



Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

Χερσαίες και Υποθαλάσσιες Ηφαιστειακές Δομές  
του Ελληνικού Τόξου

Πτυχιακή Εργασία

Μάνος Ιωαννης  
Α.μ. 1114201400053

Επιβλέπουσα καθηγήτρια  
Νομικού Παρασκευή, Αναπλ. Καθηγήτρια

Αθήνα, 2021

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	3
1. Εισαγωγή.....	4
1.1 Ηφαίστεια.....	4
1.2 Υποθαλάσσια ηφαιστειότητα.....	6
1.3 Ηφαιστειακό τόξο.....	7
1.4 Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο.....	8
2. Ηφαιστειακό γκρουπ Μεθάνων.....	9
2.1 Χερσαία ηφαιστειότητα.....	10
2.1.1 Χερσόνησος των Μεθάνων.....	10
2.2 Υποθαλάσσια ηφαιστειότητα.....	14
2.2.1 Το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό πεδίο του Πausανία.....	14
3. Ηφαιστειακό Γκρουπ Μήλου - Αντιμήλου.....	19
3.1 Χερσαία ηφαιστειότητα.....	20
3.1.1 Μήλος.....	20
3.1.2 Αντίμηλος.....	23
3.2 Υποθαλάσσια ηφαιστειότητα.....	24
3.2.1 Υποθαλάσσιο Ηφαιστειακό Πεδίο Αντιμήλου.....	24
3.2.2 Υδροθερμικό Ατμιδικό Πεδίο Παλαιοχωρίου.....	25
4. Γκρουπ Σαντορίνης : Σαντορίνη - Χριστιανά - Κολούμπο.....	28
4.1 Χερσαία Ηφαιστειότητα.....	29
4.1.1 Χριστιανά.....	29
4.1.2 Σαντορίνη.....	31
4.2 Υποθαλάσσια Ηφαιστειότητα.....	34
4.2.1 Χριστιανά.....	34
4.2.2 Σαντορίνη.....	35
4.2.3 Ηφαιστειακό Σύμπλεγμα του Κολούμπο.....	37
5. Ηφαιστειακό Γκρουπ Νίσυρου.....	42
5.1 Χερσαία Ηφαιστειότητα .....	44
5.1.1 Νίσυρος.....	44
5.1.2 Στρογγύλη.....	46
5.1.3 Γυαλί.....	47
5.1.4 Παχειά - Περγούσα.....	47
5.2 Υποθαλάσσια Ηφαιστειότητα.....	48
5.2.1 Νίσυρος.....	48
5.2.2 Άβυσσος.....	49
5.2.3 Καλδέρα της Κεφάλου.....	50
5.2.4 Ηφαιστειακά Κονδελιούσας.....	52
6. Συμπεράσματα.....	53
7. Βιβλιογραφία.....	55

## Περίληψη

Η Ελλάδα είναι μία από τις χώρες με την εντονότερη σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα στην Ευρώπη. Η δραστηριότητα αυτή οφείλεται στην γεωγραφική της θέση η οποία βρίσκεται στο σημείο όπου η Αφρικανική λιθοσφαιρική πλάκα υποβυθίζεται κάτω από το ενεργό περιθώριο της λιθοσφαιρικής πλάκας της Ευρώπης. Χάρη σε αυτό το γεωτεκτονικό πλαίσιο δημιουργήθηκε το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο κατά το ύστερο Ηώκαινο στις παράκτιες περιοχές του βόρειου Αιγαίου. Από το ύστερο Πλειόκαινο όμως ξεκίνησε η ηφαιστειακή δραστηριότητα στην σύγχρονή του θέση κατά μήκος του νότιου περιθωρίου της Κυκλαδικής πλατφόρμας και της Κρητικής οπισθοτάφρου. Το ηφαιστειακό αυτό τόξο του νοτίου Αιγαίου αποτελείται τόσο από χερσαίες όσο και από υποθαλάσσιες ηφαιστειακές δομές, οι οποίες ομαδοποιούνται με βάση την γεωγραφική τους θέση σε τέσσερα γκρουπ. Αυτά είναι τα γκρουπ των Μεθάνων, της Μήλου, της Σαντορίνης και της Νισύρου. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζονται αναλυτικά οι κυριότερες ηφαιστειακές δομές από τον χερσαίο και τον υποθαλάσσιο χώρο κάθε γκρουπ. Δίνεται έμφαση στα γεωμορφολογικά τους χαρακτηριστικά αλλά και στην ιστορική και γεωλογική τους εξέλιξη. Η παρουσίασή τους ξεκινάει από το δυτικότερο τμήμα του ηφαιστειακού τόξου στα Μέθανα και τελειώνει με το ανατολικότερο του τμήμα στην περιοχή της Νισύρου.

## Abstract

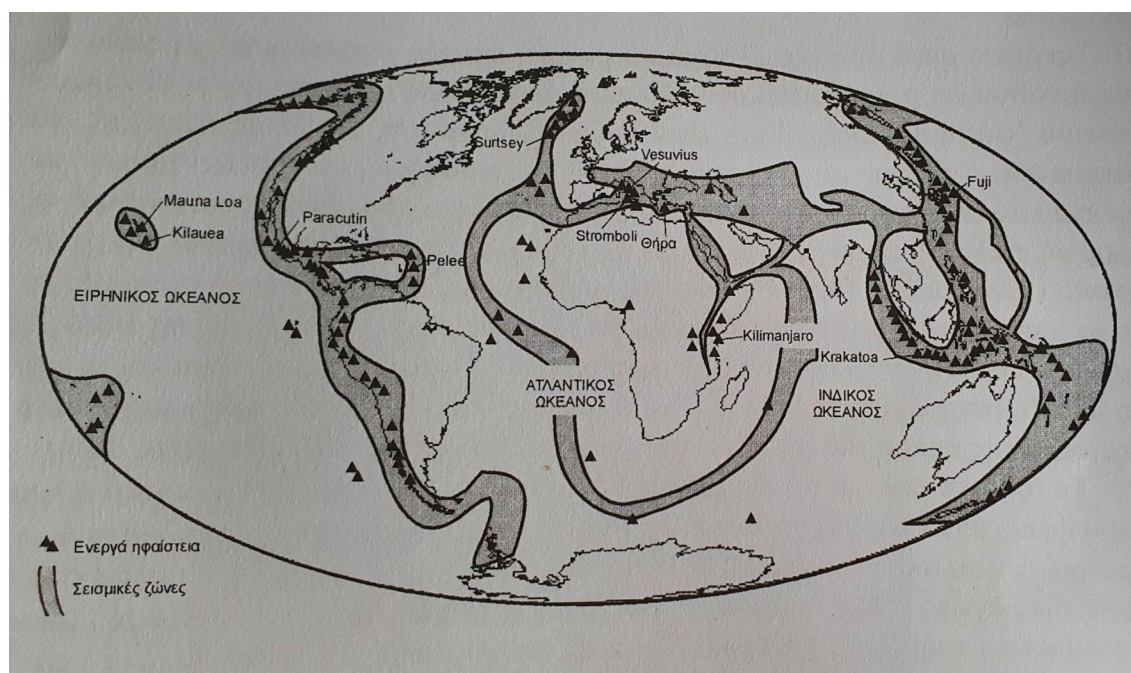
Greece is one of the countries with the most intense seismic and volcanic activity in Europe. This activity is due to its geographical location which is at the point where the African lithospheric plate subducts below the active margin of the European lithospheric plate. This geotectonic context gave rise to the Greek volcanic arc during the late Eocene in the coastal areas of the northern Aegean. However, from the late Pliocene, volcanic activity began in its modern position along the southern margin of the Cycladic platform and the Cretan back-arc. This volcanic arc of the southern Aegean consists of both onshore and submarine volcanic structures, which are grouped into four groups based on their geographical position. These are the groups of Methana, Milos, Santorini and Nisyros. In this thesis the main volcanic structures from the onshore and offshore areas of each group are presented in detail. Emphasis is placed on their geomorphological characteristics and their historical and geological evolution. Their presentation starts from the westernmost part of the volcanic arc in Methana and ends with the easternmost part in the area of Nisyros.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Ηφαίστεια

Ως ηφαίστεια χαρακτηρίζονται οι θέσεις πάνω στην επιφάνεια της γης, στις οποίες βρίσκεται διέξοδος και εκχύνεται διάπυρο ρευστό υλικό ενδογήινης προέλευσης (μάγμα) με την μορφή λάβας, μαζί με στερεά και αέρια αναβλήματα υψηλών θερμοκρασιών<sup>1</sup>. Ως μάγμα θεωρείται ένα ρευστό κυρίως πυριτικής σύστασης που περιέχει διαλυμένες φάσεις αερίων (κυρίως υδρατμών) καθώς επίσης και στερεά ορυκτολογικά συσσωματώματα που προέρχονται από την προοδευτική κρυστάλλωση του μαγματικού τήγματος. Όταν το μάγμα φτάνει στην επιφάνεια της γης διαμέσου ενός ηφαιστειακού αγωγού, απελευθερώνονται ταχύτατα στην ατμόσφαιρα τα διαλυμένα αέρια και έτσι το τήγμα που περισσεύει μετατρέπεται σε συμπαγή λάβα<sup>2</sup>. Στα σημεία εξόδου του μάγματος σχηματίζονται από τα ηφαιστειακά αναβλήματα χαρακτηριστικές γεωμορφές κωνικού συνήθως σχήματος, που ανάλογα τον χώρο που δημιουργούνται, θαλάσσιος πυθμένας ή χέρσος, ονομάζονται αντίστοιχα υποθαλάσσια ή χερσαία ηφαίστεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι, αν και δύσκολα προς την παρατήρησή τους, τα υποθαλάσσια υπερέχουν συντριπτικά σε σχέση με τα χερσαία με ποσοστό 80%.<sup>3</sup>

Οι θέσεις εκδήλωσης ενός ηφαιστείου δεν είναι καθόλου τυχαία και αυτό αποδεικνύεται από την γεωγραφική κατανομή των ενεργών ηφαιστειών σε παγκόσμια κλίμακα. Από τις θέσεις αυτές προκύπτει λοιπόν ότι η σύγχρονη ηφαιστειακή δραστηριότητα εντοπίζεται σε συγκεκριμένες γραμμές, οι οποίες σχεδόν συμπίπτουν με τις σεισμικά ενεργές ζώνες της γης και γενικά ταυτίζονται με τα όρια απόκλισης, σύγκλισης και σύγκρουσης των λιθοσφαιρικών πλακών. Στα εσωτερικά τμήματα των λιθοσφαιρικών πλακών εκδηλώνεται σχετικά μικρό ποσοστό ηφαιστειακής δραστηριότητας, ενώ δεν παρατηρείται σε όρια πλευρικής ολίσθησης<sup>4</sup>.



**Εικόνα 1:** Χάρτης με τα κυριότερα ενεργά ηφαίστεια της Γης, που εντοπίζονται πάνω στις σεισμικές ζώνες (σκιασμένες περιοχές) (paranikolaou et al., 2007)

1. Παπανικολάου Δ. Ι., Σίδερης Χρ. Ι., Γεωλογία η επιστήμη της Γης, Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη, έβδομη έκδοση 2014
2. Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014
3. Παπανικολάου Δ. Ι., Σίδερης Χρ. Ι., Γεωλογία η επιστήμη της Γης, Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη, έβδομη έκδοση 2014
4. Παπανικολάου Δ. Ι., Σίδερης Χρ. Ι., Γεωλογία η επιστήμη της Γης, Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη, έβδομη έκδοση 2014

Με δεδομένο λοιπόν ότι η ηφαιστειότητα συνδέεται κυρίως με διαδικασίες στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών μπορεί να διακριθούν παγκοσμίως τρεις μεγάλες γραμμές ενεργών ηφαιστειών:

- Οι γραμμές των μεσοωκεάνιων ραχών που αποτελούν την μεγαλύτερη διαχρονική δομή στην γήινη επιφάνεια με συνολικό μήκος πάνω από 84.000 χλμ. Οι μεσοωκεάνιες ράχες εγκαθίστανται πάνω σε αποκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών, κατά μήκος των οποίων συντελείται συνεχής διείδυση μάγματος ασθenoσφαιρικής προέλευσης και έκχυση λάβας στους ωκεάνιους πυθμένες. Τα ηφαίστεια των μεσοωκεάνιων ραχών είναι υποθαλάσσια (εφόσον εδράζονται σε ωκεάνιους πυθμένες) και σε ελάχιστες περιπτώσεις φτάνουν σε ύψη τέτοια ώστε τα κορυφαία τους τμήματα να αναδύονται πάνω από την στάθμη της θάλασσας με την μορφή ηφαιστειογενών νησιών (π.χ. Ισλανδία/ Βόρειος Ατλαντικός, Bouvet/ Νότιο Ατλαντικός, Νησιά του Πάσχα/ Ειρηνικός)
- Η περι-ειρηνική γραμμή που σχηματίζει ένα είδος «πύρινου δακτυλίου» (Ring of Fire) γύρω από την Ειρηνικό Ωκεανό (δυτικές ακτές Βόρειας και Νότιας Αμερικής, Αλεούτια Νησιά Βόρειου Ειρηνικού, Ιαπωνία, Φιλιππίνες μέχρι την Νέα Ζηλανδία). Τα ηφαίστεια αυτά συνδέονται με συγκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών και πιο συγκεκριμένα με την εξελισσόμενη υποβύθιση ωκεάνιου φλοιού του Ειρηνικού Ωκεανού κάτω από όλες τις λιθοσφαιρικές πλάκες που τον περιβάλλουν (Βόρειας και Νότιας Αμερικής, Ευρασιατικής και Αυστραλοϊνδικής).
- Η μεσογειακή-μεσοασιατική γραμμή, που περιλαμβάνει τα ηφαίστεια της Νότιας Ιταλίας (Λίπαρι, Βεζούβιος, Αίτνα, Στρόμπολι κ.α.), τα ελληνικά ηφαίστεια του Νοτίου Αιγαίου (Μέθανα, Μήλος, Σαντορίνη, Νίσυρος κ.τ.λ.) και τα ηφαίστεια της ζώνης Καυκάσου/ Αρμενίας – Ιμαλαΐων. Πρόκειται για ηφαιστειότητα που συνδέεται είτε με συγκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών στην περίπτωση των τόξων ηφαιστειών της ανατολικής Μεσογείου, δηλαδή με την εξελισσόμενη υποβύθιση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας της αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική, είτε με όρια σύγκρουσης στην περίπτωση Καυκάσου/ Αρμενίας (ολοκληρωμένη σύγκρουση της αραβικής με την Ευρασιατική πλάκα).<sup>5</sup>

Οι περιπτώσεις που συναντάμε ηφαιστειότητα στα εσωτερικά τμήματα των πλακών, είτε ηπειρωτικών είτε ωκεάνιων, παρουσιάζουν και αυτές γραμμική διάταξη. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η γραμμή ηφαιστειών στα νησιά του συμπλέγματος της Χαβάης που αναπτύσσεται μέσα στην ωκεάνια πλάκα του Ειρηνικού, και η γραμμή ηφαιστειών στο κέρασ της Ανατολικής Αφρικής (Κιλιμάντζαρο κ.α.), μέσα στην Ηπειρωτική πλάκα της Αφρικής. Στην πρώτη περίπτωση η ηφαιστειακή δραστηριότητα ερμηνεύεται με βάση την θεωρία των θερμών κηλίδων. Θερμές κηλίδες (Hotspots) ονομάζονται ορισμένες σταθερές και γεωγραφικά αμετακίνητες σημειακές εστίες εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών κάτω από την λιθόσφαιρα, με βαθιές «ρίζες», που θεωρείται πως φτάνουν μέχρι τον πυρήνα. Καθώς μια λιθοσφαιρική πλάκα μετακινείται αργά πάνω από μια θερμή κηλίδα, υφίσταται γραμμική ανάτληξη που εκδηλώνεται με σειρά ηφαιστειών. Η ηλικία των ηφαιστειών παρουσιάζει μια συγκεκριμένη χρονική διαβάθμιση, ανάλογα με την φορά κίνησης της πλάκας, π.χ. για την περίπτωση της Χαβάης τα ηφαίστεια είναι διαδοχικά παλαιότερα προς τα βορειοδυτικά, γιατί η φορά κίνησης της ωκεάνιας πλάκας είναι προς αυτή την κατεύθυνση. Γραμμές ηφαιστειών λόγω θερμών κηλίδων εμφανίζονται εκτός από ωκεάνιες και σε ηπειρωτικές πλάκες (π.χ. Yellowstone, Η.Π.Α.). Η δεύτερη περίπτωση των ηφαιστειών της Ανατολικής Αφρικής συνδέεται με τις πρώιμες φάσεις διάνοιξης ενός νέου ωκεανού. Συγκεκριμένα ένα τεράστιο «ράγισμα» του ηπειρωτικού φλοιού της Αφρικής μήκους 4.000 χλμ. εκτείνεται από την Ερυθρά Θάλασσα και τον Κόλπο του Άντεν μέχρι τις εκβολές του ποταμού Ζαμβέζη στο στενό της Μαδαγασκάρης. Το εφελκυστικό πεδίο τάσεων στην ρηξικοιλιάδα αυτή οδηγεί σε σταδιακή διεύρυνση και βάθυνση των ταφρολεκάνων. Η βίαιη αυτή διαδικασία συνοδεύεται από εκδηλώσεις ηφαιστειακής (π.χ. Κιλιμάντζαρο) και σεισμικής δραστηριότητας κατά μήκος της<sup>6</sup>.

5. Παπανικολάου Δ. Ι., Σίδερης Χρ. Ι., Γεωλογία η επιστήμη της Γης, Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη, έβδομη έκδοση 2014

6. Παπανικολάου Δ. Ι., Σίδερης Χρ. Ι., Γεωλογία η επιστήμη της Γης, Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη, έβδομη έκδοση 2014

## 1.2 Υποθαλάσσια ηφαιστειότητα

Από την συνολική ηφαιστειακή δραστηριότητα, που αναφέραμε προηγουμένως, το 75% λαμβάνει χώρα στον πυθμένα του ωκεανού. Τα υποθαλάσσια ηφαίστεια τα συναντάμε στα εξής γεωτεκτονικά περιβάλλοντα: α) Στις γραμμές των μεσοωκεάνιων ραχών, οι οποίες καλύπτουν το 33% περίπου του συνολικού ωκεάνιου πυθμένα. Οι μεσοωκεάνιες ράχες αποτελούν ένα σύνολο από υποθαλάσσιες οροσειρές που διασχίζουν όλους τους ωκεανούς και κατά μήκος τους χύνεται βασαλτικό υλικό, που προέρχεται από τον μανδύα της γης. Τέτοιο παράδειγμα είναι η μεσοατλαντική ράχη που διασχίζει όλο τον ατλαντικό ωκεανό από τον Βορρά μέχρι τον Νότο. β) Στο εσωτερικό λιθοσφαιρικών πλακών κοντά στα σημεία υποβύθισης μιας λιθοσφαιρικής πλάκας κάτω από την άλλη. Εκεί έχουμε σημεία που αναβλύζει υλικό του μανδύα και δημιουργεί ηφαίστεια είτε σε υποθαλάσσια σημεία είτε στην χέρσο. Τα σημεία αυτά των ηφαιστειών έχουν γραμμική διάταξη παράλληλα με τα όρια υποβύθισης των πλακών και δημιουργούν τα ηφαιστειακά τόξα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι και το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου, στο οποίο έχουμε μαζί με τα χερσαία ηφαίστεια και υποθαλάσσιες εμφανίσεις. γ) Σε σημείο εσωτερικά των λιθοσφαιρικών πλακών, όπου συναντάμε τις θερμές κηλίδες (hot spots) που αναφέραμε προηγουμένως. Τέτοια ηφαίστεια παρατηρούνται κατανεμημένα πάνω σε γραμμές και σχηματίζουν αλυσίδες από ηφαίστεια. Χαρακτηριστικά τέτοια παραδείγματα συναντάμε στον Ειρηνικό ωκεανό, όπως η αλυσίδα των νησιών της Χαβάης.

Η έρευνα του θαλάσσιου πυθμένα για τον εντοπισμό και στη συνέχεια την μελέτη των υποθαλάσσιων ηφαιστειών πραγματοποιείται με σύγχρονες γεωφυσικές τεχνικές από την επιφάνεια της θάλασσας και με την παρατήρηση και δειγματοληψία από κοντά με την χρήση επανδρωμένων και μη βαθυσκάφων.

Για να μελετήσουμε την βυθομετρία, την μορφολογία αλλά και την υποδομή του θαλάσσιου πυθμένα από απόσταση χρησιμοποιούμε τεχνικές ακουστικής διασκόπησης με την βοήθεια ειδικών ηχοβολιστικών συσκευών με τις οποίες είναι εξοπλισμένο ένα ωκεανογραφικό σκάφος. Αυτές οι συσκευές είναι οι εξής:

- Μονοδεσμικό βυθόμετρο (singlebeam) και πολυδεσμικό βυθόμετρο (multibeam)
- Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης (side scan sonar)
- τομογράφος υποδομής πυθμένα (subbottom profilers).

Η αρχή λειτουργίας των συσκευών αυτών στηρίζεται στις φυσικές ιδιότητες του ήχου κατά τη διάδοση του στο ρευστό και στα γεωλογικά στρώματα, καθώς και στην ιδιότητα του ήχου να ανακλεί σε επιφάνειες με διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά<sup>7</sup>.

Το μονοδεσμικό βυθόμετρο, ή αλλιώς ο ηχοβολιστής μονής δέσμης (singlebeam), χρησιμοποιείται για την σημειακή αποτύπωση του βάθους του πυθμένα. Σε αντίθεση όμως με το μονοδεσμικό, το πολυδεσμικό βυθόμετρο (multibeam) εκτός από την βυθομετρία μας παρέχει και πληροφορίες για την μορφολογία του υποθαλάσσιου πυθμένα<sup>8</sup>.

Ο ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης (side scan sonar) είναι ένα ηχοβολιστικό σύστημα, που καταγράφει δισδιάστατες αποτυπώσεις της επιφάνειας του πυθμένα χρησιμοποιώντας το φαινόμενο της ανάκλασης του ήχου. Το χρησιμοποιούμε για την απόσταση της μορφολογίας του πυθμένα και δεν μας παρέχει κάποια βυθομετρικά δεδομένα. Συγκεκριμένα αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για την αποτύπωση δια φυσικών (μορφολογικών) χαρακτηριστικών του πυθμένα, όπως οι βραχώδεις εξάρσεις, οι κρατήρες των ηφαιστειών, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και άλλα<sup>9</sup>.

Ο τομογράφος υποδομής πυθμένα (subbottom profiler) είναι ένα εργαλείο, που χρησιμοποιείται για την μελέτη της γεωλογικής υποδομής του θαλάσσιου πυθμένα, ενώ παράλληλα δίνει πληροφορίες για

7.Σ.Ε. Πούλος & Κ. Καρδιτσά. σημειώσεις Εφαρμοσμένη Ωκεανογραφία & Περιβάλλον, Αθήνα, 2020

8.Σ.Ε. Πούλος & Κ. Καρδιτσά. σημειώσεις Εφαρμοσμένη Ωκεανογραφία & Περιβάλλον, Αθήνα, 2020

9.Σ.Ε. Πούλος & Κ. Καρδιτσά. σημειώσεις Εφαρμοσμένη Ωκεανογραφία & Περιβάλλον, Αθήνα, 2020

τις φυσικές και γεωτεχνικές ιδιότητες των επιφανειακών ιζημάτων, την παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στους πόρους των ιζημάτων και την μορφολογία του πυθμένα κατά μήκος της τομής. Οι τομογράφοι υποδομής πυθμένα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- A. Στους τομογράφους με υψηλή διακριτική και περιορισμένη διεισδυτική ικανότητα, όπως είναι οι ανιχνευτές χαλαρών ιζημάτων (Pinger) και οι τομογράφοι Boomer.
- B. Στους τομογράφους υψηλής διεισδυτικής και περιορισμένης διακριτικής ικανότητας, όπως είναι οι τομογράφοι Sparker και Airgun.

Ως διεισδυτική ικανότητα ορίζεται η ικανότητα του συστήματος να διεισδύσει στα υποκείμενα στρώματα. Ως διακριτική ικανότητα ορίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο στρωμάτων (κατακόρυφη διακριτική ικανότητα) και δύο σημείων σε ένα επίπεδο (οριζόντια διακριτική ικανότητα), ώστε να αναγνωρίζονται και να καταγράφονται ως δύο.<sup>10</sup>

Η μελέτη του πυθμένα της θάλασσας και κατ' επέκταση των υποθαλάσσιων ηφαιστειών, μπορεί να γίνει εκτός από την επιφάνεια της θάλασσας και από κοντά, με την χρήση υποβρύχιων βαθυσκάφων επανδρωμένων και μη.

Με την χρήση επανδρωμένων βαθυσκάφων οι επιστήμονες μπορούν να παρακολουθήσουν και να μελετήσουν από κοντά τον υποθαλάσσιο πυθμένα. Μπορούν να κατέβουν σε μεγάλα βάθη, να καταγράψουν την μορφολογία και τις υποθαλάσσιες γεωλογικές δομές, αλλά και να συλλέξουν δείγματα για να μελετηθούν από κοντά. Ένα παράδειγμα τέτοιου σκάφους, που έχει χρησιμοποιηθεί για τις υποθαλάσσιες έρευνες στον ελληνικό χώρο είναι το βαθυσκάφος "ΘΕΤΙΣ" του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ). Το βαθυσκάφος αυτό είναι ικανό να επιχειρήσει σε βάθος έως και τα 610μ, για 6 έως και 9 ώρες. Είναι εξοπλισμένο με προβολείς, βιντεοκάμερα για καταγραφή, δύο υδραυλικούς βραχίονες ( με 5 και 3 βαθμούς ελευθερίας αντίστοιχα), σκανερ αποφυγής εμποδίων και αντλία αναρρόφησης για συλλογή δειγμάτων. Η καμπίνα έχει χώρο για δύο άτομα, τον πιλότο και τον επιστήμονα.

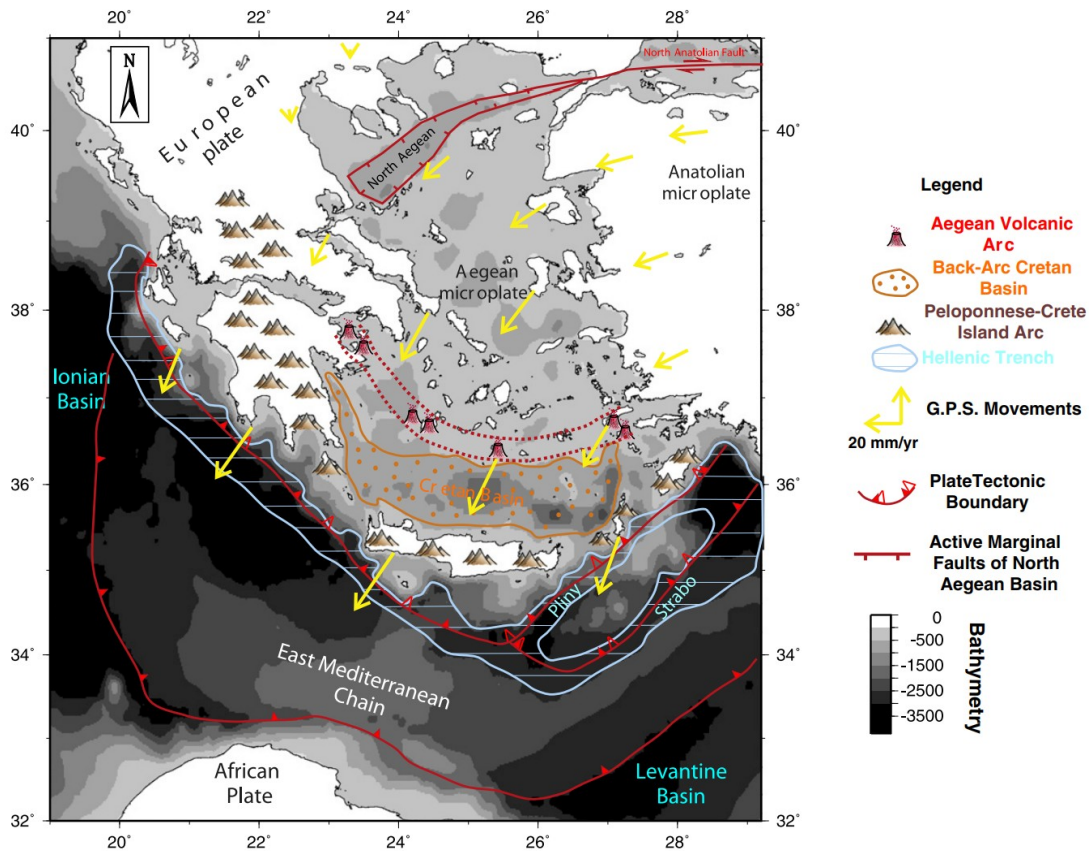
Για ακόμα μεγαλύτερα βάθη και δυσκολότερες συνθήκες χρησιμοποιούνται τηλεχειριζόμενα οχήματα ROV (remotely operated vehicle), τα οποία χειρίζονται οι πιλότοι μέσα από το ωκεανογραφικό πλοίο. Τα οχήματα αυτά μπορούν να φτάσουν σε βάθος έως και τα 6000μ και να λειτουργούν για απεριόριστο χρονικό διάστημα. Έχουν προβολείς και κάμερες, οι οποίες τροφοδοτούνται με καλώδιο απευθείας από το σκάφος, ώστε να καταγράφουν και να στέλνουν βίντεο και δεδομένα επί τόπου. Διαθέτουν και αυτά βραχίονες για την συλλογή δειγμάτων, αλλά και ωκεανογραφικό εξοπλισμό για την μελέτη του θαλάσσιου πυθμένα, όπως ηχοβολιστικά σόναρ, βυθόμετρα, πυξίδες και άλλα.

### 1.3 Ηφαιστειακό τόξο

Ηφαιστειακό τόξο ονομάζεται ένα επιμέρους τμήμα μιας μεγαλύτερης γεωλογικής δομής, του ορογενετικού τόξου. Κατά την σύγκλιση των τεκτονικών πλακών, υποβυθίζεται ωκεάνια λιθόσφαιρα είτε κάτω από άλλη ωκεάνια λιθόσφαιρα είτε κάτω από ηπειρωτική λιθόσφαιρα. Και στις δύο περιπτώσεις, στην ζώνη σύγκλισης διαμορφώνεται μία σχεδόν σταθερά απαντώμενη γεωμετρία επιμέρους τμημάτων, τα οποία συνθέτουν αυτό που ονομάζουμε ορογενετικό τόξο. Τα βασικά τμήματα του ορογενετικού τόξου, από τα πιο εξωτερικά στα πιο εσωτερικά είναι η προτάφρος, το νησιωτικό τόξο, η οπισθοτάφρος και το ηφαιστειακό τόξο. Στην περίπτωση της υποβύθισης ωκεάνιας λιθόσφαιρας κάτω από ηπειρωτική η ορογενετική δομή μπορεί να μην εκφράζεται ως νησιωτικό τόξο αλλά ως χερσαία συνεχής οροσειρά, και μάλιστα με ενσωματωμένο σε αυτήν το ηφαιστειακό τόξο. Πίσω από αυτή δεν αναπτύσσεται οπισθοταφρική λεκάνη, άρα παρατηρούμε ένα ζεύγος «τάφρος – χερσαία οροσειρά/ηφαιστεια». Το ηφαιστειακό τόξο σαν δομή εκφράζεται με σειρά ηφαιστειών διατεταγμένων τοξοειδώς, παράλληλα προς τις προηγούμενες δομές. Τα ηφαιστεια αυτά σχηματίζονται από ανοδικά κινούμενο μάγμα, το οποίο προέρχεται κατά το πλείωτον από τη τήξη των πετρωμάτων της υποβυθιζόμενης πλάκας, όταν αυτή φτάσει σε βάθος μεγαλύτερο των 100 χιλιομέτρων. Η θέση εκδήλωσης των ηφαιστειών είναι συνάρτηση

10.Σ.Ε. Πούλος & Κ. Καρδισά. σημειώσεις Εφαρμοσμένη Ωκεανογραφία & Περιβάλλον, Αθήνα, 2020

της γωνίας και της ταχύτητας υποβύθισης της λιθόσφαιρας.



**Εικόνα 2:** Απλοποιημένος χάρτης με την σημερινή μορφή των δομών του Ελληνικού τόξου, όπου φαίνεται το σημερινό ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου που έχει αναπτυχθεί πίσω από την Ελληνική τάφρο, το νησιωτικό τόξο Πελοποννήσου-Κρήτης και την οπισθοτάφρος του Κρητικού πελάγους. (Nomikou et al., 2012)

## 1.4 Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο

Το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου εκτείνεται από την Πελοπόννησο (Κρομμυωνία) δυτικά, μέχρι την Μ. Ασία (Bodrum) ανατολικά και βρίσκεται μεταξύ του πλατό των Κυκλάδων προς Βορρά και της κρητικής τάφρου προς Νότο<sup>11</sup>. Ανήκει στο ελληνικό ορογενετικό τόξο, το οποίο δημιουργείται στα όρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών της Ευρώπης και της Αφρικής. Η μελέτη των ηφαιστειακών πετρωμάτων της περιοχής του Αιγαίου έχει δείξει μια μετακίνηση της ηφαιστειότητας από το Βόρειο Αιγαίο (Κάτω Ηώκαινο) προς τη σημερινή του θέση. Η συνολική μετανάστευση του ηφαιστειακού τόξου είναι περίπου 400 χλμ. σε διάστημα 40 εκ. χρόνων, η οποία αντιστοιχεί σε έναν ρυθμό 10 χλμ./εκ. χρόνια. Η σημερινή θέση του τόξου, ύστερα από δεδομένα γεωχρονολόγησης των ηφαιστειακών πετρωμάτων του, τοποθετείται από το άνω Πλειόκαινο, με έντονη δραστηριότητα κατά το Τεταρτογενές<sup>12</sup>.

Οι ηφαιστειακές εμφανίσεις του μπορούν να ταξινομηθούν γεωγραφικά σε τέσσερις ομάδες με χερσαία και υποθαλάσσια δραστηριότητα: η ομάδα των Μεθάνων στο δυτικό, η ομάδα της Μήλου με την ομάδα της Σαντορίνης στο κεντρικό και η ομάδα της Νισύρου στο ανατολικό τμήμα του τόξου.

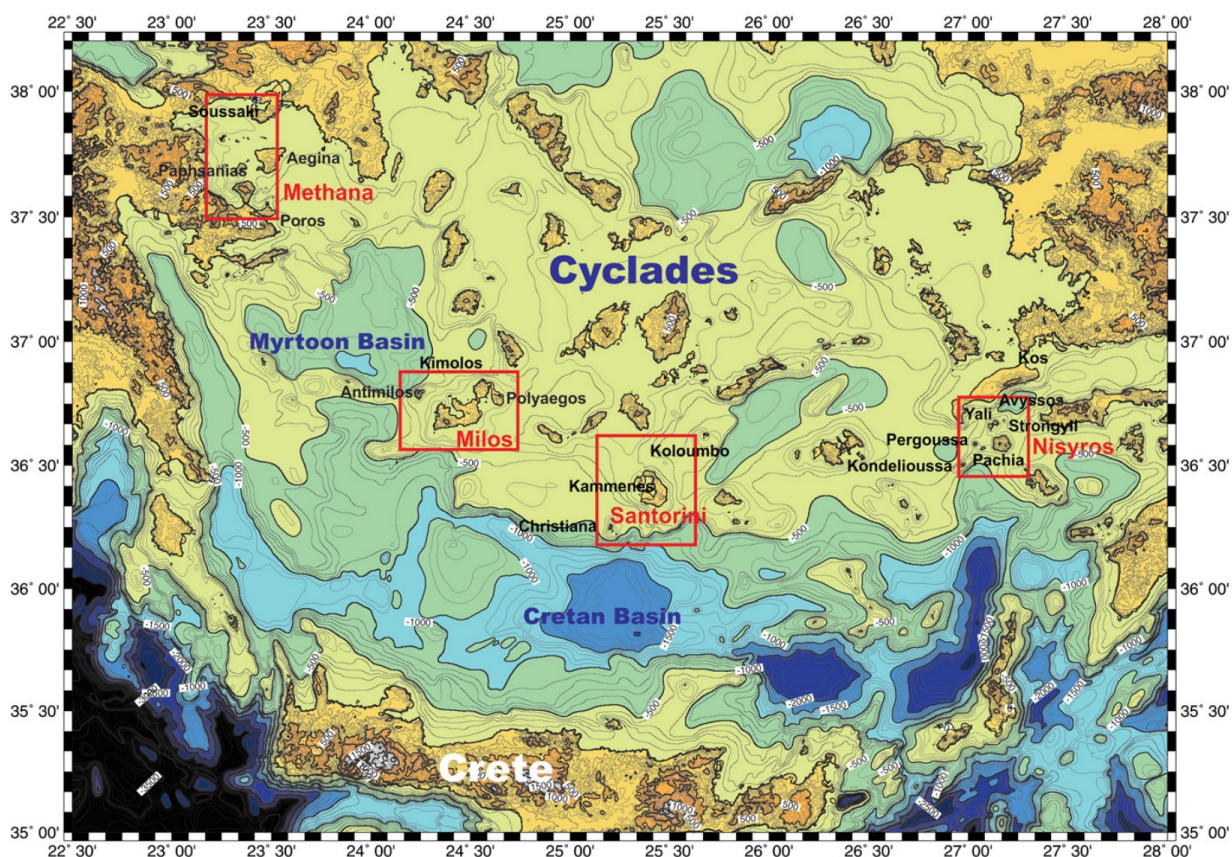
Στην ομάδα των Μεθάνων περιλαμβάνονται οι ηφαιστειακές εμφανίσεις στα νησιά της Αίγινας και του

11.Περισωράτης Κ., Ανδρινόπουλος Α., Ζαχαράκης Π., Ζημιανίτης Ε., Ιζηματολογικές και γεωλογικές έρευνες στο κεντρικό τμήμα του ηφαιστειακού τόξου Ν. Αιγαίου : προκαταρκτικά αποτελέσματα, Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ., Τομ. XXVIII/1, Αθήνα, 1993, σελ.511-531

12.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146



Πόρου, το ηφαίστειο στην περιοχή του Σουσακίου Κορινθίας, το ηφαίστειο των Μεθάνων και το υποθαλάσσιο ηφαίστειο του Πausanία στο δυτικό τμήμα του Σαρωνικού κόλπου στη λεκάνη της Επιδαύρου 1,5 – 2 χλμ. βορειοδυτικά των Μεθάνων. Στην ομάδα της Μήλου περιλαμβάνονται οι ηφαιστειακές εμφανίσεις στα νησιά της Μήλου, της Αντιμήλου, της Κιμώλου και του Πολύαιγου, καθώς και το υποθαλάσσιο υδροθερμικό ηφαιστειακό πεδίο νοτιοανατολικά της Μήλου. Στην ομάδα της Σαντορίνης ξεχωρίζουν τρεις υποομάδες – ηφαιστειακές δομές με κατεύθυνση νοτιοδυτική προς βορειοανατολική: το ηφαιστειακό σύμπλεγμα των Χριστιανών νοτιοδυτικά, το ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Σαντορίνης στο κέντρο και το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο βορειοανατολικά. Στην ομάδα της Νισύρου περιλαμβάνονται το σύμπλεγμα των ηφαιστειακών νησιών: Νίσυρος, Παχιά, Περγούσσα, Γυαλί, Στρογγύλη, ο υποθαλάσσιος ηφαιστειακός κρατήρας της Αβύσσου (βορειοανατολικά της Στρογγύλης) και την ηφαιστειακή δομή της Κονδελιούσας<sup>13</sup>.



**Εικόνα 3:** Τοπογραφικός χάρτης του νότιου Αιγαίου που συνδυάζει χερσαία και υπεράκτια δεδομένα από πρόσφατες ωκεανογραφικές έρευνες. Τα τέσσερα σύγχρονα ηφαιστειακά γκρουπ υποδεικνύονται εντός κόκκινων πλαισίων μαζί με τα ονόματα των κύριων χερσαίων και υποθαλάσσιων ηφαιστειακών κέντρων κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου.

## 2. Ηφαιστειακό γκρουπ Μεθάνων

Το ηφαιστειακό γκρουπ των Μεθάνων αποτελεί το δυτικότερο τμήμα του ενεργού ελληνικού ηφαιστειακού τόξου και βρίσκεται στον Σαρωνικό κόλπο, ανάμεσα στην Στερεά Ελλάδα και την Πελοπόννησο. Αποτελείται από τα ηφαιστειακά κέντρα της Αίγινας, του Πόρου, του Σουσακίου και των Μεθάνων, με ενεργή ηφαιστειότητα να παρατηρείται κυρίως στην Χερσόνησο των Μεθάνων και σε ένα υποθαλάσσιο τμήμα βορειοδυτικά των Μεθάνων στην λεκάνη της Επιδαύρου, όπου συναντάμε το υποθαλάσσιο ηφαίστειο του Πausanία.

13.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146



**Εικόνα 4:** Δορυφορική φωτογραφία από το Google Earth όπου φαίνονται τα Μέθανα και ο υποθαλάσσιος χώρος όπου βρίσκεται το ηφαιστειο του Πausανία (κυκλωμένος με κόκκινο)

## 2.1 Χερσαία ηφαιστειότητα

### 2.1.1 Χερσόνησος των Μεθάνων

Η χερσόνησος των Μεθάνων (ηφαίστειο των Μεθάνων) βρίσκεται στο δυτικό σαρωνικό κόλπο περίπου 163 χλμ από την Αθήνα, καλύπτει μια επιφάνεια περίπου μέχρι τα 50 τετραγωνικά χλμ και αποτελεί το δυτικότερο κομμάτι του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου<sup>14</sup>. Τα Μέθανα αποτελούν κομμάτι του σαρωνικού κόλπου, μια νεοτεκτονική λεκάνη που θεωρείται σεισμικά ενεργή και περιέχει συστήματα ενεργών ρηγμάτων. Η χερσόνησος των Μεθάνων αποτελεί σχεδόν ένα νησί, το οποίο ενώνεται με την χέρσο της Πελοποννήσου, από έναν ισθμό διαμέτρου μόνο 300 μ. Το σχεδόν στρογγυλό της περίγραμμα διακόπτεται στο βορειοδυτικό μέρος από την προεξοχή που δημιουργείται από τον λόφο της Παναγίας, μια μάζα από γκρι ασβεστόλιθους (άνω τριαδικό - κάτω ιουρασικό), και στο νότιο από τους ασβεστόλιθους του Ασπροβουνίου (άνω ιουρασικό - κρητιδικό), των οποίων ασβεστόλιθων ο ισθμός είναι προέκταση. Αυτές οι ιζηματογενείς ακολουθίες αποτελούν το υπόβαθρο των ηφαιστειακών

14. Antoniou V., Nomikou P., Bardouli P., Lampridou D., Ioannou T., Kalisperakis I., Stentoumis C., Whitworth M., Krokos M., Ragia L., An interactive story map for the Methana volcanic peninsula, Proceedings of the 4th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management - Volume 1: GISTAM, [SciTePress](#), 2018, Pages 68-78

συμπλεγμάτων σε βάθος έως και 1000 μ κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας<sup>15</sup>.

Παρόλο που η περιοχή χαρακτηρίζεται από ενεργές εκτατικές τεκτονικές κινήσεις, η σεισμικότητα της είναι χαμηλότερη από εκείνη του κορινθιακού κόλπου. Ο γεωλογικός χάρτης των Μεθάνων, των Dietrich και Γαϊτανάκη, δείχνουν την ύπαρξη πολλαπλών συστημάτων ρηγμάτων. Τα κυριότερα συστήματα του ολόκαινου είναι προσανατολισμένα σε κατευθύνσεις νοτιοδυτικά - βορειοανατολικά (περίπου 45 - 60 μοίρες), δυτικά - ανατολικά (περίπου 90 μοίρες) και βόρεια - νότια (περίπου 165 - 180 μοίρες). Άλλα κύρια συστήματα, που ήταν ενεργά κατά το πλειστόκαινο και επανενεργοποιήθηκαν κατά το ολόκαινο, έχουν προσανατολισμό δυτικά βορειοδυτικά - ανατολικά νοτιοανατολικά ( περίπου 110 - 135 μοίρες), βορειοδυτικά - νοτιοανατολικά (περίπου 145 - 150 μοίρες) και νότια νοτιοδυτικά - βορεια βορειοανατολικά (περίπου 25 - 50 μοίρες). Μικροσεισμικές μελέτες έχουν δείξει ότι η κύρια σεισμική δραστηριότητα στον σαρωνικό κόλπο οφείλεται σε τεκτονικές δομές δυτικές - ανατολικές και νοτιοδυτικές - βορειοανατολικές που δεν οφείλονται σε ηφαιστειακή δραστηριότητα<sup>16</sup>.

Οι περισσότερες γεωθερμικές εκδηλώσεις στα Μέθανα, όπως η θερμές πηγές στα λουτρά των Μεθάνων, στον Άγιο Νικόλαο και στον όρμο Θιάφη με σημάδια πρόσφατης φουμαρολικής δραστηριότητας, συνδέονται με ένα σύστημα ρηγμάτων νότιο νοτιοδυτικής - βόρειο βορειοανατολικής κατεύθυνσης, που οριοθετεί την ανατολική ακτή της χερσονήσου για περίπου 10 χλμ. Τομογραφικές μελέτες δείχνουν λέπτυνση του φλοιού έως και 20 χλμ κάτω από τα ηφαιστειακά κέντρα του σαρωνικού κόλπου. αυτή η λεπτύωση συνδέεται με τις παρούσες διατμητικές τάσεις αλλά και με την εισχώρηση υλικού του μανδύα στο ηφαιστειακό τόξο<sup>17</sup>.

Μορφολογικά η χερσόνησος των Μεθάνων είναι πολύπλευρη και διαμορφώνεται από ηφαιστειακές αποθέσεις, το τοπικό τεκτονικό καθεστώς και από την διάβρωση του υδρογραφικού δικτύου. Γενικά το ανάγλυφο της χερσονήσου είναι κυρίως υψηλό χωρίς πεδιάδες και με απότομες πλαγιές, οι οποίες φτάνουν ως τη θάλασσα. Το απότομο ανάγλυφο εξομαλύνεται από ηφαιστειακό κλαστικό υλικό και ιζήματα του ολοκαινού. Επιπλέον στην χερσόνησο απλώνεται ένα εκτενές δίκτυο ρεμάτων, το οποίο εκτείνεται από το κέντρο και τα υψηλότερα ανάγλυφα προς τη θάλασσα. Το μεγαλύτερο φαράγγι εκτείνεται κοντά στους Αγίους Θεοδώρους, το πλάτος του υπερβαίνει τα 120 μ και η αξονική τομή του κυμαίνεται μεταξύ 20 και 10 μ<sup>18</sup>.

Τα Μέθανα δεν αποτελούνται από ένα αυτόνομο ηφαιστειακό κέντρο, αλλά από ένα σύμπλεγμα από 30 περίπου ηφαιστειακούς κώνους, θόλους και ροές ανδευσιτικών και δακτιτικών πετρωμάτων<sup>19</sup>. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στα Μέθανα πιθανόν ξεκίνησε στο όριο πλειοκαινού πλειστοκαινού, αν και τα παλαιότερα πετρώματα χρονολογούνται περίπου στα 0,9 εκατ. χρόνια. Από τη βιβλιογραφία έχουμε πολύ λίγες ραδιοχρονολογήσεις για τα ηφαιστειακά πετρώματα. Η ηφαιστειακή ιστορία της χερσονήσου προκύπτει κυρίως από γεωμορφολογικά δεδομένα. Ο Dietrich και ο Γαϊτανάκης το 1995 απέδωσαν μια παλαιότερη ηφαιστειακή σειρά στα τέλη του πλειοκαινού, την οποία ακολούθησαν 7 ομάδες ηφαιστειακών πετρωμάτων του τεταρτογενούς. Ραδιοχρονολογήσεις στις πιο πρόσφατες από αυτές, έδωσαν ηλικίες από 0,29 έως 0,38 εκατ. χρόνια, ενώ στις παλαιότερες από 0,55 έως 0,9 εκατ. χρόνια. Η πιο

15. D'Alessandro W., Brusca L., Kyriakopoulos K., Michas G., Papadakis G., Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean arc (Greece): Insight from fluids geochemistry, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 178, Issue 4, 2008, Pages 818-828

16. D'Alessandro W., Brusca L., Kyriakopoulos K., Michas G., Papadakis G., Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean arc (Greece): Insight from fluids geochemistry, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 178, Issue 4, 2008, Pages 818-828

17. D'Alessandro W., Brusca L., Kyriakopoulos K., Michas G., Papadakis G., Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean arc (Greece): Insight from fluids geochemistry, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 178, Issue 4, 2008, Pages 818-828

18. Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163

19. Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163

πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα ήταν μια έκρηξη το 230 π.Χ., η οποία έδωσε ανδρειακές λάβες στην καμένη χώρα και περιγράφηκε πρώτη φορά από τον αρχαίο γεωγράφο Στράβωνα<sup>20</sup>.

Η ηφαιστειακή ιστορία των Μεθάνων χωρίζεται σε οκτώ διαφορετικές φάσεις με βάση την ηλικία, τον τύπο του πετρώματος και τη μορφή της εκρηκτικής δραστηριότητας.

#### **Φάση Α**

Εκδηλώθηκε κατά το κάτω πλειόκαινο περίπου  $3,4 \pm 0,9$  εκατ. χρόνια, σχηματίζοντας το ηφαιστειακό υπόβαθρο, δόμοι και ροές ανδρειακής και δακτικής σύστασης κατά μήκος ρηγμάτων διεύθυνσης Βορράς - Νότος, στο κεντρικό και στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου<sup>21</sup>.

#### **Φάση Β**

Αποτελείται από χονδρόκοκκο ηφαιστειοκλαστικό υλικό προερχόμενο από τη διάβρωση των κεντρικών ηφαιστειακών μαζών και καλύπτει μεγάλο τμήμα της χερσονήσου, διαχωρίζοντας τα αρχαιότερα ηφαιστειακά πετρώματα της φάσης Α από όλες τις νεότερες φάσεις<sup>22</sup>.

#### **Φάση C**

Εκδηλώθηκε περίπου πριν από  $1,4 \pm 0,3$  εκατ. χρόνια και περιλαμβάνει τόφους ρυοδακτικής σύστασης, δόμους και ροές των βασαλτικών ανδρειτών μαζί με πυροκλαστικά υλικά. Στην Άκρη Πούντα αναγνωρίζονται αποθέσεις από καλά ταξινομημένους τόφους με λιθάρια που σχετίζονται με Πλίνειες εκρήξεις. Σημαντικό ρόλο σε αυτή τη φάση είχαν τα ρήγματα με διεύθυνση βορειοανατολικά – νοτιοδυτικά<sup>23</sup>.

#### **Φάση D**

Περιλαμβάνει τα νότια δακτικά ηφαίστεια με δόμους και ροές, αλλά και τις βορειοδυτικές ανδρειακές ροές. Οι ανδρειαίτες και οι δακίτες αυτής της φάσης μοιάζουν γεωχημικά με αυτούς της Φάσης C (υψηλή περιεκτικότητα σε  $TiO_2$ ). Πιθανώς σχετίζεται με τεκτονισμό και τη σχετική ανύψωση των νοτιοανατολικών και των βορειοδυτικών τμημάτων της χερσονήσου κατά μήκος ρηγμάτων κατεύθυνσης ανατολικά – δυτικά, ενώ η ηλικία της προσδιορίστηκε στα  $0,9 - 0,5$  εκατ. χρόνια<sup>24</sup>.

#### **Φάση E**

Περιλαμβάνει τα βορειοδυτικά δακτικά ηφαίστεια με δόμους και ροές που συνδέονται με ρήγματα διεύθυνσης βορειοδυτικά – νοτιοανατολικά και η ηλικία τους είναι  $0,6 \pm 0,2$  εκατ. χρόνια<sup>25</sup>.

#### **Φάση F**

Συνδέεται με τους αρχαιότερους ανατολικά – δυτικά διατεταγμένους δακτικούς και ανδρειακούς δόμους<sup>26</sup>.

#### **Φάση G**

Περιλαμβάνει τα κεντρικά ανδρειακά ηφαίστεια με δόμους και ροές και τα ανατολικά – δυτικά ηφαίστεια με δόμους και ροές σύστασης δακτικής έως ρυοδακτικής (ηλικίας από 0,34 έως 0,29 εκατ. χρόνια)<sup>27</sup>.

20.D'Alessandro W., Brusca L., Kyriakopoulos K., Michas G., Papadakis G., Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean arc (Greece): Insight from fluids geochemistry, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 178, Issue 4, 2008, Pages 818-828

21.Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163

22.Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163

23.Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163

24.Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163

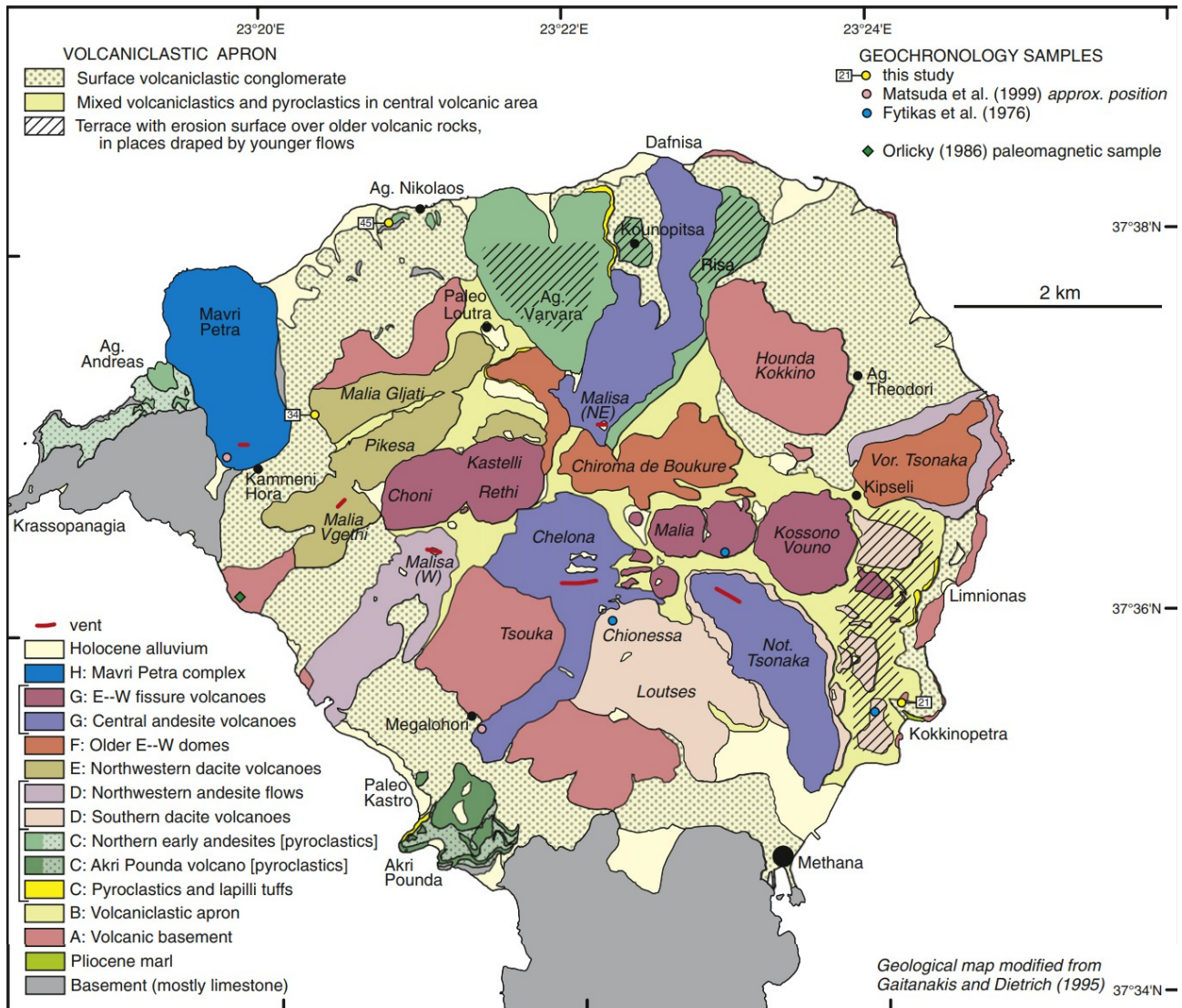
25.Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163

26.Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163

27.Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of*

## Φάση Η

Είναι τμήμα του συμπλέγματος της Μαύρης Πέτρας που περιλαμβάνει ανδευτικούς και δακτιτικούς δόμους και ροές. Συνδέεται με την έκρηξη λάβας της Καμένης Χώρας, με δραστηριότητα στα τελευταία 0,2 εκατ. χρόνια περιλαμβανομένων και των ιστορικών χρόνων. Οι ροές της έκρηξης αυτής παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση στο βορειοδυτικό τμήμα της χερσονήσου και συνεχίζονται και στον υποθαλάσσιο χώρο.<sup>28</sup>



**Εικόνα 5:** Γεωλογικός χάρτης των Μεθάνων (τροποποιημένος από Gaitanakis και Dietrich (1995)). Φαίνονται οι ηφαιστειακές φάσεις A-H (Pe-Piper και Piper 2013)

Σύγχρονες μελέτες δείχνουν πως το ηφαιστειο των Μεθάνων έχει πολύ ήπια δραστηριότητα (ηρεμία). Αρχικά η θερμοκρασία των γεωθερμικών αέριων αναβλίσεων είναι χαμηλή (40°C) και η χωρική τους κατανομή είναι εξίσου μικρή. Πιθανολογείται πως η τελευταία έκρηξη του 230 π.Χ. ήταν κάποιο μεμονωμένο συμβάν που συνέβαλε στον σχηματισμό ή στη συντήρηση ενός μικρού γεωθερμικού συστήματος. Οι ακριβείς θερμοδυναμικές συνθήκες του ρεζερβουάρ δεν είναι εύκολο να χαρακτηριστούν, καθώς ο υπολογισμός τους εμποδίζεται από την πολύ αργή άνοδο των γεωθερμικών υγρών σε συνδυασμό

Volcanology and Geothermal Research, Volume 260, 2013, Pages 146-163

28. Pe-Piper, G., & Piper, D. J., The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 260, 2013, Pages 146-163

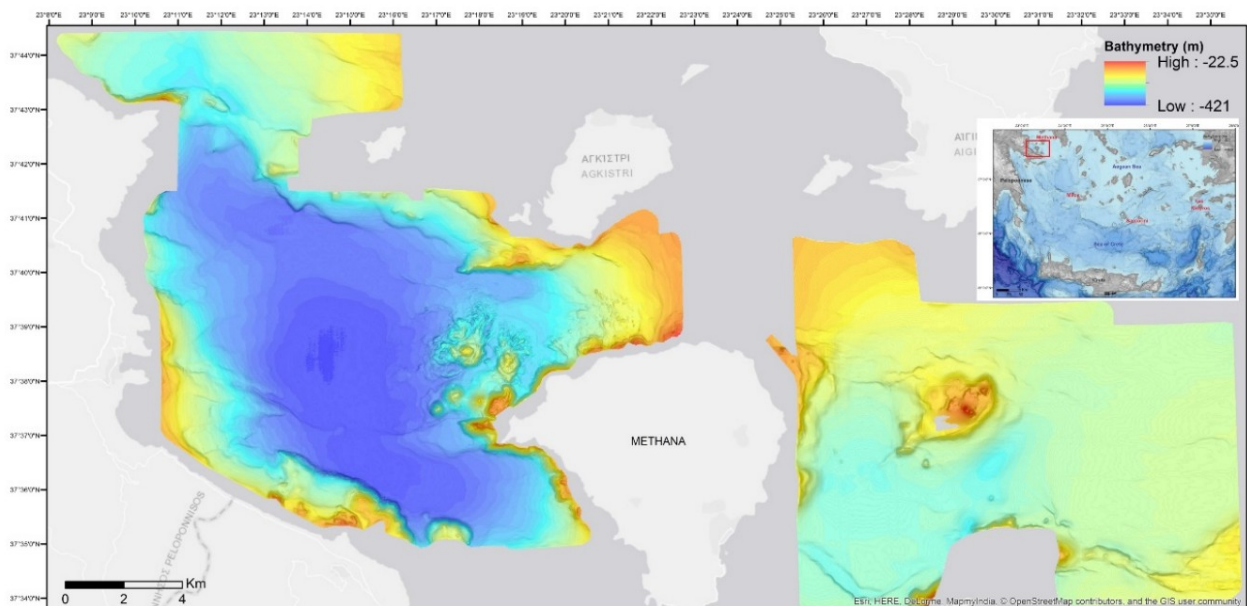
με την ανάμειξη τους με τα ρηχά υγρά<sup>29</sup>.

Η πολύ ήπια δραστηριότητα του ηφαιστείου επιβεβαιώνεται και από την πολύ χαμηλή παραγωγή CO<sub>2</sub>. Η συνολική του παραγωγή εκτιμάται στα 0.03 kg/s για μια περιοχή περίπου 10.000 τμ. Είναι από τις χαμηλότερες που αναφέρονται στην επιστημονική βιβλιογραφία για ηφαιστειακά/ γεωθερμικά συστήματα. Το CO<sub>2</sub> αποτελεί επί του παρόντος το μόνο ηφαιστειακό κίνδυνο των Μεθάνων, παρόλο που έχει χαμηλή παραγωγή και έκταση, δεν πρέπει να παραμεληθεί η παρακολούθησή του<sup>30</sup>.

## 2.2 Υποθαλάσσια ηφαιστειότητα

### 2.2.1 Το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό πεδίο του Παισανία

Το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Παισανίας ανακαλύφθηκε το 1987 στην λεκάνη της Επιδαύρου στον δυτικό Σαρωνικό Κόλπο. Βρίσκεται 1,5 – 2 χλμ βορειοδυτικά της χερσονήσου των Μεθάνων και έχει έκταση περί τα 12 χλμ<sup>2</sup>. Υποθαλάσσιες έρευνες στην περιοχή αποκάλυψαν 6 διαφορετικά ηφαιστειακές προεξοχές και 3 κύριες ηφαιστειακές εκδηλώσεις που απαρτίζουν το ηφαιστειακό πεδίο του Παισανία. Στα ανατολικά του παρατηρήθηκε μια λοφοειδής περιοχή, όπου εξογκωματικές εξάρσεις και ανώμαλη μορφολογία κυριαρχούν σε ένα κομμάτι του βυθού, έκτασης 4,7 χλμ<sup>2</sup>. Βορειοδυτικά του βορειοδυτικού άκρου της χερσονήσου των Μεθάνων η κατωφέρεια εμφανίζει απότομες κλίσεις (220°), οι οποίες σχετίζονται με ένα πεδίο 6 ηφαιστειακών προεξοχών VO (Volcanic Outcrops). Κάθε προεξοχή από τον πυθμένα της θάλασσας παρουσιάζει διαφορετική αρχιτεκτονική και γεωμετρία.



Εικόνα 6: Βυθομετρικός χάρτης του δυτικού Σαρωνικού Κόλπου (Lampridou et al. 2018)

29. D'Alessandro W., Brusca L., Kyriakopoulos K., Michas G., Papadakis G., Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean arc (Greece): Insight from fluids geochemistry, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 178, Issue 4, 2008, Pages 818-828

30. D'Alessandro W., Brusca L., Kyriakopoulos K., Michas G., Papadakis G., Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean arc (Greece): Insight from fluids geochemistry, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 178, Issue 4, 2008, Pages 818-828

Η πρώτη και κύρια ηφαιστειακή προεξοχή είναι η VO1. Έχει προσανατολισμό βορειοανατολικά – νοτιοδυτικά με τις βόρειο βορειοανατολικές και δυτικές πλευρές να εμφανίζουν μέτριες κλίσεις (>10) με χαράδρες και επιμήκεις κορυφογραμμές ευθυγραμμισμένες σε κατευθύνσεις βόρειο βορειοανατολικά – νότιο νοτιοδυτικά και ανατολικά – δυτικά αντίστοιχα. Οι νότιες και δυτικές πλευρές της VO1 χαρακτηρίζονται από υψηλής κλίσης (>20) με μικρές χαράδρες στην νότια πλευρά καθώς παρατηρούνται διαβρωτικές δομές στη νότια νοτιοανατολική πλευρά. Βρίσκεται σε βάθος 154 – 380 μ, έχει περίμετρο βάσης 8,7 χλμ, καταλαμβάνει έκταση 4,6 χλμ<sup>2</sup> και όγκο 0,35 χλμ<sup>3</sup>.

Η δεύτερη προεξοχή VO2 είναι μια περίπλοκη ηφαιστειακή δομή, της οποίας η βορειότερη πλευρά εκτείνεται προς τα βόρεια με κλίση >10 και αποτελείται από χαράδρες και κορυφογραμμές βόρειο βορειοανατολικής – νότιο νοτιοδυτικής διάταξης. Οι δυτικές, ανατολικές και νότιες πλευρές έχουν πιο απότομες κλίσεις με μικρές χαράδρες. Βρίσκεται σε βάθος από 150 – 310 μ, έχει περίμετρο βάσης 6,8 χλμ, καταλαμβάνει έκταση 2,3 χλμ<sup>2</sup> και όγκο 0,08 χλμ<sup>3</sup>.

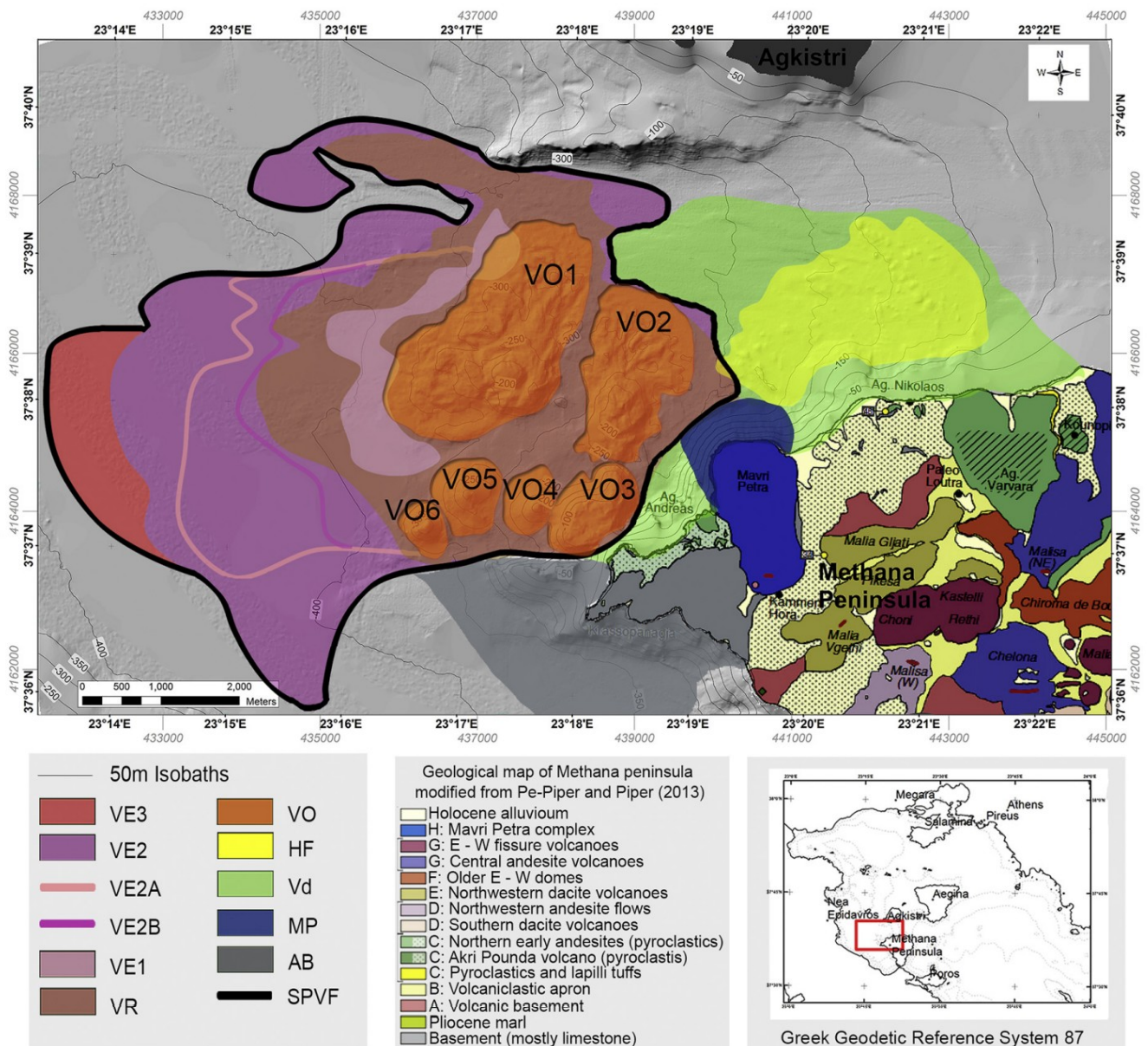
Η τρίτη προεξοχή VO3 είναι μικρότερη και τη συναντάμε 600 μ βόρεια από την βορειοδυτικότερη ακτή των Μεθάνων. Οριοθετείται από πολύ απότομες πλαγιές με υψηλές κλίσεις (>20 και >30). Βρίσκεται σε βάθος από 262 έως 280 μ και έχει περίμετρο βάσης 3,8 χλμ. Έχει έκταση 1 χλμ<sup>2</sup> και όγκο 0,12 χλμ<sup>3</sup>.

Η τέταρτη ηφαιστειακή προεξοχή VO4 έχει κωνικό σχήμα με απότομες κλίσεις (>20) και βρίσκεται σε απόσταση <500 μ δυτικά από το VO3. Έχει διάμετρο 0,9 χλμ και βρίσκεται σε βάθος 132- 260 μ. Έχει περίμετρο στη βάση της 2,5 χλμ και έκταση 0,4 χλμ<sup>2</sup>, ενώ καταλαμβάνει όγκο 0,016 χλμ<sup>3</sup>.

Λίγο πιο δυτικά βρίσκεται η πέμπτη προεξοχή VO5 και αυτή με κωνικό σχήμα και διάμετρο 1 χλμ. Βρίσκεται σε βάθος από 190 – 320 μ και έχει περίμετρο βάσης 3 χλμ. Καταλαμβάνει έκταση 0,65 χλμ<sup>2</sup> και όγκο 0,03 χλμ<sup>3</sup>.

Τέλος και στα νοτιοδυτικά του VO5 συναντάμε ένα παρόμοιο κώνο τον VO6, ο οποίος έχει ακόμη μεγαλύτερες κλίσεις πλευρών της τάξεως των 20 - 30. Έχει διάμετρο 0,8 χλμ και βρίσκεται σε βάθος 218 – 360μ, έχει περίμετρο βάσης 2χλμ και εκτείνεται στα 0,3 χλμ<sup>2</sup> με όγκο 0,01 χλμ<sup>3</sup>.

The active submarine NW termination of the South Aegean Active Volcanic Arc: the Submarine Pausanias Volcanic Field



Εικόνα 7: Χάρτης του υποθαλάσσιου ηφαιστειακού πεδίου Πausανία στο βορειοδυτικό τμήμα της χερσονήσου των Μεθάνων. ( Foutrakis και Anastasakis 2017)

Νότια από τις VO3 και VO4 υπάρχει μια κορυφογραμμή με διεύθυνση ανατολή – δύση, η οποία ανέρχεται με πολύ απότομες κλίσεις (>30) από τα 320 στα 24 μ βάθος.

Δυτικά από τις ηφαιστειακές προεξοχές (VO1 – VO6) συναντάμε 3 ξεχωριστές ηφαιστειακές εμφανίσεις, οι οποίες αποτελούνται από καλά διαβαθμισμένο ηφαιστειακό υλικό, το οποίο ενδέχεται να περιλαμβάνει και υαλοκλαστικό υλικό. Από την παλαιότερη προς την νεότερη ηφαιστειακή εμφάνιση έχουμε πρώτα την VE3 (Volcanic Event), η οποία χρονολογείται στα περίπου 450.000 χρόνια. Μετά έχουμε την VE2, η οποία χρονολογείται στα 200 – 130.000 χρόνια και τέλος την VE1, η οποία είναι και η πιο πρόσφατη, περίπου στα 14.000 χρόνια.

Η VE3 βρίσκεται στο δυτικότερο τμήμα του ηφαιστειακού πεδίου και καλύπτει περίπου μια έκταση 6 χλμ<sup>2</sup> με πάχος που κυμαίνεται από 10 – 25 μ. Τα ανατολικά όρια αυτής της εμφάνισης δεν είναι σαφή, καθώς



επικαλύπτονται από την VE2. Η VE3 σχετίζεται ηφαιστειακά με τις προεξοχές VO1 και VO2 καθώς και με την ηφαιστειακή φάση E των Μεθάνων.

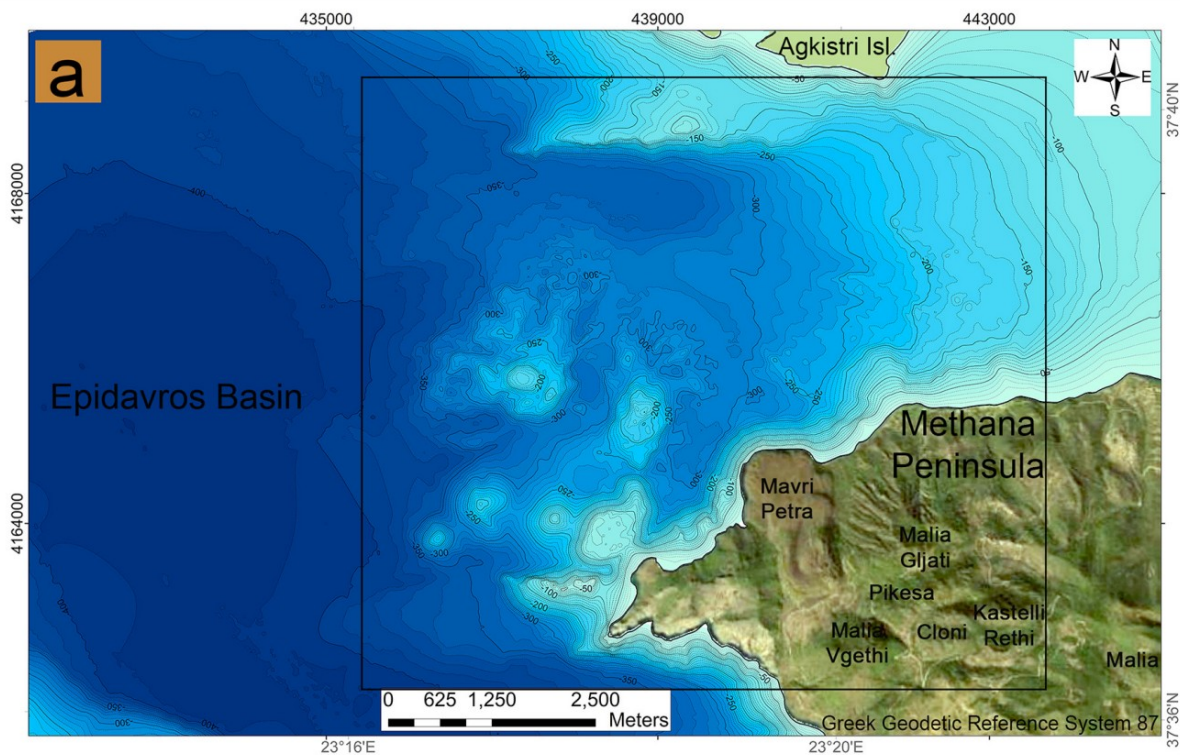
Η ηφαιστειακή εμφάνιση VE2 εκτείνεται σε μια περιοχή έκτασης περίπου 33 χλμ<sup>2</sup> και δείχνει μια επέκταση της λεκάνης προς τα βορειοδυτικά. Το πάχος της φτάνει τα 30μ, ενώ φτάνει μέχρι και 5 χλμ βόρεια του VO1. Ανατολικά εκτείνεται για 1,5 χλμ μέχρι το VO2. Η VO2 σχετίζεται ηφαιστειακά με την δημιουργία των VO3 - VO6 καθώς και με την φάση G των Μεθάνων.

Η πιο πρόσφατη ηφαιστειακή εμφάνιση V1 έχει πάχος 25μ και παρατηρείται στο κεντρικό κομμάτι του ηφαιστειακού πεδίου. Δεν διακρίνονται καθαρά τα όρια μεταξύ της VE2 στα δυτικά, αλλά φαίνεται να ξεκινάει η εμφάνισή του από την δυτική πλαγιά του VO1 και να εκτείνεται σε μια έκταση μόλις 2 χλμ<sup>2</sup>.<sup>31</sup>

Ανατολικά από το ηφαιστειακό πεδίο του Πausανία και βόρεια της χερσονήσου των Μεθάνων παρατηρείται μια λοφοειδής περιοχή (Hummocky Field), σε απόσταση 0,2 χλμ έως και 2,5 χλμ από την ακτογραμμή και σε βάθος από 160 – 300 μ. Η μορφολογία του βυθού για μια έκταση 4,7 χλμ<sup>2</sup> καλύπτεται από εξογκωματικές εξάρσεις, με σφαιρικούς έως επιμήκεις σχηματισμούς που παρουσιάζουν μεγάλες κλίσεις. Παρουσιάζουν ποικιλία στα μεγέθη τους με ύψη που φτάνουν έως 16 μ και μήκη διαμέτρων έως και 130 μ. Ανάμεσα στους μεγάλους σχηματισμούς παρατηρούνται και μικρότερα τεμάχια με διαστάσεις από 0,5 μ έως λίγα μέτρα. Παρουσιάζουν γραμμική διάταξη σε διεύθυνση βορειοδυτικά – νοτιοανατολικά, ενώ υπάρχουν και μερικές διάσπαρτες δομές. Παράλληλα στους γραμμικά κατανεμημένους λοφοειδής σχηματισμούς αναγνωρίζονται διαβρωτικές χαραδρώσεις που ενώνονται βορειότερα σε ένα διαβρωσιγενές κανάλι σε διεύθυνση ανατολικά νοτιοανατολικά – δυτικά βορειοδυτικά. Θεωρείται πως οι σχηματισμοί αυτοί σχετίζονται με το ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Μαύρης Πέτρας στα Μέθανα και συγκεκριμένα την φάση Η.<sup>32</sup>

31.Foutrakis P. M., Anastasakis G., The active submarine NW termination of the South Aegean Active Volcanic Arc: The Submarine Pausanias Volcanic Field, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 357, 2018, Pages 399-417

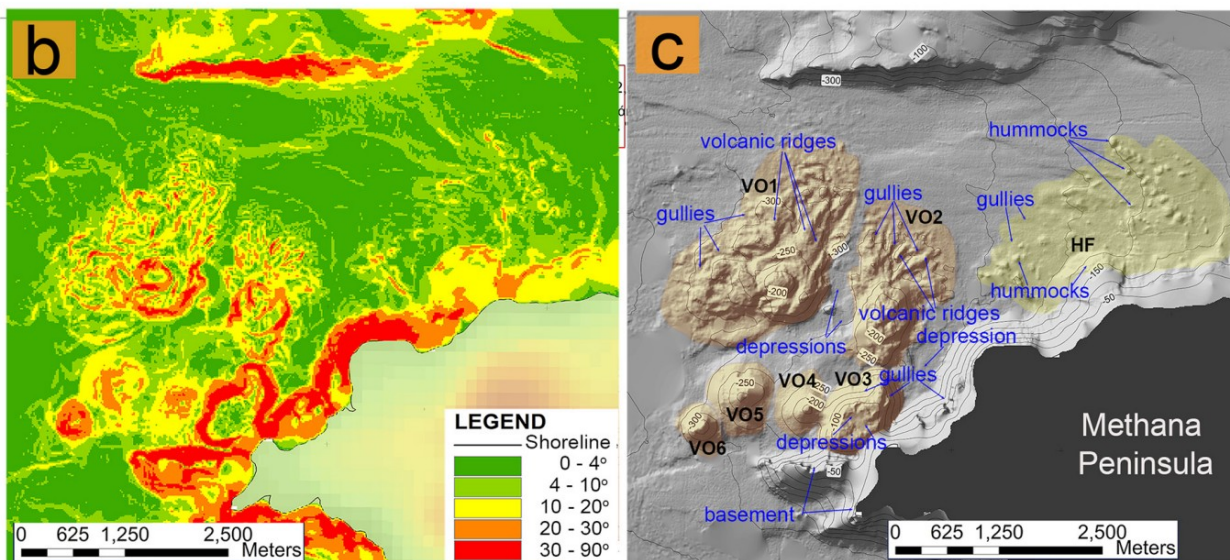
32.Φουτράκης Π. Μ., Θαλάσσια γεωλογική εξέλιξη του Σαρωνικού κόλπου κατά το τεταρτογενές, Διδακτορική διατριβή, [Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών \(ΕΚΠΑ\)](#). Σχολή Θετικών Επιστημών. Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Ωκεανογραφίας, 2016



**LEGEND**

— Shoreline — 50m Isobaths - - - - - 10m Isobaths - - - - - >-50m High Uncertainty Isobaths

**Bathymetry**



**Εικόνα 8:** (a) Λεπτομερής βυθομετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης. Το μαύρο ορθογώνιο δείχνει τους χάρτες Β και C. (b) Χάρτης κατανομής των κλίσεων της περιοχής μελέτης. (c) Εικόνα σκιασμένου αναγλύφου της περιοχής μελέτης. Τα περιγράμματα είναι σε μέτρα. Οι πορτοκαλί και κίτρινες επικαλύψεις αναφέρονται στις περιοχές ηφαιστειακών εξάρσεων (VO) και του πεδίου hummocky (HF) αντίστοιχα. ( Foutrakis και Anastasakis 2017)

### 3. Ηφαιστειακό Γκρουπ Μήλου - Αντιμήλου

Το ηφαιστειακό γκρουπ της Μήλου βρίσκεται στο νοτιοδυτικό περιθώριο της πλατφόρμας των κυκλάδων, μεταξύ της κρητικής λεκάνης στα νότιο νοτιοδυτικά και της λεκάνης των Μυρτών στα βορειοδυτικά. Αποτελείται από τα ηφαιστειογενή νησιά της Μήλου και της Αντιμήλου από το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό πεδίο βορειοδυτικά της Αντιμήλου, καθώς και από το υποθαλάσσιο υδροθερμικό πεδίο ατμίδων του Παλαιοχωρίου νοτιοανατολικά της Μήλου<sup>33</sup>.



**Εικόνα 9:** Δορυφορική φωτογραφία από το Google Earth όπου φαίνονται η Μήλος, η Αντίμηλος, το σημείο όπου βρίσκεται το υδροθερμικό πεδίο του Παλαιοχωρίου και η περιοχή όπου βρίσκεται το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό πεδίο της Αντιμήλου (κυκλωμένο με κόκκινο).

33.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

### 3.1 Χερσαία ηφαιστειότητα

#### 3.1.1 Μήλος

Η Μήλος βρίσκεται στη νοτιοδυτική άκρη των κυκλάδων 120 χλμ ανατολικά των ακτών της Λακωνίας με έκταση 150,6 τετρ.χλμ. Στα βορειοανατολικά της βρίσκεται η Κίμωλος (35 τετρ. χλμ) και ο Πολύαιγος (17 τετρ. χλμ), ενώ στα βορειοδυτικά της η Αντίμηλος (8 τετρ. χλμ). Έχει μορφή πετάλου σχηματίζοντας ένα μεγάλο κόλπο στη βόρεια πλευρά του νησιού. Ο κόλπος αυτός αποτελεί και φυσικό λιμάνι για το νησί. Γενικά η γεωμορφολογία των ακτών διαμορφώνεται από απότομες και ακανόνιστες πλαγιές. Το ανάγλυφο του νησιού χαρακτηρίζεται από χαμηλούς λόφους, από μερικές ψηλές κορφές και βουνά, με το δυτικό κομμάτι του νησιού να έχει πιο έντονη τοπογραφία από το ανατολικό. Το υψηλότερο βουνό είναι ο Προφήτης Ηλίας (751 μ) και ακολουθεί το Χονδρό Βουνό (636 μ) στο δυτικό μέρος του νησιού. Από το πλειόκαινο έως και τη σύγχρονη ιστορική περίοδο η Μήλος είχε έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα με κύριες ηφαιστειακές δομές τα ανενεργά ηφαίστεια της Φυριπλάκας και της Τραχήλας βόρεια βορειοδυτικά και των ηφαιστειακών δομών όπως το κάστρο της χώρας και η κορυφή του Προφήτη Ηλία<sup>34</sup>.

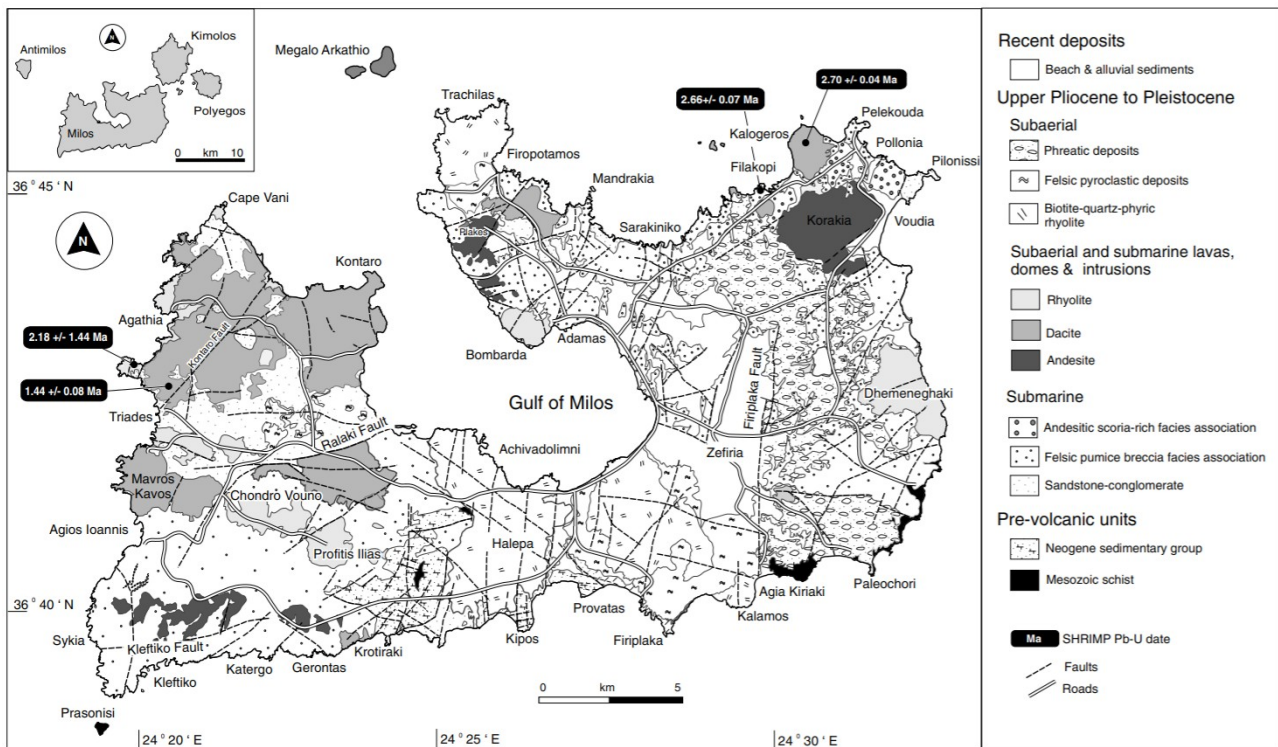
Τεκτονικά η Μήλος χωρίζεται από νεοτεκτονικά ενεργά ρήγματα, τα οποία δημιουργούν δομές μπλοκ που χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση συγκεκριμένων στρωματογραφικών σχηματισμών σε κάθε μπλοκ. Οι κύριες τεκτονικές δομές, στις οποίες οφείλεται η μορφολογία του νησιού, είναι δύο μεγάλες ζώνες ρηγμάτων: η βορειοανατολική ζώνη Μήλου - Φυριπλάκας και η νοτιοδυτική ζώνη Μήλου - Φυριπλάκας με προσανατολισμό βορειοδυτικά - νοτιοανατολικά. Αυτές οριοθετούν την τεκτονική τάφρο της Φυριπλάκας (Milos – Fyriplaka tectonic graben - MFTG) και διαχωρίζουν τον δυτικό τεκτονικό ορίζοντα της Μήλου (West Milos tectonic horst - WMTH) από το ανατολικό (East Milos tectonic horst - EMTH)<sup>35</sup>.

Οι ηφαιστειακές ακολουθίες εντός αυτής της ενότητας καλύπτουν μια έκταση περίπου 7,5 τετρ. χλμ και αποτελούνται κυρίως από διαδοχικές ροές λάβας (Fyriplaka Lava Flows - FLF) και τον σχηματισμό Lahar της Φυριπλάκας (πάχους έως 30 μ) που έρευσαν από την ομώνυμη δομή (Fyriplaka Volcanic Edifice - FVE) και κινήθηκαν προς τα βορειοδυτικά. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του ηφαιστειακού κώνου της Φυριπλάκας μπορεί να παρατηρηθεί στο νότιο τμήμα της τάφρου Μήλου - Φυριπλάκας που αποτελείται από τέφρα, άμμο και περλιτικά θραύσματα ρυολιθικής σύστασης. Ο κώνος έχει σχήμα πετάλου, με χείλος κρατήρα να βρίσκεται περίπου 150μ στα νοτιοδυτικά, 200μ στο κεντρικό τμήμα και 50μ στο βορειοανατολικό τμήμα αντίστοιχα. Ένας δευτερεύων κώνος έχει αναδυθεί εντός του επίπεδου εσωτερικού κύριου κρατήρα, γεγονός που δείχνει ότι η εκρηκτική δραστηριότητα εξελίχθηκε σε δύο φάσεις. Στο βόρειο τμήμα του νησιού, το ηφαιστειακό οικοδόμημα της Τραχήλας (Trachilas Volcanic Edifice - TVE) έχει χείλος κρατήρα και βρίσκεται περίπου 20 μ στα δυτικά, 150μ στο κεντρικό τμήμα και 120μ στη βόρεια περιοχή. Οι ροές ρυολιθικής λάβας (Trachilas Lava Flows - TLF) που παράγονται από αυτόν τον κώνο εκτείνονται προς τα βόρεια και καλύπτουν έκταση 2,5 τετρ. χλμ. Η τεκτονική τάφρος της Ζεφυρίας (ZTG) έχει σχηματιστεί εντός του ορίζοντα της νοτιοδυτικής Μήλου και χαρακτηρίζεται από αλλουβιακές αποθέσεις<sup>36</sup>.

34. Fytikas M., Innocenti F., Kolios N., Manetti P., Mazzuoli R., Poli G., Rita F., and Villari L, Volcanology and petrology of volcanic products from the island of Milos and neighbouring islets, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 28, 1986, Pages 297-317

35. Papanikolaou D., Lekkas E., Syskakis D., Tectonic analysis of Milos geothermal field, Bulletin of the Geological Society of Greece XXIV, 1990, Pages 27-46

36. Fytikas M., Innocenti F., Kolios N., Manetti P., Mazzuoli R., Poli G., Rita F., and Villari L, Volcanology and petrology of volcanic products from the island of Milos and neighbouring islets, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 28, 1986, Pages 297-317



**Εικόνα 10:** Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Μήλου που δείχνει την κατανομή των κύριων ηφαιστειακών σχηματισμών, τροποποιημένος κατά Fytikas (1986) (Stewart και McPhie 2006)

Πιο αναλυτικά η ηφαιστειακή εξέλιξη της Μήλου, η οποία ξεκίνησε από το μέσο του ανώτερου πλειοκαίνου και συνεχίζεται μέχρι και το τεταρτογενές, χωρίζεται σε 5 χαρακτηριστικές ηφαιστειακές ενότητες. Αρχίζοντας από τις παλαιότερες έχουμε τις βασικές πυροκλαστικές σειρές (μέσο - άνω πλειόκαινο), το σύμπλεγμα δόμων και ρών λάβας (άνω πλειόκαινο), τις πυροκλαστικές σειρές και τους δόμους λάβας (άνω πλειόκαινο - πλειστόκαινο), και τα προϊόντα της φρεατικής δραστηριότητας (πλειστόκαινο - σήμερα)<sup>37</sup>.

### Βασικές πυροκλαστικές σειρές (μέσο - άνω πλειόκαινο)

Τις συναντάμε κυρίως στα νοτιοδυτικά του νησιού και είναι ηλικίας μέσο - άνω πλειόκαινο. Η ακολουθία αποτελείται από πυροκλαστικά υλικά, υποθαλάσσιους τόφφους, ροές κίσηρης και κατώτερες μαξιλαροειδείς λάβες (pillow lava) και μαξιλαροειδείς λατυποπαγές. Τυπικά αυτή η σειρά έχει πάχος τουλάχιστον 120 μ και εμφανίζεται κατά μήκος της ανατολικής ακτής (Κλέφτικο). Η ακολουθία αυτή τελειώνει με βασικά ηφαιστειακά προϊόντα, δηλαδή βασαλτικούς ανδεσίτες, τα οποία δημιουργούν μαξιλαροειδείς λάβες, μαξιλαροειδή λατυποπαγή και κατώτερους υαλοκλαστίτες<sup>38</sup>.

### Σύμπλεγμα δόμων και ρών λάβας (άνω πλειόκαινο)

Στο δυτικό τμήμα της Μήλου συναντάμε μία υπο-εναέρια φάση ηφαιστειότητας, η οποία καλύπτει σχεδόν εξ ολοκλήρου τα προηγούμενα προϊόντα και χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό δόμων και ρών λάβας του ανώτερου πλειοκαίνου. Η έκχυτη δραστηριότητα έδωσε πυροκλαστικά υλικά, λατυποπαγή και πυρακτωμένα νέφη αερίων και τέφρας. Οι μεγαλύτεροι δόμοι τοποθετήθηκαν σε διεύθυνση βόρεια βορειοανατολική ή βορειοανατολική<sup>39</sup>.

37.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

38.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

39.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

### **Πυροκλαστικές σειρές και δόμοι λάβας (άνω πλειόκαινο - πλειστόκαινο)**

Στο ανατολικό και στο βόρειο τμήμα του νησιού σχηματίστηκαν υποθαλάσσιες πυροκλαστικές ακολουθίες σε συνδυασμό με ρυολιθικούς δόμους κατά το τέλος του πλειοκαινού και στην αρχή του πλειστοκαινού. Οι ρυολιθικοί δόμοι είναι έντονα υδροθερμικά εξαλλοιωμένοι και μερικές φορές έχουν μετατραπεί σε λατυποπαγή με τοπικά τμήματα οψιδιανού. Πιθανολογείται πως ο ηφαιστειακός κύκλος ολοκληρώθηκε με τη δημιουργία ενός μεγάλου συμπλέγματος από δόμους και ροές όξινης λάβας στο μέσο του νησιού. Τα πυροκλαστικά προϊόντα εμφανίζονται κυρίως μεταξύ Πούντες και Πολλώνια, ενώ μικρές εμφανίσεις είναι διασκορπισμένες στην περιοχή μεταξύ Αδάμαντα και Ζεφυρία. Στην περιοχή της Φυλακωπής οι πυροκλαστικές σειρές καλύπτονται από υαλοκλαστικές αποθέσεις ανδρειακής σύστασης μαζί με μαξιλαροειδείς λάβες και τεμάχη από λιθικά θραύσματα<sup>40</sup>.

### **Το όξινο σύμπλεγμα της Φυριπλάκας και της Τραχήλας (άνω πλειστόκαινο)**

Η πιο πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα της Μήλου εκδηλώθηκε κατά το ανώτερο πλειστόκαινο στα ηφαιστειακά κέντρα της Τραχήλας στο βόρειο τμήμα και της Φυριπλάκας στο νότιο. Και στα δύο κέντρα οι τελικές φάσεις της δραστηριότητας χαρακτηρίζονται από έκχυση λαβών<sup>41</sup>.

Στην Τράχηλα η εκρηκτική δραστηριότητα, που έδωσε τον κύριο κώνο, άρχισε με απόθεση πυροκλαστικών υλικών. Οι αποθέσεις αυτές σχηματίζουν ένα πλατύ βασικό δακτύλιο. Η διαβάθμιση των προϊόντων από τα αρχικά ογκώδη αποθέματα σε τεμάχια (blocks) και τελικά σε ροές λάβας δείχνει την προοδευτική ελάττωση της εκρηκτικής δράσης του ηφαιστείου. Οι πρώτες φάσεις της ηφαιστειακής δράσης χαρακτηρίζονται από μια αντίδραση μεταξύ μάγματος και νερού. Σταδιακά η παραπάνω εκρηκτική δραστηριότητα μετατράπηκε σε έκχυτη<sup>42</sup>.

Το ηφαιστειακό κέντρο της Φυριπλάκας χαρακτηρίζεται από έναν παλαιότερο δακτύλιο τόφφων, υπόλοιπα του οποίου εμφανίζονται στα νοτιοανατολικά του Προβατά. Ο δακτύλιος αυτός καλύπτεται από έναν πυροκλαστικό κώνο που αποτελείται από τεμαχισμένη λάβα και λιθάρια. Η δραστηριότητα αυτής της ηφαιστειακής φάσης έληξε με την έκχυση της λάβας<sup>43</sup>.

Μετά από αυτές τις δραστηριότητες ακολούθησε μια φάση εκτεταμένων φρεατικών εκρήξεων, οι οποίες οδήγησαν στην επιφάνεια τεμάχια από την μεταμορφωμένη βάση, τα οποία αποτέθηκαν ως πράσινο λαχάρ. Η παρουσία ενός παλαιο-εδάφους, που καλύπτει τα φρεατικά αποθέματα δείχνει το τέλος της παραπάνω εκρηκτικής δραστηριότητας<sup>44</sup>.

Η ηφαιστειακή φάση που ακολούθησε χαρακτηρίστηκε από φρεατο-μαγματική δραστηριότητα και δημιούργησε έναν πλατύ δακτύλιο τόφφων, με εσωτερική διάμετρο περίπου 1,5 χλμ. Η πλειονότητα των πυροκλαστικών προϊόντων αποτελείται από ογκώδη αποθέματα, με το κατώτερό τους τμήμα να αποτελείται κατά το ήμισυ από μεταμορφωμένο υλικό. Η ακόλουθη δραστηριότητα εμφανίστηκε στο δυτικό και στο εσωτερικό τμήμα αυτού του μεγάλου κώνου δημιουργώντας ένα νέο κώνο από τεμάχη και λιθάρια. Οι δύο μεγάλοι κώνοι ενωθηκαν σχηματίζοντας μια σειρά από μικρότερους. Οι εσωτερικοί συνδέονται με λάβα, η οποία ρέει προς τα βορειοανατολικά και καταλήγουν στην θάλασσα, στον κόλπο της Μήλου. Οι ροές λάβας είναι κυρίως περλιτικές με μια θραυσματογενή επιφάνεια<sup>45</sup>.

### **Προϊόντα της φρεατικής δραστηριότητας (πλειστόκαινο - σήμερα)**

Σε όλο το ανατολικό τμήμα της Μήλου βρίσκονται διασκορπισμένοι κρατήρες απο φρεατικές εκρήξεις, με τους περισσότερους από αυτούς να συγκεντρώνονται βόρεια της πεδιάδας της Ζεφυρίας. Η

40.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

41.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

42.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

43.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

44.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

45.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

διάμετρος των κρατήρων σπάνια υπερβαίνει το 1 χλμ. Τα προϊόντα της φρεατικής δραστηριότητας σχηματίστηκαν από το πλειστόκαινο έως και την πρόσφατη εποχή και η λιθολογία τους αντανάκλα αυτή του μητρικού πετρώματος. Από τις φρεατικές καταπτώσεις σχηματίζεται το πράσινο λαχάρ και το πάχος του τείνει να αυξάνεται κοντά σε κατήρες εκρήξεων<sup>46</sup>.

Η δραστηριότητα αυτή έλαβε χώρα κατά το τεταρτογενές αφού τα προϊόντα της υπέρκεινται των ηφαιστιτών και καλύπτονται από πολύ πρόσφατα αιολικά ιζήματα. Στο νότιο τμήμα του νησιού συναντάμε μερικούς φρεατικής προέλευσης σχηματισμούς, οι οποίοι καλύπτονται από τα νεότερα πυροκλαστικά προϊόντα του ηφαιστειακού συστήματος της Φυριπλάκας<sup>47</sup>.

### 3.1.2 Αντίμηλος

Η Αντίμηλος βρίσκεται 21 χλμ βορειοδυτικά της Μήλου και είναι ένα καθαρά ηφαιστειακό νησί με έντονο ανάγλυφο και απότομους γκρεμούς που καταλήγουν στην θάλασσα. Το νησί είναι ουσιαστικά ένας γεωμετρικός ηφαιστειακός θόλος ύψους περίπου 700μ. Αποτελείται από ανδσειτικές και δακτικές λάβες, τόφφους αλλά και διάφορους τύπους ρών οι οποίοι δίνουν το χαρακτηριστικό του ανάγλυφο. Η ηλικία των ηφαιστειακών σχηματισμών έχει προσδιοριστεί περίπου στα 0,32 εκατ. χρόνια<sup>48</sup>.

Το νησί έχει σχήμα περίπου τριγωνικό με μήκος από Βορρά μέχρι τον Νότο περί τα 4 χλμ και πλάτος από Δύση προς Ανατολή περί τα 3 χλμ. Έχει συνολική έκταση περίπου 8 τετρ. χλμ και περίμετρο σχεδόν 10χλμ. Η υψηλότερη κορυφή του βρίσκεται στο βόρειο τμήμα και φτάνει σε ύψος τα 686 μ. Οι απότομες πλαγιές του νησιού με κλίσεις που κυμαίνονται από 30 - 40 μοίρες φτάνουν από την κορυφή μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας και πολλές φορές συνεχίζουν και κάτω από αυτήν. Η βόρεια πλευρά είναι και η πιο απότομη στην οποία οι κλίσεις φτάνουν μέχρι και τις 50 μοίρες. Την τοπογραφία του νησιού συμπληρώνουν ξηρά ρεύματα, τα οποία διανοίγονται από τις κορυφές μέχρι τις ακτές. Σημεία όπου το ανάγλυφο είναι πιο ομαλό, συναντάμε στα υψηλότερα σημεία του νησιού ανάμεσα στη βόρεια και στη νότια κορυφή<sup>49</sup>.

Γεωλογικά η Αντίμηλος αποτελεί εξ ολοκλήρου ηφαιστειογενές νησί με μορφολογική εικόνα ηφαιστείου νέας ηλικίας. Πετρολογικά αποτελείται μόνο από ηφαιστειακά πετρώματα, λάβες, τόφφους και ροές. Τα περισσότερα ακρωτήρια του νησιού έχουν δημιουργηθεί από ροές λάβας που έρευσαν μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας<sup>50</sup>.

Η δημιουργία της Αντιμήλου θεωρείται πως αντιστοιχεί στην δεύτερη και τρίτη φάση των εκρήξεων της Μήλου εντός του ανώτερου πλειοκαινού καθώς συναντάμε ομοιότητες στις λάβες αυτής της ηλικίας και στα δύο νησιά. Οι λάβες αυτές είναι δακτικές και ανδσειτικές, με τις πρώτες να αντιστοιχούν στην δεύτερη περίοδο εκρήξεων της Μήλου, και τις επόμενες στην τρίτη. Το κύριο σώμα, λοιπόν, του νησιού αποτελείται από δακίτη, ενώ οι δύο ακραίες κορυφές, βόρεια και νότια, από ανδσειτή μεταγενέστερα του δακίτη. Ο δακίτης περιγράφεται ως πυροξενικός δακίτης με ανδσεινή και ο ανδσειτής ως πυροξενικός, επίσης, με ανδσεινή, αλλά και ολιβίνη<sup>51</sup>.

Η Αντίμηλος παρουσιάζει την εικόνα ήρεμου ηφαιστείου. Οι κρατηροειδείς κοιλάτες που βρίσκονται στη βόρεια κορυφή αποτελούν αβαθείς καλδέρες που δημιουργήθηκαν από υποχώρηση της λάβας, μετά την έξοδό της και την διαμορφωση των δόμων. Μετά τις τελευταίες εκρήξεις της ανδσειτικής λάβας, η Αντίμηλος βρίσκεται σε περίοδο ηφαιστειακής αδράνειας, καθώς δεν παρατηρείται μέχρι και σήμερα η δράση έστω ατμίδων ή άλλη παρόμοια μετα-εκρηξιγενή δραστηριότητα, σε αντίθεση με τις

46.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

47.Κυριακόπουλος Κ. Γ., Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014

48.Nomikou P., Paranikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146

49.Μαρίνος Γ., Το Ηφαίστειο της Αντιμήλου, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 1959

50.Μαρίνος Γ., Το Ηφαίστειο της Αντιμήλου, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 1959

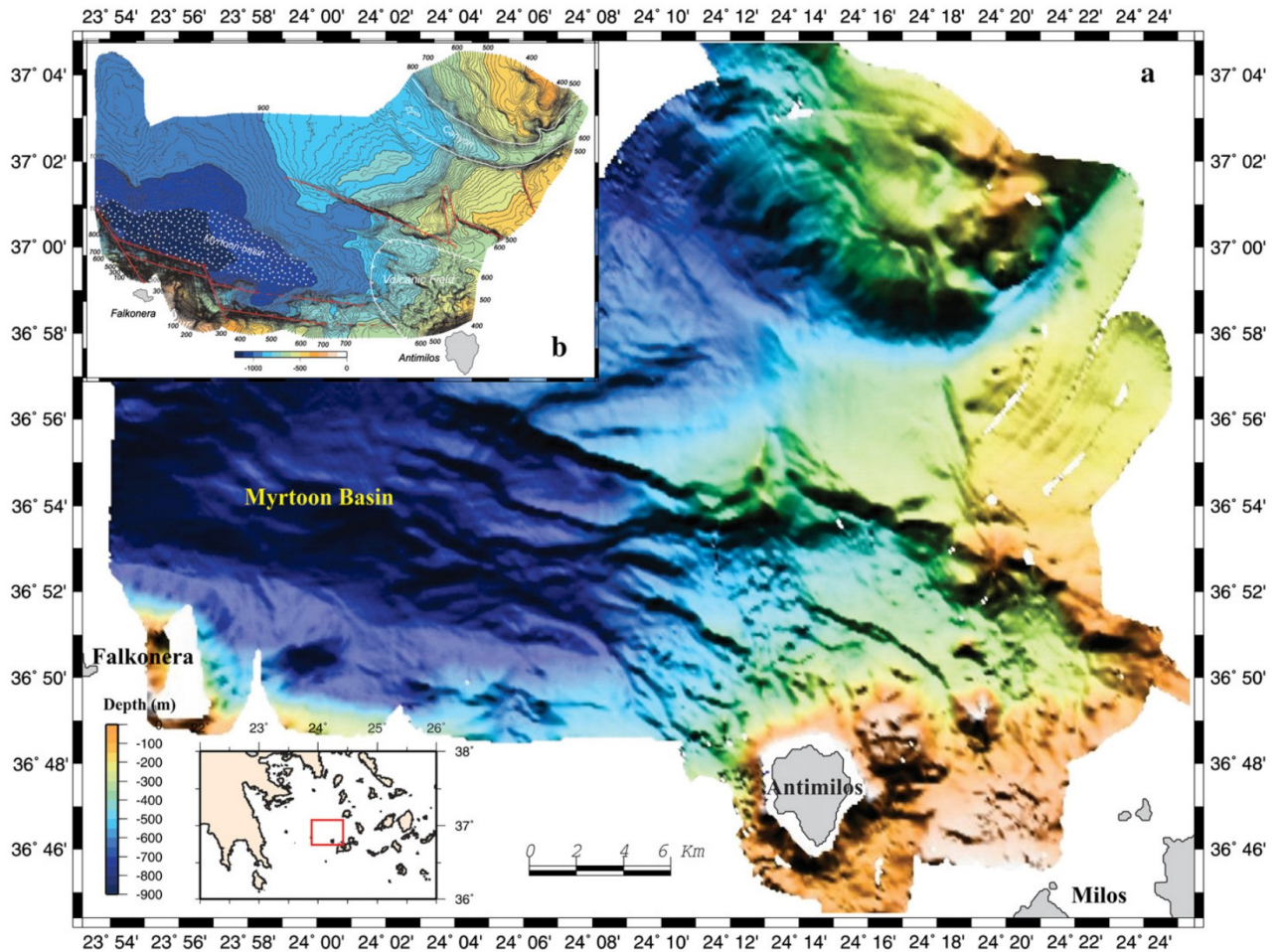
51.Μαρίνος Γ., Το Ηφαίστειο της Αντιμήλου, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 1959

ατιμίδες και τις θερμές πηγές στη Μήλο<sup>52</sup>.

### 3.2 Υποθαλάσσια ηφαιστειότητα

#### 3.2.1 Υποθαλάσσιο Ηφαιστειακό Πεδίο Αντιμήλου

Στον υποθαλάσσιο χώρο στα ανοιχτά της Αντιμήλου παρατηρούμε μια περιοχή μικρής κλίμακας με τραχύ ανάγλυφο στα βορειοδυτικά του νησιού και μια σειρά από 3 διαδοχικούς ηφαιστειακούς θόλους στα βορειοανατολικά. Η παραπάνω δομές φαίνεται να αντιστοιχούν σε επέκταση στον υποθαλάσσιο χώρο του ηφαιστείου της Αντιμήλου[1].<sup>53</sup>



**Εικόνα 11: a)** Βυθομετρικός χάρτης με σκιασμένο ανάγλυφο του ηφαιστειακού πεδίου του Αντιμήλου με βάση τα βυθομετρικά δεδομένα πολλαπλών ακτίνων. **b)** Βυθομετρικός χάρτης της λεκάνης του Μυρτώου (Nomikou et al. 2012)

Οι 3 ηφαιστειακές δομές στα βορειοανατολικά βρίσκονται σε σειρά από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο όσο απομακρυνόμαστε από το νησί και τοποθετούνται σε βάθη από 200 έως 500 μ. Έχουν διάμετρο περίπου 100 με 300μ και μέγιστο ύψος της τάξης των 50μ. από τις πλατφόρμες μέχρι τις πλαγιές διανοίγονται στον πυθμένα της θάλασσας αρκετά κανάλια πλάτους από 200μ και μήκους έως και 4 χλμ, τα οποία υποδηλώνουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς ηφαιστειοκλαστικών ιζημάτων από το νησί προς το εγγύς τμήμα των αποθέσεων ηφαιστειακών κατολισθήσεων. Σε αυτά τα σημεία συναντάμε μεγάλα τεμάχη

52.Μαρίνος Γ., Το Ηφαίστειο της Αντιμήλου, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας,1959

53.Nomikou P., Paranikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146



(hammocks) ηφαιστειακού υλικού μερικώς θαμμένα από το ίζημα[2].<sup>54</sup>

Αντίστοιχες μορφές με κανάλια και υλικό ηφαιστειακών κατολισθήσεων συναντάμε σε όλο τον υποθαλάσσιο χώρο του ηφαιστειακού πεδίου στα βόρεια της Αντιμήλου. Το μεγάλο αυτό πεδίο καλύπτει μια έκταση περίπου 260 τετρ. χλμ και φαίνεται να έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτό του ηφαιστείου της Αντιμήλου. Το πεδίο με τα ηφαιστειακά τεμάχια (hammocks) καλύπτει μια μεγάλη έκταση περίπου 56 τετρ. χλμ. Το πεδίο αυτό εικάζεται πως συνδέεται με την κατάρρευση μιας μεγαλύτερης, προϋπάρχουσας ηφαιστειακής δομής, η οποία αποτελούσε τμήμα του ηφαιστείου της Αντιμήλου[3].<sup>55</sup>

### 3.2.2 Υδροθερμικό Ατμιδικό Πεδίο Παλαιοχωρίου

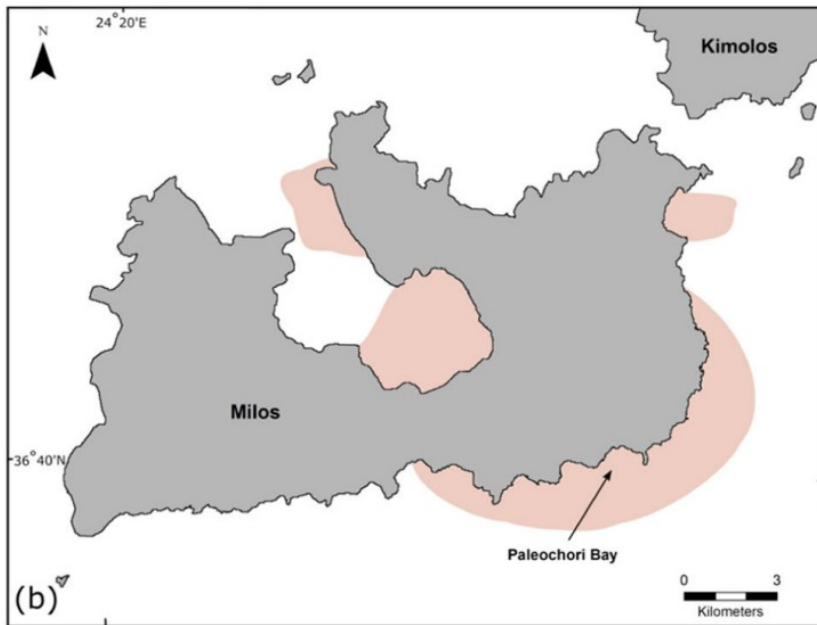
Η Μήλος φιλοξενεί ένα ενδεχομένως από τα μεγαλύτερα υδροθερμικά συστήματα ρηχών νερών στον κόσμο, με έκταση που υπολογίζεται στα 35 τετρ. χλμ. Στο νησί συναντάμε θερμές πηγές και φουμαρόλες, κυρίως στην ανατολική του πλευρά και υποθαλάσσια υδροθερμική δραστηριότητα σε όλο το νοτιοανατολικό του τμήμα, καθώς και στο νοτιοανατολικό και βορειοανατολικό κομμάτι εσωτερικά του μεγάλου κόλπου της Μήλου. Το σημείο όμως με την πιο έντονη δραστηριότητα υποθαλάσσιων ατμίδων βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού, στον κόλπο του Παλαιοχωρίου. Εκεί τα υδροθερμικά ρευστά εκλύονται σε βάθη από 2 έως 15 μ κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, σε μια έκταση περίπου 1000 επί 500 μ.<sup>56</sup> Η υδροθερμική δραστηριότητα στο Παλαιοχώρι εμφανίζει εκπομπές ρευστών υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλού pH με ποικίλες συγκεντρώσεις χλωρίου, καθώς και διαλυμένα αέρια (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>) που αναμειγνύονται ποικιλοτρόπως με το θαλασσινό νερό. Τα ρευστά είναι αλατούχα και θειούχα, φτωχά σε Mg<sup>2+</sup> και SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> και ιδιαίτερα εμπλουτισμένα σε As και CO<sub>2</sub>, σε συνδυασμό με Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub> και άλλα διαλυμένα αέρια. Η υδροθερμική δραστηριότητα συχνά συνδέεται με την εμφάνιση πορτοκαλί και λευκών ιζημάτων βακτηριακής και υδροθερμικής-ορυκτολογικής προέλευσης.<sup>57</sup>

54.Nomikou, P., Papanikolaou, D., Tibaldi, A., Carey, S., Livanos, I., Bell, K.L.C., Rousakis,G., The Detection of Volcanic Debris Avalanches (VDAs) Along the Hellenic Volcanic Arc, Through Marine Geophysical Techniques, In: Submarine MassMovements and Their Consequences. Springer, 2014, pages 339–349

55.Nomikou, P., Papanikolaou, D., Tibaldi, A., Carey, S., Livanos, I., Bell, K.L.C., Rousakis,G., The Detection of Volcanic Debris Avalanches (VDAs) Along the Hellenic Volcanic Arc, Through Marine Geophysical Techniques, In: Submarine MassMovements and Their Consequences. Springer, 2014, pages 339–349

56.Khimasia A., Rovere A., Pichler T., Hydrothermal areas microbial mats and sea grass in Paleochori Bay, Milos, Greece, Journal of maps, Volume 16, 2020, pages 348-356

57.Puzenat V., Escartín J., Martelat J., Barreyre T., Bauer S., Nomikou P., Gracias N., Allemand P., Antoniou V., Coskun O., Garcia R., Grandjean P., Jørgensen S., Magí L., Mandalakis M., Orsi W., Polymenakou P., Schouw A., Vallicrosa G., Vlasopoulos O., Shallow-water hydrothermalism at Milos (Greece): Nature, distribution, heat fluxes and impact on ecosystems, Marine Geology, Volume 438, 2021



**Εικόνα 12:** Χάρτης της Μήλου όπου φαίνεται με κόκκινο χρώμα η έκταση (35 τετρ.χλμ ) όπου παρατηρείται υποθαλάσσια Υδροθερμική δραστηριότητα. ( Khimasia et al. 2020 )

Ο βυθός στο Παλαιοχώρι καλύπτεται από ιζήματα ηφαιστειακής προέλευσης και βαθαινει βαθμιαία μέχρι τα 15 μ βάθος στα 500μ ανοιχτά από την ακτή. Στα σημεία με υδροθερμική εκφόρτιση τα ιζήματα παίρνουν ένα χρώμα λευκό και κιτρινοπορτοκαλί, λόγω του σχηματισμού στρωμάτων βακτηρίων, τα οποία φιλοξενούν χημολιθοτροφικά βακτήρια οξειδωσης θείου και αναγωγής θειικών αλάτων. Τα ιζήματα του πυθμένα μπορούν επίσης να έχουν κοκκινωπό και κιτρινωπό χρώμα λόγω της καταβύθισης υδροξειδίων του σιδήρου και σουλφιδίων αρσενικού από τα υδροθερμικά ρευστά. Τα διαφορετικά χρώματα στα ιζήματα σχετίζονται και με τις διαφορετικές τους θερμοκρασίες και επομένως με τις διαφορετικές θερμοκρασίες του υδροθερμικού ρευστού που εκλύεται σε κάθε σημείο. Τα σημεία με λευκό ιζημα έχουν θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 45 έως και >80°C, ενώ τα κοκκινωπά και κιτρινωπά ιζήματα έχουν ελαφρώς χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τα τελευταία τα συναντάμε συνήθως να περιβάλλουν τα λευκά. Τις πιο θερμές περιοχές (>85°C) τις συναντάμε στο κέντρο των λευκών και συχνά χαρακτηρίζονται από έντονο κίτρινο έως κιτρινοπορτοκαλί χρώμα.<sup>58</sup>

Στον κόλπο του Παλαιοχωρίου συναντάμε 2 κύριους τύπους εκροής των υδροθερμικών ρευστών. Πρώτα έχουμε εκροή, που συνδέεται με έντονη εξάτμιση, η οποία εκδηλώνεται ως ρεύματα από φυσαλίδες αερίου που αναδύονται από τον αμμώδη πυθμένα ή απευθείας μέσα από το πέτρωμα. Ο δεύτερος τύπος εκροής αφορά διαρροή άλμης (brine seepage) με ελάχιστη έως και καθόλου εξάτμιση φυσαλίδων. Αυτός ο τύπος εκροής συνδέεται με τον σχηματισμό υδροθερμικών οικοδομημάτων που φτάνουν σε ύψος το μισό μέτρο και πλάτος έως και 1 μ. Αυτές οι δομές αποτελούν θειούχους δόμους που σχηματίζονται κυρίως στην περιοχή αλλά όχι γύρω από τα σημεία εκροής εξαιτίας του περιβάλλοντος υψηλής ενέργειας, στο οποίο λαμβάνει χώρα η απόθεση (υψηλή ενέργεια λόγω δράσης κυμάτων και περιστασιακής ανάβλυσης φυσαλίδων). Έχει βρεθεί μόνο ένα οικοδόμημα που να εμφανίζει κωνική δομή με κεντρικό άνοιγμα και αυτό πιθανώς να οφείλεται στην πυκνή εκροή υδροθερμικών, χάρη στην οποία σχηματίστηκε το κωνικό οικοδόμημα γύρω της.<sup>59</sup>

58.Khimasia A., Rovere A., Pichler T., Hydrothermal areas microbial mats and sea grass in Paleochori Bay, Milos, Greece, Journal of maps, Volume 16, 2020, pages 348-356

59.Valsami-Jones E., Baltatzis E., Bailey E.H., Boyce A.J., Alexander J.L., Magganas A. , Anderson L., Waldron S. ,

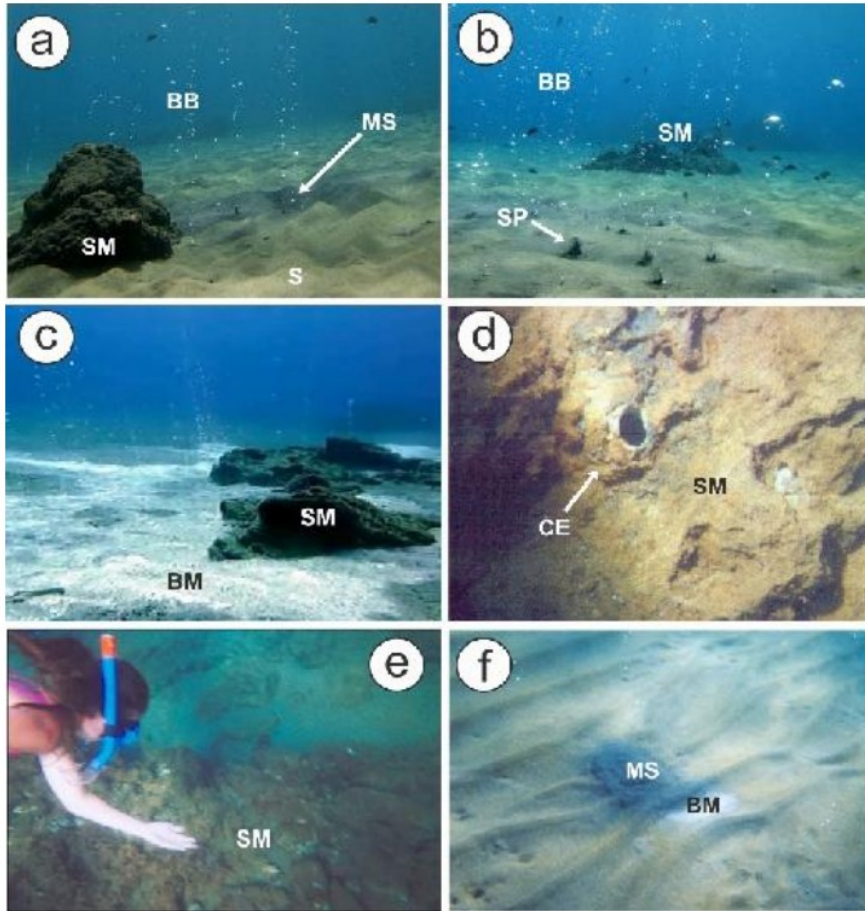
Οι υδροθερμικές δομές που συναντάμε στο Παλαιοχώρι αποτελούν λατυποπαγείς δομές που αποτελούνται από αποσαθρωμένους πυριτικούς κόκκους τσιμεντοποιημένους από συνδετικό υλικό σουλφιδίων (σιδηροπυρίτη). Από παρατηρήσεις έχει προταθεί πως δημιουργούνται και καταστρέφονται σε έναν ετήσιο κύκλο. Το καλοκαίρι δομούνται και το χειμώνα, ως αποτέλεσμα των έντονων καιρικών συνθηκών, καταστρέφονται. Δεν συνδέονται όλες οι δομές με ορατή υδροθερμική δραστηριότητα· μερικές αποτελούν και κατακρημνίσματα από ανενεργές ατμίδες. Συνήθως αυτά τα τεμάχια καλύπτονται μερικώς από άμμο, οπότε δεν είναι εύκολος ο προσδιορισμός του πραγματικού τους μεγέθους.<sup>60</sup>

Η υδροθερμική – ατμική δραστηριότητα στο Παλαιοχώρι χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα θειούχα (έως και 3mM H<sub>2</sub>S) με όξινο pH ≈5,5 και φτάνει σε θερμοκρασία έως και 122°C. Το υδροθερμικό σύστημα εκλύει ρευστά και αέρια με μέση θερμοκρασία 91 ±23°C. Τα αέρια που απελευθερώνονται τόσο από τις φουμαρόλες όσο και από τους αγωγούς (ατμίδες) αποτελούνται από CO<sub>2</sub> (55 – 92%Vol) H<sub>2</sub> (< 3% Vol) CH<sub>4</sub> (<10% Vol) και H<sub>2</sub>S (<8% Vol).<sup>61</sup>

Στον κόλπο του παλαιοχωρίου έχουν παρατηρηθεί δύο τύποι υδατικών ρευστών (1) ρευστά χαμηλού Cl που περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις αλκαλίων (K, Li, Na) και Ca, και υψηλές συγκεντρώσεις πυριτίου και θειικών, καθώς και (2) ρευστά υψηλού Cl που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αλκαλίων και Ca και χαμηλότερες συγκεντρώσεις πυριτίου και θειικών αλάτων σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό. Οι υψηλές περιεκτικότητες σε Zn, Cd, Mn και Pb στα ρευστά με υψηλό Cl υποδηλώνουν ότι τα μέταλλα αυτά πιθανώς μεταφέρονται ως χλωριούχα σύμπλοκα. Και οι δύο τύποι ρευστών εμφανίζονται ο ένας δίπλα στον άλλο σε ατμίδες που απέχουν μεταξύ τους μόνο λίγα μέτρα, και εκλύουν ρευστά με συγκεντρώσεις As έως 39 μM στα ρευστά υψηλής περιεκτικότητας σε Cl, και έως 78 μM στα ρευστά χαμηλής περιεκτικότητας σε Cl. Αυτοί οι δύο τύποι ρευστών στον Κόλπο του Παλαιοχωρίου θεωρείται πως προέρχονται από τον βρασμό ρευστών βαθιών ταμειυτήρων (~1-2 χλμ) και ρηχού θαλασσινού νερού. Τα ρευστά χαμηλού Cl είναι πιθανόν το αποτέλεσμα της συμπύκνωσης ατμών σε θαλασσινό νερό, σε περιβάλλον θερμαινόμενο με ατμό, ενώ τα ρευστά με υψηλή περιεκτικότητα σε Cl αραιώνονται σε Cl ως αποτέλεσμα της ανάμιξης του θαλασσινού νερού.<sup>62</sup>

Ragnarsdottir K.V., The geochemistry of fluids from an active shallow submarine hydrothermal system Milos island, Hellenic Volcanic Arc, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 148, Issues 1–2, 2005, Pages 130-151  
60.Valsami-Jones E., Baltatzis E., Bailey E.H., Boyce A.J., Alexander J.L., Magganas A. , Anderson L., Waldron S. , Ragnarsdottir K.V., The geochemistry of fluids from an active shallow submarine hydrothermal system Milos island, Hellenic Volcanic Arc, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 148, Issues 1–2, 2005, Pages 130-151  
61.Voudouris, P.; Kati, M.; Magganas, A.; Keith, M.; Valsami-Jones, E.; Haase, K.; Klemd, R.; Nestmeyer, M. Arsenian Pyrite and Cinnabar from Active Submarine Nearshore Vents, Paleochori Bay, Milos Island, Greece. Minerals 2021, 11, 14.

62.Voudouris, P.; Kati, M.; Magganas, A.; Keith, M.; Valsami-Jones, E.; Haase, K.; Klemd, R.; Nestmeyer, M. Arsenian Pyrite and Cinnabar from Active Submarine Nearshore Vents, Paleochori Bay, Milos Island, Greece. Minerals 2021, 11, 14.



**Εικόνα 13:** Υδροθερμικές εκροές από τα ιζήματα (S) του πυθμένα του κόλπου του Παλαιοχωρίου: **(a-c, d)** καμινάδα διαμέτρου 3 εκ. **e)** θειούχο ανάχωμα, **f)** μεταλλοφόρα ιζήματα (SM) και μικροβιακά στρώματα (BM) (Voudouris et al. 2020)

#### 4. Γκρουπ Σαντορίνης : Σαντορίνη - Χριστιανά - Κολούμπο

Το ηφαιστειακό γκρουπ της Σαντορίνης βρίσκεται στο νότιο κομμάτι των κυκλάδων, στο νότιο περιθώριο της πλατφόρμας των κυκλάδων και βόρεια της κρητικής λεκάνης, και αποτελείται από τρία ξεχωριστά ηφαιστειακά συμπλέγματα που βρίσκονται σε διεύθυνση νοτιοδυτικά - βορειοανατολικά. Ξεκινώντας από τα νοτιοδυτικά έχουμε τα Χριστιανά και πηγαίνοντας προς τα βορειοανατολικά συναντάμε τη Σαντορίνη στο κέντρο και στο βορειοανατολικό άκρο το υποθαλάσσιο ηφαιστειο Κολούμπο.



**Εικόνα 14:** Δορυφορική φωτογραφία από το Google Earth όπου φαίνονται τα Χριστιανιά, η Σαντορίνη και ο υποθαλάσσιος χώρος όπου βρίσκεται το ηφαιστειακό πεδίο του Κολούμπο.

## 4.1 Χερσαία Ηφαιστειότητα

### 4.1.1 Χριστιανιά

Τα Χριστιανιά αποτελούν μια ομάδα από ακατοίκητες ηφαιστειακές βραχονησίδες που βρίσκονται 18 χλμ περίπου νοτιοδυτικά από την Σαντορίνη. Οι νησίδες που τα αποτελούν είναι η Χριστιανή, η Ασκανιά και οι δύο έσχατες, οι οποίες βρίσκονται προσανατολισμένες σε μία ευθεία, με πρώτη και μεγαλύτερη στα βορειοδυτικά την Χριστιανή και τελευταίες τις έσχατες στα νοτιοανατολικά.

Η Χριστιανή, που είναι η βορειότερη από τα Χριστιανιά, απέχει περίπου 18 χλμ από το νοτιοδυτικό άκρο της Σαντορίνης (Ακρωτήρι). Έχει έκταση 1,188 τετρ. χλμ και υψηλότερη κορυφή στα 283μ. Η νησίδα Ασκανιά, δεύτερη σε σειρά, απέχει κάτι λιγότερο από 1 χλμ από τη Χριστιανή και έχει μέγεθος 257 τετρ μ και ύψος 168 μ από την επιφάνεια της θάλασσας. Στο μέσο της απόστασής της από την Χριστιανή, το βάθος είναι μόλις 4 μ. Στη συνέχεια προς τα νοτιοανατολικά βρίσκονται 2 μικρές βραχονησίδες, οι έσχατες, οι οποίες απέχουν 1,70 χλμ περίπου από την Ασκανιά. Οι δύο αυτές βραχονησίδες έχουν μακρόστενο σχήμα με διεύθυνση βορειοδυτικά - νοτιοανατολικά, έχουν μήκος περι τα 40μ η βόρεια και

50μ η νότια και βρίσκονται σχεδόν παράλληλα η μία από την άλλη, με απόσταση 10-20 μ. Μέγιστο ύψος παρατηρείται στα 23μ από την επιφάνεια της θάλασσας. Όλες αυτές οι νησίδες αποτελούν ηφαιστειακά νησιά και έχουν έντονο βραχώδες ανάγλυφο.



**Εικόνα 15:** Δορυφορική φωτογραφία από το Google Earth όπου φαίνονται οι τέσσερις νησίδες Χριστιανή, Ασκανιά και η Βόρεια και η Νότια Εσχάτη.

Τα Χριστιανά λοιπόν ανήκουν σε έναν ανεξάρτητο ηφαιστειακό κώνο που ανέρχεται από τον πυθμένα της θάλασσας και βγαίνει και έξω από αυτήν. Από την μορφολογία του πυθμένα γύρω από αυτά φαίνεται πως το ηφαίστειο αυτό έχει δώσει διάφορες ροές αλλά και πυροκλαστικές αποθέσεις. Ολόκληρο το ηφαιστειακό οικοδόμημα έχει δημιουργηθεί στην διασταύρωση ενός ζεύγους ρηγμάτων με διεύθυνση βόρειο βορειοδυτικά - νότιο νοτιοανατολικά και βόρειο βορειοανατολικά - νότιο νοτιοδυτικά, με κυριότερο το δεύτερο, το οποίο τέμνει απότομα τον ηφαιστειακό κώνο και διασχίζει βόρεια τον Βορρά

του νησιού (Χριστιανή).<sup>63</sup>

Οι διαστάσεις του ηφαιστειακού κώνου των Χριστιανών είναι 10 έως 13 χλμ και οι 4 νησίδες αποτελούν διαφορετικές κορυφές αυτού του κώνου, που είναι ευθυγραμμισμένες κατά διεύθυνση βόρειο βορειοδυτικά - νότιο νοτιοανατολικά. Το μέγιστο ύψος του κώνου είναι τα 283μ από την επιφάνεια της θάλασσας (Χριστιανή). Η βάση του ηφαιστείου υψώνεται από διαφορετικά βάθη του πυθμένα. Στο βόρειο τμήμα βρίσκεται σε βάθος 500μ περίπου, ενώ στο νότιο ξεπερνά τα 800μ βάθος. Το συνολικό ηφαιστειακό ανάγλυφο των Χριστιανών είναι πάνω από 900μ<sup>64</sup>.

Τα ανώτερα ηφαιστειακά πετρώματα των Χριστιανών φαίνεται να έχουν ηλικίες αντίστοιχες με αυτές του Ακρωτηρίου στη Σαντορίνη (0,65 - 0,55 εκατ. χρόνια). Παράλληλα τα κατώτερα πετρώματα συγκρίνονται με την κατώτερη σειρά ηφαιστειακών της Σαντορίνης και χρονολογούνται κατά το πλειόκαινο<sup>65</sup>.

#### 4.1.2 Σαντορίνη

Το ηφαίστειο της Σαντορίνης είναι το πιο ενεργό ηφαίστειο στον ελλαδικό χώρο και το πιο δημοφιλές. Βρίσκεται στο νοτιότερο τμήμα των κυκλάδων, νότια της Ίου και δυτικά από την Ανάφη, και απέχει 240 περίπου χλμ από τον Πειραιά και 120 χλμ από την Κρήτη. Έχει έκταση 79,194 τετρ. χλμ, μήκος ακτογραμμής 67 χλμ με υψηλότερη κορυφή τα 567μ στον Προφήτη Ηλία και πληθυσμό περίπου 15.000 κατοίκους. Αποτελείται συνολικά από πέντε νησιά, την Θήρα (το μεγαλύτερο), την Θηρασιά στα ανατολικά, το Ασπρονήσι νότια της Θηρασιάς και την Παλαιά και Νέα Καμένη στο κέντρο της καλδέρας<sup>66</sup>. Η πλημμυρισμένη αυτή καλδέρα φτάνει σε βάθος από 290-390 μ, ενώ τα απότομα τοιχώματά της ανέρχονται σε ύψος έως και 300μ πάνω από την θάλασσα<sup>67</sup>.

Η μορφολογία του νησιού είναι ιδιαίτερα έντονη με απότομους γκρεμούς στο εσωτερικό της καλδέρας, ενώ όσο παρατηρούμε προς το εξωτερικό του νησιού το αναγλυφο είναι πιο ομαλό χωρίς έντονο διαμελισμό. Το ίδιο παρατηρείται και στη Θήρα και στην Θηρασιά. Το έδαφος της Σαντορίνης είναι σχετικά πεδινό και άνυδρο, χωρίς λίμνες, ποταμούς, ρεματιές ή χαράδρες. Αντίθετα η όψη από το ηφαίστειο στο εσωτερικό της καλδέρας παρατηρείται πιο βραχώδης και απόκρημνη. Στη Σαντορίνη δεν συναντάμε μόνο ηφαιστειακά πετρώματα, αλλά και μάρμαρα και φυλλίτες, που αποτελούν το κρυσταλλικό της υπόβαθρο. Τα πετρώματα αυτά παρατηρούνται στην νοτιοανατολική πλευρά της Θήρας και στο τείχος της καλδέρας κοντά στο λιμάνι του Αθηνιού<sup>68</sup>.

Το ηφαίστειο της Σαντορίνης υπέρκειται του ηπειρωτικού φλοιού της κυκλαδικής μάζας, ο οποίος αποτελείται από μη εκτεθειμένους γνεύσιους του Προτεροζωϊκού (Ηρακυνικό υπόβαθρο - Hercynian basement) και Μεσοζωϊκά πυριγενή και ιζηματογενή συμπλέγματα. Αυτά τα συμπλέγματα έχουν υποστεί μεταμόρφωση υψηλών και μέσω πιέσεων κατά τη διάρκεια του Ηωκαίνου και του Μειοκαίνου αντίστοιχα

63.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146

64.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146

65.Tsampouraki-Kraounaki K., Sakellariou D., Seismic stratigraphy and geodynamic evolution of Christiana Basin, South Aegean Arc, Marine Geology, Volume 399, 2018, Pages 135-147

66.Ιωάννου Σ., Ανάλυση Επικινδυνότητας λόγω ηφαιστειακής τέφρας, εκτίμηση κινδύνου και διαχείριση κρίσης στο ηφαίστειο της Σαντορίνης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας συγκοινωνιών, διαχείριση έργου και σχεδιασμού χώρου, Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, 2013

67.Perissoratis C., The Santorini volcanic complex and its relation to the stratigraphy and structure of the Aegean arc, Greece, Marine Geology, Volume 128, Issues 1–2, 1995, Pages 37-58

68.Ιωάννου Σ., Ανάλυση Επικινδυνότητας λόγω ηφαιστειακής τέφρας, εκτίμηση κινδύνου και διαχείριση κρίσης στο ηφαίστειο της Σαντορίνης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας συγκοινωνιών, διαχείριση έργου και σχεδιασμού χώρου, Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, 2013

(Αλπική ορογένεση). Στο κύριο νησί της Σαντορίνης, τη Θήρα, έχουν παρατηρηθεί αλλοιωμένοι ασβεστόλιθοι του τριαδικού και μεταπηλίτες του Ηωκαίνου στο βουνό του Προφήτη Ηλία και στον Αθηνιό, καθώς και στην περιοχή του μεγαλοχωρίου σε πυρήνες γεωτρήσεων έχουν εντοπιστεί γρανιτοειδή<sup>69</sup>.

Τα αρχαιότερα ηφαιστειακά προϊόντα στην Σαντορίνη χρονολογούνται στα 1,5 - 1,6 εκατ. χρόνια, σημαντικά πιο νέα από εκείνα της Μήλου<sup>70</sup>. Η πρώιμη ηφαιστειότητα στη Σαντορίνη χαρακτηρίστηκε από έκχυτη έως τοπικά εκρηκτική δραστηριότητα στη χερσόνησο του Ακρωτηρίου, η οποία παρήγαγε βασαλτικές έως ρυοδακτικές υποθαλάσσιες και υποεπιφανειακές (subaerial) λάβες, υαλοκλαστικά κροκαλοπαγή (breccias) και άλλες πυροκλαστικές αποθέσεις (650 - 550 χιλ. χρόνια πρώιμα ηφαιστειακά κέντρα, χερσόνησος Ακρωτηρίου). Στο βόρειο περιθώριο της σημερινής καλδέρας, 530 χιλ. χρόνια πριν, αναπτύχθηκε ένα στρωματοηφαίστειο που ονομάστηκε Περιστέρια, παράγοντας μια διαδοχή από βασαλτικές και ανδεσιτικές λάβες. Παράλληλα στη χερσόνησο του Ακρωτηρίου συμβαίνουν εκρήξεις στρομπολικού τύπου. Από τα 360 χιλ. χρόνια και μετά έχουν συμβεί 12 κύριες και μεγάλες εκρήξεις και έχει καταρρεύσει η καλδέρα τουλάχιστον πέντε φορές. Οι αποθέσεις από αυτές τις εκρήξεις ορίζουν 2 μαφικούς προς πυριτικούς μαγματικούς κύκλους που έληξαν με τον σχηματισμό της κατώτερης κυσιρης, 172 χιλ. χρόνια πριν και με την Μινωική έκρηξη, 3,6 χιλ. χρόνια πριν, αντίστοιχα<sup>71</sup>. Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι το ηφαίστειο της Σαντορίνης δίνει καταστροφικές εκρήξεις σαν κι αυτές περίπου κάθε 15-20 χιλ. χρόνια<sup>72</sup>.

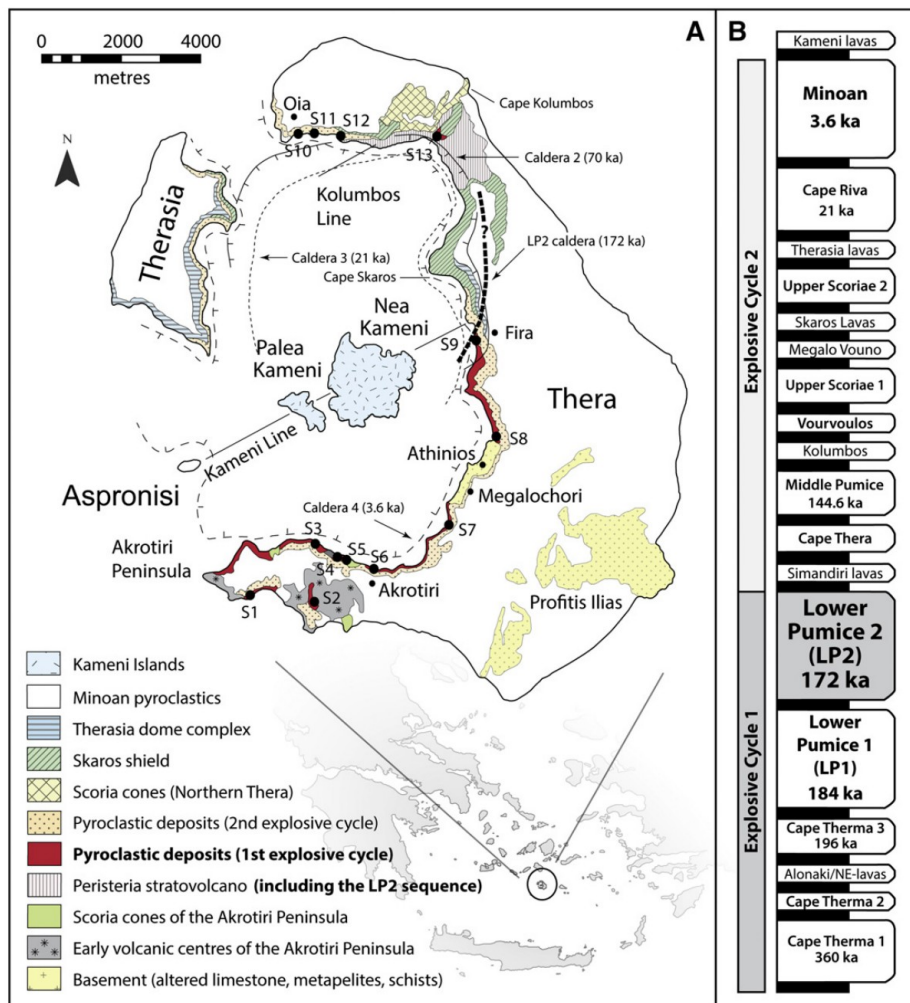
69. Simmons J.M., Cas R.A.F., Druitt T.H., Carey R.J. The initiation and development of a caldera-forming Plinian eruption (172 ka Lower Pumice 2 eruption, Santorini, Greece), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 341, 2017, Pages 332-350

70. Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., *Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc*, *Tectonophysics*, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146

71. Simmons J.M., Cas R.A.F., Druitt T.H., Carey R.J. The initiation and development of a caldera-forming Plinian eruption (172 ka Lower Pumice 2 eruption, Santorini, Greece), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 341, 2017, Pages 332-350

72. Ιωάννου Σ., Ανάλυση Επικινδυνότητας λόγω ηφαιστειακής τέφρας, εκτίμηση κινδύνου και διαχείριση κρίσης στο ηφαίστειο της Σαντορίνης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας συγκοινωνιών, διαχείριση έργου και σχεδιασμού χώρου, Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, 2013





**Εικόνα 16:** Εικ. 16: **A)** Χάρτης όπου φαίνεται η κατανομή των πυροκλαστικών της Θήρας στη Σαντορίνη (συμπεριλαμβανομένης της ακολουθίας LP2, κατά Druitt et al., 1999). **B)** Στρωματογραφία των πυροκλαστικών της Θήρας (κατά Druitt et al., 1999).

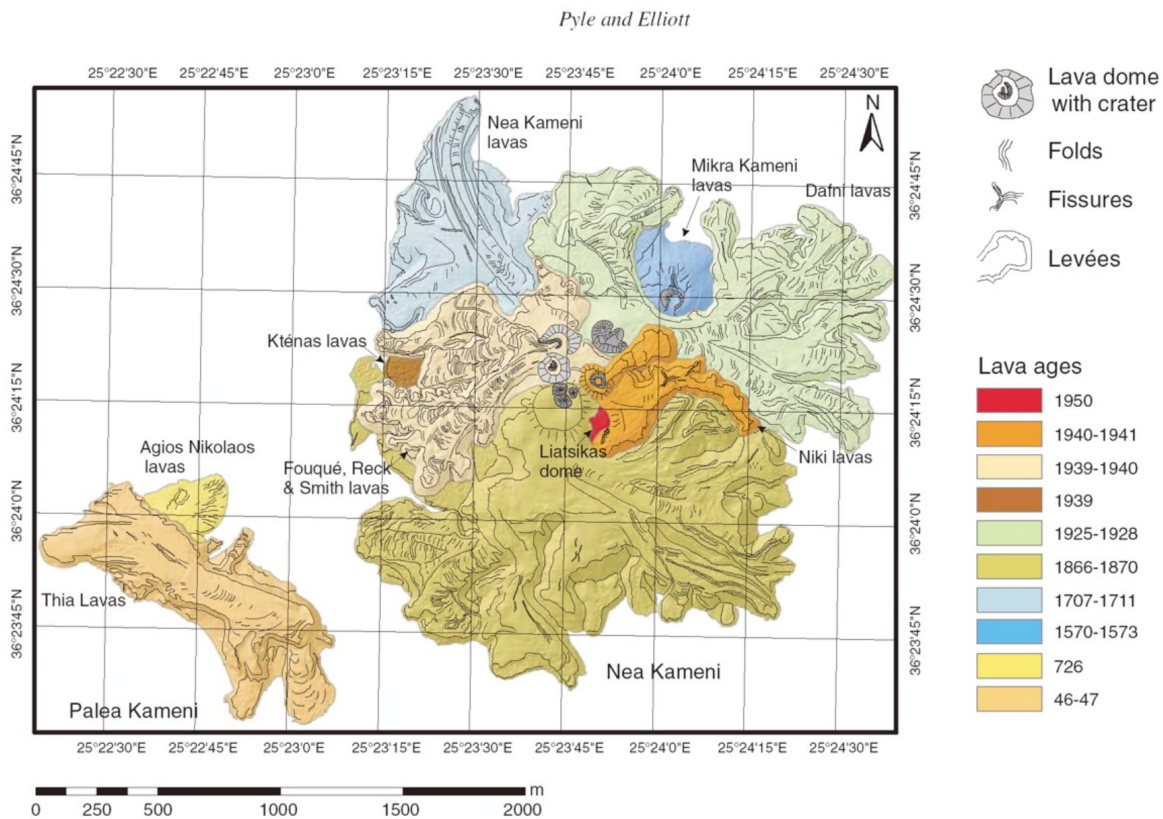
Οι μαύρες ράβδοι υποδηλώνουν περιόδους διάβρωσης μεταξύ των εκρήξεων. Ημερομηνίες εκρήξεων από Druitt et al. (1999), Keller et al. (2000), Friedrich et al. (2006), Lee et al. (2013) και Fabbro et al. (2013). (Simmons et al. 2017)

Η τελευταία λοιπόν από αυτές τις 12 μεγάλες εκρήξεις, η Μινωική, έγινε το 1613 π.Χ. και ήταν αυτή που οδήγησε στην καταστροφή πολλών οικισμών του νησιού, αλλά και του Αιγαίου στην εποχή του χαλκού. Η μινωική τέφρα σχημάτισε ένα λευκό κάλυμμα πάνω στο νησί με πάχος που φτάνει και τα 50μ. Κάτω από αυτό το κάλυμμα παρατηρούνται διαδοχικά πολύχρωμα στρώματα λάβας, πυροκλαστικές ροές, αποθέσεις τέφρας και άλλοι ηφαιστειακοί σχηματισμοί, που εκτίθενται στα τοιχώματα της καλδέρας και αποδεικνύουν την ποικίλη ηφαιστειακή ιστορία του νησιού<sup>73</sup>.

Από την καταστροφική Μινωική έκρηξη του 17ου αι. π.Χ. έχουν σημειωθεί πολλές αρκετά ασθενέστερες εκρήξεις με αποτέλεσμα το τοπίο να αλλάξει ακόμα και κατά τα πολύ πρόσφατα ιστορικά χρόνια. Το νησί της Νέας Καμένης στο κέντρο της καλδέρας σχηματίζει την κορυφή του ενεργά αναπτυσσόμενου νέου ηφαιστειακού κέντρου. Ο αρχαίος γεωγράφος Στράβων ήταν ο πρώτος που κατέγραψε ηφαιστειακές εκρήξεις μέσα στην καλδέρα της Σαντορίνης. Περιέγραψε την γέννηση ενός νεοσύστατου μικρού νησιού στη μέση της καλδέρας, το 197 π.Χ., το οποίο σήμερα αντιστοιχεί στην

73.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146

Παλαιά Καμένη. Από την γέννηση της Καμένης (Παλαιάς και Νέας) έχουν ακολουθήσει αρκετές εκρηκτικές φάσεις κατά τα έτη 46-47, 726, 1570-1573, 1707-1711, 1806-1870, 1925-1928, 1930 - 1941 και 1950 μ.Χ που έχουμε και την τελευταία έκρηξη<sup>74</sup>. Πιο σύγχρονα το 2011-2012 η διείσδυση  $>1,4 \times 10^7 \text{m}^3$  μάγματος κάτω από την Σαντορίνη, οδήγησε σε διόγκωση του δαπέδου της καλδέρας και στην αυξημένη σεισμικότητα<sup>75</sup>.



**Εικόνα 17:** Γεωλογικός χάρτης των νησιών Καμένων. Τα ονόματα των επιλεγμένων πεδίων λάβας ακολουθούν τις συμβάσεις που ξεκίνησαν από τον Φουκέ (1879) και τους μεταγενέστερους συγγραφείς (Georgalas, 1962). (Pyle et al. 2006)

## 4.2 Υποθαλάσσια Ηφαιστειότητα

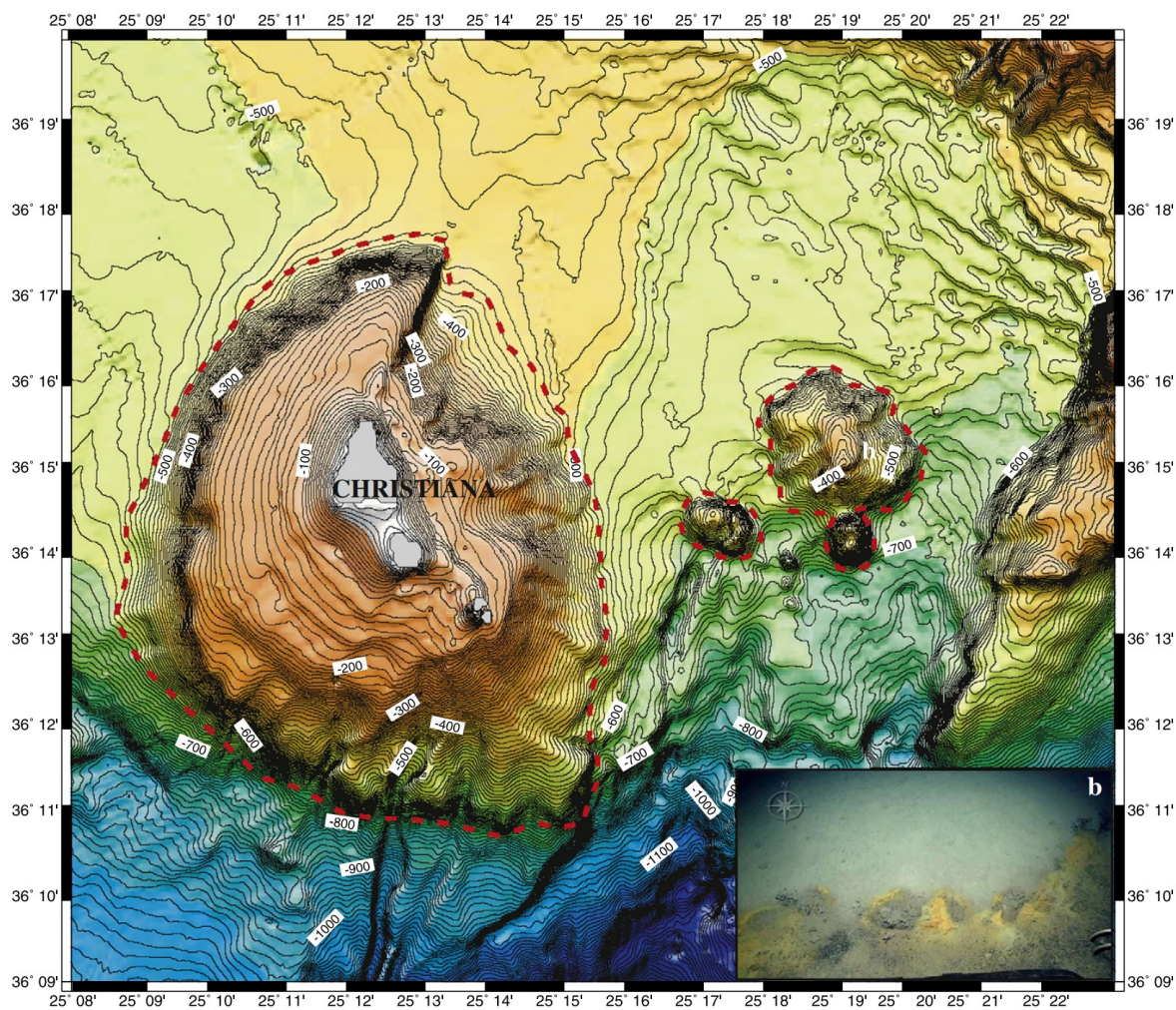
### 4.2.1 Χριστιανά

Στον θαλάσσιο πυθμένα ανατολικά από τα Χριστιανά, σε απόσταση 10χλμ και σε βάθος 500-600 μ παρατηρούνται 3 νέες δομές ηφαιστειακών δόμων. Η μεγαλύτερη δομή βρίσκεται στα 300μ βάθος, ενώ οι άλλες δύο μικρότερες έχουν τις κορυφές του στα 400μ βάθος. Επομένως προκύπτει ένα ηφαιστειακό ανάγλυφο 300 μ. για το μεγαλύτερο δόμο και 200μ. για τους δύο μικρότερους. Από υποθαλάσσιες έρευνες προέκυψαν ενδείξεις ρηγμάτων σε βράχους με διαφορά υψομέτρου έως και 100 μ καθώς και μικρές αποικίες κίτρινων, πιθανώς θειούχων υδροθερμικών βακτηρίων.<sup>76</sup>

74.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

75.Simmons J.M., Cas R.A.F., Druitt T.H., Carey R.J. The initiation and development of a caldera-forming Plinian eruption (172 ka Lower Pumice 2 eruption, Santorini, Greece), Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 341, 2017, Pages 332-350

76.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146



**Εικόνα 18:** Βυθομετρικός χάρτης του ηφαιστειακού πεδίου των Χριστιανών, Οι τρεις πρόσφατα ανακαλυφθέντες υποθαλάσσιοι ηφαιστειακοί θόλοι απεικονίζονται με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές. **b)** Μικρές αποικίες υδροθερμικών βακτηρίων που παρατηρήθηκαν στις υψηλότερες πλαγιές του μεγαλύτερου ηφαιστειακού θόλου. (Nomikou et al. 2012)

#### 4.2.2 Σαντορίνη

Στο βυθό της καλδέρας της Σαντορίνης ανακαλύφθηκε μεγάλος αριθμός υδροθερμικών πηγών, οι οποίες έχουν χαμηλή θερμοκρασία εξόδου σε αντίθεση με αυτές που βρέθηκαν στον υποθαλάσσιο χώρο του Κολούμπο, που έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου. Η σημερινή διαμόρφωση της καλδέρας αποτελείται από τρεις διαφορετικές λεκάνες που σχηματίζουν ξεχωριστά περιβάλλοντα απόθεσης και χωρίζεται από τα ηφαιστειακά νησιά (Καμένες). Η βόρεια λεκάνη είναι η μεγαλύτερη και η βαθύτερη (389 μ) και αναπτύσσεται μεταξύ των Καμένων (Παλαιάς και Νέας), τη Θηρασιά και το βόρειο τμήμα της καλδέρας. Η δυτική λεκάνη είναι πιο μικρή με βάθος 325 μ και βρίσκεται κατά μήκος της Νησίδας Ασπρονήσι, της Παλαιάς Καμένης και του νότιου τμήματος της Θηρασιάς. Τέλος η νότια λεκάνη έχει βάθος 297μ και αναπτύσσεται ανάμεσα στις Καμένες και στο νότιο κομμάτι της καλδέρας. Οι τρεις αυτές μεταμινωικές καλδέρες που περιβάλλουν τις Καμένες, χωρίζονται μεταξύ τους από έντονο ανάγλυφο με ράχες και θόλους που φιλοξενούν και αυτοί υδροθερμική δραστηριότητα. Στα ανατολικά της Νέας

Καμένης παρατηρείται πιο εντονο υποθαλάσσιο ηφαιστειακό ανάγλυφο με βάθος μόλις 40 μ, το οποίο γεφυρώνει την απόσταση με τα Φηρά - Φηροστεφάνι στη Σαντορίνη<sup>77</sup>.

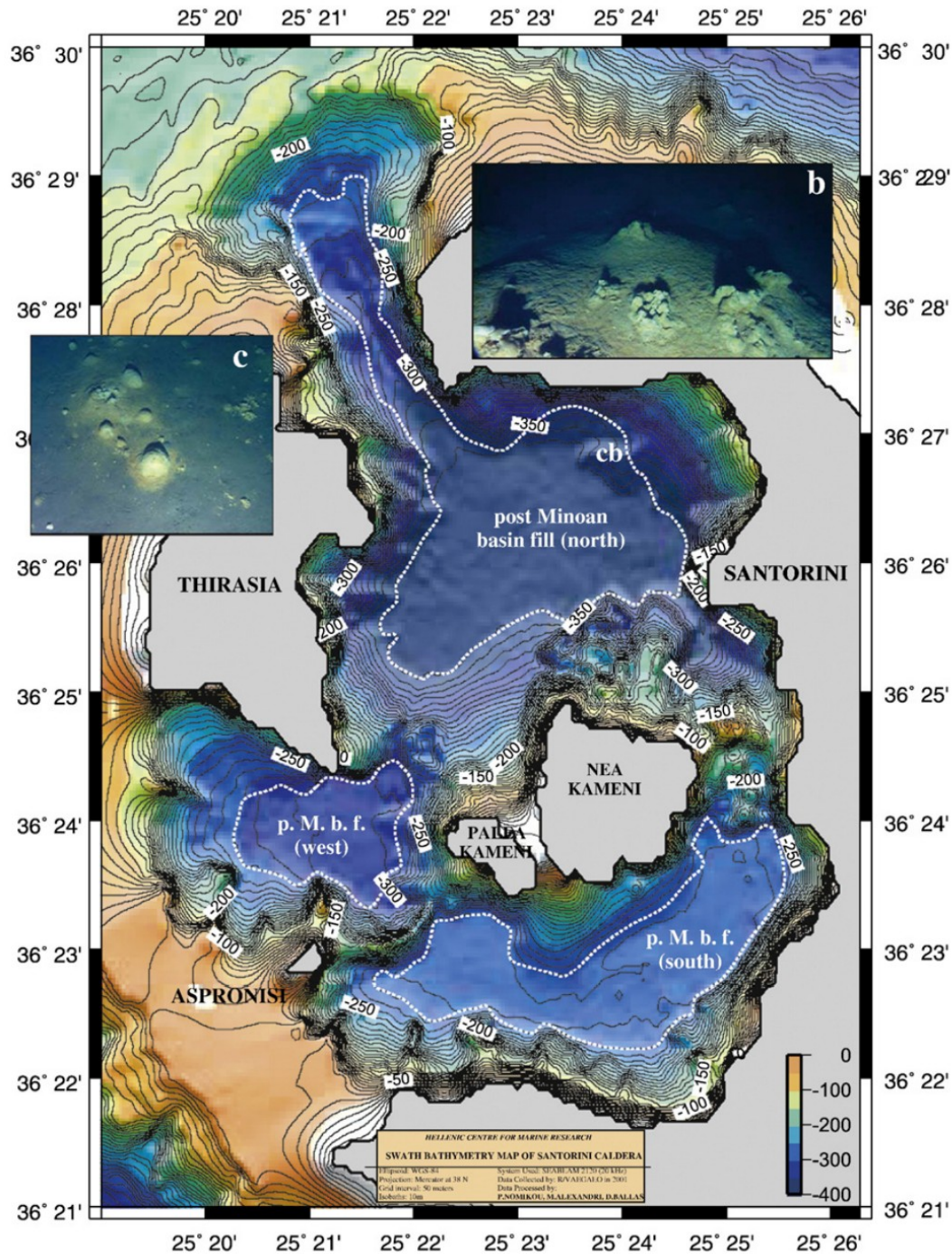
Τόσο στο βόρειο όσο και στο νότιο λιμάνι της καλδέρας συναντάμε υδροθερμικές πηγές. Στο βορειοανατολικό τμήμα της βόρεια λεκάνης σχηματίζεται ένα πεδίο αγωγών που έχει έκταση 200-300μ. Οι αγωγοί σχηματίζουν εκατοντάδες λοφίσκους διαμέτρου από 1-4 μ, οι οποίοι καλύπτονται από ένα κιτρινωπό βακτηριακό στρώμα και φτάνουν σε ύψος μέχρι το 1 μ. Η θερμοκρασία σε αυτούς τους λοφίσκους είναι περίπου 15-17°C ή περίπου 5°C παραπάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το υδροθερμικό πεδίο της βόρειας λεκάνης συμπίπτει με το σύστημα κανονικών ρηγμάτων του Κολούμπο και με το περιθώριο μιας ρηχής διύσδεισης μέσα στα ιζήματα της λεκάνης. Παρόμοια αναχώματα υδροθερμικών αναβλύσεων εμφανίζονται και στην νότια λεκάνη, όπου οι περισσότερες από τις εκροές χαμηλών θερμοκρασιών αποτελούν διαρροές κατά μήκος μιας ράχης που χωρίζει τη δυτική από τη νότια λεκάνη. Σε μικρά βάθη στις υποθαλάσσιες πλευρές των νησίδων της Παλαιάς και της Νέας Καμένης παρατηρούνται ενεργές υδροθερμικές αναβλύσεις<sup>78</sup>.

Ο πυθμένας της καλδέρας αποτελείται από αποθέσεις (κυρίως πυροκλαστικές ροές) που προέρχονται από την Μινωική έκρηξη. Οι υποθαλάσσιες ηφαιστειακές δομές γύρω από τις Καμένες περιλαμβάνουν μια σειρά από ροές λάβας που εκτείνονται προς τα βόρεια και φτάνουν στον πυθμένα εως και 390 μ βάθος και μερικές φλέβες στα υποθαλάσσια τοιχώματα της καλδέρα στο βορειοανατολικό τμήμα της στη βόρεια λεκάνη, οι οποίες ανήκουν στο ίδιο σύστημα με αυτές που παρατηρούνται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, όπως και στην περιοχή της Παλαιάς Καμένης. Τέλος παρατηρούνται κατακερματισμένα κομμάτια (blocks) από λάβα κατά μήκος της υποθαλάσσιας συνέχειας των νησίδων (Καμένες)<sup>79</sup>.

77.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

78.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

79.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

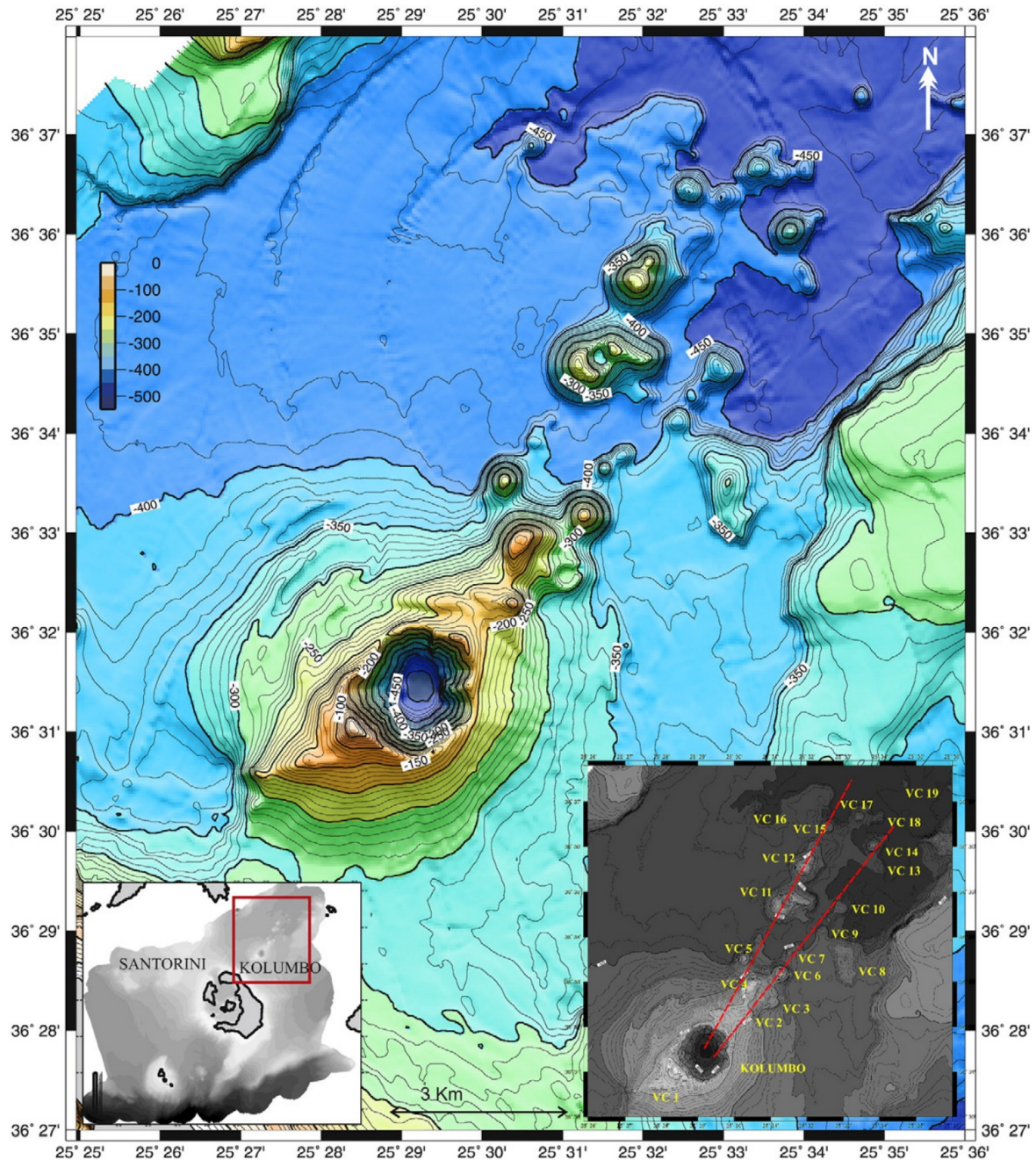


**Εικόνα 19:** α) Βυθομετρικός χάρτης της καλδέρας της Σαντορίνης, Υποδεικνύονται τρεις υπολεκάνες της μεταμινωικής καλδέρας (οριοθετημένες με διακεκομμένες γραμμές με ποικίλα βάθη: 350 μ στα βόρεια, 280 μ στα νότια και 320 μ στα δυτικά). β,γ) Υποβρύχιες φωτογραφίες που ελήφθησαν από το ROV "Hercules" και δείχνουν ενδείξεις υδροθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας στο βόρειο τμήμα της καλδέρας. ( Nomikou et al. 2012)

#### 4.2.3 Ηφαιστειακό Σύμπλεγμα του Κολούμπο

Σε απόσταση 7 χλμ βορειοανατολικά της Σαντορίνης βρίσκεται το ενεργό υποθαλάσσιο ηφαιστειο του Κολούμπο. Από εκεί και για 13χλμ ακόμα προς τα βορειοανατολικά εκτείνεται το ηφαιστειακό του πεδίο, όπου παρατηρούνται σε γραμμική διάταξη υποθαλάσσιοι ηφαιστειακοί κώνοι σε διαφορετικά

μεγέθη. Σε όλο το πεδίο πέρα από τον Κολούμπο παρατηρούνται άλλες 18 μικρότερες δομές σε βάθος μέχρι και 500 μ περίπου. Με εξαίρεση τον Κολούμπο, που έδωσε την τελευταία του μεγάλη έκρηξη το 1650 μ.Χ., δεν έχουμε καμία ιστορική αναφορά για έκρηξη σε κάποιο από τα μικρότερα ηφαιστειακά κέντρα<sup>80</sup>.



**Εικόνα 20:** Βυθομετρικός χάρτης της υποθαλάσσιας ηφαιστειακής αλυσίδας Κολούμπο. **Δεξί ένθετο:** Βυθομετρικός χάρτης που απεικονίζει τους 19 ηφαιστειακούς θόλους σε δύο ΒΑ-ΝΔ διευθύνσεις. **Αριστερό ένθετο:** Γεωγραφική θέση του υποθαλάσσιου ηφαιστειακού πεδίου του Κολούμπο ΒΑ της Σαντορίνης. (Nomikou et al. 2012)

80. Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D., Alexandri M., Bejelu K., Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece, *Global and Planetary Change*, Volumes 90–91, 2012, Pages 135-151

Στα βορειοανατολικά της Σαντορίνης αναπτύσσεται μια σημαντική ρηξιγενής ζώνη με διεύθυνση νοτιοδυτικά - βορειοανατολικά, η οποία σχηματίζει την λεκάνη του Άνυδρου. Αυτή η λεκάνη περιλαμβάνει τον υποθαλάσσιο Κολούμπο και τους υπόλοιπους μικρότερους ηφαιστειακούς κώνους. Η ιζηματογενής λεκάνη του Άνυδρου οριοθετείται και τεμαχίζεται από κανονικά ρήγματα, σχηματίζοντας μια τεκτονική δομή τύπου “λουλουδιού” (flower type), η οποία εκτείνεται προς τα βορειοανατολικά<sup>81</sup>. Οι ηφαιστειακοί κρατήρες που βρίσκονται σε αυτήν τη λεκάνη έχουν γραμμή διάταξης με διεύθυνση νοτιοδυτικά - βορειοανατολικά. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι κυκλικοί ή κοίλοι με απότομες κλίσεις. Ορισμένοι ηφαιστειακοί κώνοι έχουν καλά καθορισμένους κρατήρες, ενώ άλλοι έχουν σχήμα θόλου. Οι κορυφές των κώνων βρίσκονται σε βάθος μεταξύ 130 και 170 μ με την πλειονότητα να βρίσκεται στα 200 - 350 μ. Ο πυθμένας στον οποίο βρίσκονται έχει βάθος από 300-450 μ. Ο μεγαλύτερος από αυτούς κρατήρας είναι ο Κολούμπο, ένας κώνος με διάμετρο 3 χλμ, με πλάτος κρατήρα 1,5 χλμ και την υψηλότερη κορυφή να βρίσκεται 18 μ από την επιφάνεια της Θάλασσας στο νοτιοδυτικό της τμήμα. Το βάθος του δαπέδου του κρατήρα ανέρχεται στα 505μ. Το μεγαλύτερο τμήμα του χείλους της καλδέρας του ηφαιστείου βρίσκεται κατά μέσο όρο στα 150μ βάθος σχηματίζοντας έναν υποθαλάσσιο κυκλικό βράχο σε ύψος 350 μ από τον πυθμένα<sup>82</sup>.

Οι ηφαιστειακοί κώνοι στα βορειοανατολικά του Κολούμπο φαίνεται να είναι ευθυγραμμισμένοι κατά μήκος δύο διακριτών γραμμικών ευθειών (B29°A, B42°A) που συγκλίνουν στο σημείο του κρατήρα. Οι κώνοι στην πιο βόρεια διεύθυνση είναι γενικά μεγαλύτεροι, αλλά διαφέρουν σε μέγεθος όσο πάμε προς τα βορειοανατολικά. Οι κώνοι στα ανατολικά είναι μικρότεροι και πιο ομοιόμορφοι σε μέγεθος. Επιπλέον οι κώνοι όσο απομακρύνονται από τον Κολούμπο προς τα βορειοανατολικά μειώνονται σε μέγεθος και σε ύψος, γεγονός που υποδηλώνει πως μειώνεται η ηφαιστειακή δραστηριότητα όσο αυξάνεται η απόσταση από τον Κολούμπο<sup>83</sup>.

Το ηφαιστειακό κέντρο του Κολούμπο είναι το μόνο με καταγεγραμμένη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Έδωσε μια μεγάλη έκρηξη το 1650 μ.Χ. παράγοντας περίπου 2 κυβ. χλμ ρυοδακτιτικού μάγματος και απελευθέρωσε μεγάλη ποσότητα τοξικών αερίων που προκάλεσαν πάνω από 10 θανάτους στην γειτονική Σαντορίνη σε απόσταση 7 χλμ. Κατά τη διάρκεια της έκρηξης το ηφαίστειο αναδύθηκε πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας δημιουργώντας μεγάλη στήλη αερίων. Παρατηρήθηκε πτώση τέφρας μέχρι και την Τουρκία. Επιπλέον η έκρηξη προκάλεσε τσουνάμι, τα οποία χτύπησαν στην ανατολική πλευρά της Σαντορίνης και στα υπόλοιπα γειτονικά νησιά<sup>84</sup>.

Η δημιουργία του ηφαιστείου Κολούμπο, όπως το παρατηρούμε σήμερα περιλαμβάνει τρεις μεγάλες (K1, K2 και K5) και δύο μικρότερες (K3 και K4) εκρηκτικές φάσεις. Η πρώτη φάση ξεκίνησε στα τέλη του Πλειστοκαίνου >70 χιλ. χρόνια πριν και η τελευταία ήταν εκείνη του 1650 μ.Χ. Το συνολικό σύμπλεγμα του ηφαιστείου σήμερα έχει ύψος 21 χλμ και διάμετρο  $\geq 11$  χλμ<sup>85</sup>. τα ανώτερα τοιχώματα του κρατήρα αποτελούνται από 250μ παρεμβαλλόμενων στρωμάτων αποθέσεων τέφρας, κίσηρης και κροκαλοπαγών από τα υλικά των εκρήξεων του 1650 μ.Χ. Επιπλέον κοντα στον πυθμένα του κρατήρα παρατηρήθηκε μια επιφάνεια λεπτού στρώματος τέφρας, η οποία αντιπροσωπεύει τα πρώτα εκρηκτικά στάδια του ηφαιστείου. Σε γενικές γραμμές οι ανώτερες αποθέσεις τέφρας του Κολούμπο είναι πολύ

81.Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D., Alexandri M., Bejelou K., Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece, Global and Planetary Change, Volumes 90–91, 2012, Pages 135-151

82.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

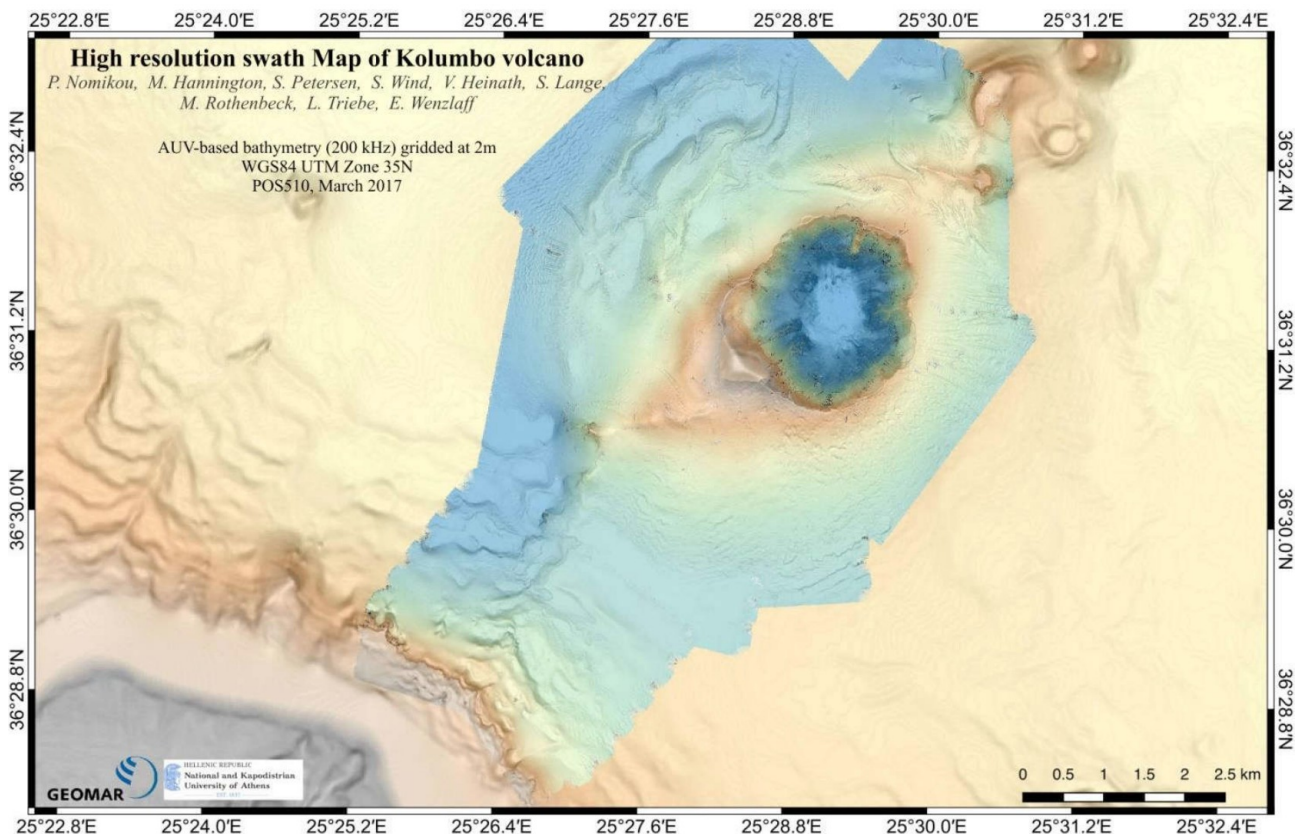
83.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

84.Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D., Alexandri M., Bejelou K., Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece, Global and Planetary Change, Volumes 90–91, 2012, Pages 135-151

85.Hübscher C., Ruhnu M., Nomikou P., Volcano-tectonic evolution of the polygenetic Kolumbo submarine volcano/Santorini (Aegean Sea), Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 291, 2015, Pages 101-111

λεπτόκοκκες (από ιλύς έως λεπτή άμμος) και καλύπτονται από περίπου 10 εκ καφέ ημιπελαγικού ιζήματος. Η τέφρα του 1650 μ.Χ. εντοπίζεται έως και 19 χλμ μακριά από τον κρατήρα<sup>86</sup>.

Στο εσωτερικό του κρατήρα παρατηρούνται αρκετές προεξέχουσες ράχες που κατεβαίνουν με κλίση από τα τοιχώματα του κρατήρα προς τον πυθμένα του. Οι ράχες αυτές αποτελούν ροές λάβας, φλέβες και διεισδύσεις που δημιουργήθηκαν πριν από την έκρηξη του 1650 μ.Χ.. Στην βορειοδυτική γωνία του πυθμένα ανακαλύφθηκαν λεπτά στρώματα πυροκλαστικών κάτω από τις ροές λάβας, που αναφέραμε προηγουμένως. Αυτά τα στρώματα αντιπροσωπεύουν τα πρώτα στάδια της ηφαιστειακής δραστηριότητας και φέρουν πολλές ομοιότητες με τα πρώιμα ηφαιστειακά υλικά της Σαντορίνης (ηλικίας 1ος εκατομμύριου χρόνια)<sup>87</sup>.



**Εικόνα 21:** Βυθομετρικός Χάρτης του υποθαλάσσιου ηφαιστείου Κολούμπο υψηλής ευκρίνειας. (Nomikou et al. 2019)

Στο δάπεδο του κρατήρα του Κολούμπο στα 500 μ βάθος, βρίσκεται ένα ενεργό υδροθερμικό πεδίο, όπου επί του παρόντος σχηματίζεται ένα κοιτάσματα σουλφιδίων τύπου Kuroko. Τέτοια κοιτάσματα είναι πολύ σημαντικά, καθώς δεν έχουν εντοπιστεί πολλά παρόμοια και έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε χρυσό και ασήμι. Συγκρίνονται με τα black smokers των μεσοωκεάνιων ραχών. Τα ορυκτά που καθιζάνουν από το υδροθερμικό ρευστό του πεδίου περιλαμβάνουν σιδηροπυρίτη (με έως και 5% ασήμι), βαρύτη, γαληνίτη, αγγλεσίτη, ανυδρίτη και άλλα. Στο βόρειο τμήμα του κρατήρα παρατηρείται η μεγαλύτερη δομή του υδροθερμικού πεδίου, μια ατμίδα ύψους 6 μ, καλυμμένη από βακτηριακά στρώματα, της έχει δοθεί το ψευδώνυμο “Κερί του Ποιητή”. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του ατμιδικού αυτού πεδίου είναι η ενεργή εκροή φυσαλίδων αερίου που αποτελούνται κατά 99% από

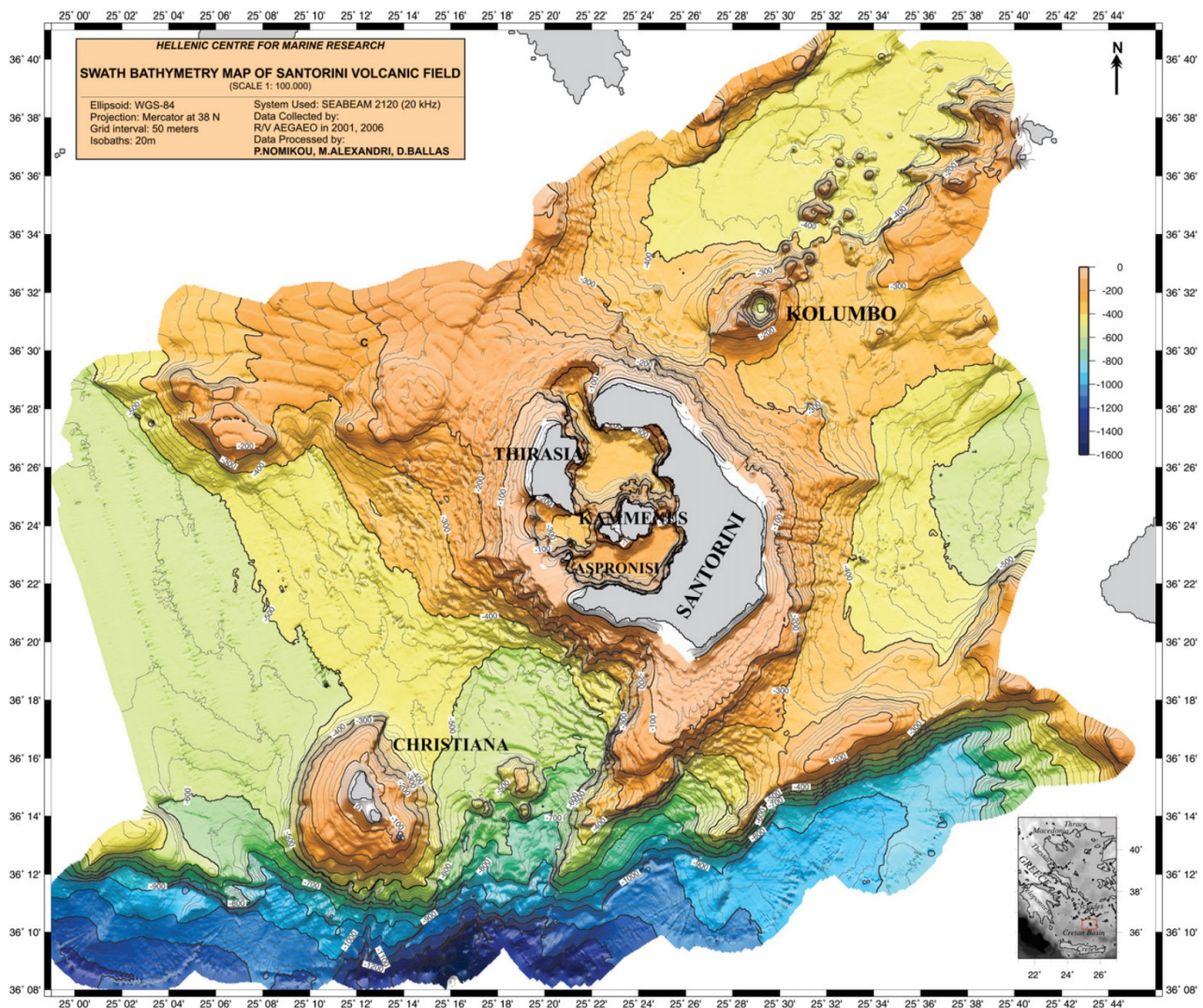
86. Hübscher C., Ruhnu M., Nomikou P., Volcano-tectonic evolution of the polygenetic Kolumbo submarine volcano/Santorini (Aegean Sea), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 291, 2015, Pages 101-111

87. Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, *Tectonophysics*, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146



διοξειδίο του άνθρακα μαζί με ρευστά υψηλής θερμοκρασίας (220°C). Το χαρακτηριστικό αυτό είναι μοναδικό για ηφαιστειακά κέντρα ρηχών νερών σε περιβάλλοντα ζωνών καταβύθισης<sup>88</sup>.

Το ηφαιστειακό πεδίο του Κολούμπο σχηματίστηκε γραμμικά στην λεκάνη του Άνυδρου χάρη στη διατμηματική ζώνη που δημιουργείται κατά μήκος του κύριου άξονα της λεκάνης από ρήγματα ολίσθησης. Εξαιτίας αυτού του τεκτονισμού βρήκε δίοδο το μάγμα, που παράγεται κατά την υποβύθιση για να βγει στην επιφάνεια και να δημιουργήσει τα 19 ηφαιστειακά κέντρα. Το νοτιοδυτικό τμήμα των κύριων αυτών ομάδων ρηγμάτων τέμνονται, όπως προαναφέραμε, στον κρατήρα του Κολούμπο<sup>89</sup>. Οι ηφαιστειακοί κώνοι βορειοανατολικά του Κολούμπο χρονολογούνται στο τέλος του Πλειστοκαίνου και δημιουργήθηκαν με υποθαλάσσιες εκρήξεις, Οι εκρήξεις τους δεν έφτασαν στον αέρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και κατά συνέπεια δεν έδωσαν υπο-εναέριες πυροκλαστικές αποθέσεις<sup>90</sup>.



**Εικόνα 22:** Βυθομετρικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του ηφαιστειακού γκρουπ της Σαντορίνης. (Nomikou et al. 2012)

88.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

89.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

90.Hübscher C., Ruhnau M., Nomikou P., Volcano-tectonic evolution of the polygenetic Kolumbo submarine volcano/Santorini (Aegean Sea), Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 291, 2015, Pages 101-111

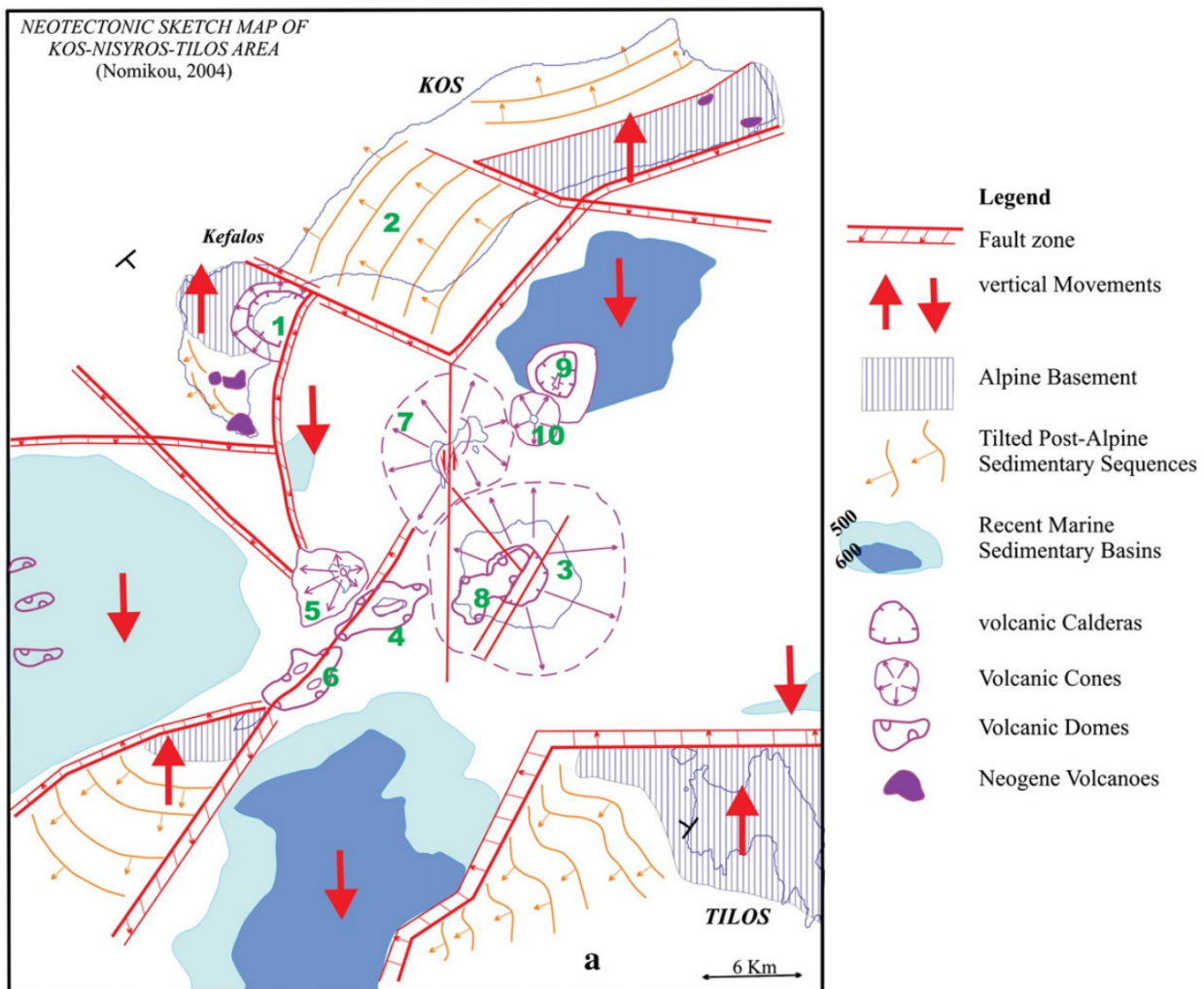
## 5. Ηφαιστειακό Γκρουπ Νισύρου

Το 4ο και τελευταίο ηφαιστειακό γκρουπ του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου είναι το γκρουπ της Νισύρου και βρίσκεται στο ανατολικό άκρο του τόξου, στο νοτιοανατολικό Αιγαίο. Περιλαμβάνει όλη τη θαλάσσια περιοχή που οριοθετείται στα βόρεια από την Κω και στα νότια από την Τήλο. Το υποθαλάσσιο τμήμα στην περιοχή αυτή αποτελεί μια μεγάλη λεκάνη - τεκτονική τάφρο με μέσο βάθος 600μ. Η λεκάνη αυτή διακόπτεται από το περίπλοκο ηφαιστειακό πεδίο που σχηματίζουν τα ηφαιστειακά νησιά: Νίσυρος, Παχειά, Περγούσα, Γυαλί και Στρογγύλη, καθώς και μικρές ενδοηφαιστειακές (intra-volcanic) λεκάνες.



**Εικόνα 23:** Δορυφορική φωτογραφία από το Google Earth όπου φαίνονται οι νήσοι Κως, Νίσυρος, Κονδελιούσα, Περγούσα, Παχειά, Γυαλί και Στρογγύλη. Ακόμα φαίνεται με κόκκινο κύκλο η υποθαλάσσια περιοχή που βρίσκεται η καλδέρα της Κεφάλου, με κίτρινο κύκλο το σημείο όπου βρίσκεται η καλδέρα της Αβύσσου και με πράσινο κύκλο η περιοχή όπου βρίσκονται ηφαιστειακά θραύσματα από το ηφαίστειο της Νισύρου.

Ηφαιστειακοί σχηματισμοί βρίσκονται σε βάθος μέχρι και 680 μ (Άβυσσος στη δυτική λεκάνη της Κω) και σε ύψος μέχρι και 700μ (στο ηφαίστειο της Νισύρου) δημιουργώντας έτσι ένα ηφαιστειακό ανάγλυφο της τάξης των 1400μ διαφοράς υψομέτρου. Συνοπτικά τα ηφαιστειακά κέντρα που υπάρχουν στο πεδίο της Νισύρου είναι: **1.** η υποθαλάσσια καλδέρα της Κεφάλου νοτιοανατολικά της Κω σε βάθος 220 - 300 μ, **2.** οι ιγκνιμβρίτες και οι τόφφοι της Κω ηλικίας 161 χιλ. χρόνων, **3.** Η καλδέρα της Νισύρου με ύψος χείλους καλδέρας 580μ και ύψος δαπέδου 80, **4.** οι ηφαιστειακοί δόμοι της νήσου Παχειάς που έχουν βάση στα 250μ βάθος και ύψος 150 από την επιφάνεια, **5.** ο ηφαιστειακός κώνος της Περγούσας που ξεκινάει από τα 400μ βάθος και φτάνει έως και τα 100μ ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, **6.** οι υποθαλάσσιοι ηφαιστειακοί δόμοι ανατολικά της Κονδελιούσας σε βάθος που ξεκινάει από τα 400-700 μ κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, **7.** το ηφαίστειο στο Γυαλί με μερικώς βυθισμένη καλδέρα σε βάθος δαπέδου 300μ και ύψος πάνω από την επιφάνεια 170μ, **8.** οι δόμοι του Προφήτη Ηλία που ξεκινάνε σε βάθος 270μ και φτάνουν σε ύψος τα 698μ, **9.** η υποθαλάσσια καλδέρα της Αβύσσου βορειοανατολικά της Στρογγύλης σε βάθος από 670-590 μ και τέλος **10.** ο ηφαιστειακός κώνος της Στρογγύλης που ξεκινάει από τα 650μ βάθος και φτάνει τα 120 μ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας<sup>91</sup>.



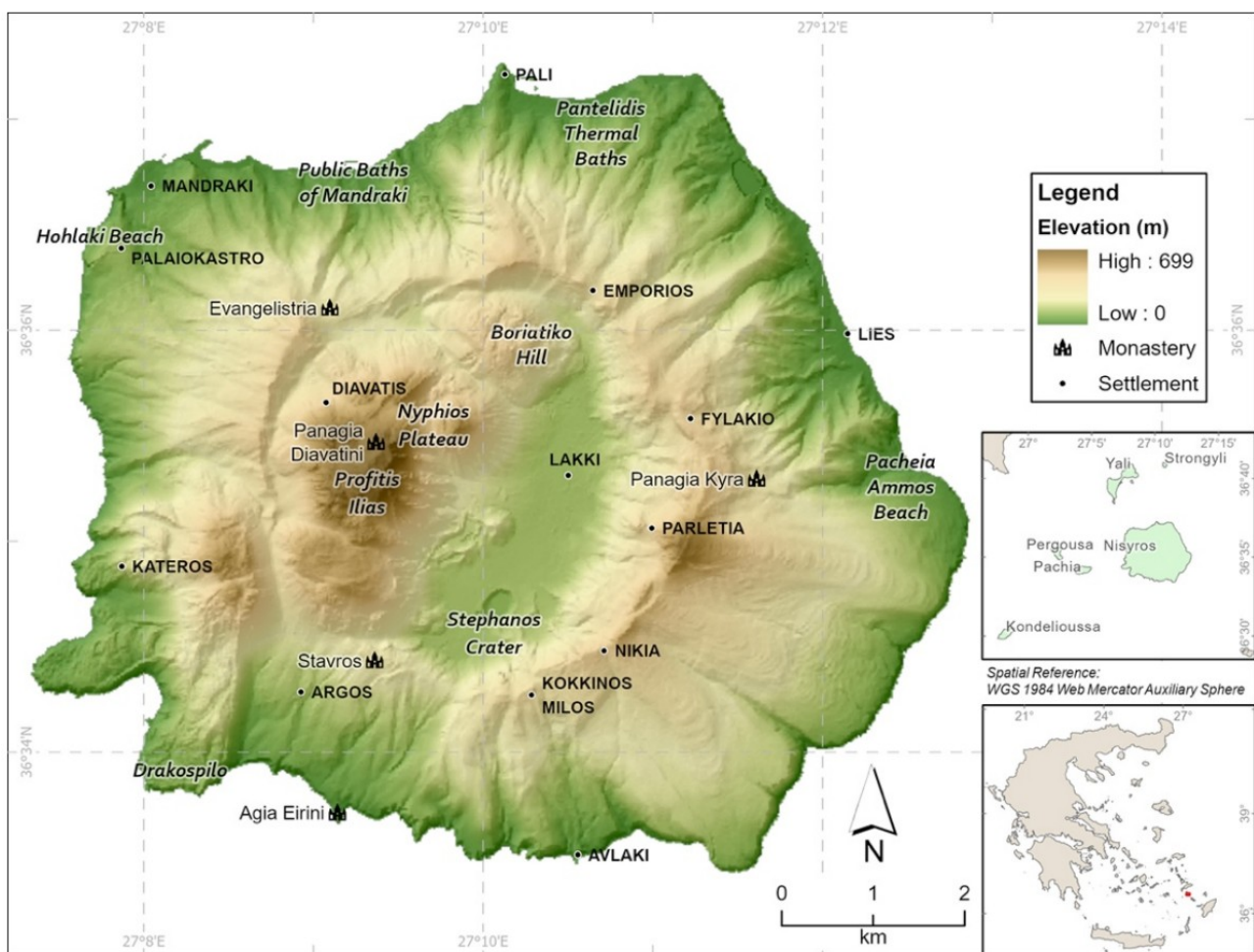
**Εικόνα 24:** Νεοτεκτονικό σκαρίφημα της περιοχής Κω-Νισύρου-Τήλου με διακριτά τα ηφαιστειακά κέντρα του γκρουπ της Νισύρου (τροποποιημένο κατά Nomikou and Papanikolaou, 2010). **1:** Κέφαλος, **2:** Ιγκνιμβρίτης - τόφφος της Κω, **3:** Στρωματοηφαίστειο της Νισύρου, **4:** Παχειά, **5:** Περγούσα, **6:** Ανατολική Κονδελιούσα, **7:** Γυαλί, **8:** Προφήτης Ηλίας, **9:** Άβυσσος, **10:** Στρογγύλη. (Nomikou et al. 2012)

91.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146

## 5.1 Χερσαία Ηφαιστειότητα

### 5.1.1 Νίσυρος

Η Νίσυρος είναι το μεγαλύτερο νησί - ενεργό ηφαιστείο αυτής της ομάδας και βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του συμπλέγματος. Βόρεια της βρίσκεται το Γυαλί και η Στρογγύλη, ενώ δυτικά της η Περγούσα και η Παχειά. Σε σχέση με τα μεγαλύτερα νησιά της περιοχής βρίσκεται 16 περίπου χιλιόμετρα νότια της νήσου Κω, 13 περίπου χλμ βορειοδυτικά της Τήλου και 14,5χλμ δυτικά από τα παράλια της Μικράς Ασίας. Τοπογραφικά αλλά και μορφολογικά το ανάγλυφο του νησιού έχει σχήμα κώνου με διάμετρο βάσης 8 χλμ και έκταση 42 τετρ. χλμ. Στο κέντρο του νησιού με διάμετρο 4 χλμ βρίσκεται ένα καλδερικό βύθισμα. Η υψηλότερη κορυφή της είναι ο Προφήτης Ηλίας με ύψος 628 μ που βρίσκεται στο κεντροανατολικό τμήμα εσωτερικά της καλδέρας. Το νησί έχει συνολικό μήκος ακτών περίπου 24 χλμ και γύρω στους 1000 μόνιμους κατοίκους<sup>92</sup>.



Εικόνα 25: Γεωμορφολογικός χάρτης της Νισύρου (Antoniou et al. 2021)

Πέρα από τον Προφήτη Ηλία, άλλες κορυφές του νησιού είναι ο Άγιος Γεώργιος με ύψος 519 μ και ο Άγιος Μηνάς στα 588 μ. Μεταξύ των κορυφών της Νισύρου βρίσκεται ένας κρατήρας εκατακρήμισης με διεύθυνση βορειοανατολικά - νοτιοδυτικά, μήκος 2,5 χλμ, πλάτος 1 χλμ και μέσο ύψος τα 100 μ. Η καλδέρα του ηφαιστείου διαιρείται σε δύο τμήματα. Το Λακκί, το βορειοδυτικό τμήμα που είναι κατάφυτο και τον Ράμμο, το νοτιοδυτικό τμήμα που χαρακτηρίζεται από έντονη ατμιδική δράση. Στον πυθμένα της

92. Antoniou, V., Nomikou, P., Panousis, D., Zafeirakopoulou E., Nisyros Volcanic Island: A Geosite through a Tailored GIS Story. Geosciences 2021, 11, 132.

καλδέρας βρίσκονται υδροθερμικοί κρατήρες, οι κυριότεροι των οποίων είναι ο Στέφανος, ο Αλέξανδρος (φλέγετον), ο Λογοθέτης, ο μικρός και ο μεγάλος Πολυβώτης και τα Καμινάκια<sup>93</sup>.

Το νησί της Νισύρου δομείται αποκλειστικά από ηφαιστειακούς σχηματισμούς του τεταρτογενούς, οι οποίοι είναι απωθημένοι πάνω σε υπόβαθρο μεσοζωικών ασβεστολίθων. Η συνέχεια των σχηματισμών αυτών διακόπτεται από έναν μεγάλο αριθμό ρηγμάτων. Τα ρήγματα αυτά διακρίνονται σε δύο ομάδες: α) τα κύρια ρήγματα, τα οποία συγκροτούν μεγάλες ρηξιγενής ζώνες και β) τα δευτερεύοντα ρήγματα. Τα κύρια ρήγματα - ρηξιγενείς ζώνες είναι αυτά που παίζουν τον κύριο ρόλο στην γεωλογική δομή και εξέλιξη της Νισύρου. Τα κύρια χαρακτηριστικά των μεγάλων ρηξιγενών ζωνών είναι: (i) τα μεγάλα μήκη τους, όπου τις περισσότερες φορές αρχίζουν από το εσωτερικό της καλδέρας και φτάνουν ως την ακτογραμμή, (ii) τα μεγάλα άλματα τους >100μ., προκαλώντας ταυτόχρονα χαρακτηριστικές μορφολογικές ασυνέχειες κατά μήκος τους ή έντονες μορφολογικές αλλαγές εκατέρωθέν τους και (iii) το γεγονός ότι οριοθετούν εμφανίσεις ηφαιστειακών σχηματισμών σε ένα μεγάλο τμήμα του νησιού ή ακόμα μεταθέτουν σημαντικά τα όρια των σχηματισμών που τέμνουν. Αντίθετα, τα δευτερεύοντα ρήγματα: (i) έχουν συνήθως μικρά μήκη και σπάνια φτάνουν από το ίχνος της καλδέρας μέχρι την ακτογραμμή, (ii) έχουν μικρά άλματα που δεν υπερβαίνουν τα 20-30μ., ενώ στις πιο πολλές περιπτώσεις τα άλματα είναι της τάξης των 5-15 μ. περίπου και ορισμένα μπορούν να χαρακτηριστούν απλά σαν διαρρήξεις, διότι ουσιαστικά η μετακίνηση των εκατέρωθεν τεμαχίων είναι ασήμαντη, (iii) δεν οριοθετούν εμφανίσεις σχηματισμών σε ένα μεγάλο τμήμα του νησιού και ακόμα δεν μεταθέτουν αισθητά τα όρια των σχηματισμών που τέμνουν, (iv) δεν προκαλούν ιδιαίτερες μορφολογικές ανωμαλίες στην επιφάνεια του εδάφους και δεν παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη γεωλογική δομή και εξέλιξη του ηφαιστειακού συγκροτήματος της Νισύρου<sup>94</sup>.

Η εξέλιξη του ηφαιστείου της Νισύρου χωρίζεται σε πέντε κύρια στάδια: **(1)** Πρώτα έχουμε ένα υποθαλάσσιο ηφαίστειο όπου με εκρήξεις δίνει βασαλτικές και ανδεσιτικές μαξιλαροειδείς λάβες (pillow lavas). Έτσι δημιουργήθηκαν τα κατώτερα ηφαιστειακά στρώματα που είναι ορατά στη βόρεια ακτή κοντά στο Μανδράκι. **(2)** Στην συνέχεια και μετά από αλληπάλληλες ηφαιστειακές εκρήξεις δημιουργήθηκε ένα στρωματοηφαίστειο ύψους 500-700 μ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το ηφαίστειο αυτό δομήθηκε πάνω από τους προηγούμενους εν μέρη υποθαλάσσιους σχηματισμούς. **(3)** Μετά από αρκετές εκρηκτικές φάσεις αερίων και ατμών, δύο μεγάλες ρυοδακτικές εκρήξεις πλίνιου τύπου κάλυψαν ολόκληρο το νησί με πυροκλαστικές ροές και κατακρημνίσεις. **(4)** Στη συνέχεια και περίπου 20 χιλ. χρόνια πριν μια μεγάλη κεντρική κατακόρυφη κατάρρευση του ηφαιστείου δημιούργησε μια μεγάλη καλδέρα. **(5)** Τέλος κατά τους προϊστορικούς χρόνους το δυτικό τμήμα της καλδέρας γέμισε με μια σειρά από ρυοδακτικούς θόλους, ο υψηλότερος από τους οποίους είναι ο Προφήτης Ηλίας (698μ).<sup>95</sup>

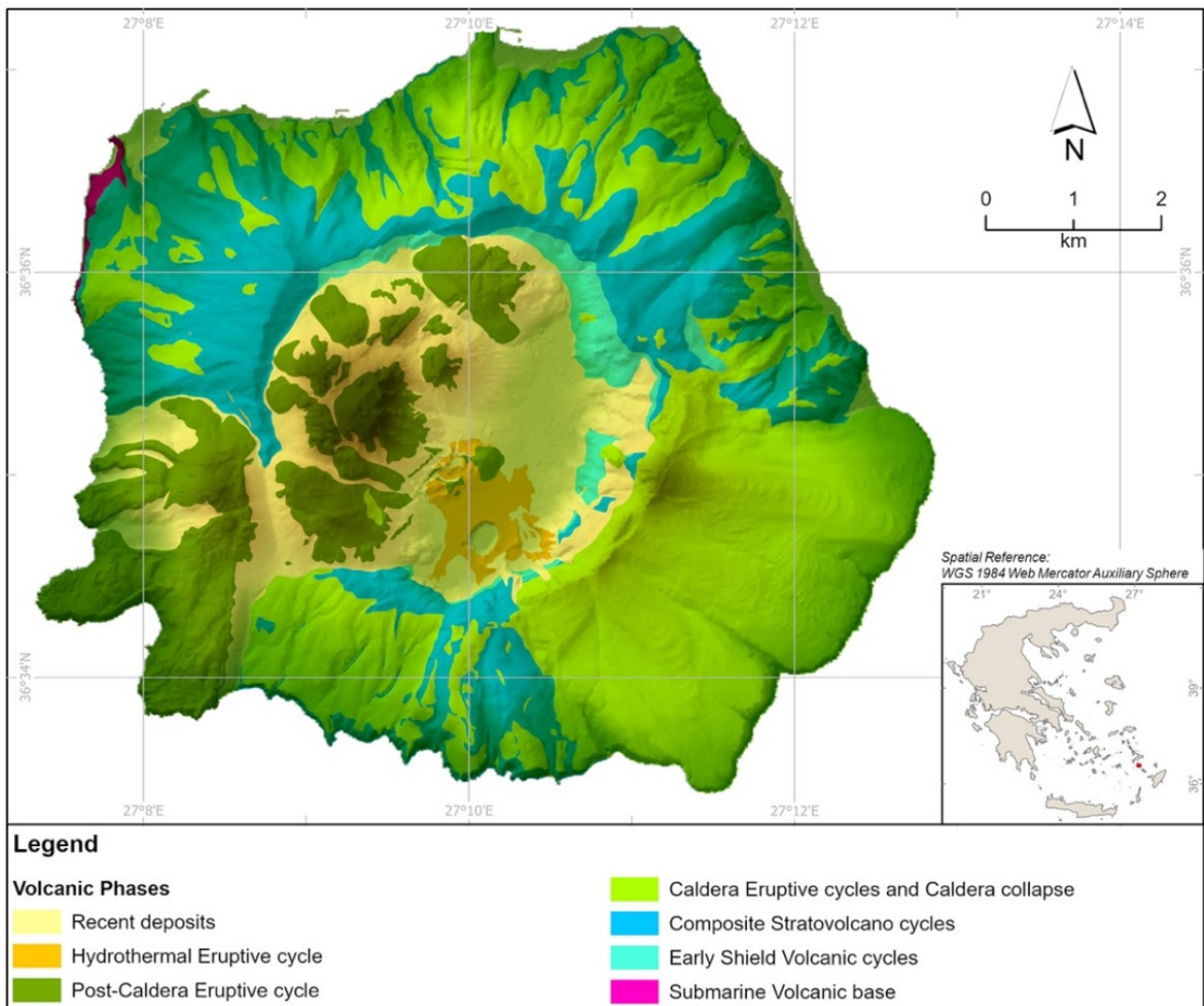
Μετά τον σχηματισμό των θόλων δεν υπάρχει κάποια καταγεγραμμένη ηφαιστειακή δραστηριότητα πέρα από τις εκρήξεις που σχετίζονται με τον σχηματισμό των κρατήρων στο εσωτερικό της καλδέρας. Οι κρατήρες αυτοί που έχουμε προαναφέρει εξακολουθούν να εκκρίνουν φουμαρόλες. Το 1871-1873 και το 1887 μ.Χ. είχαμε τις πιο πρόσφατες υδροθερμικές εκρήξεις, οι οποίες συνοδεύονταν από βίαιους σεισμούς, εκρήξεις αερίων και ατμών και λασποροές. Κατά τη διάρκεια αυτών των εκρήξεων είχαμε τραυματισμούς κατοίκων και μικρές ζημιές σε κατοικίες<sup>96</sup>.

93. Antoniou, V., Nomikou, P., Panousis, D., Zafeirakopoulou E., Nisyros Volcanic Island: A Geosite through a Tailored GIS Story. *Geosciences* 2021, 11, 132.

94. Παπανικολάου Δ.Ι., Λέκκας Ε. Λ Γεωλογική δομή και εξέλιξη του ηφαιστείου της νισύρου, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμος XXV.1, 1991, σελ. 405-419

95. Tibaldi A., Pasquare F.A., Papanikolaou D., Nomikou P., Tectonics of Nisyros Island, Greece, by field and offshore data, and analogue modelling, *Journal of Structural Geology*, Volume 30, Issue 12, 2008, Pages 1489-1506

96. Tibaldi A., Pasquare F.A., Papanikolaou D., Nomikou P., Tectonics of Nisyros Island, Greece, by field and offshore data, and analogue modelling, *Journal of Structural Geology*, Volume 30, Issue 12, 2008, Pages 1489-1506



Εικόνα 26: Χάρτης της Νισύρου όπου φαίνονται οι εκρηκτικές φάσεις του ηφαιστείου. (Antonίου et al. 2021)

### 5.1.2 Στρογγύλη

Η νησίδα Στρογγύλη είναι μια ηφαιστειογενής νησίδα, η οποία ανήκει και αυτή στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Νισύρου και βρίσκεται 6,6 χλμ βόρεια από αυτήν και περίπου 10 χλμ νοτιοανατολικά από την Κω. Είναι μια ακατοίκητη νησίδα με στρογγυλό σχήμα, όπως υποδηλώνει το όνομά της, με περίμετρο 1,8 χλμ και έκταση 0,2 τετρ. χλμ. Ο ηφαιστειακός της κώνος έχει τη βάση του στα 650μ βάθος και φτάνει σε ύψος μέχρι και 125 μ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Στην επιφάνεια του νησιού παρατηρείται ένας ηφαιστειακός κρατήρας διαμέτρου 300 μ. Η διάμετρος της βάσης του ηφαιστειακού κώνου φτάνει τα 3,5 χλμ. Τα ηφαιστειακά της πετρώματα περιλαμβάνουν γκρίζους ανδεσίτες και μικρές εμφανίσεις πυροκλαστικών. Ο ηφαιστειακός κώνος της Στρογγύλης επηρεάζεται από ρήγματα προσανατολισμένα σε διαφορετικές διευθύνσεις, οι οποίες κυμαίνονται κυρίως μεταξύ βορειοανατολικά - νοτιοδυτικά και ανατολικά - δυτικά. Τελευταία έχουν ανακαλυφθεί νέοι υποθαλάσσιοι κρατήρες στην βορειοδυτική πλευρά του ηφαιστείου σε βάθος 190-200 μ. Οι κρατήρες αυτοί είναι ευθυγραμμισμένοι σε κατεύθυνση ανατολικό βορειοανατολικά - δυτικό νοτιοδυτικά και δεν έχουν δώσει κάποιο σημάδι ενεργούς υδροθερμικής δραστηριότητας<sup>97</sup>.

97. Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146

### 5.1.3 Γυαλί

Το επόμενο ηφαιστειογενές νησί του συμπλέγματος ονομάζεται Γυαλί και βρίσκεται 3 χλμ περίπου δυτικά της Στρογγύλης και 6 χλμ βόρειο βορειοδυτικά από την Νίσυρο. Έχει έκταση περίπου 4,5 τετρ. χλμ και ιδιαίτερη μορφή, αφού έχει έκταση 5 χλμ στον άξονα βόρειο βορειοανατολικά - νότιο νοτιοδυτικά και 3 χλμ στον άξονα δυτικά - ανατολικά, ενώ το μεγαλύτερό της πλάτος είναι 2 χλμ στο νότιο κομμάτι και 1,5 χλμ στο βόρειο και το μικρότερο πλάτος φτάνει τα 230 μ στο κεντρικό κομμάτι του νησιού. Κατοικείται με πολύ μικρό πληθυσμό (21 άτομα, απογραφή 2011) και αποτελεί κέντρο εξόρυξης κίσηρης (ελαφρόπετρας) και περλίτη. Στο νησί φαίνονται τμήματα από μια βυθισμένη καλδέρα, η οποία τεμαχίζεται από ένα ρήγμα διεύθυνσης βόρεια - νότια. Η βάση της ηφαιστειακής αυτής δομής βρίσκεται στα 350μ βάθος, ενώ εκτείνεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας σε ύψος 170μ. Το δυτικό τμήμα του νησιού αποτελείται από δύο διαδοχικούς σχηματισμούς κίσηρης (άνωτερο και κατώτερο), ενώ το ανατολικό του τμήμα περιλαμβάνει μια ρυολιθική ροή οψιδιανού ηλικίας 24 χιλ. χρόνων. Ο σχηματισμός αυτός καλύπτεται τοπικά από τον ανώτερο σχηματισμό κίσηρης του δυτικού τμήματος. Οι υποθαλάσσιες ηφαιστειακές εμφανίσεις γύρω από το νησί στον πυθμένα της θάλασσας επικαλύπτονται είτε από βαριές προσχώσεις είτε από τσιμεντοποιημένα στρώματα<sup>98</sup>.

### 5.1.4 Παχειά - Περγούσα

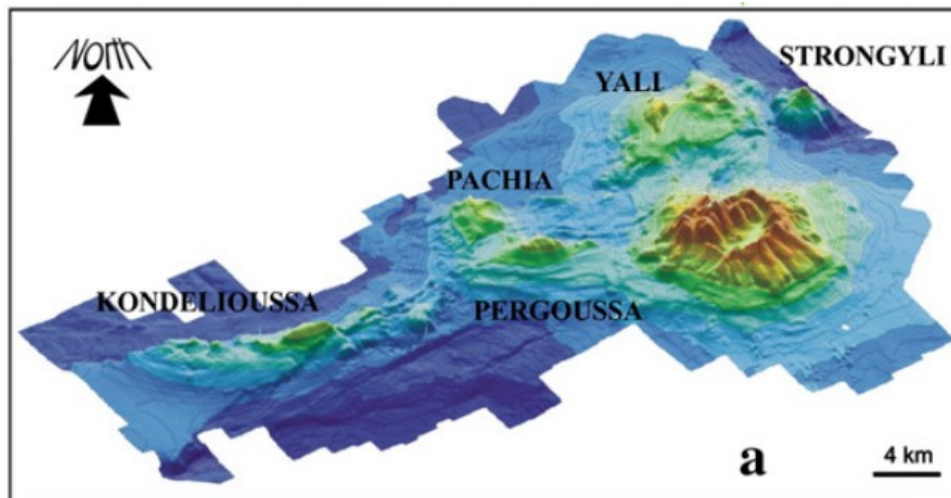
Σε απόσταση 4 περίπου χλμ δυτικά της Νισύρου βρίσκεται άλλο ένα ηφαιστειογενές νησί του συμπλέγματος. Η Παχειά αποτελεί ένα ηφαιστειακό θόλο, όπου η βάση του βρίσκεται σε βάθος 250 περίπου μέτρα και το ύψος του φτάνει μέχρι τα 150 περίπου μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το νησί έχει διάμετρο 4,8 χλμ, καταλαμβάνει έκταση περίπου 1,1 τετρ. χλμ και είναι ακατοίκητο. Σε απόσταση 2,2 χλμ βορειοδυτικά της Παχειάς βρίσκεται η Περγούσα, η οποία αποτελεί και αυτή ηφαιστειογενές νησί του συμπλέγματος της Νισύρου. Ο ηφαιστειακός της κώνος αποτελείται από σχηματισμούς στρωματοηφαιστείου με εναλλαγές ρών άβας και στρώματα κίσηρης<sup>99</sup>. Τα δύο αυτά νησιά χωρίζονται από κανάλι βάθους 100 μ περίπου. Ο ηφαιστειακός κώνος που δημιουργεί την Περγούσα ξεκινάει σε βάθος 400 μ και φτάνει σχεδόν μέχρι τα 100 μ ύψος. Και αυτή η νησίδα είναι ακατοίκητη με έκταση περίπου 1,2 τετρ. χλμ.<sup>100</sup> Στα δύο αυτά ηφαιστειακά κέντρα κατα την αρχή του Πλειοκαίνου - Πλειστοκαίνου αποτέθηκαν πορφυρικές ανδρειακές λάβες<sup>101</sup>.

98.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

99.Papanikolaou D., Nomikou P., Tectonic structure and volcanic centers at the eastern edge of the Aegean volcanic arc around Nisyros island, Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. 34, 2001

100.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

101.Keller J., Rehren T., Stadlbauer F., Explosive volcanism in the Hellenic Arc: A summary and review. 1990.– In: Hardy, D. A., Keller, J., Galanopoulos, V. P., Flemming, M. C. & Druitt, T. H. (eds.): Thera and the Aegean world III, 2: 13–26, Thera Foundation London



Εικόνα 27: Χάρτης που συνδυάζει υψομετρικά και βυθομετρικά δεδομένα από τον χώρο του ηφαιστειακού γκρουπ της Νισύρου.

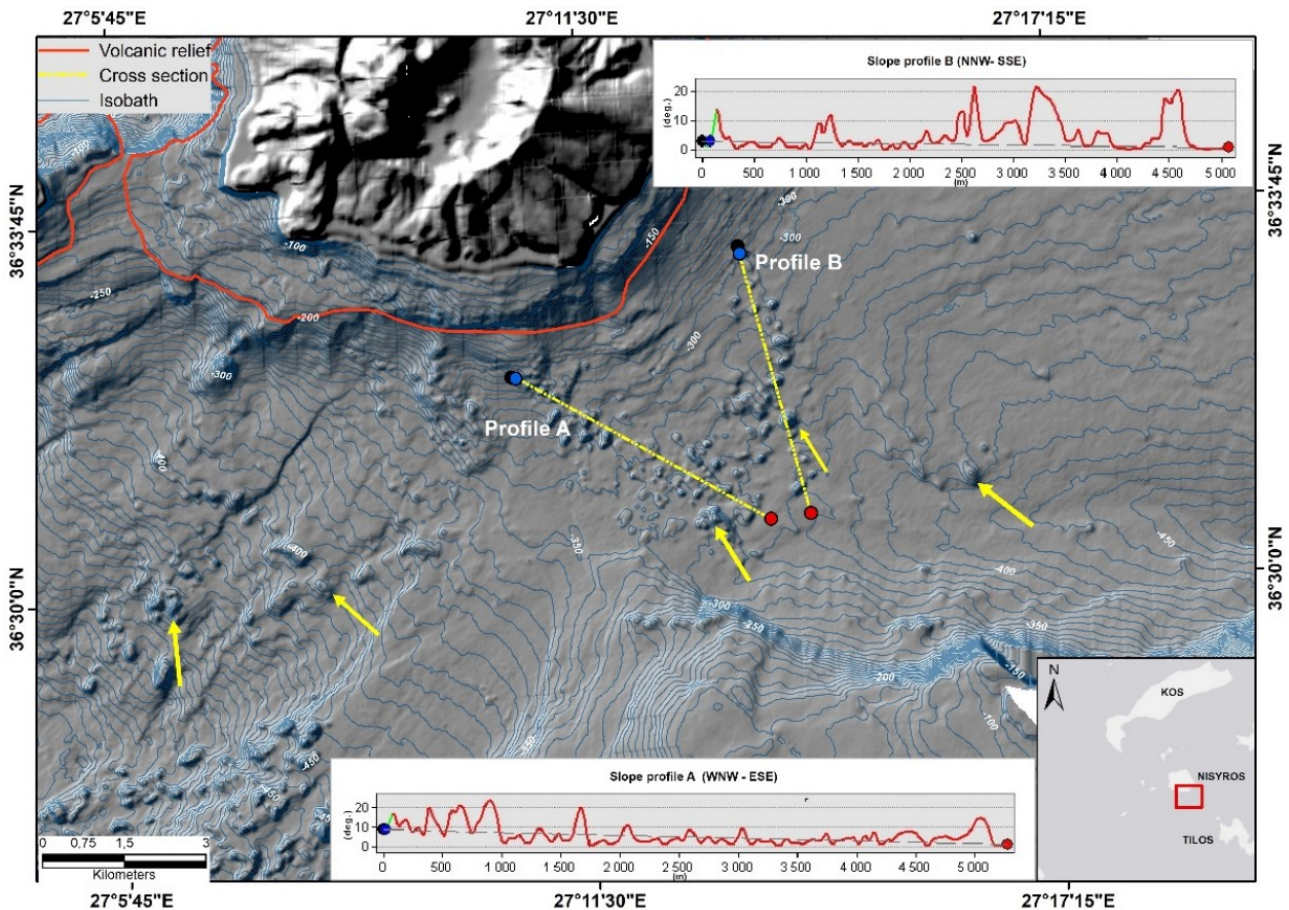
## 5.2 Υποθαλάσσια Ηφαιστειότητα

### 5.2.1 Νίσυρος

Στις υποθαλάσσιες πλαγιές νοτιοανατολικά και νοτιοδυτικά της ηφαιστειακής δομής της Νισύρου παρατηρείται μια ιδιαίτερη μορφολογία που υποδηλώνει αποθέσεις υποθαλάσσιας κατολίσθησης ηφαιστειακών θραυσμάτων. ΣΕ όλο το πεδίο της κατολίσθησης καταμετρήθηκαν συνολικά 364 υψώματα ηφαιστειακών θραυσμάτων (hummocks). Σχηματίζουν συστάδες σε ποικίλα βάθη μεταξύ 196 και 769 μέτρα και εκτείνονται έως και 20 Χλμ μακριά από την ακτή της Νισύρου. Το σχήμα αυτών των θραυσμάτων ποικίλλει από κυκλικά στρογγυλά έως επιμήκη και ασύμμετρα τεμάχια (blocks) διαφορετικού προσανατολισμού, με μέσο αξονικό μήκος 350 μέτρα (τα μεγαλύτερα). Καλύπτουν μια έκταση περίπου 90 τετρ.Χλμ και ο συνολικός τους όγκος εκτιμάται σε περίπου 1 κυβ.χλμ. με μέσο πάχος 40-50 μέτρα σε βάθη νερού μεταξύ 250 και 410 μέτρα. Πιθανολογείται πως προέρχονται από το χερσαίο τμήμα της Νισύρου. Η κατολίσθηση των ηφαιστειακών αυτών συντριμμίων περιλαμβάνει πολυάριθμους λόφους που υψώνονται έως και 60 μέτρα πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας και σχηματίζουν διαμήκεις κορυφογραμμές, δημιουργώντας μία δομή σε σχήμα πετάλου.<sup>102</sup>

102.Nomikou P., Krassakis P., Kazana S., Papanikolaou D., Koukouzas N., The Volcanic Relief within the Kos-Nisyros-Tilos Tectonic Graben at the Eastern Edge of the Aegean Volcanic Arc, Greece and Geohazard Implications. Geosciences 2021, 11, 231





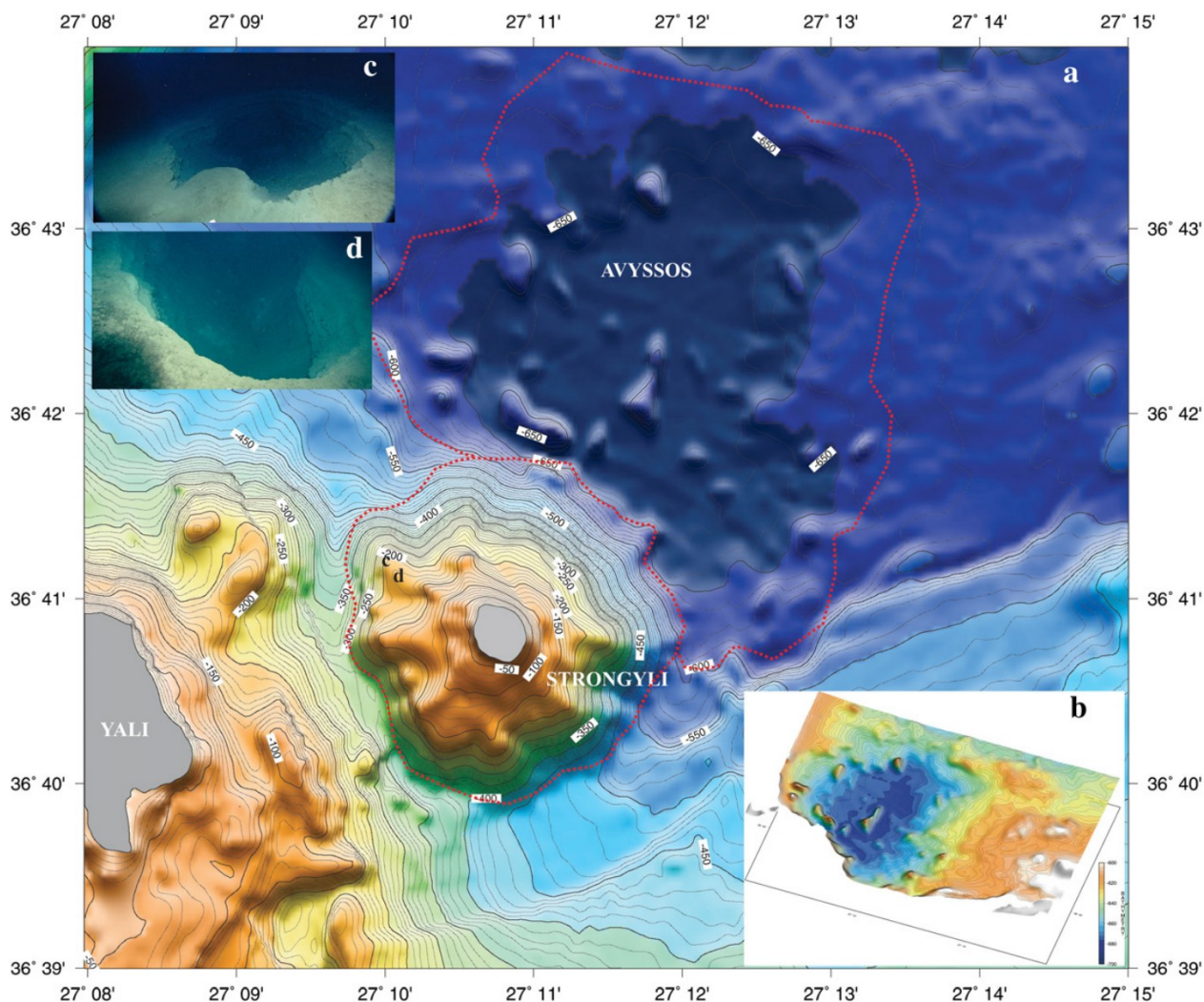
**Εικόνα 28:** Χάρτης της υποθαλάσσιας περιοχής ΝΑ της Νισύρου, που απεικονίζει μέρος του πεδίου κατολισθήσεων ηφαιστειακών θραυσμάτων. Οι μεγαλύτεροι λόφοι/υψώματα εμφανίζονται ως κλειστές ισοβαθείς στο χάρτη (κίτρινα βέλη). Οι τομές κλίσεων (σε μοίρες) κατά μήκος των κατολισθήσεων ερμηνεύουν το σχήμα τους στην οριζόντια απόσταση. (Nomikou et al. 2021)

### 5.2.2 Άβυσσος

Βορειοανατολικά από τον ηφαιστειακό κώνο της Στρογγύλης βρίσκεται ο μεγαλύτερος υποθαλάσσιος ηφαιστειακός κρατήρας του συμπλέγματος της Νισύρου, ο οποίος ονομάζεται Άβυσσος. Το όνομα το πήρε από ο μεγάλο βάθος, στο οποίο συναντάμε τη βάση αυτού του κρατήρα, που πλησιάζει τα 680 μ. Η καλδέρα του κρατήρα της Αβύσσου έχει έκταση 3 χλμ στον άξονα βορειοδυτικά - νοτιοανατολικά και 4 χλμ στον άξονα βορειοανατολικά - νοτιοδυτικά. Στο κεντρο αυτού του κρατήρα εντοπίζεται ένας λόφος μήκους 1 χλμ με ύψος περίπου 60-70 μ πάνω από το επίπεδο του πυθμένα. Ο συγκεκριμένος σχηματισμός αντιπροσωπεύει μεταγενέστερες διεισδύσεις ηφαιστειακών πετρωμάτων. Η κορυφή του κεντρικού ηφαιστειακού θόλου βρίσκεται σε βάθος 610 μ και υψώνεται 66 μ πάνω από την επίπεδη βάση της καλδέρας, η οποία βρίσκεται σε βάθος 676 μ. Το χείλος της καλδέρας βρίσκεται σε βάθος περίπου 630 μ, σχηματίζοντας έναν υποθαλάσσιο κυκλικό βράχο με τοπογραφική διαφορά της τάξεως των 40-50 μ. Οι πλαγιές της καλδέρας της Αβύσσου έχουν ομαλή κλίση που κυμαίνεται από 5-15% με σταδιακή αύξηση του βάθους από τα 630 μ στα 670 μ<sup>103</sup>. Η δημιουργία του κρατήρα αυτού πιστεύεται ότι αντιστοιχεί στην τεράστια έκρηξη που έγινε στην γύρω περιοχή πριν από 160 χιλ. χρόνια. Η έκρηξη αυτή ήταν η μεγαλύτερη που έχει λάβει χώρα στην ανατολική Μεσόγειο και αντιπροσωπεύεται από τον "Ιγκνιμβρίτη της Κω", ο οποίος κάλυψε μια έκταση πάνω από 3.000 τετρ. χλμ. Το κέντρο της έκρηξης αυτής δεν είναι γνωστό με

103.Nomikou P., Bell K.L.C., Papanikolaou D., Livanos I. and Fero Martin J., Exploring the Avyssos-Yali-Strogyli submarine volcanic complex at the eastern edge of the Aegean Volcanic Arc,Z. Geomorphol. 2013, 57, 125–137

ακρίβεια, αλλά πιθανότατα βρίσκεται στην υποθαλάσσια περιοχή βόρεια της νήσου Γυαλί<sup>104</sup>. Η εξερεύνηση του κρατήρα της Αβύσσου έδειξε πως ο πυθμένας του είναι καλυμμένος από καλά διαβαθμισμένα ιζήματα, τα οποία είναι γεμάτα με τρύπες και αναχώματα, στοιχεία που δείχνουν βιοαναμόχλευση. Τέλος δεν έχει παρατηρηθεί κάποιου είδους υδροθερμικής δραστηριότητας στον κρατήρα<sup>105</sup>.



**Εικόνα 29:** **a)** Βυθομετρικός χάρτης των ηφαιστειών Στρογγύλη και Άβυσσος. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές οριοθετούν τις υποθαλάσσιες ηφαιστειακές εξάρσεις. **b)** τρισδιάστατος χάρτης της υποθαλάσσιας καλδέρας της "Αβύσσου". **c)** Υποθαλάσσιος κρατήρας που παρατηρήθηκε κατά την κατάδυση του υποβρύχιου THETIS το 2000 σε βάθος 192 m, στις βορειοδυτικές πλαγιές της Στρογγύλης (σημείο c). **d)** Υποθαλάσσιος κρατήρας που παρατηρήθηκε σε βάθη που κυμαίνονται μεταξύ 193 m (στην κορυφή) και 199 m (στον πυθμένα) κατά την εξερεύνηση του 2010 με ROV. Η θέση (σημείο d) είναι πολύ κοντά στον προηγούμενο κρατήρα. (Nomikou et al. 2012)

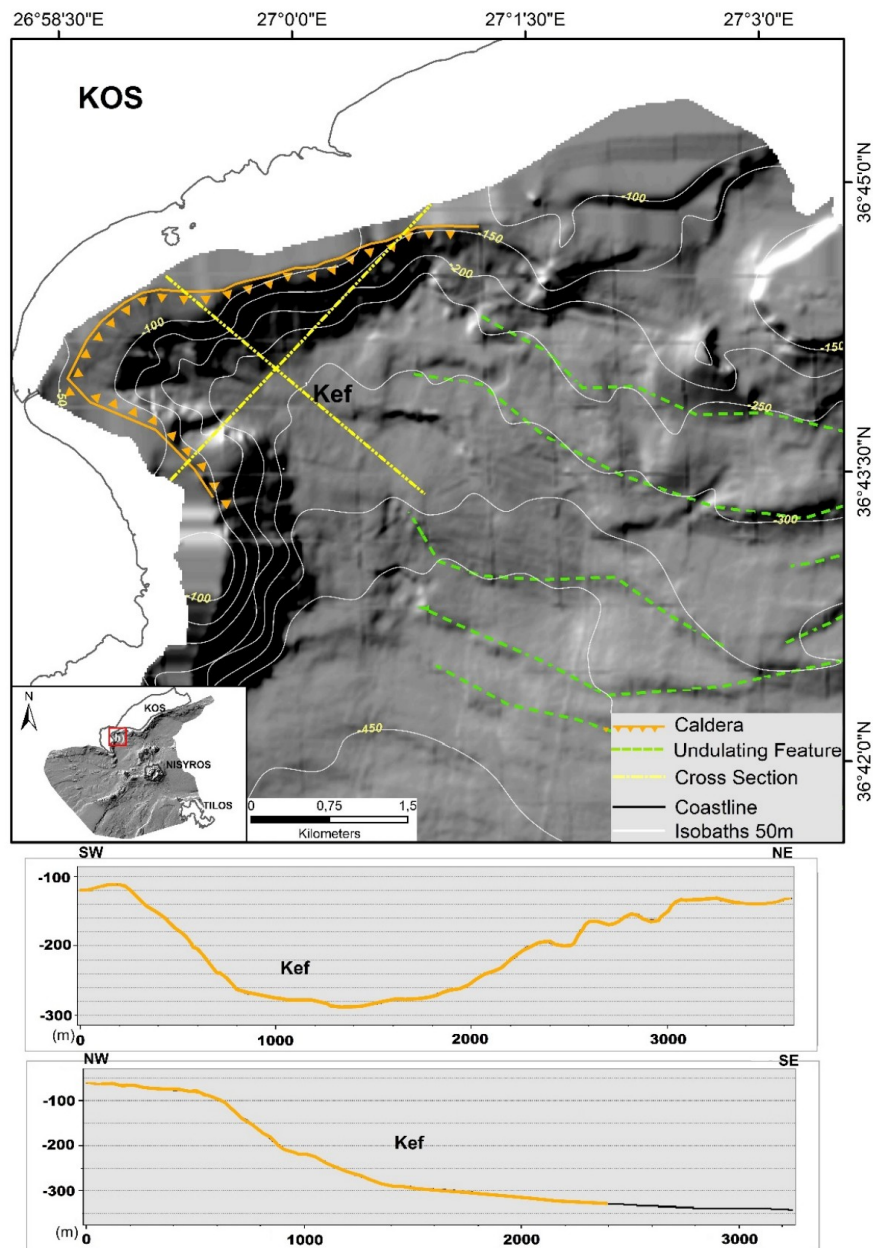
### 5.2.3 Καλδέρα της Κεφάλου

Άλλη μία υποθαλάσσια καλδέρα παρατηρείται στο νοτιοδυτικό τμήμα της νήσου Κω, στα νοτιοανατολικά της χερσονήσου της Κεφάλου, από την οποία πήρε και το όνομα. Σχηματίστηκε πριν από περίπου 500 χιλ. χρόνια κατά τη διάρκεια του Μέσου Πλειστόκαινου. Το παράκτιο χείλος της καλδέρας

104. Tibaldi A., Pasquarè F.A., Papanikolaou D., Nomikou P., Tectonics of Nisyros Island, Greece, by field and offshore data, and analogue modeling. *J. Struct. Geol.* 2008, 30, 1489–1506

105. Nomikou P., Bell K.L.C., Papanikolaou D., Livanos I. and Fero Martin J., Exploring the Avyssonos-Yali-Strogyli submarine volcanic complex at the eastern edge of the Aegean Volcanic Arc, *Z. Geomorphol.* 2013, 57, 125–137

χαρακτηρίζεται από απότομες πλαγιές 20°-30° ενώ η βάση της καλδέρας βρίσκεται σε βάθος από 220 έως 300 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Μόνο το δυτικό τμήμα της καλδέρας της Κεφάλου διατηρείται, ενώ η ανατολική συνέχειά της έχει καταρρεύσει με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια κυματοειδής μορφολογία τοξοειδών αναβαθμίδων που φτάνουν σε βάθος από 400 έως 450 μέτρα. Η δομή αυτή χαρακτηρίζεται από κλίσεις 10°-20° και μοιάζει με ακτινωτή ροή με νότια φορά προς τη περιοχή της λεκάνης της Δυτικής Κω.<sup>106</sup>



**Εικόνα 30:** Το ήμισυ της καλδέρας του Κεφάλου (Kef) που βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της δυτικής λεκάνης της Κω. Τα κυματοειδή χαρακτηριστικά απεικονίζονται με πράσινες διακεκομμένες γραμμές που δείχνουν την κατεύθυνση μιας ακτινωτής ροής. Το ηφαιστειακό ανάγλυφο της υποθαλάσσιας καλδέρας του Κεφάλου (Kef) απεικονίζεται στις τοπογραφικές τομές. (Nomikou et al. 2021)

106.Nomikou P., Krassakis P., Kazana S., Papanikolaou D., Koukouzas N.,The Volcanic Relief Within the Kos-Nisyros-Tilos Tectonic Graben at the Eastern Edge of the Aegean Volcanic Arc, Greece and Geohazard Implications,Geosciences 2021, 11, 231

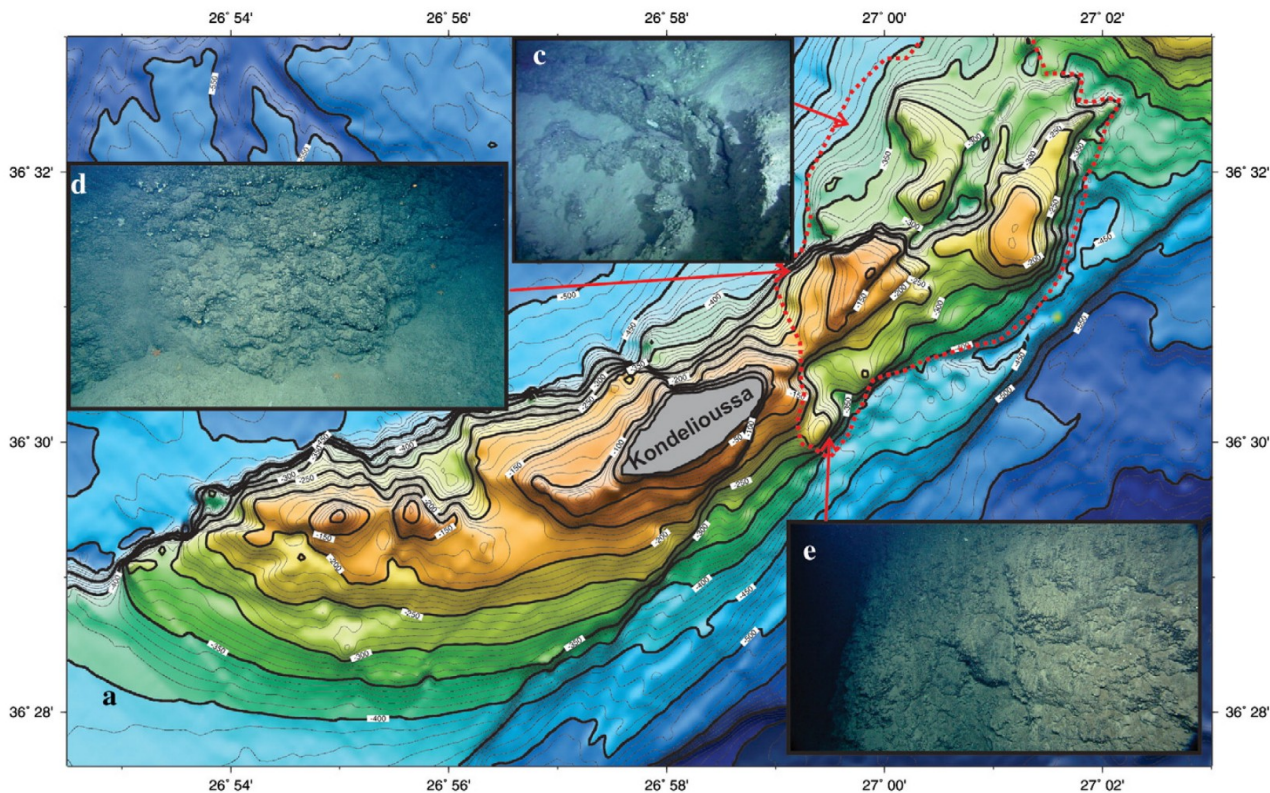
#### 5.2.4 Ηφαιστειακά Κονδελιούσας

Οι τελευταίες εμφανίσεις ηφαιστειακών σχημάτων του συμπλέγματος της Νισύρου βρίσκονται στα βορειοανατολικά και δυτικά της Κονδελιούσας. Η Κονδελιούσα ή Κανδελιούσα είναι ένα ακόμα νησί που βρίσκεται 14,5 χλμ περίπου νοτιοδυτικά της Νισύρου με έκταση 1,4 τετρ. χλμ. Η νησίδα αυτή σχηματίζει έναν νεοτεκτονικό ορίζοντα, ο οποίος αποτελείται από μεσοζωικούς ασβεστόλιθους, που συνορεύει με δύο (περιθωριακά) κανονικά ρήγματα διεύθυνσης ανατολικό βορειοανατολικά - δυτικό νοτιοδυτικά. Τα ρήγματα αυτά έχουν προκαλέσει βύθιση άνω των 1,3 χλμ τόσο βόρεια του νησιού στην δυτική λεκάνη της Νισύρου, όσο και στα νότια προς τη νότια λεκάνη της Νισύρου. Από το βάθος των δύο λεκανών / νεοτεκτονικών τάφρων και το πάχος των ιζημάτων που βρίσκονται πάνω στους Αλπικούς μεσοζωικούς σχηματισμούς στον πυθμένα της θάλασσας, εκτιμάται πως η παραπάνω μετατόπιση είναι η ελάχιστη. Οι ασβεστόλιθοι της Κονδελιούσας εντοπίζονται σε όλο το μήκος της υπεράκτιας συνέχειας της λοφοειδούς δομής προς δυτικά - νοτιοδυτικά, κάτω από το μετά - αλπικό κάλυμμα ιζημάτων πάχους 100-150 μ. Η συνολική μορφή της δομής αυτής σχηματίζει μια πλατφόρμα με ιζήματα που έχουν κλίση 15-20° προς τα νοτιοδυτικά<sup>107</sup>.

Στα βορειοανατολικά λοιπόν αυτής της νήσου (και νοτιοδυτικά της Νισύρου) βρίσκεται μια σειρά από ηφαιστειακούς θόλους. Στη βόρεια πλευρά ενός από αυτούς βρίσκεται ένας υποθαλάσσιος κρατήρας σε βάθος 43 μ με μόλις λίγα μέτρα διάμετρο. Ο κρατήρας αυτός επιβεβαιώνει την ηφαιστειακή προέλευση των θόλων. Επιπλέον ηφαιστειακοί θόλοι με επιβεβαιωμένη ηφαιστειακή προέλευση έχουν παρατηρηθεί στα βορειοανατολικά της Κονδελιούσας χωρίς όμως κάποιο σημάδι υδροθερμικής δραστηριότητας. Εξερευνώντας τον βόρειο κάθετο τοίχωμα του πλησιέστερου θόλου βορειοανατολικά της Κονδελιούσας βρέθηκαν σχηματισμοί που έμοιαζαν με στερεά στρώματα λάβας ή με κατακερματισμένα κομμάτια μαξιλαροειδούς λάβας σε βάθος 263μ. Από την γενική εικόνα της περιοχής φαίνεται πως οι υποθαλάσσιοι ηφαιστειακοί θόλοι της Κονδελιούσας συνεχίζουν βορειοανατολικά προς τους θόλους της Παχειάς και τους θόλους του Προφήτη Ηλία, στο νησί της Νισύρου. Έτσι προκύπτει η υπόθεση πως όλες οι παραπάνω δομές ανήκουν σε μια μεγάλη ηφαιστειακή ράχης, με διεύθυνση βορειοανατολικά - νοτιοδυτικά, μήκους 27 χλμ η οποία είναι κατασκευασμένη από ρυοδακίτες του Ύστερου Πλειοκαίνου<sup>108</sup>.

107.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146

108.Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G., Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, Tectonophysics, Volumes 597–598, 2013,Pages 123-146



**Εικόνα 31:** α) Βυθομετρικός χάρτης της Κονδελιούσας. Οι ηφαιστειακές εξάρσεις οριοθετούνται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή. **c,d,e)** Οι υποβρύχιες φωτογραφίες που ελήφθησαν από το THETIS το 2000 (κρατήρας στο σημείο c) και από το ROV "Hercules" το 2010, και δείχνουν την απότομη κατακόρυφη βόρεια πλευρά του ηφαιστειακού θόλου, ΒΑ της Κοντελιούσας σε βάθος 330 m (σημείο d) και το μεγάλο απότομο διατμητικό τοίχωμα λάβας που καλύπτεται από ιζήματα με βιολογική επικάλυψη νότια της Κονδελιούσας (σημείο e). (Νομίκου et al. 2012)

## 6. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, το Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου δημιουργήθηκε κατά το ύστερο Πλειόκαινο και από τότε μέχρι και σήμερα συνεχίζει την δράση του δίνοντας έντονα σεισμικά και ηφαιστειακά φαινόμενα. Οι ηφαιστειακές δομές του τόξου χωρίζονται σε τέσσερα γκρουπ τα οποία είναι, ξεκινώντας από τα δυτικά, το ηφαιστειακό γκρουπ των Μεθάνων, της Μήλου, της Σαντορίνης και τέλος της Νισύρου στο ανατολικό περιθώριο του ηφαιστειακού τόξου.

Οι κυριότερες ενεργές ηφαιστειακές δομές του γκρουπ των Μεθάνων είναι το ίδιο το ηφαίστειο των Μεθάνων και το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό πεδίο του Πausανία. Η χερσονήσος των Μεθάνων δεν μοιάζει με ένα τυπικό ηφαίστειο όπως τα άλλα ηφαιστειακά κέντρα του τόξου. Αποτελείται κυρίως από μια ομάδα θόλων και ρωών που εκτείνονται από το κεντρικό τμήμα της χερσονήσου μέχρι τη θάλασσα. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα εκτείνεται και στον υποθαλάσσιο χώρο βορειοδυτικά της χερσονήσου, όπου συναντάμε το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό πεδίο του Πausανία. Το πεδίο αυτό αποτελείται κυρίως από έξι ηφαιστειακές προεξοχές με διαφορετική αρχιτεκτονική και γεωμετρία η κάθε μία.

Το επόμενο γκρουπ είναι αυτό της Μήλου και βρίσκεται νοτιοανατολικά από αυτό των Μεθάνων.

Αποτελείται από τα ηφαιστειογενή νησιά της Μήλου και της Αντιμήλου αλλά και από τα υποθαλάσσια ηφαιστειακά πεδία το ένα στα ανοιχτά της Αντιμήλου και το άλλο στην Μήλο αντίστοιχα. Η επικρατούσα τεκτονική τάση στην περιοχή της Μήλου έχει προσανατολισμό βορειοδυτικά - νοτιοανατολικά, σχηματίζοντας το πιο κυρίαρχο χαρακτηριστικό του νησιού, την τεκτονική τάφρο Μήλου-Φυριπλάκας, η οποία φιλοξενεί το ηφαιστειακό οικοδόμημα της Φυριπλάκας. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι πολύ έντονη και στο υποθαλάσσιο τμήμα γύρω από το νησί καθώς έχει δημιουργήσει ένα από τα μεγαλύτερα υδροθερμικά συστήματα ρηχών νερών στον κόσμο, με έκταση που υπολογίζεται στα 35 τετρ. χλμ. Η πιο έντονη δραστηριότητα βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού, στον κόλπο του Παλαιοχωρίου. Βορειοδυτικά της Αντιμήλου συναντάμε μία σειρά από τρεις διαδοχικούς ηφαιστειακούς θόλους οι οποίοι αποτελούν το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό πεδίο της Αντιμήλου.

Στο νοτιότερο σημείο του τόξου βρίσκεται το Γκρουπ της Σαντορίνης το οποίο ξεκινώντας από τα νοτιοδυτικά, περιλαμβάνει τα ηφαιστειογενή Χριστιανά, το ηφαίστειο της Σαντορίνης και το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό πεδίο του Κολούμπο στα βορειοανατολικά. Τα χριστιανά αποτελούνται από 4 ηφαιστειογενή νησιά, την Χριστιανή, την Ασκανιά και τις δύο Εσχάτες, ενώ η ηφαιστειακή δραστηριότητα εκτείνεται και υποθαλάσσια με την εμφάνιση τριών ηφαιστειακών θόλων στον πυθμένα της θάλασσας ανατολικά από τα χριστιανά. Το ηφαίστειο της Σαντορίνης αυτή τη στιγμή αποτελείται από δύο ηφαιστειακά νησιά στο κέντρο της βυθισμένης της καλδέρας, τις Καμένες. Παρατηρείται έντονη υδροθερμική δραστηριότητα όμως και στο υποθαλάσσιο τμήμα της καλδέρας της. Βορειοανατολικά της Σαντορίνης η ηφαιστειακή δραστηριότητα συνεχίζεται υποθαλάσσια στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα του Κολούμπο, το οποίο αποτελείται από τον μεγάλο κρατήρα του Κολούμπο αλλά και από άλλες δεκαοκτώ μικρότερες δομές σε βάθος μέχρι και 500 μ περίπου προς τα βορειοδυτικά του.

Τέλος το ηφαιστειακό γκρουπ της Νισύρου αναπτύσσεται εντός της νεοτεκτονικής τάφρου της Νισύρου, που οριοθετείται μεταξύ των νήσων Κω και Τήλου στο ανατολικό περιθώριο του ηφαιστειακού τόξου. Οι κυριότερες ηφαιστειακές δομές που περιλαμβάνει είναι η υποθαλάσσια καλδέρα της Κεφάλου νοτιοανατολικά της Κω σε βάθος 220 - 300 μέτρα, οι ιγκνιμβρίτες και οι τόφφοι της Κω, η καλδέρα της Νισύρου, οι ηφαιστειακοί δόμοι της νήσου Παχειάς, ο ηφαιστειακός κώνος της Περγούσας, οι υποθαλάσσιοι ηφαιστειακοί δόμοι ανατολικά της Κονδελιούσας σε βάθος που ξεκινάει από τα 400-700 μ κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, το ηφαίστειο στο Γυαλί με μερικώς βυθισμένη καλδέρα, η υποθαλάσσια καλδέρα της Αβύσσου βορειοανατολικά της Στρογγύλης σε βάθος από 670-590 μέτρα και τέλος ο ηφαιστειακός κώνος της Στρογγύλης.

## 7. Βιβλιογραφία

- Ιωάννου Σ.**, Ανάλυση Επικινδυνότητας λόγω ηφαιστειακής τέφρας, εκτίμηση κινδύνου και διαχείριση κρίσης στο ηφαίστειο της Σαντορίνης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας συγκοινωνιών, διαχείριση έργου και σχεδιασμού χώρου, Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, 2013
- Κυριακόπουλος Κ. Γ.**, Ηφαιστειολογία, Αθήνα, Κυριακόπουλος Κ., 2014
- Λεοντάρη Σ. Ν.**, Εισαγωγή στην Ωκεανογραφία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995
- Μαρίνος Γ.**, Το Ηφαίστειο της Αντιμήλου, Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 1959
- Παπανικολάου Δ.Ι, Λέκκας Ε. Λ** Γεωλογική δομή και εξέλιξη του ηφαιστείου της νισύρου, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμος XXV.1, 1991, σελ. 405-419
- Παπανικολάου Δ. Ι., Σίδερης Χρ. Ι.**, Γεωλογία η επιστήμη της Γης, Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη, έβδομη έκδοση 2014
- Περισοράτης Κ., Ανδρινόπουλος Α., Ζαχαράκης Π., Ζημιανίτης Ε.**, Ιζηματολογικές και γεωλογικές έρευνες στο κεντρικό τμήμα του ηφαιστειακού τόξου Ν. Αιγαίου : προκαταρκτικά αποτελέσματα, Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ., Τομ. XXVIII/1, Αθήνα, 1993, σελ.511-531
- Πούλος Σ.Ε. & Καρδισά Κ.**, σημειώσεις Εφαρμοσμένη Ωκεανογραφία & Περιβάλλον, Αθήνα, 2020
- Φουτράκης Π. Μ.**, Θαλάσσια γεωλογική εξέλιξη του Σαρωνικού κόλπου κατά το τεταρτογενές, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Ωκεανογραφίας, 2016
- Anastasakis G., Piper D.J.W.**, Late Neogene evolution of the western South Aegean volcanic arc: sedimentary imprint of volcanicity around Milos, Marine Geology, Volume 215, Issues 3–4, 2005, Pages 135-158
- Antoniou V., Nomikou P., Bardouli P., Lampridou D., Ioannou T., Kalisperakis I., Stentoumis C. , Whitworth M., Krokos M., Ragia L.**, An interactive story map for the Methana volcanic peninsula, Proceedings of the 4th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management - Volume 1: GISTAM, [SciTePress](#), 2018, Pages 68-78
- Antoniou, V., Nomikou, P., Panousis, D., Zafeirakopoulou E.**, Nisyros Volcanic Island: A Geosite through a Tailored GIS Story. Geosciences 2021, 11, 132
- Bampourda, D., Argialas, D., Nomikou, P., & Tzotsos A.**, AN OBJECT BASED IMAGE ANALYSIS APPROACH FOR THE EXTRACTION OF THE KOLOUMBO VOLCANO AND ASSOCIATED DOMES-CONES FROM A DIGITAL SEABED ELEVATION MODEL. Bulletin of the Geological Society of Greece, volume 50, 2016, pages 1616-1625.
- D'Alessandro W., Brusca L., Kyriakopoulos K., Michas G., Papadakis G.**, Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean arc (Greece): Insight from fluids geochemistry, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 178, Issue 4, 2008, Pages 818-828
- Dando P.R., Hughes J.A., Leahy Y., Niven S.J., Taylor L.J., Smith C.**, Gas venting rates from submarine hydrothermal areas around the island of Milos, Hellenic Volcanic Arc, Continental Shelf Research, Vol. 15, No. 8, 1995, pages 913-929,
- Druitt T.H., Sparks R.S.J.**, A proximal ignimbrite breccia facies on santorini , Greece, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1982, pages 147--171
- Foutrakis P. M., Anastasakis G.**, The active submarine NW termination of the South Aegean Active Volcanic Arc: The Submarine Pausanias Volcanic Field, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 357, 2018, Pages 399-417
- Foutrakis P. M., Anastasakis G.**, Quaternary continental shelf basins of Saronikos Gulf, Aegean Sea, Geo-Marine Letters Volume 40, 2020, pages 629–647
- Fytikas M., Innocenti F., Kolios N., Manetti P., Mazzuoli R., Poli G., Rita F., and Villari L.**, Volcanology and petrology of volcanic products from the island of Milos and neighbouring islets, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 28, 1986, Pages 297-317
- Hékinian R.**, Undersea Volcanoes, Scientific American , Vol. 251, No. 1 (July 1984), pages. 46-55

- Hübscher C., Ruhnu M., Nomikou P.**, Volcano-tectonic evolution of the polygenetic Kolumbo submarine volcano/Santorini (Aegean Sea), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 291, 2015, Pages 101-111
- Karátson D., Telbisz T., Gertisser R., Strasser T., Nomikou P., Druitt T., Vereb V., Quidelleur X., Kósik S.**, Constraining the landscape of Late Bronze Age Santorini prior to the Minoan eruption: Insights from volcanological, geomorphological and archaeological findings, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 401, 2020
- Keller J., Rehren T., Stadlbauer F.**, Explosive volcanism in the Hellenic Arc: A summary and review. 1990.– In: Hardy, D. A., Keller, J., Galanopoulos, V. P., Flemming, M. C. & Druitt, T. H. (eds.): *Thera and the Aegean world III*, 2: 13–26, Thera Foundation London
- Khimasia A., Rovere A., Pichler T.**, Hydrothermal areas microbial mats and sea grass in Paleochori Bay, Milos, Greece, *Journal of maps*, Volume 16, 2020, pages 348-356
- Lampridou D., Haase K., Nomikou P., Beier C., Wölki D., Storch B.**, Preliminary results of seafloor exploration in the Western Saronic Gulf, 9th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeo Seismology, Possidi, Greece, 2018
- Nomikou P., Bell K.L.C., Papanikolaou D., Livanos I. and Fero Martin J.**, Exploring the Avyssos-Yali-Strogyli submarine volcanic complex at the eastern edge of the Aegean Volcanic Arc, *Z. Geomorphol.* 2013, 57, 125–137
- Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D., Alexandri M., Bejelou K.**, Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece, *Global and Planetary Change*, Volumes 90–91, 2012, Pages 135-151
- Nomikou P., Hannington M., Petersen S., Wind S., Heinath V., Lange S., Rothenbeck M., Triebe L., Wenzlaff E.**, High-Resolution AUV Mapping of Kolumbo submarine volcano, Santorini, Greece, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, Sp. Pub. 7, 2019
- Nomikou P., Krassakis P., Kazana S., Papanikolaou D., Koukouzas N.**, The Volcanic Relief within the Kos-Nisyros-Tilos Tectonic Graben at the Eastern Edge of the Aegean Volcanic Arc, Greece and Geohazard Implications. *Geosciences* 2021, 11, 231
- Nomikou, P., & Papanikolaou, D.**, A COMPARATIVE MORPHOLOGICAL STUDY OF THE KOS-NISYROS TILOS VOLCANOSEDIMENTARY BASINS. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, Volume 43, 2010, pages 464-474
- Nomikou P., Papanikolaou D., Alexandri M., Sakellariou D., Rousakis G.**, Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc, *Tectonophysics*, Volumes 597–598, 2013, Pages 123-146
- Nomikou, P., Papanikolaou, D., Tibaldi, A., Carey, S., Livanos, I., Bell, K.L.C., Rousakis, G.**, The Detection of Volcanic Debris Avalanches (VDAs) Along the Hellenic Volcanic Arc, Through Marine Geophysical Techniques, In: *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. Springer, 2014, pages 339–349
- Papanikolaou D., Lekkas E., Syskakis D.**, Tectonic analysis of Milos geothermal field, *Bulletin of the Geological Society of Greece XXIV*, 1990, Pages 27-46
- Papanikolaou D., Nomikou P.**, Tectonic structure and volcanic centers at the eastern edge of the Aegean volcanic arc around Nisyros island, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, Vol. 34, 2001
- Pe-Piper, G., & Piper, D. J.**, The effect of changing regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 260, 2013, Pages 146-163
- Perissoratis C.**, The Santorini volcanic complex and its relation to the stratigraphy and structure of the Aegean arc, Greece, *Marine Geology*, Volume 128, Issues 1–2, 1995, Pages 37-58
- Popa R.G., Dietrich V.G., Bachmann O.**, Effusive-explosive transitions of water-undersaturated magmas. The case study of Methana Volcano, South Aegean Arc, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 399, 2020
- Puzenat V., Escartín J., Martelat J., Barreyre T., Bauer S., Nomikou P., Gracias N., Allemand P., Antoniou V., Coskun O., Garcia R., Grandjean P., Jørgensen S., Magí L., Mandalakis M., Orsi W., Polymenakou P., Schouw A., Vallicrosa G., Vlasopoulos O.**, Shallow-water hydrothermalism at Milos (Greece): Nature, distribution, heat fluxes and impact on ecosystems, *Marine Geology*, Volume 438, 2021
- Pyle D.M., Elliott J. R.**, Quantitative morphology, recent evolution, and future activity of the Kamani Islands volcano, Santorini, Greece. *Geosphere*, 2006, pages 253–268



- Sakellariou D., Sigurdsson H., Alexandri M., Carey S., Rousakis G., Nomikou P., Georgiou P., Ballas D.,** Active tectonics in the Hellenic volcanic arc: the Kolumbo submarine volcanic zone, *Bulletin of the Geological Society of Greece* Volume 43, 2010
- Simmons J.M., Cas R.A.F., Druitt T.H., Carey R.J.** The initiation and development of a caldera-forming Plinian eruption (172 ka Lower Pumice 2 eruption, Santorini, Greece), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 341, 2017, Pages 332-350
- Stewart A.L., McPhie J.** Facies architecture and Late Pliocene – Pleistocene evolution of a felsic volcanic island, Milos, Greece, *Bull Volcanol*, Volume 68, 2006, Pages 703–726
- Tibaldi A., Pasquarè F.A., Papanikolaou D., Nomikou P.,** Discovery of a huge sector collapse at the Nisyros volcano, Greece, by on-land and offshore geological-structural data, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 177, Issue 2, 2008, Pages 485-499
- Tibaldi A., Pasquarè F.A., Papanikolaou D., Nomikou P.,** Tectonics of Nisyros Island, Greece, by field and offshore data, and analogue modelling, *Journal of Structural Geology*, Volume 30, Issue 12, 2008, Pages 1489-1506
- Tsampouraki-Kraounaki K., Sakellariou D.,** Seismic stratigraphy and geodynamic evolution of Christiana Basin, South Aegean Arc, *Marine Geology*, Volume 399, 2018, Pages 135-147
- Valsami-Jones E., Baltatzis E., Bailey E.H., Boyce A.J., Alexander J.L., Magganas A. , Anderson L., Waldron S. , Ragnarsdottir K.V.,** The geochemistry of fluids from an active shallow submarine hydrothermal system Milos island, Hellenic Volcanic Arc, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 148, Issues 1–2, 2005, Pages 130-151
- Varnavas S.P., Cronan D.S.,** Submarine hydrothermal activity off Santorini and Milos in the Central Hellenic Volcanic Arc: A synthesis, *Chemical Geology*, Volume 224, Issues 1–3, 2005, Pages 40-54
- Voudouris, P.; Kati, M.; Magganas, A.; Keith, M.; Valsami-Jones, E.; Haase, K.; Klemd, R.; Nestmeyer, M.** Arsenian Pyrite and Cinnabar from Active Submarine Nearshore Vents, Paleochori Bay, Milos Island, Greece. *Minerals* 2021, *11*, 14.