιαίο έγγραφο. Έχουν πραγματοποιηθεί από τη δεκαετία του 1970 μέχρι και το 2019 πολλές μελέτες από Έλληνες, αλλά κι επιστήμονες του εξωτερικού, με σκοπό την ανάλυση του προαναφερθέντος θέματος, αλλά για τον κάθε τόπο ξεχωριστά. Απουσιάζει δηλαδή, μία εργασία στην οποία να υπάρχουν πληροφορίες για την υδροθερμική μεταλλογένεση στο ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου στο σύνολό του. Επίσης θα πραγματοποιηθούν συγκρίσεις με αντίστοιχα συστήματα στον υπόλοιπο κόσμο, όπως την Ιαπωνία και τη Νέα Ζηλανδία, καθώς εμφανίζονται ομοιότητες και διαφορές, που μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση και την βαθύτερη αντίληψη του φαινομένου. Δεν θα μπορούσε όμως, να απουσιάζει από μια εργασία αυτού του τύπου, ταυτόχρονη απόδοση του γεωλογικού καθεστώτος της κάθε περιοχής ενδιαφέροντος, αφού ο τρόπος λειτουργίας των υδροθερμικών συστημάτων, τα προϊόντα της δράσης αυτής, αλλά και η σύσταση των ίδιων των ρευστών, συνδέονται άμεσα με το γενικότερο γεωλογικό και τεκτονικό πλαίσιο του συστήματος.

Αρχικά θα γίνει αναφορά σε ορισμένους από τους λόγους που καθιστούν την παρουσία των μετάλλων στα υδροθερμικά συστήματα σημαντική. Στη συνέχεια θα αποδοθεί σύντομα το γενικότερο γεωλογικό καθεστώς του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου, αλλά και η ιστορία του. Θα ακολουθήσει ανάλυση του κάθε συστήματος-μέλους του τόξου τόσο γεωλογικά, όσο και για την υδροθερμική δραστηριότητα που παρουσιάζουν και το μεταλλικό τους εμπλουτισμό. Αργότερα θα συγκριθούν δεδομένα του ελληνικού συστήματος, με δεδομένα από αντίστοιχα συστήματα του κόσμου και τέλος θα υπάρξει αναφορά σε κάποια από τα συμπεράσματα στα οποία οδηγήθηκε ο συγγραφέας, σε ερωτήματα που γεννώνται από τις παραπάνω αναλύσεις και θα κλείσει η εργασία αυτή με την βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη συγγραφή της.

Πρόκειται για ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα με άμεσο οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο, και απασχολεί σήμερα την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα, καθώς πραγματοποιούνται όλο και περισσότερες μελέτες και αναλύσεις των συστημάτων, με πολλά από αυτά να τίθενται υπό στενή παρακολούθηση, με τη χρήση σύγχρονων οργάνων. Η Ελλάδα έχει την τύχη να εμφανίζει τέτοιου τύπου υδροθερμική δραστηριότητα σε πολλές περιοχές, και κάποιες από αυτές εμφανίζουν εμπλουτισμό ακόμη και σε κρίσιμα μέταλλα. Για τον λόγο αυτό και για πολλούς ακόμη, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, είναι σημαντικό να

διεξαχθούν περισσότερες in-situ μελέτες και να συγγραφούν επιστημονικά άρθρα, αλλά κι εργασίες σαν τη συγκεκριμένη.

## **1. Εισαγωγή-Σημασία των μετάλλων στα υδροθερμικά συστήματα**

Κατά τη μελέτη υδροθερμικών συστημάτων που βρίσκονται σε ρηχές υποθαλάσσιες περιοχές, ανακαλύφθηκε ότι στη σύστασή τους υπάρχει πολλές φορές εμπλουτισμός σε μέταλλα, όπως ψευδάργυρος σίδηρος και άλλα. Τα μεταλλικά αυτά στοιχεία μπορεί να προέρχονται είτε από πετρώματα μέσω των οποίων κυκλοφορούν τα υδροθερμικά ρευστά, και με χημικές αντιδράσεις γίνονται μέλη των ρευστών, είτε από άλλες πηγές (βλ. Κεφάλαιο 3). Μεγάλης σημασίας είναι το γεγονός πως τα μέταλλα αυτά πολλές φορές αποτίθενται δημιουργώντας κοιτάσματα από τα οποία μπορεί ο άνθρωπος να επωφεληθεί μελλοντικά, όπως για παράδειγμα στο Κολούμπο, όπου γεννάται ένα κοίτασμα τύπου Kuroko, ή ακόμη μπορεί να αποτελούν ως ένα βαθμό κίνδυνο ρύπανσης, καθώς ουκ ολίγες φορές ο εμπλουτισμός των υδροθερμικών ρευστών περιλαμβάνει στοιχεία όπως το αρσενικό και το αντιμόνιο. Στον Ελλαδικό χώρο μόνο, έχουν βρεθεί στοιχεία σαν και τα προηγούμενα, σε πολύ μεγάλες ποσότητες, σε τουλάχιστον δύο από τα συστήματα που θα αποτελέσουν αντικείμενο της παρούσης εργασίας. Ακόμη, πολλές φορές συνδέεται με την εμφάνιση των μεταλλικών στοιχείων, ολόκληρο το οικοσύστημα της περιοχής. Μικροοργανισμοί και βακτήρια εμφανίζονται συχνά με την μορφή ολόκληρων καλυμμάτων, όπως συμβαίνει στη Μήλο και το Κολούμπο. Οι οργανισμοί αυτοί χρησιμοποιούν συστατικά των υδροθερμικών ρευστών, παραδείγματος χάριν το αρσενικό, για τις διάφορες λειτουργίες τους και μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στον έλεγχο των στοιχείων αυτών.

Στην Ελλάδα, ρηχά υποθαλάσσια υδροθερμικά συστήματα εμφανίζονται κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου, κοντά στα ηφαιστειακά κέντρα. Δηλαδή στα Μέθανα, στη Μήλο, στη Σαντορίνη, στο Κολούμπο, που αποτελεί υποθαλάσσιο ηφαίστειο κοντά στη Σαντορίνη, στην Νίσυρο και στην Κω. Σε όλα τα μέλη δηλαδή του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου εκδηλώνεται δραστηριότητα τέτοιου τύπου. Παρ' όλα αυτά, ούτε η ένταση, ούτε τα υδροθερμικά ρευστά, αλλά ούτε και ο εμπλουτισμός σε μέταλλα είναι ίδιος σε όλα τα συστήματα, κι ας ανήκουν στο ίδιο ηφαιστειακό τόξο. Αυτό συμβαίνει γιατί οι συνθήκες που επικρατούν σε κάθε σύστημα είναι διαφορετικές και διαφορετική είναι και η γεωλογία του κάθε τόπου πετρολογικά, ορυκτολογικά και ως ένα βαθμό τεκτονικά, ακόμη και προερχόμενα από το ίδιο τεκτονικό καθεστώς και έχοντας σε μεγάλο βαθμό κοινή γεωλογική εξελικτική πορεία. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς είναι πιθανό μελετώντας

τα διαφορετικά υδροθερμικά συστήματα, τους βαθμούς εμπλουτισμού σε μεταλλικά στοιχεία, τις θερμοκρασίες των ρευστών και άλλα χαρακτηριστικά, να προκύψουν συμπεράσματα που αφορούν τις συνθήκες γένεσης, πιθανότατα να αποκτηθούν πληροφορίες για το υποκείμενο μανδυακό υλικό, αλλά μπορεί ακόμη συγκρίνοντας δεδομένα και παρατηρώντας αλλαγές στα γειτονικά μεταξύ τους συστήματα, να βοηθηθεί η επιστημονική κοινότητα στην πρόβλεψη πιθανών ηφαιστειακών δραστηριοτήτων. Κατά τον συγγραφέα, η περίπτωση του Κολούμπο αποτελεί ζωντανή απόδειξη της σημαντικότητας των μετάλλων σε υδροθερμικά πεδία, καθώς δημιουργεί το ενδεχόμενο να αποκτήσει η Ελλάδα στο σχετικά άμεσο μέλλον, ένα δικό της επιθερμικό κοίτασμα Kuroko. Αυτό θα μπορούσε να είναι εκμεταλλεύσιμο και άμεσα προσβάσιμο, επειδή, παρά το γεγονός ότι βρίσκεται υπό της θαλάσσης, το βάθος δεν είναι μεγάλο και η τεχνολογία, όπως π.χ. βαθυσκάφη, είναι ήδη υπαρκτή. Μείζον παραμένει στα προαναφερθέντα συστήματα, το ζήτημα της επικινδυνότητας στον τομέα της ρύπανσης του περιβάλλοντος, ιδίως του άμεσα γειτονικού στα κέντρα εμφάνισης της δραστηριότητας. Τα φαινόμενα αυτά γεννιούνται από δυνάμεις που δεν ελέγχονται από τον άνθρωπο και δεν είναι δυνατό να επέμβει ο άνθρωπος στον τρόπο λειτουργίας ή στην ένταση εμφάνισης ενός τέτοιου φαινομένου, ωστόσο ο ίδιος ο άνθρωπος μπορεί να επηρεαστεί από αυτά. Η απελευθέρωση χημικών στοιχείων, τοξικών για την έμβια ζωή σε μεγάλο μέρος της, είναι συχνότατο επακόλουθο των διαδικασιών που διέπουν τα ενεργά υδροθερμικά συστήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η Μήλος, όπου το αρσενικό που εκλύεται από τα ρευστά, αγγίζει σε εμπλουτισμό, περίπου 3.000 φορές το τυπικό ποσοστό συμμετοχής του στοιχείου αυτού, στο θαλάσσιο νερό. Η παρακολούθηση, μέτρηση και συνεχής μελέτη τέτοιων συστημάτων είναι υποχρέωση των επιστημόνων, ειδικά όταν εμφανίζονται στοιχεία σαν το As σε τουριστικές περιοχές. Μεταβολή των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν, όπως θα ήταν ένας ισχυρός σεισμός, που θα μπορούσε να δημιουργήσει νέες διόδους ανόδου για τα υδροθερμικά ρευστά, θα οδηγούσε πιθανώς σε αύξηση της διαθέσιμης από το σύστημα ποσότητας As και άρα επί πλέον απελευθέρωση αυτού, αποτελώντας κίνδυνο για τη θαλάσσια και ίσως ανθρώπινη ζωή στην περιοχή.

Συνοψίζοντας, η παρουσία εμπλουτισμού σε μέταλλα σε υδροθερμικά συστήματα είναι υψηλής σημασίας, καθώς μπορούν τα στοιχεία αυτά να διαδραματίσουν σοβαρό ρόλο οικονομικά (σχηματισμός κοιτασμάτων, απόθεση ακόμη και κρίσιμων μετάλλων, όπως το κοβάλτιο, το αντιμόνιο και το νικέλιο) και περιβαλλοντικά (μεταλλικοί ρυπαντές σαν το αρσενικό και το αντιμόνιο) και χρήζουν αυτά τα συστήματα εντατικής μελέτης, όχι μόνο ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, αλλά και έμμεσα, παραδείγματος χάριν μέσω του βιολογικού ενδιαφέροντος που προκύπτει, από μικροοργανισμούς και βακτηριακές

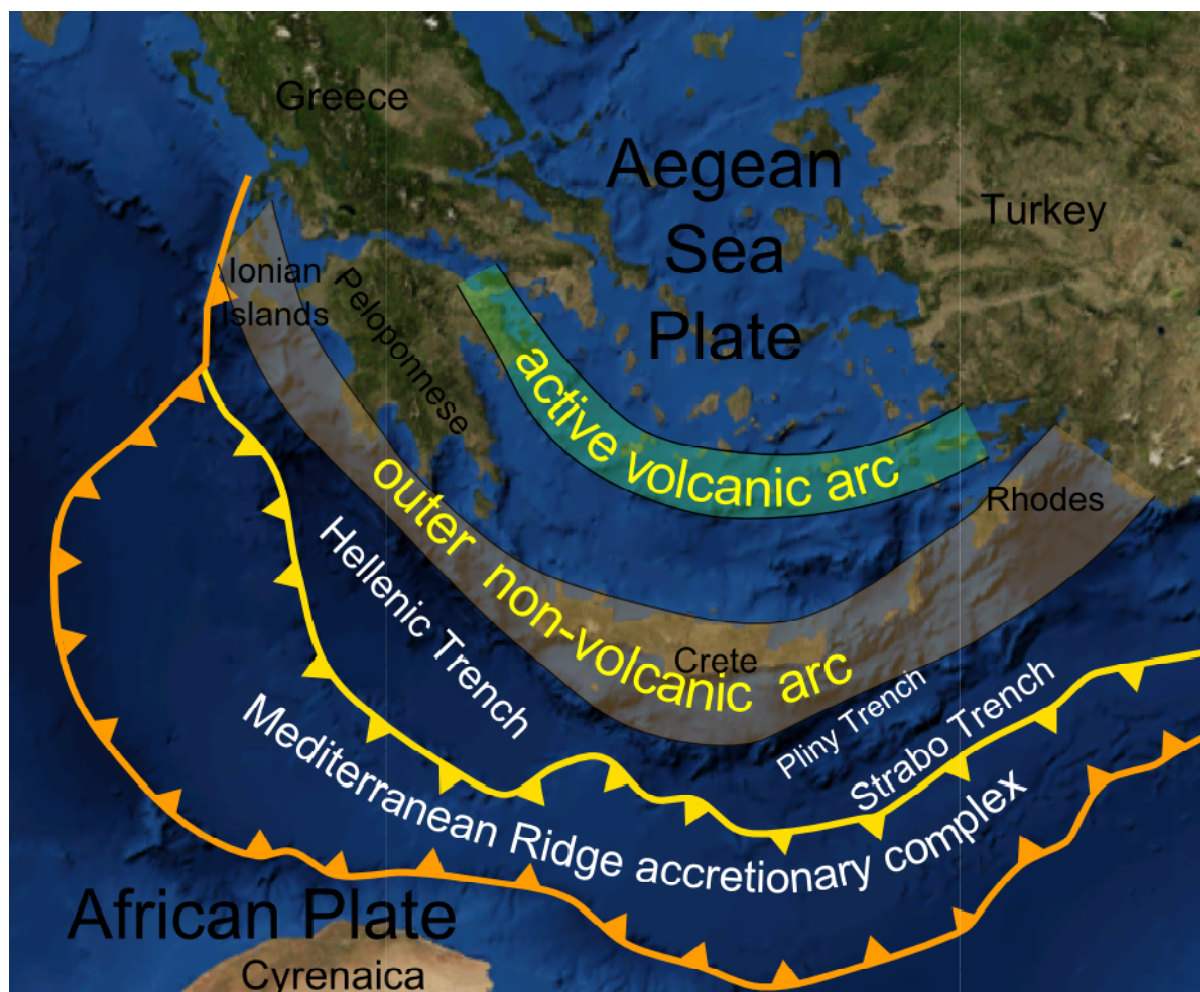
κοινότητες που ακμάζουν υπό συνθήκες τοξικές για τον άνθρωπο και ελέγχουν σε κάποιο βαθμό (σημαντικό ορισμένες φορές) την διάθεση στοιχείων όπως το αρσενικό.

## 2. Γενική γεωλογία της περιοχής του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου

Προτού αναλυθούν τα υδροθερμικά συστήματα κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου της Ελλάδος, είναι σημαντικό να αποδοθεί ως ένα βαθμό το γεωλογικό καθεστώς της περιοχής. Με τον τρόπο αυτό γίνονται καλύτερα αντιληπτές οι συνθήκες που οδηγούν στο σχηματισμό της υδροθερμικής δραστηριότητας, τα αίτια δημιουργίας των ρευστών της, οι μηχανισμοί που ελέγχουν την κίνηση των αερίων και των ρευστών, αλλά και η ίδια η σύσταση των υλικών αυτών.

Στον Ελληνικό χώρο διαδραματίζεται σύγκρουση της Ευρασιατικής τεκτονικής πλάκας με την Αφρικανική, όπου έχει ως αποτέλεσμα την υποβύθιση του ωκεάνιου φλοιού της δεύτερης (υπολειμματικός φλοιός της θάλασσας της Τηθύος). Η υποβύθιση αυτή έχει αμφιθεατρικό σχήμα με το κοίλο μέρος του προς τον Βορρά. Ξεκινώντας από τον Αμβρακικό κόλπο, εκτείνεται ως το νησί της Ρόδου, σχηματίζοντας μία αύλακα μήκους 1000 km και με ακτίνα καμπυλότητας περίπου 400 km, η οποία ονομάζεται Ελληνική Αύλακα. Η υποβύθιση της Αφρικανικής πλάκας λαμβάνει χώρα νότια της Κρήτης με αποτέλεσμα την δημιουργία Βόρεια αυτής, μιας οπισθοτόξιας λεκάνης της οποίας το όριο προς το Βορρά είναι το επονομαζόμενο Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο. Το ηφαιστειακό τόξο αυτό, του οποίου οι διαστάσεις είναι 500 km σε μήκος και 20-40 km σε πλάτος, προκύπτει περίπου 120 km βόρεια του εξωτερικού τόξου και εμφανίζεται παράλληλο σε αυτό (Kiliyas et al. 2013). Ο σχηματισμός του οφείλεται στην μερική τήξη της σφήνας του μανδύα, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στον Ευρασιατικό φλοιό και τον υποβυθιζόμενο Αφρικανικό, που σε βάθος υπόκειται σε διαδικασίες μεταμόρφωσης και αλλοίωσης λόγω της αυξανόμενης θερμοκρασίας και πίεσης, αποβάλλει από τα ορυκτά των πετρωμάτων του νερό και εισερχόμενο αυτό στη μανδυακή σφήνα, προκαλεί πτώση του σημείου τήξης μέσω εφυδάτωσης. Στη συνέχεια προκύπτει ο σχηματισμός μάγματος μέσω μερικής τήξης της σφήνας. Το μάγμα ανέρχεται μέσα από τον φλοιό και δημιουργεί στην επιφάνεια τα ηφαιστειακά κέντρα του τόξου (Kiliyas et al. 2013). Ο λόγος που το ηφαιστειακό τόξο σε περιοχές σύγκλισης πλακών προκύπτει σε μία χιλιομετρική απόσταση των 100-120 km από το σημείο έναρξης της υποβύθισης, είναι γιατί οι πλάκες δεν βυθίζονται κάθετα, αλλά έχουν μία κλίση προς την πλάκα κάτω από την οποία βυθίζονται και η διαφορά στην απόσταση στην οποία προκύπτει το τόξο συνδέεται με τη γωνία καταβύθισης, έτσι ώστε όταν συναντηθούν οι κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που απαιτούνται για τις

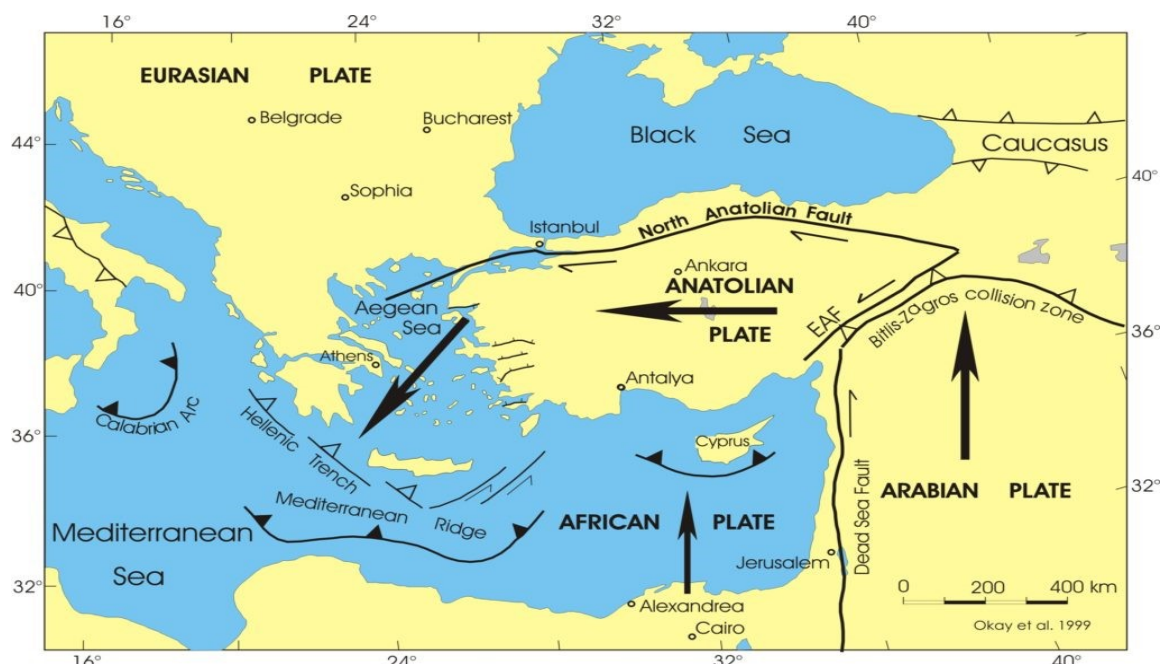
προαναφερθείσες επιπτώσεις, το σημείο το οποίο επιδέχεται την μεταμόρφωση βρίσκεται συνήθως μεταξύ των συγκεκριμένων τιμών χιλιομετρικής απόστασης από τη θέση της σύγκρουσης (Kiliyas et al. 2013).



**Εικόνα 2.1:** Η ζώνη υποβύθισης στον ελληνικό χώρο  
([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Hellenic\\_arc.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Hellenic_arc.png))

Το ηφαιστειακό τόξο απαρτίζεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά, από το σύστημα Σουσάκι-Μέθανα, τη Μήλο, τη Σαντορίνη, το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο, τη Νίσυρο και την Κω. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα μέλη του τόξου χωρίζονται γεωλογικά σε δύο κατηγορίες. Η Μήλος, η Σαντορίνη και το Κολούμπο, ανήκουν στην Αττικοκυκλαδική ζώνη των εσωτερικών Ελληνίδων, ενώ Σουσάκι-Μέθανα και Νίσυρος-Κως, ανήκουν στην Υποπελαγονική ζώνη (Μουντράκης 2010). Παρά το γεγονός αυτό, λόγω του οποίου εμφανίζονται διαφορετικοί τύποι υποβάθρου στα μέλη των ενοτήτων αυτών, όλα τα ηφαιστειακά κέντρα του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου έχουν σε ένα βαθμό κοινή εξελικτική πορεία τα τελευταία 5 εκατομμύρια χρόνια, με την εμφάνιση σε αυτά ηφαιστειακής δραστηριότητας, εκρήξεων, κάλυψη σε μεγάλο μέρος των νησιών από αποθέσεις ηφαιστειακών υλικών, αλλά και λαβών, εμφάνιση υδροθερμικής δραστηριότητας

και φυσικά κοινή τεκτονική εξέλιξη, αφού αποτελούν μέλη του ίδιου τεκτονικού καθεστώτος. Εμφανίζεται λοιπόν στα νησιωτικά μέλη του τόξου, μία κοινή τεκτονική δομή. Κανονικά ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ, μέσω των οποίων πραγματοποιήθηκε στους παρελθοντικούς χρόνους η άνοδος μάγματος και σήμερα δια μέσω πολλών από αυτά, άνοδος υδροθερμικών ρευστών. Αίτιο δημιουργίας των ρηγμάτων αυτών που διατρέχουν συγκεκριμένα τη Νίσυρο, τη Σαντορίνη, το Κολούμπο, αλλά και τη Μήλο, αποτελεί ένα ενεργό και σήμερα εκτατικό φαινόμενο διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, το οποίο δεν περιορίζεται μόνο στο ηφαιστειακό τόξο, αλλά σε όλο τον Αιγαϊκό χώρο και οφείλεται στην αριστερόστροφη περιστροφική κίνηση της μικροπλάκας του Αιγαίου. Η περιστροφή αυτή είναι αποτέλεσμα της σύγκλισης με κατεύθυνση Α-Δ, της πλάκας της Ανατολίας με την Ευρασιατική. Ο πόλος περιστροφής βρίσκεται βόρεια της Αιγύπτου (Nomikou et al. 2016). Καθώς η Αραβική πλάκα, αποσπασμένη πλέον από την Αφρικανική, με την διάνοιξη της Ερυθράς θάλασσας, κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από την μητρική της πλάκα προς τον Βορρά, πιέζει την πλάκα της Ανατολίας προς τη Δύση, δηλαδή προς τον Ελλαδικό χώρο. Η κίνηση της τελευταίας πραγματοποιείται μέσω του δεξιόστροφου ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας



**Εικόνα 2.2:** Σχηματική απεικόνιση της σύγκλισης της πλάκας της Ανατολίας.

(<http://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/2019/07/NearEastTectonics-NewScientist2011-1024x709.jpg>)

Οι συνθήκες μεταμόρφωσης που διέπουν το Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο, υπάγονται κατά τον Παλαιοζωικό αιώνα (εφαρμογή στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα του υποβάθρου της Αττικοκυκλαδικής), στην αμφιβολιτική έως πρσινοσχιστολιθική φάση. Σημαντικό μεταμορφικό επεισόδιο παρατηρείται με την σύγκρουση της Απουλίας με την

Ευρασιατική. Το επεισόδιο αυτό που ξεκινάει κατά το Άνω Κρητιδικό με αρχές Τριτογενούς, εμφανίζει χαρακτηριστικά εκλογιτικής φάσης, στη συνέχεια όμως (Ηώκαινο), μεταβαίνει στην γλαυκοφανιτική φάση. Χαρακτηριστικό αυτής είναι οι συνθήκες υψηλής πίεσης, αλλά χαμηλής (σχετικά) θερμοκρασίας. Έτσι κατά τη χρονική περίοδο αυτή, δηλαδή περίπου στα 45 εκατομμύρια χρόνια, η γλαυκοφανιτική μεταμόρφωση επικρατεί, με κατά τόπους εμφανίσεις της εκλογιτικής. Αργότερα, την περίοδο Ολιγόκαινο-Μειόκαινο. Το ορογενές ανέρχεται σε μικρότερα βάθη και συνέπεια της ανόδου αυτής είναι η ελάττωση τόσο της θερμοκρασίας, όσο και της πίεσης. Το γεγονός αυτό προκαλεί φαινόμενα ανάδρομης μεταμόρφωσης πρασινοχριστολιθικής φάσης, το οποίο κατά θέσεις εξαλείφει την γλαυκοφανιτική (Μουντράκης 2010). Τα τεκτονικά γεγονότα που διαδραματίστηκαν και συνεχίζουν μέχρι και σήμερα να δρουν στο Νότιο Αιγαίο, πρωταρχικό ρόλο στα οποία κατέχει ο εφελκυσμός του Μειοκαινού, συνέισφερε στην λέπτυνση του φλοιού και την άνοδο μαγματικών όγκων που προκάλεσαν θερμομεταμόρφωση επαφής στα γύρω πετρώματα. Έχει μετρηθεί, πως το πάχος του φλοιού στον Αιγαίο χώρο εμφανίζει διακυμάνσεις, από 32 km κάτω από την Κρήτη (ιζηματογενές τόξο), έως 25-28 km στις κεντρικές Κυκλάδες και περίπου 19 km στο Νότιο Αιγαίο (Κατσένης 2014). Καθώς το ορογενές πλησιάζει την επιφάνεια, φτάνοντας χρονικά, περίπου στην έναρξη της ηφαιστειακής δραστηριότητας στο τόξο, η εφελκυστική τεκτονική συνεχίζεται μέσω κανονικών ρηγμάτων. Τα ρήγματα αυτά υποβοήθησαν την πραγματοποίηση δύο πολύ σημαντικών συμβάντων. Πρώτον, δια μέσω αυτών ανήλθαν και συνεχίζουν σήμερα (πιθανώς) να ανέρχονται τα μαγματικά υλικά που τροφοδότησαν τις εκρήξεις των ηφαιστειακών κέντρων του τόξου, και δεύτερον, προκάλεσαν μέσω μεταπτώσεών τους, την αποκοπή της Αττικοκυκλαδικής ζώνης σε απομονωμένα νησιά, διαλύοντας και βυθίζοντας την αποκαλούμενη Αιγηίδα (ηπειρωτικός χώρος του σημερινού Αιγαίου Πελάγους).

### 3. Ενεργά υδροθερμικά συστήματα και απόθεση μετάλλων

Παρακάτω, θα αναλυθούν ξεχωριστά, το κάθε τμήμα του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου, από Δυτικά προς Ανατολικά. Πρώτα θα δοθούν οι σημαντικότερες γεωλογικές πληροφορίες του κάθε τμήματος και στη συνέχεια η υδροθερμική δραστηριότητα και ο εμπλουτισμός σε μέταλλα, όπου εμφανίζεται. Η σειρά θα είναι η εξής: Μέθανα, Μήλος, Σαντορίνη-Κολούμπο, Νίσυρος-Κως (Εικ. 3.1, Εικ. 3.4, Εικ. 3.8, Εικ. 3.11 αντίστοιχα).

#### 3.1 Μέθανα-Σουσάκι-Πελοπόννησος



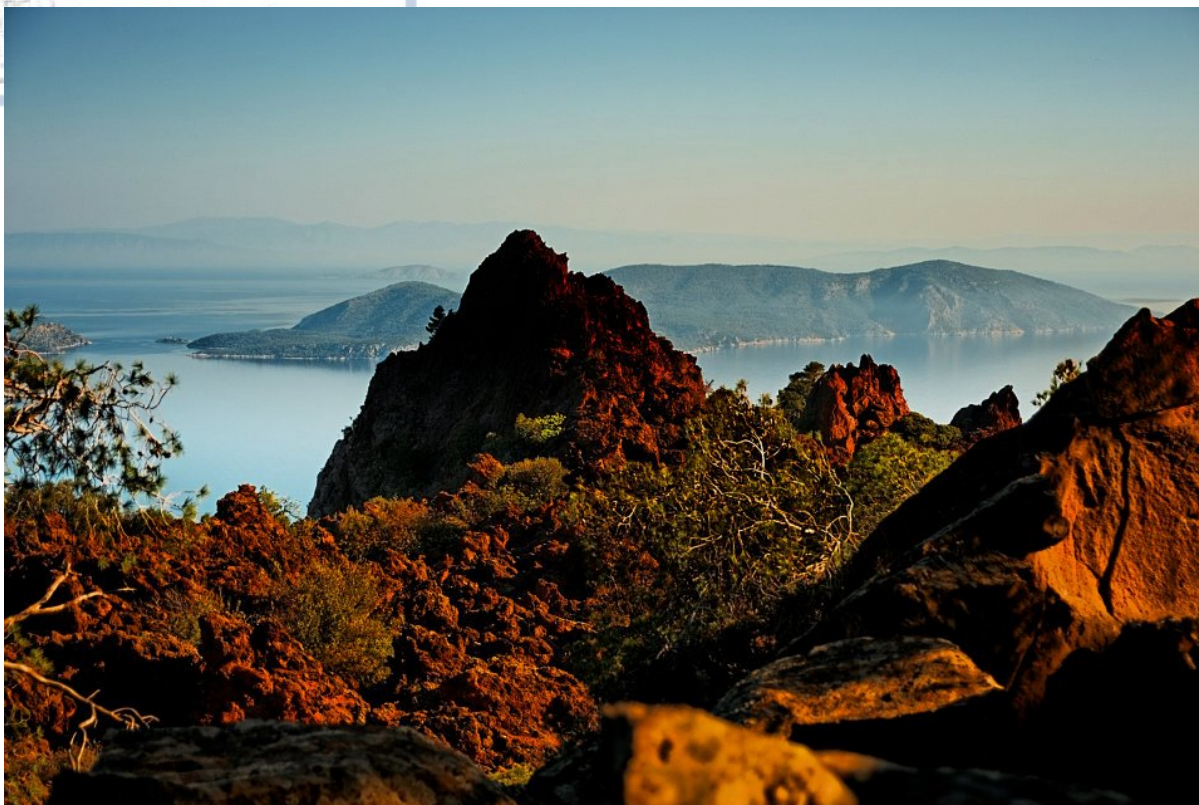
Εικόνα 3.1: Η χερσόνησος των Μεθάνων (<http://www.hellenicaworld.com/Greece/Geo/gr/Methana.html>)

### 3.1.1 Η γεωλογία του συγκροτήματος

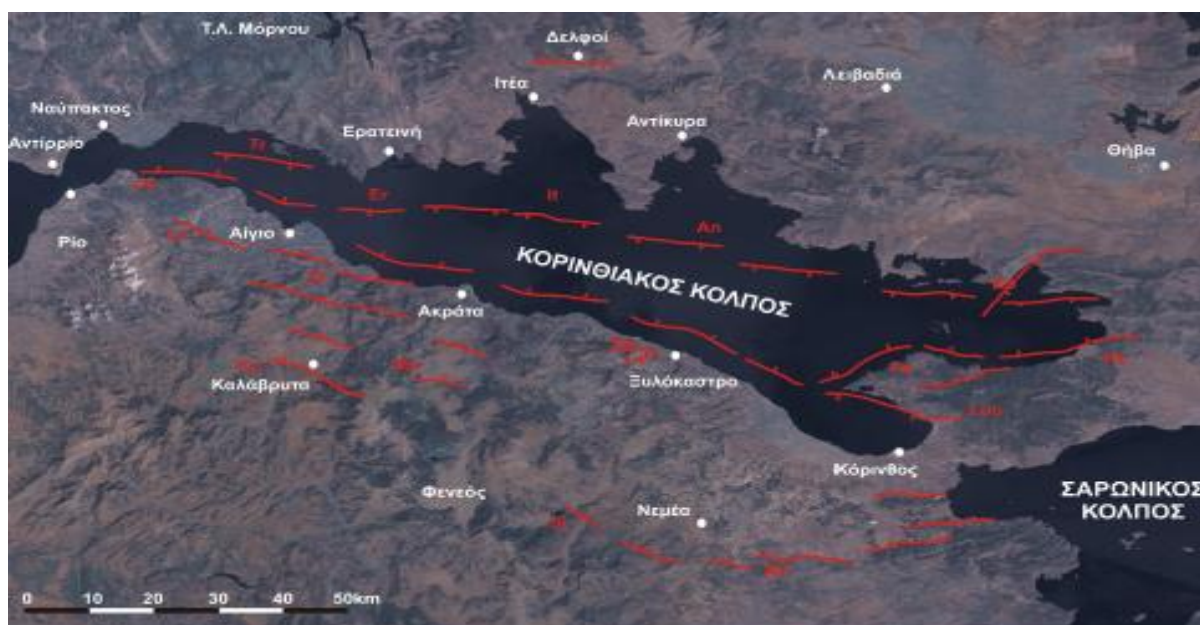
Η χερσόνησος των Μεθάνων, μαζί με το Σουσάκι και τμήμα της ευρύτερης περιοχής της βορειοανατολικής Πελοποννήσου, αποτελούν το δυτικότατο όριο του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου. Γεωλογικά η περιοχή έγκειται στην Υποπελαγονική ζώνη, τα χαρακτηριστικά της οποίας έχουν πολλαπλές εμφανίσεις. Μεγάλο τμήμα της χερσονήσου, κυρίως ΒΒΔ και προς το Σουσάκι, καλύπτεται από τους ασβεστόλιθους της Τραπεζώνας. Το οφιολιθικό *mélange* το οποίο δείχνει να υπέρκειται των προαναφερθέντων ασβεστόλιθων, αποτελείται από μαξιλαροειδείς λάβες και δολερίτες, αλλά και από σερπεντινωμένα βασικά και υπερβασικά πετρώματα. Στο βουνό Αδέρης και τη γειτονική σε αυτό περιοχή, εμφανίζεται ένα τεκτονικό *mélange* φλύσχη που συνίσταται από μάργες, ψαμμίτες κ.ά., ενώ βορειότερα, στη χερσόνησο των Μεθάνων, επικρατεί η ηφαιστειακή σειρά του τόπου, με χαλαρά ηφαιστειακά ιζήματα που περιέχουν τεμάχια τόφφων, δακίτες και ανδεσίτες να καλύπτουν σχεδόν καθολικά την χερσόνησο (Εικ. 3.2). Ανώτερο σχηματισμό αποτελούν Τεταρτογενούς ηλικίας χαλαρά ιζήματα, αλλούβια υλικά, άμμοι, ιλύς, και κώνοι καταπτωθέντων υλικών (Matiatos and Alexopoulos 2013). Η ως επί το πλείστον κάλυψη των τελευταίων από τα ηφαιστειακά υλικά στον χώρο των Μεθάνων είναι ενδεικτική της πολύ πρόσφατης ηφαιστειακής δράσης στην χερσόνησο.

Η έντονη τεκτονική του Κορινθιακού και Αργοσαρωνικού κόλπου και της Υποπελαγονικής ζώνης γενικότερα (Εικ. 3.3), δημιουργούν ένα έντονα ετερολιθικό τοπίο, τόσο οριζόντια, όσο και κατακόρυφα, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό αυτόνομων υδροφορέων μέσα στα διάφορα στρώματα (Matiatos and Alexopoulos 2013). Η παρουσία των υδροφορέων αυτών υποδεικνύει κίνηση του νερού δια μέσω δευτερογενούς πορώδους, μικρών σχισμών και ρωγμών, όπως φαίνεται και από την παρουσία μικρών πηγών. Αντίθετα στους ανθρακικούς καρστικοποιημένους σχηματισμούς η κυκλοφορία πραγματοποιείται μέσω μεγάλων αγωγών και μεγαλύτερων σε μέγεθος πηγών. Παρ' όλα αυτά φαίνεται πως η πλειοψηφία των πηγών στην περιοχή ανήκει στην πρώτη κατηγορία, γεγονός που εξηγεί και την μεγάλης έκτασης υδροθερμική αλλοίωση στους διάφορους σχηματισμούς, καθώς δια μέσω τέτοιων ρωγμών και διακλάσεων περατώνεται και η κυκλοφορία των υδροθερμικών ρευστών.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι σερπεντινωμένες ζώνες στις οποίες εμφανίζεται επίδραση υδροθερμικών ρευστών στο Σουσάκι, καθώς συνδυασμός των δύο φαινομένων οδηγεί στην συσσώρευση στην περιοχή διαφόρων μετάλλων, παραδείγματος χάριν, χρώμιο, νικέλιο κ.ά., όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.



**Εικόνα 3.2:** Ηφαιστειακά υλικά στα Μέθανα. ([https://www.porosnews.gr/wp-content/uploads/2012/07/531543\\_478993698794670\\_1568771376\\_n.jpg](https://www.porosnews.gr/wp-content/uploads/2012/07/531543_478993698794670_1568771376_n.jpg))



**Εικόνα 3.3:** Σημαντικά ρήγματα του Κορινθιακού κόλπου (κόκκινο χρώμα) ([https://1.bp.blogspot.com/\\_D9NIUTvr5EM/S6-qMhBdj7I/AAAAAAAAAaQ/JdXxQ48yIsY/s320/2.jpg](https://1.bp.blogspot.com/_D9NIUTvr5EM/S6-qMhBdj7I/AAAAAAAAAaQ/JdXxQ48yIsY/s320/2.jpg))

### 3.1.2 Υδροθερμική δραστηριότητα

Στο σύστημα Σουσάκι-Αίγινα-Μέθανα δεν συναντάται υδροθερμική δράση μεγάλης χωρικά κλίμακας όπως συμβαίνει στη Μήλο και άλλα σημεία του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου. Παρ' όλα αυτά η επίδρασή της είναι σημαντική στο Σουσάκι σε μία έκταση περίπου 1-2 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η ύπαρξη πρόσφατης δραστηριότητας αποδεικνύεται με την ύπαρξη στην περιοχή φουμαρολικών κρατήρων, υδροθερμικά αλλοιωμένων ορυκτών και πετρωμάτων, θερμών υδάτων και με την εμφάνιση σε αλλουβιακές αποθέσεις σερπεντινωμένων κλασμάτων, των οποίων μητρικό πέτρωμα αποτελεί το υπερβασικό υπόβαθρο του τόπου. Τυπικές αλλοιώσεις που εμφανίζονται στην περιοχή και σχετίζονται με την υδροθερμική δράση είναι η πυριτική και η αργιλική.

Η σημαντική αποσάθρωση του σερπεντινωμένου υποβάθρου σε συνδυασμό με την φουμαρολική / υδροθερμική αλλοίωση, οδήγησε τους Georgopoulos et al. (2018) στην υπόθεση ότι τα δύο αυτά φαινόμενα ενισχύουν την διάδοση των ιχνοστοιχείων, την διαθεσιμότητα και την κινητικότητα αυτών. Κύριο αντικείμενο της μελέτης τους αποτέλεσε η διάδοση των κοβάλτιο, νικέλιο, μαγγάνιο και χρώμιο, σημαντικών μετάλλων που εμφανίζονται στην περιοχή.

Οι μετρήσεις των προαναφερθέντων μελετητών περιστράφηκαν γύρω από εδάφη, ιζήματα ρευμάτων και απευθείας μετρήσεις στα μητρικά πετρώματα, καθώς οι τρεις αυτοί στόχοι αποτελούν τους κύριους φορείς των μεταλλικών ιχνοστοιχείων ενδιαφέροντος. Όσο αφορά τα ιζήματα ρευμάτων οι μέσες τιμές μεταξύ των διαφόρων δειγμάτων ήταν : Cr 1334 mg/Kg, Ni 1725 mg/Kg, Mn 934 mg/Kg, Co 116 mg/Kg, όπου mg/Kg είναι η ποσότητα σε मिलीग्रामμάρια του ιχνοστοιχείου, ανά κιλό δείγματος.

Για τα εδάφη οι τιμές ήταν οι εξής : Cr 1448 mg/Kg, Ni 1879 mg/Kg, Mn 904 mg/Kg, Co 115 mg/Kg. Παρατηρείται πως οι ποσότητες αυτές δεν διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από τις αντίστοιχες στα ιζήματα ρευμάτων, γεγονός που υποδεικνύει μία γενικά σταθερή και ομοιόμορφη κίνηση, εξάπλωση των ιχνοστοιχείων στο σύστημα του Σουσακίου.

Στο μητρικό πέτρωμα : Cr 13.030 mg/Kg, Ni 904 mg/Kg, Mn υπό του σημείου ανιχνεύσεως, Co 20 mg/Kg.

Όπως παρουσιάζεται από τις μετρήσεις, το Νικέλιο αποτελεί το στοιχείο που εμφανίζεται με τις μεγαλύτερες ποσότητες τόσο στα ιζήματα ρευμάτων, όσο και στα εδάφη. Παρ' όλα αυτά το Cr αποκτά τιμές εντυπωσιακά υψηλότερες κάθε άλλου στοιχείου στα τμήματα του μητρικού υλικού.

Τα παραπάνω ιχνοστοιχεία εμφανίζονται με ποικίλους τρόπους στα ιζήματα και τα εδάφη. Ως διαλυμένη ουσία εντός του νερού, δεσμευμένα σε οξείδια, δεσμευμένα σε ανθρακικά άλατα, αλλά και ως υπολειμματικά στοιχεία ορυκτών. Ανάλογα με τον τύπο εμφάνισης αλλάζει και η κινητικότητα και διαθεσιμότητα. Για παράδειγμα, η διαλυμένη στο νερό ουσία, ή κλάσματα που έχουν απορροφηθεί επιφανειακά, είναι πολύ ευκολότερο να απελευθερωθούν στο περιβάλλον από ότι τα υπολειμματικά στοιχεία ορυκτών στις τυπικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στην επιφανειακή ζώνη όπου πραγματοποιείται η κατακράτηση των πιο ευκίνητων δομών των ιχνοστοιχείων η συσχέτιση μεταξύ αυτών φαίνεται να είναι θετική. Ωστόσο το χρώμιο εμφανίζει συσχέτιση χαμηλότερη από την αναμενόμενη με το νικέλιο. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε από τους Georgopoulos et al. (2018) στην έντονη αλλαγή που υπέστησαν τα ιχνοστοιχεία αυτά στην ορυκτολογική και γεωχημική τους σύσταση από την επίδραση υδροθερμικών ρευστών. Το γεγονός αυτό επηρέασε έντονα κατά συνέπεια την συσχέτιση των δύο αυτών ιχνοστοιχείων. Τα πυριτικά ορυκτά που συνήθως αποτελούν τους κύριους ξενιστές του νικελίου στον σεπρεντινωμένο περιδοτίτη, είναι πιο ευαίσθητα στην αποσάθρωση από ότι οι χρωμιούχοι σπινέλιοι. Πιθανολογείται λοιπόν, η έκπλυση και απομόνωση του νικελίου σε δευτερογενείς φάσεις να προκύπτει σε προγενέστερο στάδιο της υδροθερμικής αλλοίωσης από ότι αυτή του χρωμίου, καθώς τα υδροθερμικά ρευστά σε αυτό το στάδιο δεν θα μπορούσαν να υπερβούν την ισχυρότερη αντίσταση που εμφανίζει ο χρωμιούχος σπινέλιος.

Άρα, το νικέλιο και το χρώμιο εκπλένονται ετεροχρονισμένα και απομονώνονται σε διαφορετικά δευτερογενή ορυκτά κι έτσι δεν εμφανίζουν ισχυρή θετική συσχέτιση. Την υπόθεση αυτή υποστηρίζει το γεγονός ότι το ποσοστό του νικελίου, του μαγγανίου και του κοβαλτίου, το οποίο απορροφάται στην επιφάνεια ορυκτών και που δεσμεύεται από Fe-Mn οξείδια είναι αρκετά υψηλό. Η παρατήρηση αυτή δείχνει πως η μετανάστευση των ιχνοστοιχείων αυτών από πρωτογενή σε δευτερογενή ορυκτά οφείλεται σε υδροθερμική δραστηριότητα και πως η περιβαλλοντική τους διαθεσιμότητα ελέγχεται κυρίως από το Eh/pH του συστήματος. Τέλος η έντονα θετική συσχέτιση μεταξύ νικελίου, μαγγανίου και κοβαλτίου πιθανώς να οφείλεται στην εμφάνιση στην υδροθερμικά αλλοιωμένη ζώνη σερπεντινιτών, του ορυκτού "Absolane", του οποίου ο χημικός τύπος είναι :  $(\text{Mn}_4+(\text{O},\text{OH})_2(\text{Co},\text{Ni},\text{Mg},\text{Ca})_x(\text{OH})_{2x} \cdot n\text{H}_2\text{O})$ .

Συμπερασματικά, ενώ η γενικότερη περιοχή Σουσάκι-Αίγινα-Μέθανα δεν χαρακτηρίζεται ούτε από έντονη, αλλά ούτε και μεγάλης χωρικά κλίμακας υδροθερμική δραστηριότητα, είναι φανερό πως η επίδρασή της είναι πολύ σημαντική, καθώς πυροδοτεί

φαινόμενα όπως την κινητοποίηση μεταλλικών ιχνοστοιχείων, την μετανάστευσή τους, την αύξηση της περιβαλλοντικής διαθεσιμότητας τους, αλλά και αλλοιώνει σημαντικά τους σχηματισμούς της περιοχής τροποποιώντας την ορυκτολογική και γεωχημική σύσταση των πετρωμάτων.

### 3.2 Μήλος



**Εικόνα 3.4:** Αεροφωτογραφία της Μήλου και στο βάθος η Κίμωλος.  
(<https://www.mag24.gr/wp-content/uploads/2017/07/milos-kimolos.jpg>)

#### 3.2.1 Γεωλογία της Μήλου

Η νήσος της Μήλου αποτελείται από τέσσερις κύριους γεωλογικούς σχηματισμούς (Fytikas and Marinelli 1976). Ένα κρυσταλλικό (μεταμορφωμένο) υπόβαθρο, μία ιζηματογενή σειρά Νεογενούς ηλικίας, μία ηφαιστειακή, ηφαίστειο-ιζηματογενή σειρά του Τεταρτογενούς που καλύπτει σχεδόν εξ' ολοκλήρου το νησί και μία αλλουβιακή (Εικ. 3.5). Πιο συγκεκριμένα.

Το Υπόβαθρο: Εκτενείς μελέτες των Fytikas and Marinelli (1971-76), όπως το άρθρο “Geology and geothermics of the Island of Milos (Greece)”, (1976), για την περιοχή, σε συνδυασμό με προηγούμενες μελέτες έχουν οδηγήσει στα εξής συμπεράσματα. Το μεταμορφωμένο αυτό υπόβαθρο έχει πολύ λίγες εμφανίσεις στο νησί και μάλιστα αρκετοί

τόνοι αυτού του υλικού οφείλουν την εμφάνισή τους σε φρεατικές εκρήξεις που “εκτόξευσαν” υλικό έως και αρκετών τόνων συνολικά, στην επιφάνεια. Αποτελείται από ελαφρώς μεταμορφωμένα πετρώματα σε πρασινοσχιστολιθική φάση, αλλά και μπλε-σχιστολιθική που όμως είναι σπανιότερη. Το μεγαλύτερο μέρος αποτελείται από σχιστόλιθους με σύσταση χαλαζία, μοσχοβίτη, και χλωρίτη. Στο σύμπλεγμα του υποβάθρου εμφανίζονται και στρώματα φλύσχη που σύμφωνα με τους προαναφερθέντες μελετητές υποδηλώνει Αλπική ηλικία λόγω συνύπαρξής του με οφειολιθικά πετρώματα όπως σερπεντινίτες οι οποίοι δεν έχουν εμφάνιση στη Μήλο αλλά υπάρχουν στην άμεση ‘γειτονιά’ της.

Η Ιζηματογενής σειρά: Συνίσταται από δύο μέρη, ένα κροκαλοπαγές κι ένα από ασβεστόλιθο. Το πρώτο μέρος έχει μέγιστο πάχος τα 30 m με το χρώμα του να ποικίλει από γκρι έως κοκκινωπό. Οι κροκάλες προέρχονται κατά κύριο λόγο από το κρυσταλλικό υπόβαθρο και είναι χαλαζιτικής σύστασης. Το συνδετικό υλικό είναι κοκκινωπό με μερικές εμφανίσεις γύψου και οι ενστρώσεις ψαμμιτικού υλικού γκρι με κατά τόπους εμφάνιση γύψου (Fytikas and Marinelli 1976). Το ασβεστολιθικό μέρος της ιζηματογενούς σειράς ποικίλει πολύ στη σύσταση. Κυριότερα μέρη του είναι γκρι ασβεστόλιθοι πάχους 1-2 m και προς τη βάση του στρώματος κιτρινωποί ασβεστόλιθοι σε λεπτά στρώματα πάχους 60-80 cm., με τους τελευταίους να περιέχουν συχνά και σε μεγάλα μέρη της εμφάνισής τους απολιθώματα. Το συνολικό πάχος της σειράς αγγίζει μέχρι και τα 150 m. Βάσει μελετών των παραπάνω ερευνητών η σειρά αυτή δεν περιέχει κανένα ηφαιστειακό υλικό και άρα είχε αναδυθεί και διαβρωθεί πριν από οποιαδήποτε ηφαιστειακή δραστηριότητα στη Μήλο γεγονός που φανερώνει και το νεαρό της ηλικίας της ηφαιστειακής δράσης στο νησί.

Η Ηφαιστειακή σειρά: Η σειρά αυτή καλύπτει πολύ μεγάλο μέρος της νήσου, περίπου το 70% με το πάχος της να κυμαίνεται από 300 έως και 700 m σε ορισμένες περιοχές. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα της Μήλου μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις φάσεις μεταξύ Μέσου-Άνω Πλειόκαινο (3,5-3 εκ. χρόνια) έως Άνω Πλειστόκαινο (0,08 εκ. χρόνια) (Alfieri et al. 2013).

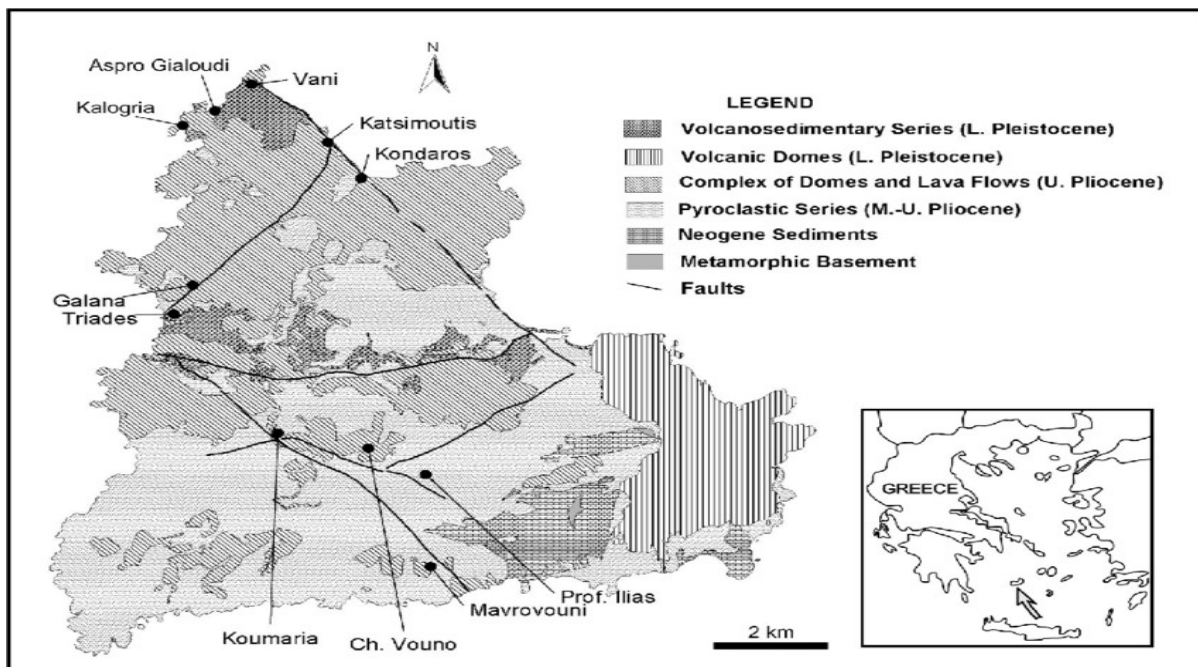
Η πρώτη φάση που ξεκίνησε στο Μέσο με Άνω Πλειόκαινο οδήγησε στον σχηματισμό μίας παχιάς αλληλουχίας (>120 m) υποβρύχιων δομών υψηλού πυριτίου που αποτελείται από πυροκλαστικά με υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά τα οποία έχουν κατά τόπους παρεμβολές υπό-ηφαιστειακών σωμάτων, λάβες ή/και ναλοκλαστίτες (Alfieri et al. 2013). Περίπου στα 3 εκ. χρόνια με ~2,7 εκ. χρόνια αποτίθενται με κατεύθυνση Α-Δ ηφαιστειο-ιζηματογενή προϊόντα ρηχής θάλασσας με τη μορφή δομών Graben.

Η δεύτερη φάση έλαβε χώρα από το Άνω Πλειόκαινο έως Μέσο Πλειστόκαινο ~2,7-1,4 εκ. χρόνια και χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό ηφαιστειακών πετρωμάτων παρουσία δόμων και ροών ανδεσιτικής-δακτιτικής λάβας, δομές οι οποίες παρεμβλήθηκαν στα ακόμα μη ενοποιημένα ηφαίστειο-ιζηματογενή προϊόντα της προηγούμενης φάσης.

Στην τρίτη φάση περιλαμβάνονται ο σχηματισμός υψηλού πυριτίου και πτητικών-κωνικών ηφαιστείων σε υποθαλάσσιες συνθήκες, πυροκλαστικών, αλλά και ρυολιθικής σύστασης λάβα ηλικίας 0,9-0,8 εκ. χρόνων (Fytikas et al. 1986). Η ηλικία της φάσης αυτής είναι 1,4-0,5 εκ. χρόνια (Alfieri et al. 2013).

Η τέταρτη και ηλικιακά νεότερη δράση συγκεντρώνεται στην ανατολική πτέρυγα της Μήλου με έντονη εκρηκτική δραστηριότητα στην στεριά και σύνοδο σχηματισμό ρυολιθικών λαβών, καθώς και με πολλές φρεατικές εκρήξεις (Fytikas et al. 1986).

Η Αλλουβιακή σειρά: Τα υλικά αυτά έχουν κυρίως εμφανίσεις τοπικού χαρακτήρα και δεν είναι ευρέως διαδεδομένα στο νησί. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η περιοχή Ζαφείρια στην οποία η σειρά έχει πάχος μερικών δεκάδων μέτρων. Αποτελείται κυρίως από υλικά ηφαιστειακής προέλευσης. Τα παραπάνω οφείλονται στην πολύ πρόσφατη ηφαιστειακή δράση στο νησί, στην μορφολογία αυτού και στις αραιές βροχοπτώσεις και κατακρημνίσματα γενικότερα (Fytikas and Marinelli 1976).



**Εικόνα 3.5:** Γενικευμένος γεωλογικός χάρτης του Δυτικού τμήματος της Μήλου. ([https://www.researchgate.net/profile/P\\_Voudouris/publication/238669587/figure/fig2/AS:667592561799178@1536177878641/Generalized-geological-map-of-W-Milos-area.png](https://www.researchgate.net/profile/P_Voudouris/publication/238669587/figure/fig2/AS:667592561799178@1536177878641/Generalized-geological-map-of-W-Milos-area.png))

### 3.2.2 Τεκτονική

Τέσσερα συστήματα ρηγμάτων αποτελούν τις σημαντικότερες τεκτονικές δομές του νησιού με καθοριστικό ρόλο στην υδροθερμική και ηφαιστειακή δράση της περιοχής και οφείλουν το σχηματισμό τους σε εκτατικής φύσεως τεκτονισμό ηλικίας Μειόκαινο-Πλειόκαινο (Alfieri et al. 2013). Τα συστήματα αυτά είναι ένα Βορειοδυτικό-Νοτιοανατολικό, ένα κατεύθυνσης Ανατολής-Δύσης, ένα Βορά-Νότου κι ένα Βορειοανατολικό-Νοτιοδυτικό.

Το ΒΔ-ΝΑ σύστημα επηρέασε κυρίως το κρυσταλλικό υπόβαθρο, είναι παράλληλο στην διεύθυνση του ηφαιστειακού τόξου του νοτίου Αιγαίου και καθορίζει την διεύθυνση την κατεύθυνση των Νεογενών λεκανών των Δυτικών Κυκλάδων και Νοτιοανατολικής Πελοποννήσου. Θεωρείται πως συνδέεται με την Αλπική ορογένεση (Alfieri 2006).

Το Α-Δ σύστημα, είναι προϊόν δύο χρονικά διαφορετικών τεκτονικών διαδικασιών. Η πρώτη έλαβε χώρα πριν την έναρξη της ηφαιστειακής δράσης στη Μήλο και επέδρασε στο υπόβαθρο, ενώ η δεύτερη συνδέεται με την εκ νέου ενεργοποίηση της πρώτης λόγω μίας ορογενετικής φάσης κατά το Τεταρτογενές. Η δεύτερη αυτή τεκτονική φάση επηρέασε όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς της Μήλου (Alfieri 2006).

Το Β-Ν σύστημα, το οποίο χαρακτηρίζεται από κανονικά εκτατικά ρήγματα επηρέασε τόσο το κρυσταλλικό υπόβαθρο, όσο και την ηφαίστειο-ιζηματογενή σειρά πάνω απ' αυτό και θεωρείται υπεύθυνο για την άνοδο μάγματος σε μικρά βάθη και/ή την επιφάνεια (Fytikas et al. 1986).

Το ΒΑ-ΝΔ σύστημα, είναι υποπαράλληλο του ιζηματογενούς τόξου, συνδέεται κυρίως με τον σχηματισμό ηφαιστειακών δομών, φουμαρόλες κ.ά. (Alfieri 2006).

### 3.2.3 Υδροθερμική δραστηριότητα

Η Μήλος χαρακτηρίζεται από έντονη υδροθερμική δραστηριότητα, με εμφανίσεις σε πολλά σημεία του νησιού (Εικ. 3.6), εκ των οποίων τα κυριότερα είναι: Ο κόλπος του Παλαιοχωρίου και του Σπαθιού που είναι και το σημαντικότερο σε έκταση ενεργό υδροθερμικό σημείο, ο κόλπος της Μήλου (δυτικά της Λακίδας) και ο κόλπος των Βουδίων. Στα σημεία αυτά, στον πυθμένα της θάλασσας σε βάθος μέχρι και μεγαλύτερο από 110 m παρατηρήθηκε από αρκετά παλαιότερα (Dando et al. 1995), η ανάδυση φυσαλίδων (Εικ. 3.7). Πρόκειται για υδροθερμικά αέρια τα οποία βρίσκουν δίοδο στα ιζήματα του βυθού και στις περιοχές αυτές εμφανίζονται με πολύ μεγάλη συχνότητα, η οποία σε ορισμένα σημεία μπορεί να σημαίνει ακόμα και ύπαρξη σημείων ανάδυσης των φυσαλίδων ανά 1,5-2 m. Οι

τοποθεσίες αυτές βέβαια δεν είναι πάντοτε σταθερές καθώς τα χαλαρά ιζήματα του πυθμένα παρασύρονται σε επίπεδο κόκκου από τις φυσαλίδες, στις εντονότερης δραστηριότητας εξόδους, μέχρι και 10 cm στο νερό, γεγονός που οδηγεί στην “μετανάστευση” του σημείου εξόδου τους της τάξης των μερικών εκατοστών (έως και 30 cm) περιμετρικά της αρχικής τους θέσης με το πέρασμα του χρόνου. Δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε από τους Dando et al. (1995) σε όλες τις περιοχές εμφάνισης του φαινομένου έδειξε μια παράλληλη διάταξη των εμφανίσεων με τα γειτονικά σημαντικά ρήγματα του νησιού. Η μέση σύσταση των αερίων ήταν η εξής: 80,5 % CO<sub>2</sub> (ελάχιστο 54,9 % και μέγιστο 91,9 %), 0,8 % CH<sub>4</sub>, 1,2 % H<sub>2</sub>S και 0,4 % H<sub>2</sub>. Το υδρογόνο και το υδρόθειο απουσιάζουν από τον κόλπο της Μήλου και από κάποια σημεία του Παλαιοχωρίου και στα σημεία αυτά το μεθάνιο έχει τις χαμηλότερες τιμές του. Το υδρογόνο και το υδρόθειο επίσης εμφανίζονται με μεγαλύτερες τιμές στα πιο ρηχά σημεία παρά στα βαθύτερα. Τα δύο αυτά στοιχεία παρουσιάζουν συσχέτιση και με τη θερμοκρασία. Γενικά οι μετρηθείσες θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες του περιβάλλοντος νερού, δηλαδή μεγαλύτερες των 13,9 °C τον Μάρτιο και 17,9 °C τον Ιούνιο σχεδόν σε όλες τις τοποθεσίες, φτάνοντας ένα μέγιστο άνω των 109 °C σε σημεία του Παλαιοχωρίου. Το υδρογόνο και το υδρόθειο συνήθως εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους σε θερμοκρασίες άνω των 80 °C, ενώ το μεθάνιο παρουσιάζει δύο μέγιστα, ένα περίπου στους 20 °C κι ένα περίπου στους 80 °C. Πολύ μεγάλο μέρος της σημαντικής ποσότητας CO<sub>2</sub> που εκλύεται στο υδροθερμικό σύστημα της Μήλου, προέρχεται από αβιογενείς διεργασίες αλληλεπίδρασης υδροθερμικών ρευστών πιθανώς με ιζήματα ή/και ασβεστόλιθους (Botz et al. 1996).

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να αναφερθεί πως έχει βρεθεί στη Μήλο, στις περιοχές Παλαιοχώρι και Σπαθί, ένας πολύ ισχυρός εμπλουτισμός σε αρσενικό (As). Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες από πολλούς επιστήμονες, όπως: Price et al. (2013), Fru et al. (2018), Wu et al. (2016) και άλλους, σε μία προσπάθεια να καθοριστούν οι συνθήκες και οι μηχανισμοί που ελέγχουν το φαινόμενο, αλλά και για την αναγνώριση της “καταγωγής” του στοιχείου αυτού. Αποτελέσματα αναλύσεων έδειξαν πως πιθανότερη πηγή του αρσενικού, αποτελούν τα μεταμορφωμένα πετρώματα του υποβάθρου. Η υδροθερμική αλλοίωση και η αλληλεπίδραση επαφής με υδροθερμικά ρευστά (που ως ένα βαθμό έχουν μαγματική προέλευση) κατά την άνοδο αυτών, οδηγεί στην απόσπαση του στοιχείου από τα πετρώματα και απελευθέρωσή του στο θαλάσσιο περιβάλλον της περιοχής. Βρέθηκαν δύο ξεχωριστές κατηγορίες ρευστών, μία πλούσια σε χλώριο, του οποίου ο εμπλουτισμός είναι περίπου 47 % σε σχέση με το τυπικό θαλάσσιο νερό, με ταυτόχρονο εμπλουτισμό σε Na, Ca, K, B, Sr, Br , παρουσία ιχνοστοιχείων όπως Si, Li, Rb, Cs, As, Fe, Mn. Η κατηγορία αυτή ρευστών

εμφανίζει μέγιστη περιεκτικότητα σε αρσενικό, έως 39  $\mu\text{M}$ . Η δεύτερη κατηγορία, είναι χαμηλού χλωρίου (έως 66 % χαμηλότερο σε σχέση με το θαλάσσιο νερό) και ταυτόχρονα απεμπλουτισμένη σε Na, Mg,  $\text{SO}_4$  και Br. Στην τελευταία, το αρσενικό αγγίζει μέγιστη περιεκτικότητα 78  $\mu\text{M}$ . Στο Παλαιοχώρι, όπως και στο Σπαθί εμφανίζονται στον βυθό, περιοχές άσπρου χρώματος και περιοχές πορτοκαλί χρώματος (μικροβιακά καλύμματα και μικροδιαφορές στη χημική σύσταση των ιζημάτων). Στην άσπρου χρώματος περιοχή του Παλαιοχωρίου, οι θερμοκρασία κυμαίνεται από 48 έως 71  $^{\circ}\text{C}$  και το pH μεταξύ των τιμών 4,8 και 5,4. Στα πορτοκαλί ιζήματα, η θερμοκρασία αυξάνεται (71-95  $^{\circ}\text{C}$ ) και το pH ελαττώνεται (4,6-5,1). Φαίνεται λοιπόν να υπάρχει μια σχέση υψηλής θερμοκρασίας-χαμηλού pH και ταυτόχρονα εκεί όπου ελαττώνεται το pH, αύξηση στη συγκέντρωση του  $\text{H}_2\text{S}$  (Price et al. 2013). Στο Σπαθί, η ένταση των υδροθερμικών φαινομένων είναι χαμηλότερη σε σχέση με το Παλαιοχώρι. Ωστόσο, στις περιοχές άσπρων ιζημάτων, εμφανίζονται υψηλότερες θερμοκρασίες (έως 81  $^{\circ}\text{C}$ ) και μεγαλύτερη συγκέντρωση  $\text{H}_2\text{S}$ , όμως στα πορτοκαλί ιζήματα η θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 82  $^{\circ}\text{C}$ .

Η παρουσία του αρσενικού, έχει πολύ μεγάλη σημασία, όχι μόνο επειδή είναι επικίνδυνο σαν στοιχείο, αλλά και γιατί έχει παρατηρηθεί πως σε υδροθερμικά συστήματα σαν της Μήλου, συνδέεται ο ισχυρός εμπλουτισμός του, με επιθερμική συσχέτιση με τον χρυσό (Au). Πιθανός είναι δηλαδή ο σχηματισμός επιθερμικών κοιτασμάτων χρυσού στις περιοχές αυτές.

Το αρσενικό μπορεί να βρεθεί τόσο στην υγρή (σαν άλμη), όσο και στην αέρια (υπέρθερμοι ατμοί) φάση των υδροθερμικών ρευστών σε συγκεντρώσεις που ξεπερνούν ακόμα και αυτές των μεσωκεάνιων ραχών (βλ. Κεφάλαιο 4).



**Εικόνα 3.6:** Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις σε πετρώματα του Παλαιοχωρίου στην Μήλο (φωτ. Αρχείο Β. Μέλφου).



**Εικόνα 3.7:** Φωτογραφία απελευθέρωσης φυσαλίδων στο Παλαιοχώρι. (<http://4.bp.blogspot.com/-PK4wgy-OE3E/UK7kSANrgaI/AAAAAAAAADpg/SiVo6dalOxA/s1600/bubbles.jpg>)

### 3.3 Σαντορίνη-Κολούμπο



**Εικόνα 3.8:** Αεροφωτογραφία της Σαντορίνης.

(<https://www.naftemporiki.gr/fu/p/1380916/638/399/0x0000000001492cf3/2/santorini-nea-stoixeia-gia-tin-arxaia-ekriksi-tou-ifaisteiou.jpg>)

#### 3.3.1 Γεωλογία

Η Σαντορίνη αποτελεί ένα από τα διασημότερα ελληνικά νησιά παγκοσμίως και ταυτόχρονα ένα από τα διασημότερα ηφαίστεια, του οποίου η γνωστότερη έκρηξη, αυτή της ύστερης εποχής του Χαλκού, αποτελεί σημαντικότερο περιστατικό έκρηξης των ιστορικών χρόνων. Στη σύγχρονη εποχή το νησιωτικό σύμπλεγμα αποτελείται από της νήσουν των Χριστιανών 12 km νοτιοδυτικά της Σαντορίνης, την Θήρα, την Θηρασιά, το Ασπρονήσι, την Παλαιά και Νέα Καμένη και το ηφαίστειο Κολούμπο, το οποίο βρίσκεται 8 km βορειοανατολικά. Όμως, η σημερινή της όψη διαφέρει πολύ από την όψη της πριν την έναρξη της ηφαιστειακής της δράσης. Το προ-ηφαιστειακό υπόβαθρο της Θήρας δείχνει σημάδια ενός νησιού όμοιου με τα γειτονικά νησιά, όπως η Αμοργός. Κυκλικού σχήματος, αποτελούμενο από σχιστόλιθους αλλά και ασβεστόλιθους ηλικίας Τριαδικό έως Τριτογενές. Τα πετρώματα αυτά υπέστησαν πτύχωση κατά την Αλπική ορογένεση. Η μεταμόρφωση οφείλεται στη σύγκρουση των τεκτονικών πλακών που σχημάτισαν το Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο, ηλικίας Ολιγόκαινο-Μειόκαινο. Τα πετρώματα του υποβάθρου εμφανίζονται στην

επιφάνεια του νησιού σε λίγα μόνο σημεία, καθώς επικαλύπτονται από τα προϊόντα των ηφαιστειακών εκρήξεων που θα αναλυθούν παρακάτω. Τα σημεία αυτά, είναι μερικές τοποθεσίες στο βουνό του Προφήτη Ηλία και στην καλντέρα, στα τοιχώματα της περιοχής του Αθηνιού.

Ηφαιστειότητα πριν την έκρηξη της ύστερης εποχής του Χαλκού: Η ηφαιστειακή δράση στο νησί αρχίζει πριν από περίπου 2-2,5 εκατομμύρια χρόνια. Πλινιακές εκρήξεις, σχηματισμός κώνων σκωριών και ροές λάβας αποτελούν τους βασικότερους τύπους ηφαιστειότητας. Τα παλαιότερα υλικά ηφαιστειακής προέλευσης εμφανίζονται σε Ακρωτήρι και Χριστιανά (ηλικίας 2εκ. χρόνια έως 500 χιλιάδες χρόνια), με τη μορφή δακτιτικών-ανδεσιτικών λαβών, που εμφανίστηκαν ως θόλοι, εξήλθαν από τη θάλασσα και σχημάτισαν τις λάβες και τις πυροκλαστικές αποθέσεις που συναντώνται στο Ακρωτήρι. Τα υλικά αυτά είναι υδροθερμικά εξαλλοιωμένα. Στη συνέχεια ακολουθούν τα ηφαίστεια του Περιστερίου και της Θήρας και οι εκρηκτικές φάσεις πριν από αυτή της ύστερης εποχής του Χαλκού, και αποθέτονται στο νησί κίσηρης, ιγκνιμβρίτες, πυροκλαστικές αποθέσεις, τόφφοι και υλικά ανδεσιτικής έως δακτιτικής σύστασης (Σολδάτος 2018).

Η Μινωική έκρηξη: Η έκρηξη της Ύστερης εποχής του Χαλκού συνέβη το 1613 π.Χ. και αποκαλείται από πολλούς Μινωική, καθώς πιθανολογείται σύνδεσή της με την εξαφάνιση του Μινωικού πολιτισμού. Είναι πολύ σημαντικό να δοθούν στοιχεία για το ηφαιστειακό αυτό συμβάν, μιας και τόσο ως ένα βαθμό το σχήμα, όσο και η τεκτονο στρωματογραφία και κατά συνέπεια η υδροθερμική δραστηριότητα του νησιού επηρεάστηκαν από αυτό. Επρόκειτο για μία εκπληκτικά ισχυρή πλινιακή έκρηξη, της οποίας η εκρηκτική στήλη υψώθηκε στα ~36-39 km και απελευθέρωσε ποσότητα μάγματος από 40-60 km<sup>3</sup>. Η διάρκεια της έκρηξης θεωρείται πως ήταν περίπου 18 ώρες. Βάσει των υλικών που έχουν αποθεθεί στη Σαντορίνη, η έκρηξη χωρίζεται σε 4 φάσεις. Κατά την πρώτη φάση αποτίθεται κίσηρης πτώσης. Η κίσηρης αυτή αποτελείται 90 % κλάσματα ρυοδακτιτικής σύστασης και 10 % στάχτη-λιθικά. Το πάχος της κυμαίνεται από λίγα εκατοστά έως 6 m. Στη δεύτερη φάση λαμβάνουν χώρα υδροηφαιστειακές εκρήξεις, λόγω εισχώρησης στο ηφαιστειακό οικοδόμημα νερού που πιθανώς βρίσκει δίοδο μέσω ρωγμών που δημιουργήσε η πρώτη φάση. Οι αποθέσεις είναι μεγακυματικές και αποτελούνται κυρίως από στάχτη και κίσηρη, και σε ένα μικρότερο ποσοστό από μεγάλα τεμάχια ογκόλιθων που παρασύρονται από το οικοδόμημα και αποθέτονται στη στάχτη της φάσης αυτής. Η Τρίτη φάση αποθέτει στο νησί ένα στρώμα ιδιαίτερα παχύ σε ορισμένες περιοχές (πάχος έως 55 m), αποτελούμενο από στάχτη, κίσηρη και μεγάλη ποσότητα αταξινόμητων λιθικών εντός αυτής. Τέλος η τέταρτη φάση έρχεται να κλείσει τον κύκλο αυτής της τρομερής έκρηξης με υλικά ελαφρώς

διαφορετικά της τρίτης. Εδώ τα προϊόντα εμφανίζονται με διαφορετικό χρώμα και πολύ μεγαλύτερη ποσότητα λιθικών, μικρότερου όμως μεγέθους από αυτά της τρίτης φάσης (Σολδάτος 2018).

Σύγχρονη δραστηριότητα και τεκτονική: Μετά τη Μινωική έκρηξη, φαίνεται να ακολουθεί μία παύση της ηφαιστειακής δραστηριότητας μέχρι το 197 π.Χ., όπου και ξεκινά ένας νέος κύκλος δράσης, σαφώς ασθενέστερης έντασης που διαρκεί μέχρι το 1950 μ.Χ. με πολυάριθμες παύσεις και επανενάρξεις της δραστηριότητας, δημιουργώντας την Παλαιά και Νέα Καμένη στο κέντρο της σημερινής καλντέρας.

Τεκτονικά το σύμπλεγμα Σαντορίνης-Κολούμπο ελέγχεται από μία ζώνη ρηγμάτων, η κατεύθυνση των οποίων είναι ΝΔ-ΒΑ. Η ζώνη αυτή αποτελεί την κύρια δίοδο προς την άνοδο μάγματος στην επιφάνεια και καθορίζει τις τοποθεσίες των ηφαιστειακών κέντρων. Χωρίζεται σε δυο παράλληλες-υποπαράλληλες γραμμές, την γραμμή του Κολούμπο που περνά από το υποθαλάσσιο ηφαίστειο του Κολούμπο και το Μεγάλο Βουνό και τη γραμμή Καμένης-Χριστιανών που ενώνει τα δύο αυτά σημεία (Rizzo et al. 2016). Γενικά η ζώνη αυτή των ρηγμάτων εκτείνεται από τα Χριστιανά έως και την Αμοργό και αποτελεί σημαντικό τεκτονικό χαρακτηριστικό του ηφαιστειακού τόξου (Nomikou et al. 2016).

Κολούμπο: Όσο αφορά τη γεωλογία του Κολούμπο, πρόκειται για ένα υποθαλάσσιο ηφαίστειο 8 km βορειοανατολικά της Σαντορίνης. Είναι κτισμένο πάνω στο Αλπικό ηπειρωτικό υπόβαθρο των Κυκλάδων και βρίσκεται μεταξύ των μεταμορφωμένων σχηματισμών και ιζημάτων που οφείλουν το σχηματισμό τους στην τεκτονική καταπόνηση που υφίστανται λόγω της λεκάνης της Άνδρου (ρηγματογενής ζώνη δεξιόστροφης περιστροφής). Ο επιμηκυμένος ηφαιστειακός του κώνος έχει διάμετρο στη βάση του 7 km, ο κρατήρας του ένα πλάτος της τάξης του 1,7 km και περίπου 450-490 m ύψος. Από τα τοιχώματα του κρατήρα φαίνεται πως επικρατούν υλικά πτώσης εκρηκτικής προέλευσης, με σύσταση κυρίως καλιούχα ρυοδακτιτική. Πάνω από αυτά συναντώνται χαλαρά υλικά, σιδηρούχα-(οξύ)υδροξείδια και ένα παχύ βακτηριακό κάλυμμα χρώματος καστανό-πορτοκαλί στην επιφάνεια του κρατήρα. Στο βάθος μεταξύ 492 και 504 μέτρων συναντάται πυκνό υδροθερμικό σύστημα του οποίου ο τρόπος δράσης θα αναλυθεί παρακάτω.

Σημαντικό γεωλογικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι, στους υδροθερμικούς πόρους του κρατήρα, αποθέτονται από τα ρευστά του συστήματος σουλφίδια εμπλουτισμένα σε μεταλλικά στοιχεία τα οποία έχουν κατασκευάσει καμινάδες, κάποιες εκ των οποίων φτάνουν και τα 4m σε ύψος (Kiliass et al. 2013). Δημιουργεί δηλαδή η υδροθερμική δραστηριότητα του Κολούμπο μία μεταλλοφορία της οποίας βασικά ορυκτά αποτελούν ο γαληνίτης, ο σιδηροπυρίτης, ο βαρύτης και ο σφαλερίτης. Παράλληλα εμφανίζονται πολλά

μεταλλικά στοιχεία, όπως Zn, Fe, Ag, Cu, Pb, Ti κ.ά. Τυπικά, οι καμινάδες χωρίζονται σε 3 επίπεδα. Το πρώτο, έναν εσωτερικό παχύ θειικό-σουλφιδικό πυρήνα, μετά ένα εξωτερικό στρώμα σουλφιδίων πλούσιων σε As και μία κρούστα σιδηρούχων υδροξειδίων ακολουθούμενη από το προαναφερθέν μικροβιακό κάλυμμα.

### 3.3.2 Υδροθερμική Δραστηριότητα

Το σύστημα Σαντορίνη-Κολούμπο αποτελεί ένα από τα γνωστότερα και πιο ενεργά υδροθερμικά συστήματα του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου με την εμφάνιση δραστηριότητας και στα δύο μέλη του συστήματος. Εκ των δύο, το Κολούμπο εμφανίζει μεγαλύτερης έντασης, αλλά κι έκτασης δράση. Η ανάλυση των υδροθερμικών αυτών φαινομένων θα πραγματοποιηθεί ξεχωριστά για το κάθε μέλος.

Το υδροθερμικό πεδίο της Σαντορίνης: Η υδροθερμική δραστηριότητα στο νησί της Σαντορίνης εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στο σύμπλεγμα των Καμένων, σε εγκολπώσεις μεταξύ της Παλαιάς και Νέας Καμένης ειδικότερα (Εικ. 3.9). Οι αγωγοί της Παλαιάς Καμένης εμφανίζονται στο εσωτερικό μέρος της εγκόλπωσης και η απελευθέρωση των ρευστών προκύπτει καθ' όλο το μήκος της, ενώ στη Νέα Καμένη η απελευθέρωση προκύπτει κυρίως στο εσωτερικότερο τμήμα της εγκόλπωσης. Οι μετρηθείσες θερμοκρασίες κοντά στους αγωγούς είναι μεταξύ 28 και 30 °C. Προκύπτουν δύο ζώνες εξαερισμού και στις δύο εγκολπώσεις, μία κοντά στην κεφαλή και μία προς το μεταξύ των Καμένων κανάλι αντίστοιχα. Στις εσωτερικές ζώνες τα ιζήματα εμφανίζουν ισχυρό εμπλουτισμό σε σίδηρο και όσο αυξάνεται η απόσταση από τους αγωγούς, τα ιζήματα εμφανίζουν αυξανόμενο εμπλουτισμό σε μαγγάνιο, με κορύφωση στις εξόδους των εγκολπώσεων, στο όριο δηλαδή των δύο ζωνών. Παρουσιάζει δηλαδή το μαγγάνιο θετική συσχέτιση με την απομάκρυνση από τις εξόδους των αγωγών (Varnavas and Cronan 2005).

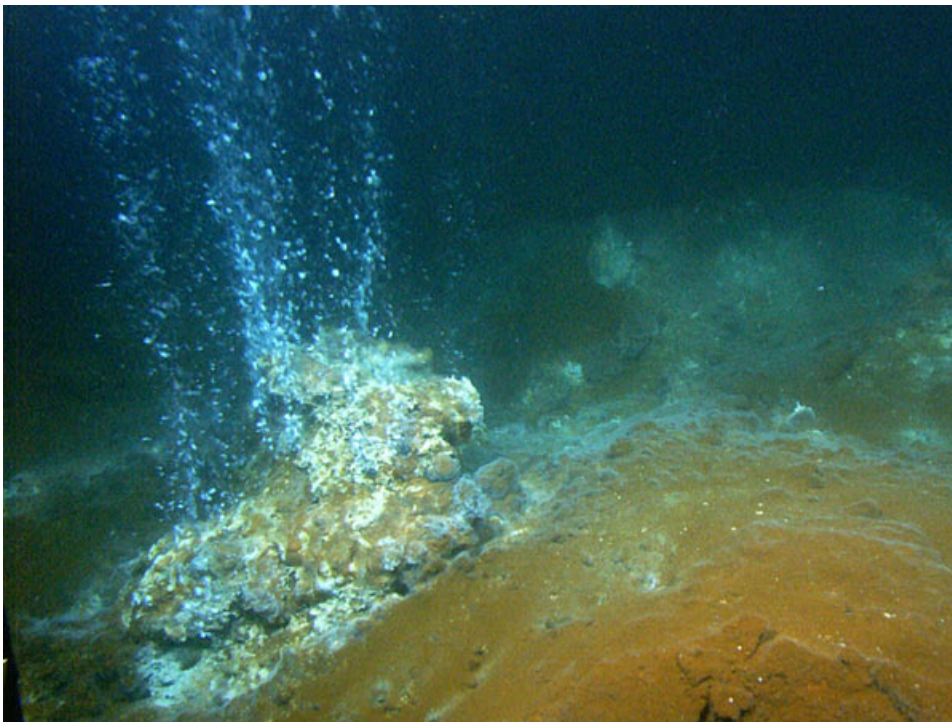


**Εικόνα 3.9 :** Η Παλαιά και Νέα Καμμένη. Εντός των κόκκινων κύκλων φαίνονται οι εγκολπώσεις στις οποίες παρατηρείται υδροθερμική δραστηριότητα. ([http://www.geo.auth.gr/765/6\\_santorini/images/64/64\\_kameni1.jpg](http://www.geo.auth.gr/765/6_santorini/images/64/64_kameni1.jpg))

Ο εμπλουτισμός σε Fe στις εσωτερικές ζώνες είναι πολύ σημαντικός καθώς οι τιμές του κυμαίνονται από 1000 έως 7000  $\mu\text{g/l}$ , τιμή περίπου χίλιες φορές μεγαλύτερη από την τυπική περιεκτικότητά του στο θαλασσινό νερό. Ωστόσο, στο όριο μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών ζωνών η τιμή του φαίνεται να επανέρχεται στις τυπικές του νερού. Το μαγγάνιο στα σημεία που εμφανίζει τον μεγαλύτερο εμπλουτισμό αγγίζει τιμές της τάξης των 1400  $\mu\text{g/l}$  και επίσης επανέρχεται στην τυπική του τιμή στα όρια των ζωνών. Σε επίπεδο ιχνοστοιχείων, εμπλουτισμός εμφανίζεται στο As το οποίο στην Σαντορίνη είναι υδροθερμικής προέλευσης και παίρνει τιμές από 6,5 έως 16,5  $\mu\text{g/l}$ . Η ποσότητα αυτή είναι περίπου από 3 έως 8 φορές μεγαλύτερη από ότι στο θαλάσσιο νερό (Να σημειωθεί πως οι συγκεκριμένες μετρήσεις είναι των Varnavas and Cronan (2005) και πιθανώς να υπάρχουν μικρές αλλαγές στα νούμερα αυτά, κατά το έτος συγγραφής της παρούσης εργασίας). Στα ιζήματα παρουσιάζεται ένας μικρός εμπλουτισμός στα στοιχεία Mo, Hg, Zn και V με τιμές από 17 έως 29  $\mu\text{g/l}$  Mo, 63 - 105  $\mu\text{g/l}$  Zn και 66 - 172  $\mu\text{g/l}$  V. Στα ιζήματα αυτά ο Fe εμφανίζεται με τιμές 17-32% σε εξωτερικές και εσωτερικές ζώνες αντίστοιχα, ενώ το μαγγάνιο σε ιζήματα της εξωτερικής ζώνης της Παλαιάς Καμένης έφτασε μέχρι και το 0,5 %.

Το υδροθερμικό πεδίο του Κολούμπο: Στο Κολούμπο η υδροθερμική δραστηριότητα προκύπτει εντός του κρατήρα, δια μέσω εξογκώσεων και πολλών καμινάδων (περισσότερες από 7 ενεργές), οι οποίες εκτονώνουν μεγάλη ποσότητα υδροθερμικών ρευστών με τη μορφή φυσαλίδων (Εικ. 3.10), αλλά και υδατικών ρευστών, με μέγιστη θερμοκρασία αυτών τους

220 °C, κάτω από όξινες συνθήκες (pH=5). Η σύσταση αυτών αποτελείται σχεδόν καθολικά από CO<sub>2</sub>, παρ' όλα αυτά οι καμινάδες εμφανίζονται έντονα εμπλουτισμένες σε Sb με μέση περιεκτικότητα 8,330 ppm, Ti ~ 510 ppm και Hg ~ 397 ppm. Ταυτόχρονα παρατηρείται μία επιθερμική συσχέτιση με Ag, Au, Pb και As. Οι μέσες συστάσεις από δείγματα καμινάδων είναι 871, 9, 35000, 3810 ppm αντίστοιχα. Η φυσαλίδες εμφανίζονται αναδυόμενες από μικρά διάκενα στο πλούσιο σε σίδηρο βακτηριακό κάλυμμα, ενώ από τις καμινάδες εξέρχονται κανονικά υδροθερμικά ρευστά (Kilias et al. 2016). Θετική συσχέτιση με την ταξινόμηση του ικανού για φιλτράρισμα σιδήρου (<45 μm) παρουσιάζει το NH<sub>4</sub>. Το μεγαλύτερο επίπεδο των στοιχείων αυτών, συναντάται στο βάθος των 500 m, ακριβώς πάνω δηλαδή, από τους ενεργούς υδροθερμικούς αγωγούς, με περιεκτικότητα 21 μmol/l. Η ποσότητα αυτή ελαττώνεται δραστικά μεταξύ του βάθους 500-400 μέτρα. Στον ιχνοστοιχειακό εμπλουτισμό εμπεριέχονται επίσης Zn 1,0 wt% με μέγιστο 6 wt%, και Cu με μέση εμφάνιση μικρότερη ή/και ίση με 0,37 wt%. Η παραπάνω μικρή περιεκτικότητα σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα ιχνοστοιχεία Co, Se και Mo βρίσκονται υπό του σημείου εντοπισμού τους είναι ενδεικτικά στοιχεία μη υψηλών γενικώς θερμοκρασιών (Kilias et al. 2013).



**Εικόνα 3.10:** Το βακτηριακό κάλυμμα στον κρατήρα του Κολούμπο και η ανάδυση φυσαλίδων. ([https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/06blacksea/background/plan/media/slideshow/gallery/album2/large/bacterial\\_mats.jpg](https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/06blacksea/background/plan/media/slideshow/gallery/album2/large/bacterial_mats.jpg))

Οι θερμοκρασίες του νερού στην περιοχή γενικά κυμαίνονται μεταξύ 19 και 22 °C (Christopoulou et al. 2015), ενώ τα υδροθερμικά ρευστά που εξέρχονται από τις καμινάδες,

αγγίζουν σε ορισμένες από αυτές τους 224 °C. Κατά την προσωπική άποψη του συγγραφέα, ο λόγος που δεν παρατηρούνται υψηλότερες θερμοκρασίες νερού στην ευρύτερη περιοχή, είναι γιατί τα υδροθερμικά ρευστά δεν εμφανίζουν αυτή την υπέρθερμη θερμοκρασία καθ' όλο το μήκος του υδροθερμικού πεδίου του Κολούμπο, το οποίο μπορεί να οφείλεται στην ορυκτογένεση της μεταλλοφορίας των καμινάδων, στην αλληλεπίδραση με το θαλάσσιο νερό που εισχωρεί μέσω ρωγμών βαθύτερα και ψύχει τα ρευστά, αλλά και πιθανώς στη μεταφορά θερμοκρασίας από τα ρευστά, στα γύρω πετρώματα κατά την άνοδο τους.

Ο τύπος δραστηριότητας στο σύστημα του Κολούμπο, η χημική και ορυκτολογική σύσταση των αποθέσεων, αλλά και των ίδιων των καμινάδων του, δείχνουν ένα πιθανό κοίτασμα τύπου Kuroko, τα οποία συχνά εμφανίζονται σε ζώνες υποβύθισης, όπως ισχύει και στο Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο. Αξιοσημείωτο είναι πως το κοίτασμα αυτό βρίσκεται σε στάδιο σχηματισμού, γεγονός που το καθιστά κατά τον συγγραφέα άξιο εκτενούς μελέτης και συνεχούς παρατήρησης.

### 3.4 Νίσυρος



**Εικόνα 3.11 :** Αεροφωτογραφία της Νισύρου. ([https://www.ikariaki.gr/wp-content/uploads/2017/03/720\\_506517\\_33632ce191-b3211a6e762d8394.jpg](https://www.ikariaki.gr/wp-content/uploads/2017/03/720_506517_33632ce191-b3211a6e762d8394.jpg))

#### 3.4.1 Γεωλογία

Η Νίσυρος αποτελεί το ανατολικό άκρο του ενεργού Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου και είναι ένα ηφαιστειακό νησί Τεταρτογενούς ηλικίας. Το υπόβαθρό της διαρθρώνεται από Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους και Νεογενή ιζήματα. Τα ηφαιστειακά προϊόντα που

υπέρκεινται του υποβάθρου αυτού συμπεριλαμβάνουν κυρίως ανδεσιτικές και βασαλτικές λάβες, αποθέσεις πτητικών υλικών πτώσης, δόμους ρυοδακτιτικής συστάσεως και πυροκλαστικά στρώματα. Η τελευταία εκρηκτική δραστηριότητα θεωρείται τουλάχιστον στα 25 χιλιάδες χρόνια πριν. Η νήσος γενικά έχει σχήμα κωνικό με διάμετρο 8 χιλιομέτρων και συνολική έκταση 42 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η καλντέρα της που βρίσκεται στην κοιλάδα του Λακκίου είναι νεότερη των 20 χιλιάδων ετών και προέκυψε από την κατάρρευση του ηφαιστειακού οικοδομήματος. Η διάμετρός της αγγίζει τα 4 km. Η κοιλάδα αυτή στο Λακκί παρουσιάζει σημάδια φρεατικών εκρήξεων με την ύπαρξη πολλών υδροθερμικών κρατήρων κυρίως στο νοτιότερο τμήμα και στο σύνολό της η περιοχή εμφανίζει υψηλή φουμαρολική δραστηριότητα, απελευθέρωση εδαφικών αερίων, υδροθερμικά επηρεασμένα τερέν και θερμικές ανωμαλίες (Venturi et al. 2018).

### 3.4.2 Υδροθερμική δραστηριότητα

Την περίοδο 2001-2002 πραγματοποιήθηκαν δύο εδαφικές καταρρεύσεις οι οποίες δημιούργησαν μία εδαφική χαράδρωση, με μήκος 600 m και πλάτος περίπου 5m (εικόνα 3.13), στην φυτοκαλυμμένη περιοχή του κεντρικού τμήματος της καλντέρας, στην πεδιάδα του Λακκίου. Η σχισμή αυτή αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης για τους Venturi et al. (2018). Τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών και χημικών αναλύσεων τους, οι μετρήσεις αερίων του εδάφους, μετρήσεις θερμοκρασίας των εδαφών αλλά και αναλύσεις φουμαρολικών αερίων κ.ά. δίνουν πολύ σημαντικές πληροφορίες για την υδροθερμική δραστηριότητα της Νισύρου.

Απόδειξη για την ύπαρξη σύγχρονης κυκλοφορίας υδροθερμικών ρευστών παρά την έλλειψη σημαντικής ανωμαλίας στην θερμοβαθμίδα, αποτέλεσαν τα αποτελέσματα ορυκτοχημικών αναλύσεων στα τοιχώματα της κατάρρευσης, αλλά και μετρήσεις και αναλύσεις δειγμάτων τα οποία λήφθηκαν από περιοχές υδροθερμικών και φουμαρολικών κρατήρων. Η κυκλοφορία των υδροθερμικών ρευστών ελέγχεται από ρήγματα και διακλάσεις, οι οποίες συμφωνούν με την τεκτονική του νησιού όπως φαίνεται από την παράλληλη εμφάνιση των υδροθερμικών κρατήρων, σε σχέση με τα τεκτονικά στοιχεία της Νισύρου.

Κύρια συστατικά των φουμαρολικών αερίων αποτελούν το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο μετρήθηκε από 784 έως 905 mmol/mol και το υδρόθειο από 78 έως 200 mmol/mol. Ακόμη, μετρήθηκαν σε μικρότερες συγκεντρώσεις μεθάνιο (από 1,8 έως 9,8 mmol/mol) και υδρογόνο (από 5,4 έως 11 mmol/mol). Η απουσία ανιχνεύσιμων συγκεντρώσεων σε ισχυρά

όξινα αέρια, αλλά και η μέτρηση της θερμοκρασίας στο σημείο βρασμού του νερού (97,8 έως 100,3 °C) κοντά στα σημεία εξόδου, δείχνει πιθανή τροφοδότηση των φουμαρολικών απορριμμάτων από υδροθερμικούς υδροφορείς (Venturi et al. 2018). Άζωτο, οξυγόνο και αρσενικό εμφανίζονται με σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις της τάξης των 2,9 mmol/mol, 0,010 mmol/mol και 0,011 mmol/mol αντίστοιχα. Όπου mmol/mol ή mmol/mol, η ποσότητα της ουσίας ανά ποσότητα δείγματος.

Τα πτητικά συστατικά αποτελούνται κυρίως από αρωματικά και αλκάνια, με πιθανή προέλευση τη θερμογενή υποβάθμιση οργανικής ύλης, με ταυτόχρονη συμβολή αβιοτικών διεργασιών για την παραγωγή μεθανίου. Τα C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> και C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> είναι τα αφθονότερα, με συγκεντρώσεις από 2402 έως 5128 nmol/mol και 2016 έως 4194 nmol/mol αντίστοιχα. Μικρότερες ποσότητες μετρήθηκαν για το C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (343 έως 730 nmol/mol), i-C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> (390 έως 620 nmol/mol). Ακόμη μετρήθηκαν C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S και C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>S, αλλά σε πολύ μικρές ποσότητες (από 2,5 έως 7,9 nmol/mol και 5,12 έως 17,2 nmol/mol αντίστοιχα).

Η τιμή του δ<sup>13</sup><sub>C-CO2</sub> κυμαίνεται από -1,4 έως -1,0 ‰ και ερμηνεύθηκε ως συσχετιζόμενο με θερμομεταμορφικές αντιδράσεις σε ασβεστόλιθους που φιλοξενούν τον βαθύ υδροθερμικό υδροφορέα.

Αναλύσεις XRD και ορυκτολογικές στα τοιχώματα της σχισμής αποκαλύπτουν πως υπάρχει αυξημένη εμφάνιση νοντρονίτη, αλλά και ορυκτών που τυπικά σχετίζονται με αργλικές αλλοιώσεις. Οι αλλοιώσεις αυτές αποτελούν απόδειξη ότι η περιοχή χαρακτηρίζεται και από υδροθερμική δράση με θέρμανση από ατμό. Τα τοιχώματα της σχισμής φανερώνουν επιπροσθέτως αλληλεπίδραση μεταξύ των υδροθερμικών ρευστών και των εναποθέσεων της καλντέρας λόγω της έντονης παρουσίας S, με συνέπεια την εμφάνιση μέχρι πολύ κοντά στην επιφάνεια στην περιοχή πλησίον της σχισμής, όξινου θεικού άλατος. Ταυτόχρονα ο ισχυρότατος εμπλουτισμός σε Ba και Sr που συνήθως σχετίζονται με τον σχηματισμό θεικών ορυκτών επιβεβαιώνουν την κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών πλούσιων σε H<sub>2</sub>S/SO<sub>4</sub>. Το Βάριο αποτελεί επίσης δείκτη για την ανάμειξη υδροθερμικών διαλυμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε SO<sub>4</sub> και μετεωρικών υδάτων (Venturi et al. 2018).

Όσο αφορά τις θερμοκρασίες στο έδαφος, όπως προαναφέρθηκε, δεν εμφανίζονται έντονες θερμικές ανωμαλίες και οι τιμές για τα 20 cm και 40 cm βάθος κυμαίνονται από 19,9 έως 97,9 και 18,6 έως 85,4 °C αντίστοιχα. Οι υψηλότερες τιμές με αναμενόμενη και σαφώς θετική συσχέτιση με το βάθος προκύπτουν στους κρατήρες των υδροθερμικών εμφανίσεων με την θερμοκρασία να κυμαίνεται από 25,4 έως 97,9 °C. Πέραν αυτών των τοποθεσιών, δεν εμφανίζεται στην ευρύτερη περιοχή αλλού θετική συσχέτιση θερμοκρασίας-βάθους. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με την επιβεβαιωμένη ύπαρξη υδροθερμικής

δραστηριότητας και αποδίδεται στα χαμηλής περατότητας ιζήματα απόθεσης της καλντέρας (Venturi et al. 2018), τα οποία παρεμποδίζουν σε πολλά σημεία την επιφανειακή εμφάνιση υδροθερμικής δράσης, την ροή θερμότητας, και επικαλύπτουν ακόμη πολλές δομές (διακλάσεις, ρήγματα) οι οποίες αποτελούν δίοδο ανόδου των υδροθερμικών διαλυμάτων καθιστώντας την αναγνώρισή της ύπαρξής τους δυσκολότερη.

Ταυτόχρονα, στη Νίσυρο, αλλά και στην Κω, παρατηρείται ρηχή υποθαλάσσια υδροθερμική δραστηριότητα. Τα κέντρα δράσης είναι το Γυαλί για τη Νίσυρο και δύο τοποθεσίες στην Κω, η Μπρος Θέρμη και ο κόλπος Κέφαλος. Η απελευθέρωση των υδροθερμικών ρευστών πραγματοποιείται μέσω αγωγών στα πετρώματα της κάθε περιοχής. Ηφαιστειακά πετρώματα για το Γυαλί, και ασβεστόλιθοι και τοπικές εμφανίσεις ηφαιστειακών υλικών για την Κω. Και στις δυο περιπτώσεις τα πετρώματα καλύπτονται από θαλάσσια ιζήματα, μέσα από τα οποία οι υδροθερμικοί αγωγοί εκλύουν τα ρευστά στο θαλάσσιο περιβάλλον. Έτσι ο μεταλλικός εμπλουτισμός εμφανίζεται και στα ίδια τα ιζήματα.

Στο Γυαλί, το pH κυμαίνεται μεταξύ 7,1 και 8,1 και οι θερμοκρασίες των ρευστών κυμάνθηκε κατά την περίοδο μέτρησής της από τους Varnavas and Cronan (1991) μεταξύ των 14,4-18,5 °C τον Απρίλιο και 27,8-33,0 °C τον Σεπτέμβριο. Οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας η οποία μετρήθηκε στους 14 °C και 22 °C για τα χρονικά διαστήματα αυτά κατ' αντιστοιχία. Ο Fe εμφανίζει τιμές από 4 έως 221 μg/l, το Ni από 0,6 έως 5,2 μg/l, ο Cu από 0,08 έως 1,22 μg/l, Zn από 0,8 έως 1,8 μg/l και το Mn από 4,5 έως 28,1 μg/l.

Για την Κω, το pH κυμαίνεται από 6,7 έως 8,2 και οι θερμοκρασίες από 14,2 έως 16,6 °C. Οι τιμές των στοιχείων είναι κοινές, με μόνες διαφορές την μη εμφάνιση Mn (υπό του σημείου εντοπισμού), και το ελαφρώς χαμηλότερο επίπεδο Ni, με μέση τιμή 1,6 μg/l.

Κατά τους Varnavas and Cronan (1991) οι διαφορές μεταξύ των δύο τοποθεσιών είναι πιθανό να οφείλονται στις διαφορές μεταξύ των πετρωμάτων του υποβάθρου, και υπάρχει επίσης πιθανότητα να σχηματίζονται υπόγεια, μεταλλικά σουλφίδια και στις δύο περιοχές.

Συμπερασματικά, η Νίσυρος χαρακτηρίζεται από σύγχρονη υδροθερμική δραστηριότητα, με πολλές εμφανίσεις σε όλο το νησί. Σημείο αξιοσημείωτου ενδιαφέροντος αποτελεί η πεδιάδα του Λακκίου, με εμφανίσεις κρατήρων φουμαρολικών εκρήξεων, υδροθερμικών αλλοιώσεων, εδαφικές καταρρεύσεις που οφείλονται στην κυκλοφορία υδροθερμικών διαλυμάτων κ.ά. φαινόμενα. Η προσωπική άποψη του συγγραφέα είναι πως θα πρέπει να γίνουν εκτεταμένες μελέτες στο νησί, ιδίως κοντά σε περιοχές που έχουν υποστεί ή υπόκεινται μέχρι και σήμερα τεκτονική καταπόνηση (ενεργά ρήγματα), καθώς η κυκλοφορία μέσω αυτών, υδροθερμικών ρευστών μπορεί να αποτελέσει κινητήρια δύναμη

για φαινόμενα αντίστοιχα της κατάρρευσης του 2001-2002, συν του επιστημονικού ενδιαφέροντος που χαρακτηρίζει τις ενεργές υδροθερμικές περιοχές.

Ακολουθούν αντιπροσωπευτικές εικόνες για την υδροθερμική δραστηριότητα στη Νίσυρο (Εικ. 3.12 – 3.14)



**Εικόνα 3.12 :** Φρεατικοί κρατήρες στην πεδιάδα του Λακκίου (<https://www.cjkoroneos.com/wp-content/uploads/2012/01/nisyros-caldera-holes-g.jpg>)



**Εικόνα 3.13 :** Τμήμα της εδαφικής κατάρρευσης (Hurni et al. 2005).



**Εικόνα 3.14 :** Ο μεγάλος υδροθερμικός κρατήρας στο Λακκί της Νισύρου (<http://www.kos.gr/DocLib/2f98544a3b294e4c93bf622f70ca0d12.jpg>)

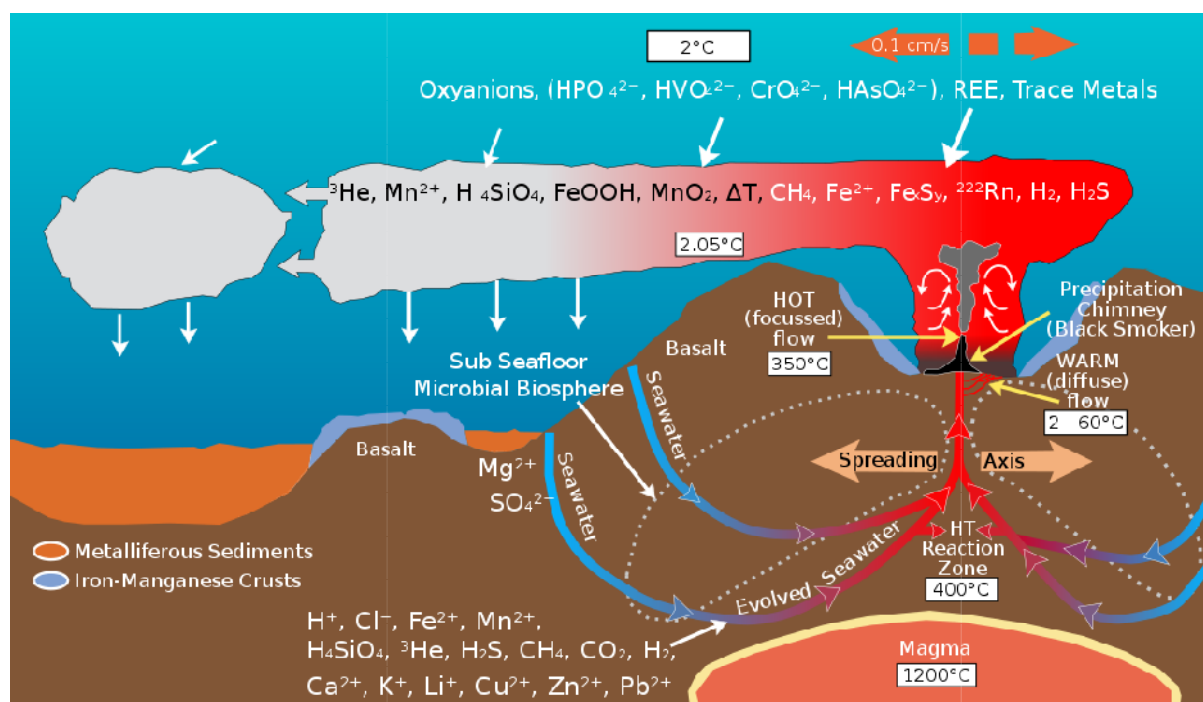
#### 4. Σύγκριση με αντίστοιχα συστήματα σε άλλες περιοχές του κόσμου

Η ύπαρξη υδροθερμικής δραστηριότητας σε συστήματα παρόμοια με αυτά του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου, παρατηρείται και μελετάται από αρκετά παλαιότερα σε θέσεις στον υπόλοιπο κόσμο, όπως για παράδειγμα κατά μήκος των μέσο-ωκεάνιων ραχών, στη Νέα Ζηλανδία, στην Ιαπωνία, στη Νέα Γουινέα και σε πολλά ακόμα μέρη. Βέβαια, υπάρχουν κάποιες σημαντικές διαφορές στο γεωτεκτονικό καθεστώς της κάθε περιοχής. Παραδείγματος χάριν, στο ελληνικό σύστημα που αναλύθηκε (βλ. Κεφάλαιο 3), η δραστηριότητα εμφανίζεται σε ηφαιστειακά κέντρα που δημιουργούνται στο πίσω όριο μιας οπισθοτόξιας λεκάνης, σε περιβάλλον σύγκλισης τεκτονικών πλακών, ενώ οι μέσο-ωκεάνιες ράχες (mid-ocean ridges) αποτελούν το ακριβώς αντίθετο γεωτεκτονικό περιβάλλον. Είναι περιβάλλοντα δημιουργίας ωκεάνιου φλοιού και διάνοιξης (εκτατικά περιβάλλοντα) αντί σύγκλισης. Παρ' όλα αυτά, κοινοί παραμένουν κάποιοι μηχανισμοί σχηματισμού υδροθερμικά ενεργών πεδίων. Στις μεσσωκεάνιες ράχες παρατηρούνται κυρίως δομές γνωστές ως "black smokers", ή μαύροι καπνιστές στα ελληνικά. Πρόκειται για καμινάδες που σχηματικά θυμίζουν αυτές του Κολούμπο, όμως κύρια διαφορά είναι η φύση του υλικού που απελευθερώνεται. Στο Κολούμπο, οι καμινάδες εκλύουν υδροθερμικά ρευστά διάφανα, συνήθως υδατικής φύσεως, αλλά και αέρια, ενώ οι black smokers απελευθερώνουν υλικό με τη μορφή μαύρου νέφους, στο οποίο και οφείλουν την ονομασία τους. Σε αυτούς, η

θερμοκρασία των υλικών μπορεί να φτάσει και τους 400 °C. Όπως και στην Ελλάδα, και πιο συγκεκριμένα στο ηφαίστειο Κολούμπο, έτσι και στην περίπτωση των black smokers, αποτέλεσμα της λειτουργίας των καμινάδων είναι ο πιθανός σχηματισμός μεγάλων κοιτασμάτων σουλφιδίων. Η διαδικασία σχηματισμού των αποθέσεων αυτών φαίνεται στην εικόνα 4.1. Ο εμπλουτισμός σε μεταλλικά στοιχεία και στις δύο περιπτώσεις προκύπτει από την αλληλεπίδραση των υδροθερμικών ρευστών, κατά την άνοδό τους, με τα πετρώματα του φλοιού μέσα στον οποίο κινούνται. Κύριο συστατικό των ρευστών αποτελεί το διοξείδιο του άνθρακα, με συμμετοχή υδρόθειου, μεθανίου και άλλων αερίων. Τα σουλφιδικά κοιτάσματα εμφανίζονται στην ίδια την καμινάδα και την άμεσα γειτονική περιοχή, με κύρια ορυκτά τον γαληνίτη (galena), βαρύτη (barite) κ.ά.. Στη Μήλο και το Κολούμπο εμφανίζονται μικροβιακά καλύμματα, συνήθως πορτοκαλί-καφέ χρώματος, στις περιοχές όπου τα ιζήματα είναι εμπλουτισμένα σε σίδηρο. Το φαινόμενο αυτό είναι κοινό και στα υπόλοιπα γνωστά συστήματα τέτοιου τύπου ανά τον κόσμο. Ο λόγος για τον οποίο η μεγαλύτερη συγκέντρωση σουλφιδικών υλικών βρίσκεται στην ίδια την καμινάδα, είναι ο εξής: Καθώς τα ρευστά εκλύονται από τον υδροθερμικό αγωγό (hydrothermal vent), έρχονται σε επαφή με το ψυχρό περιβάλλον νερό. Η απότομη ψύξη τους οδηγεί στην κοντινή εναπόθεση των μετάλλων και ορυκτών, περιμετρικά του αγωγού. Η συνεχής εναπόθεση νέων υλικών, προκαλεί την ανύψωση του υδροθερμικού οικοδομήματος, σχηματίζοντας την καμινάδα. Οι δομές αυτές ποικίλουν υψομετρικά, με συνήθη αναλογία παλαιού-υψηλού. Γνωστός για το πρωτοφανές μέγεθός του, υπήρξε ο μαύρος καπνιστής ονόματι "Godzilla", του Ειρηνικού Ωκεανού (στα ανοικτά του Όρεγκον), με ύψος 40 m. Δυστυχώς, το εντυπωσιακό οικοδόμημα κατέρρευσε το 1996.

Επιπλέον κοινή υδροθερμική δραστηριότητα, μεταξύ της Μήλου, του κόλπου της Kagoshima (Ιαπωνία), του Bay of Plenty στη Νέα Ζηλανδία και άλλων, καθίσταται η ανάδυση φουσαλίδων μέσω ιζημάτων σε ρηχά υποθαλάσσια υδροθερμικά συστήματα, ηφαιστειακών περιοχών. Κύριο συστατικό είναι το CO<sub>2</sub> με μέγιστη αναλογία 92,6 %. Συγκριτικά, στη Μήλο οι φουσαλίδες αποτελούνται κατά 54,9-91,9 % από διοξείδιο του άνθρακα, στον κόλπο της Kagoshima, από 71,3 έως 92,6 %, στη Νέα Ζηλανδία από 83 έως 88 %, ενώ σε συγκεκριμένες θέσεις στην Ιαπωνία, έχουν βρεθεί φουσαλίδες που περιέχουν μέχρι και 98 % CO<sub>2</sub>. Για τις ίδιες τοποθεσίες το μεθάνιο έχει μετρηθεί σε 0-9,7 % , 4,9-19,9 % και 9,5-14 % αντίστοιχα (Dando et al. 1995). Παρατηρείται δηλαδή, μικρότερη μέση ποσοστιαία συμμετοχή του διοξειδίου του άνθρακα στο σύστημα της Νέας Ζηλανδίας, με παράλληλα αυξημένη συμμετοχή του μεθανίου, ενώ η Μήλος και το σύστημα στον κόλπο της Kagoshima εμφανίζουν πολύ κοντινή συστατική αναλογία. Η απόκλιση αυτή οφείλεται

πιθανότητα σε πετρολογικές-ορυκτολογικές διαφορές των πετρωμάτων που αλληλεπιδρούν με τα υδροθερμικά ρευστά. Αναφέρεται στην μελέτη των Dando et al. (1995) με τίτλο Gas venting rates from submarine hydrothermal areas around the island of Milos, Hellenic Volcanic Arc, πως σε αρκετά από τα δείγματα που αναλύθηκαν, εμφανίζεται στη Μήλο, μεγαλύτερη συγκέντρωση υδρογόνου σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα, γεγονός που οφείλεται πιθανώς σε αλληλεπίδραση των ρευστών με μικροοργανισμούς των ιζημάτων.



**Εικόνα 4.1 :** Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας των Black smokers και του μηχανισμού απόθεσης μετάλλων στα συστήματα αυτά.

([https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrothermal\\_vent#/media/File:Deep\\_Sea\\_Vent\\_Chemistry\\_Diagram.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrothermal_vent#/media/File:Deep_Sea_Vent_Chemistry_Diagram.svg))

Η μοναδικότητα που χαρακτηρίζει ένα από τα υδροθερμικά συστήματα του ελληνικού χώρου, και πιο συγκεκριμένα το σύστημα της Μήλου, αποδεικνύεται και από τον εμπλουτισμό σε αρσενικό. Παλαιότερα, το υδροθερμικό σύστημα του κόλπου Tutum θεωρείτο το πλουσιότερο στο στοιχείο αυτό, με μέγιστη συγκέντρωση 12,8  $\mu\text{M}$ . Στις περιοχές τύπου BAB (Back-Arc-Basin) η συγκέντρωση μπορεί να φτάσει τα 11,5  $\mu\text{M}$  και στις MOR (Mid-Ocean-Ridge) τα 0,69  $\mu\text{M}$ . Θα φαινόταν τεράστιο το ποσό αρσενικού στον κόλπο Tutum, όμως στην Μήλο η μέγιστη συγκέντρωση είναι 78  $\mu\text{M}$  στην περιοχή του Παλαιοχωρίου, περίπου 6 φορές μεγαλύτερη από την περιοχή Tutum και σχεδόν 3000 φορές μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του αρσενικού, σε σχέση με το θαλάσσιο νερό. Πρόκειται για ποσότητα πρωτόγνωρη σε υδροθερμικό σύστημα και δεν έχει βρεθεί έως και τη χρονολογία συγγραφής της παρούσης εργασίας (2019), υδροθερμικό σύστημα ρηχού

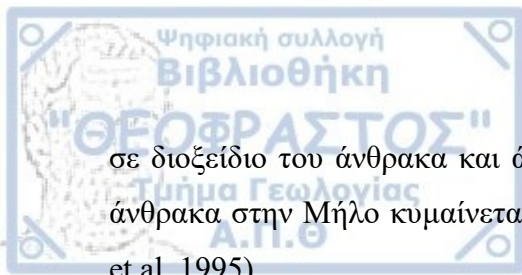
υποθαλάσσιου περιβάλλοντος και μη, με εμπλουτισμό σε αρσενικό ανάλογο με αυτόν της Μήλου. Τα συστήματα του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου γενικότερα εμφανίζουν πρωτοφανείς διαφορές με τα υπόλοιπα σύγχρονα συστήματα, λόγω των πολύ συγκεκριμένων γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή και ρυθμίζουν τις διαδικασίες αυτές.

## 5. Συμπεράσματα και συζήτηση

Το Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο, είναι καθ' όλο το μήκος του ένας τόπος υψηλού γεωλογικού ενδιαφέροντος, με πολύ πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα και σύγχρονη υδροθερμική δράση. Αυτή εμφανίζεται σε όλα τα μέλη του, δηλαδή, Μέθανα, Μήλο, Σαντορίνη, Νίσυρο, Κω. Τα παραπάνω συστήματα εμφανίζουν εμπλουτισμό σε πολλά μεταλλικά στοιχεία, όπως Zn, Pb, As και άλλα. Τα περισσότερα από τα στοιχεία αυτά προέρχονται από πετρώματα του υποβάθρου κάθε συστήματος, αλλά και από μανδυκά υλικά σε κάποιες περιπτώσεις. Αυτό καθιστά την μελέτη των υδροθερμικών συστημάτων του τόξου πολύ σημαντική, καθώς είναι δυνατό να αποσπαστούν πληροφορίες για την σύσταση του μανδύα κάτω από τον ελληνικό χώρο, και γενικότερα κάτω από όλα τα συστήματα αυτού του τύπου ανά τον κόσμο. Την μεγαλύτερη ένταση από τα προαναφερθέντα συστήματα παρουσιάζουν η Μήλος και το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο. Κατά τον συγγραφέα, θα πρέπει να τεθούν και τα δύο κέντρα ρηχής υποθαλάσσιας υδροθερμικής δραστηριότητας σε προτεραιότητα, όσο αφορά την μελέτη των συστημάτων, καθώς στη μία περίπτωση (Μήλος), πρόκειται για ένα σύστημα εξαιρετικά εμπλουτισμένο σε As, αλλά και γιατί είναι πιθανό να σχηματιστούν στην περιοχή αυτή κοιτάσματα χρυσού τύπου Carlin, ενώ στη δεύτερη (Κολούμπο), επρόκειτο για ένα επιβεβαιωμένο κοιτάσμα Kuroko στο στάδιο γένεσής του. Το παραπάνω δεν αναιρεί τη σημαντικότητα των υπόλοιπων συστημάτων, όπως της Νισύρου, στην οποία εμφανίζεται υδροθερμική δραστηριότητα, τόσο on όσο και offshore, με πολύ σημαντικά γεγονότα, όπως την εδαφική κατάρρευση του 2001-2002, που αποτέλεσε παράθυρο στις διεργασίες και τους μηχανισμούς που διέπουν το συγκεκριμένο σύστημα.

Κύρια συστατικά των ρευστών, συνιστούν συνήθως το διοξείδιο του άνθρακα, το υδροθείο κ.ά., με το pH των περισσότερων μελών του τόξου να κατατάσσεται στα όξινα. Οι θερμοκρασίες των ρευστών είναι υψηλές και στο Κολούμπο πολλές φορές ξεπερνούν τους 210 °C, ενώ οι τιμές της θερμοκρασίας στην άμεση γειτονική περιοχή των συστημάτων, είναι μεγαλύτερες του περιβάλλοντος θαλάσσιου νερού καθ' όλο το έτος.

Τα υδροθερμικά κέντρα του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου, εμφανίζουν φαινόμενα μοναδικά στον κόσμο, όπως την πολύ υψηλή συμμετοχή του αρσενικού, την εκπληκτική τιμή



σε διοξείδιο του άνθρακα και άλλα. Έχει μετρηθεί πως το η ετήσια έκλυση διοξειδίου του άνθρακα στην Μήλο κυμαίνεται από 0,8 έως 4,0 % αυτής των μεσωκεάνιων ραχών (Dando et al. 1995).

Σημαντικά ρωτήματα που δημιουργούνται από την παρατήρηση του μεταλλικού εμπλουτισμού κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου είναι τα εξής :

- Από πού προέρχονται τα μεταλλικά στοιχεία αυτά;
- Ποιος ο μηχανισμός εισαγωγής τους στα υδροθερμικά ρευστά;
- Ποιοι παράγοντες ρυθμίζουν την απόθεση των μετάλλων κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου και ποιες πληροφορίες μπορούν να αποκτηθούν από την μελέτη των παραγόντων, τόσο για την απόθεση των μετάλλων, όσο και για το γεωλογικό καθεστώς της εκάστοτε τοποθεσίας;
- Τα υδροθερμικά ρευστά που εκλύονται, που οφείλουν τον σχηματισμό τους και ποια η προέλευσή τους;

Απαντήσεις στις παραπάνω ερωτήσεις και σε πολλές ακόμη μπορούν να φέρουν στο φώς πληθώρα δεδομένων σημαντικών για την ανάπτυξη της επιστήμης της γεωλογίας στον τόπο μας, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Κατά τον συγγραφέα, άξιο μελέτης είναι το ενδεχόμενο ύπαρξης υδροθερμικών πεδίων, με κοιτάσματα μεταλλευμάτων κατά μήκος του υπόλοιπου τόξου, στα ανοικτά, πέραν των περιοχών κοντά στα ηφαιστειακά κέντρα.

## 6. Βιβλιογραφία

- Alfieri, D. (2006). *Geological, geochemical and mineralogical studies of shallow submarine epithermal mineralization in an emergent volcanic edifice, at Milos island (western side), Greece*. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Department Geowissenschaften der Universität Hamburg, Germany, p. 294.
- Alfieri, D. (2013). Shallow submarine epithermal Pb–Zn–Cu–Au–Ag–Te mineralization on western Milos Island, Aegean Volcanic Arc, Greece: Mineralogical, geological and geochemical constraints, *Ore Geology Reviews*, 53, 159-180.
- Botz, R. et al. (1996). Hydrothermal gases offshore Milos island, Greece, *Chemical Geology*, 130, 3-4, 161-173.
- Christopoulou, M.E. et al. (2015). Influence of hydrothermal venting on water column properties in the crater of the Kolumbo submarine volcano, Santorini volcanic field (Greece), *Geo-Marine Letters*, 36, 1, 15-24.
- Dando, P. R. et al. (1995). Gas venting rates from submarine hydrothermal areas around the island of Milos, Hellenic Volcanic Arc, *Continental Shelf Research*, 15, 8, 913-929.
- Fru, E.C. et al. (2018). Arsenic and high affinity phosphate uptake gene distribution in shallow submarine hydrothermal sediments, *Biogeochemistry*, 141, 1, 41-62.
- Fytikas, M. (1989). Updating of the geological and geothermal reaserch on Milos island, *Geothermics*, 18, 4, 485-496.
- Fytikas, M., & Marinelli, G. (1976). *Geology and geothermics of the Island of Milos (Greece)*. (No. NP-22876). Institute of Geology and Mining Research, Athens (Greece); Pisa Univ.(Italy). Istituto di Mineralogia e Petrografia.
- Georgopoulos, G., Mitsis, I., Argyraki, A., Stamatakis, M. (2018). Enivronmental availability of ultramafic rock derived trace elements in the fumarolic-geothermal field of Soussaki area, Greece, *Applied Geochemistry*, 92, 9-18.
- Hurni<sup>1</sup>, L., Jenny<sup>1</sup>, B., Gogu<sup>1</sup>, R., Freimark<sup>1</sup>, H., Terribilini, A., & Dietrich, V. (2005). Geowarn: a web-based atlas information system for volcanic monitoring. (web link GEOWARN 2005).
- Kilias, S. et al. (2013). *New insights into hydrothermal vent processes in the unique shallow-submarine arc-volcano, Kolumbo (Santorini), Greece*. Scientific Reports, volume3, Article number: 2421.

- Kilias, S. et al. (2016). Antimony fixation in solid phases at the hydrothermal field of Kolumbo submarine arc-volcano (Santorini): Deposition model and environmental implications, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 50, 4, 2200-2209.
- Matiatos, I., Alexopoulos, A. (2013). Analysis of temporal hydrothermal and isotopic variations in spring waters of eastern Peloponnesus (Greece), *Bulletin of the geological society of Greece*, 47, 2, 750-760.
- Nomikou, P. et al. (2016). Tectono-stratigraphic evolution through successive extensional events of the Anydros Basin, hosting Kolumbo volcanic field at the Aegean Sea, Greece, *Tectonophysics*, 671, 202-217.
- Price, R.E. et al. (2013). Processes influencing extreme As enrichment in shallow-sea hydrothermal fluids of Milos Island, Greece, *Chemical Geology*, 348, 15-26.
- Rizzo, A.L. et al. (2016). *Kolumbo submarine volcano (Greece): An active window into the Aegean subduction system*. Scientific Reports volume6, Article number: 28013
- Varnavas, S.P., & Cronan, D.S. (1991). Hydrothermal metallogenic processes off the islands of Nisiros and Kos in the Hellenic Volcanic Arc, *Marine Geology*, 99, 1-2, 109-133.
- Varnavas, S.P., & Cronan, D.S. (2005). Submarine hydrothermal activity off Santorini and Milos in the Central Hellenic Volcanic Arc: A synthesis, *Chemical Geology*, 224, 1-3, 40-54.
- Venturi, S. et al. (2018). Active hydrothermal fluids circulation triggering small-scale collapse events: the case of the 2001–2002 fissure in the Lakki Plain (Nisyros Island, Aegean Sea, Greece), *Natural Hazards*, 93, 2, 601-626.
- Wu, S.F. et al. (2016). New boron isotopic evidence for sedimentary and magmatic fluid influence in the shallow hydrothermal vent system of Milos Island (Aegean Sea, Greece), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310, 58-71.
- Κατσένης, Η. (2014). Θαλάσσια γεωλογική δομή και σεισμική στρωματογραφία της καλδέρας της Σαντορίνης, Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστημίου Πατρών.
- Μουντράκης, Δ. Μ. (2010). Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη: UNIVERSITY STUDIO PRESS A.E.
- Σολδάτος, Τ. (2018). Σαντορίνη Ηφαιστειολογικός οδηγός [πανεπιστημιακές σημειώσεις]. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, εαρινό εξάμηνο 2017-2018. Θεσσαλονίκη.