

Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ.	σελ.	Αθήνα
	XXVIII/1	533-552	1993
Bull. Geol. Soc. Greece	Vol.	pag.	Athens

## ΤΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΛΔΕΡΑΣ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΓΥΡΩ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Κ.ΠΕΡΙΣΟΡΑΤΗΣ, Σ.ΜΙΧΑΗΛΙΔΗΣ, Π.ΖΑΧΑΡΑΚΗΣ, Ι.ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ

### ΣΥΝΟΨΗ

Στο εσωτερικό της καλδέρας της Σαντορίνης αναγνωρίστηκαν τέσσερις λεκάνες, μία βόρεια των νήσων Καμμένων και οι άλλες τρεις νότια. Όλες οι λεκάνες έχουν επίπεδο πυθμένα, βάθος που κυμαίνεται από 280 έως 390μ. και πληρούνται από αδρομερή έως πολύ αδρομερή χαλαρά ιζήματα.

Η υποοριζόντια δομή των ιζημάτων στον πυθμένα των λεκανών διακόπτεται από τοπικές αναδύσεις δόμων που δίνουν την εντύπωση διεισδύσεων που έγιναν πιθανόν μετά τον σχηματισμό των λεκανών. Η πετρογραφική ανάλυση του κλάσματος της άμμου από επιφανειακά ιζήματα έδειξε μεγάλη περιεκτικότητα σε αυθιγενή οξειδία σιδήρου στο ΒΑ τμήμα της βόρειας λεκάνης, υποδηλώνοντας πιθανή υδροθερμική δράση στην περιοχή αυτή.

Βορειοανατολικά της θήρας και σε απόσταση 7 χλμ. περίπου βρίσκεται το κωνικό σχήματος ηφαίστειο Κολόμβος, που σύμφωνα με ιστορικές πηγές δημιουργήθηκε από έκχυση λάβας το 1650 μ.Χ. Η πετρογραφική ανάλυση πετρώματος που λήφθηκε από την κορυφή του πιστοποίησε ότι αυτό πράγματι αποτελείται από λάβα που πρόσφατα εκχύθηκε και ψύχθηκε κατά την επαφή της με το νερό.

Συμπερασματικά συνάγεται ότι η ηφαιστειακή δραστηριότητα της Σαντορίνης έχει εκδηλωθεί όχι μόνο στις νήσους Καμμένες αλλά πιθανώτατα και στους δόμους στο εσωτερικό των λεκανών καθώς και στο ηφαίστειο του Κολόμβου. Λεπτομερές έρευνα μπορεί ίσως να προσδιορίσει εάν η επόμενη εκδήλωση της ηφαιστειακής δραστηριότητας του συμπλέγματος της Σαντορίνης θα γίνει στις Καμμένες, στους δόμους ή στο ηφαίστειο Κολόμβος.

### ABSTRACT

Within the Santorini Caldera four basins can be distinguished, one north of Kammeni islands and three south of them. All basins have flat bottoms, depth ranging from 280 to 390m and are filled by coarse and very coarse grained loosed sediments.

The subhorizontal structure of the basin floor sediments is locally disrupted by piercing domes, giving the impression of intrusions that were probably formed after the formation of the basins. Petrographic study carried out at the coarse fraction of the surface sediments revealed abundance of authigenic iron oxides at the northeastern sector of the northern basin, indicating a hydrothermal action in this area.

At about 7 km northeast of Thera, a cone-shaped volcano named Columbus is lying, which according to the historical sources was formed in 1650 A.D. during an eruption. Petrographic description carried out at a rock fragment retrieved from the top of the cone indicate that it consists of an extrusive volcanic mass which have been recently cooled in the sea water.

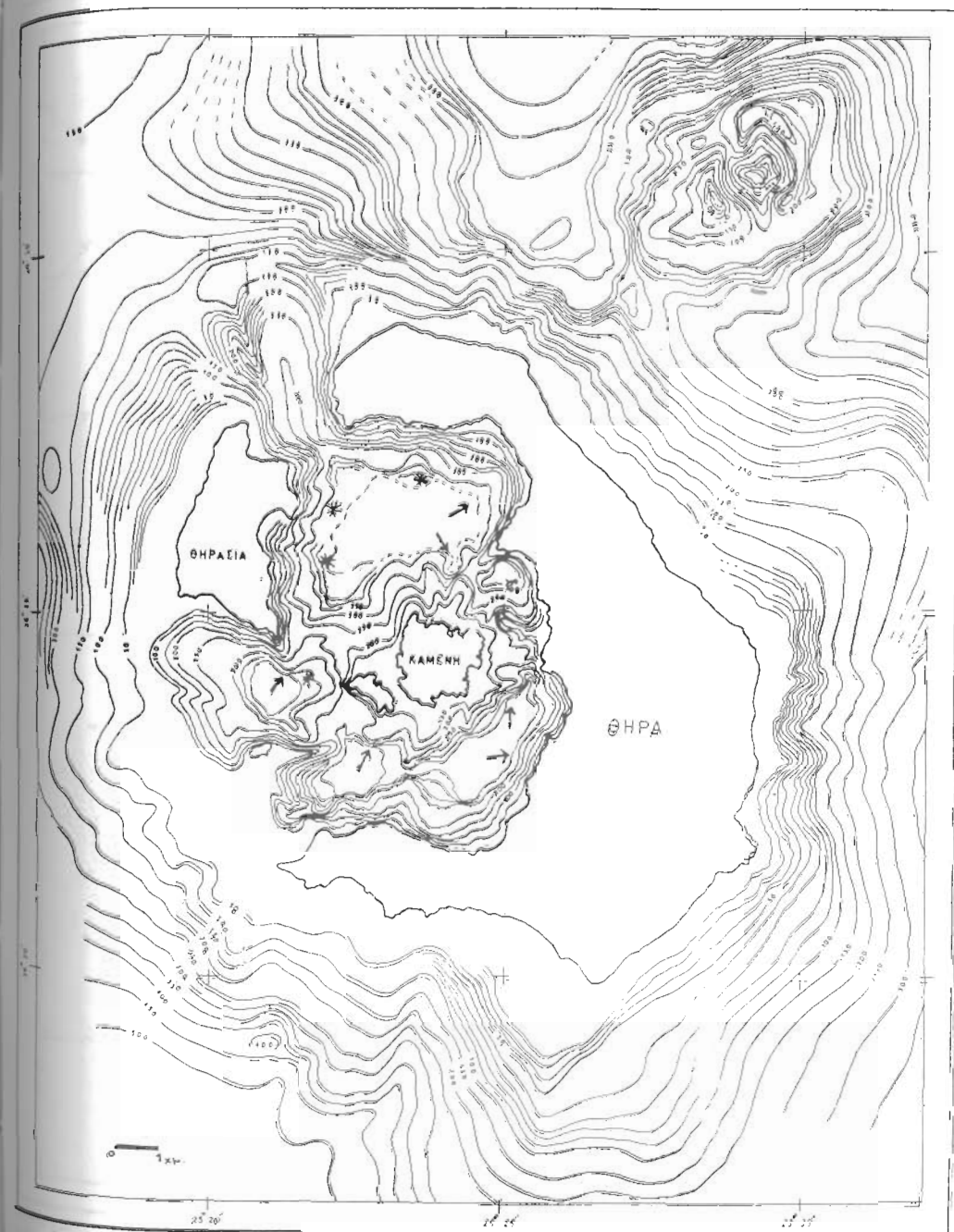
It is deduced that the volcanic activity in the Santorini area is manifested not only in the Kammeni islands but also in the doming of the basin floors as well as at the Columbus Volcano. A detailed research may determine if the next manifestation of the volcanic activity in Santorini area will take place at the Kammeni island, at the domes or at the Columbus Volcano.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοχή που εξετάζεται εδώ περιλαμβάνει την καλδέρα της Σαντορίνης, τον δακτύλιο θήρας και θηρασίας, και την θαλάσσια έκταση γύρω από τον δακτύλιο, με το υποθαλάσσιο ηφαιστείο του Κολόμβου προς τα ΒΑ (Σχ.1). Η γεωλογία των νησιών έχει μελετηθεί εκτεταμένα από πολλούς ερευνητές, ενώ αντίθετα λιγότερες έρευνες έχουν γίνει στην θαλάσσια περιοχή (π.χ. Butuzova 1964, Hoskins and Edgerton 1971, Petersen and Muller 1974, 1978, Smith and Cronan 1978, Varnavas et al. 1990) από τις οποίες μόνο μία αφορούσε την στρωματογραφία και τεκτονική της θαλάσσιας περιοχής. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ προέρχονται από γεωλογικές έρευνες που εκτελέστηκαν στην περιοχή από το Τμήμα Υποθαλάσσιας Γεωλογίας του Ι.Γ.Μ.Ε. στο πλαίσιο ενός ευρύτερου προγράμματος μελέτης του ηφαιστειακού τόξου. Στην μελέτη αυτή μετέχουν επίσης το Πανεπιστήμιο Πατρών, το Imperial College της Αγγλίας και το Ε.Κ.Θ.Ε., χρηματοδοτείται δε από το πρόγραμμα MAST της Ε.Ο.Κ. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν εδώ (Σχ.2) είναι δείγματα επιφανειακών ιζημάτων, πυρήνες και βαθυμετρικές και σεισμικές διαδρομές. Προκαταρκτικά αποτελέσματα από μέρος των στοιχείων αυτών έχουν δημοσιευθεί σε προηγούμενες εργασίες (Bostrom et al., 1990, Perissoratis et al. 1990, Perissoratis 1990, Perissoratis and Angelopoulos 1990).

## 2. ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ - ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Στην καλδέρα της Σαντορίνης η δημιουργία, από την ηφαιστειακή δράση μέχρι το 1950, των νησιών Καμμένων έχει χωρίσει την καλδέρα σε δύο τμήματα, ένα βόρεια και ένα νότια των Καμμένων (Σχ.1). Στο πρώτο τμήμα σχηματίζεται η βόρεια λεκάνη, που έχει ωοειδή μορφή, μέγιστο βάθος 390μ. και επίπεδο πυθμένα με κλίση προς τα ανατολικά και νότια. Οι πλευρές της λεκάνης είναι πολύ απότομες μέχρι την ισοβαθή των 350μ. μετά από την οποία η κλίση μειώνεται. Νότια των Καμμένων υπάρχουν τρεις μικρότερης έκτασης και βάθους λεκάνες. Η δυτική λεκάνη (μέγιστο βάθος 320μ.) χωρίζεται από την βόρεια με ένα ύψωμα ύψους 70μ. έτσι ώστε η συνολική διαφορά βάθους μεταξύ της κορυφής του υψώματος και της βόρειας λεκάνης να είναι περί τα 140μ. (Σχ.10). Οι άλλες δύο λεκάνες είναι η νότια και η ανατολική, που είναι αβαθέστερες της δυτικής (μέγιστο βάθος 290μ.) χωρίζονται απ'αυτή με ένα ύψωμα 70μ. (Σχ.11), του οποίου το ύψος μειώνεται σημαντικά προς νότο. Σε όλες τις λεκάνες νότια των Καμμένων οι πλευρές είναι επίσης απότομες και οι πυθμένες επίπεδοι με μία εμφανή κλίση όμως προς τα βόρεια και βορειοανατολικά.



Σχ. 1: Βαθυμετρικός χάρτης (σε μ.) της καλδέρας και της γύρω περιοχής. Με αστερίσκο σημειώνονται οι θέσεις των αναβολώσεων και με βέλη η διεύθυνση κλίσης του πυθμένα των λεκανών.

Fig.1: Bathymetric map (in m) of the caldera and the surrounding area. The locations of the domes are noted by stars. Arrows indicate tilting directions of Basin floors.

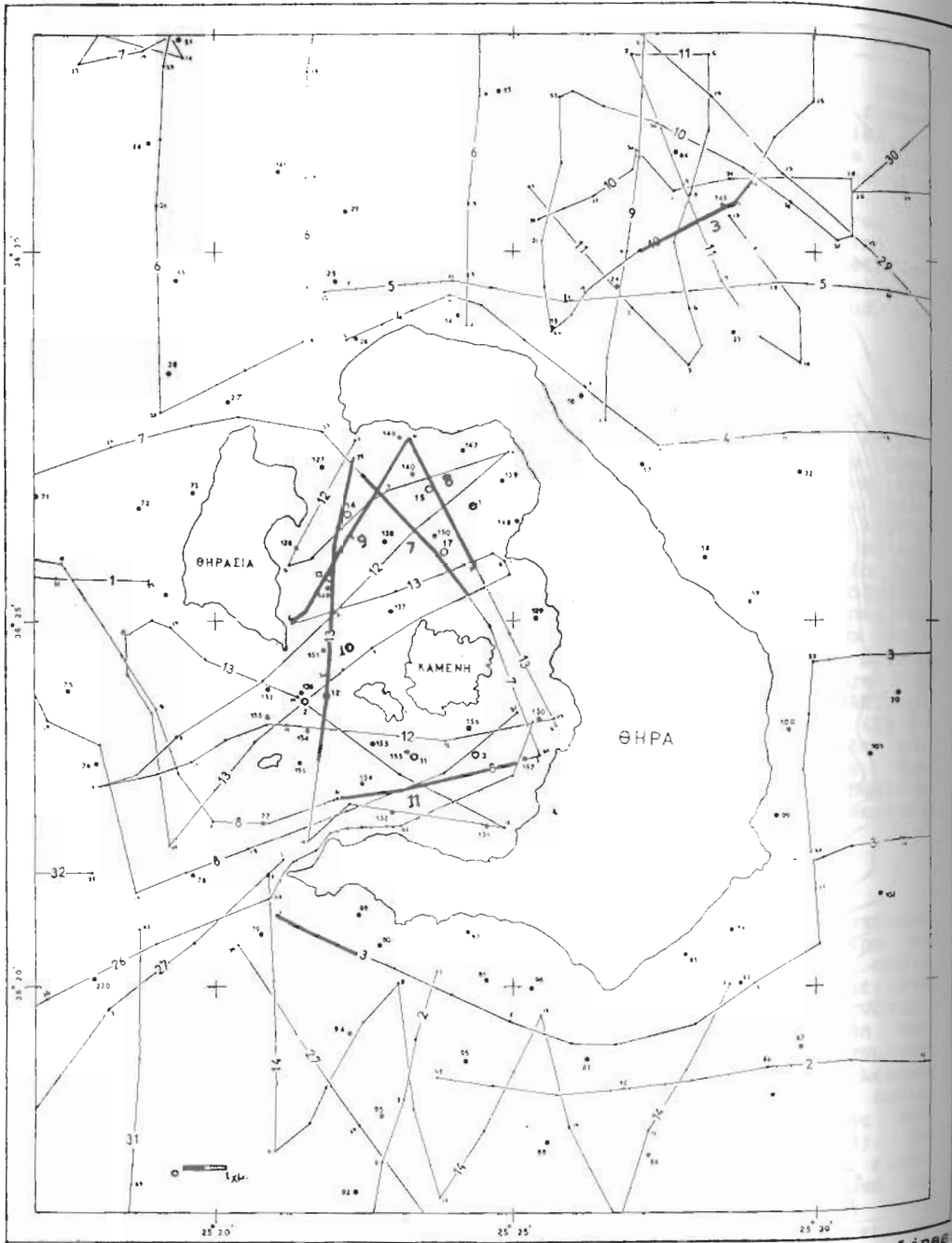
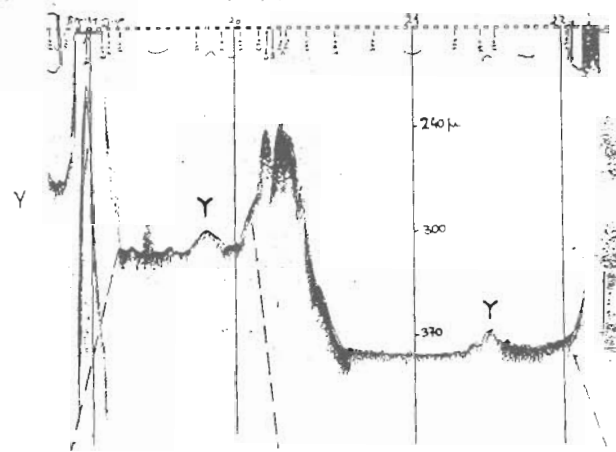
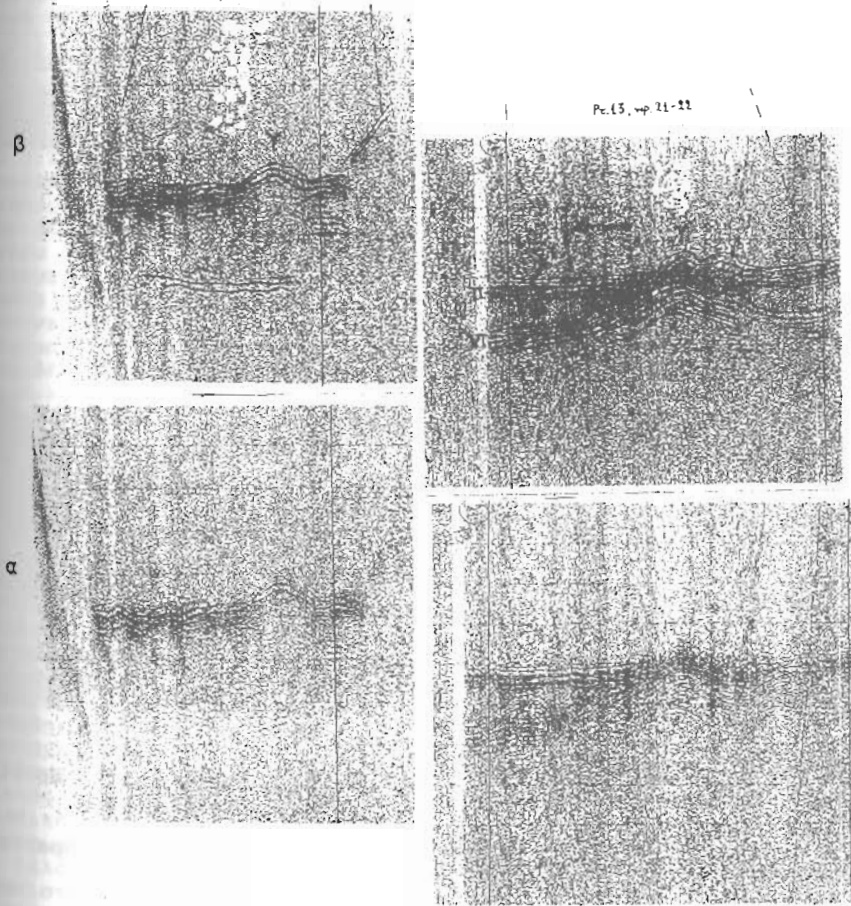


Fig.2: Collected data. Dots: surface samples, Circles: cores, Lines: seismic and bathymetric profiles. Thick lines indicate the location of profiles in figures 3,7,8,9, and 10.  
 Σχ. 2: Συλλεχθέντα στοιχεία. Τελείες: Δείγματα επιφανείας (ως κύκλοι), Πυρήνες. Γραμμές: σεισμικές και βαθυμετρικές διαδρομές. Παχιές γραμμές δείχνουν την θέση των διαδρομών των σχημάτων 3,7,8,9 και 10.



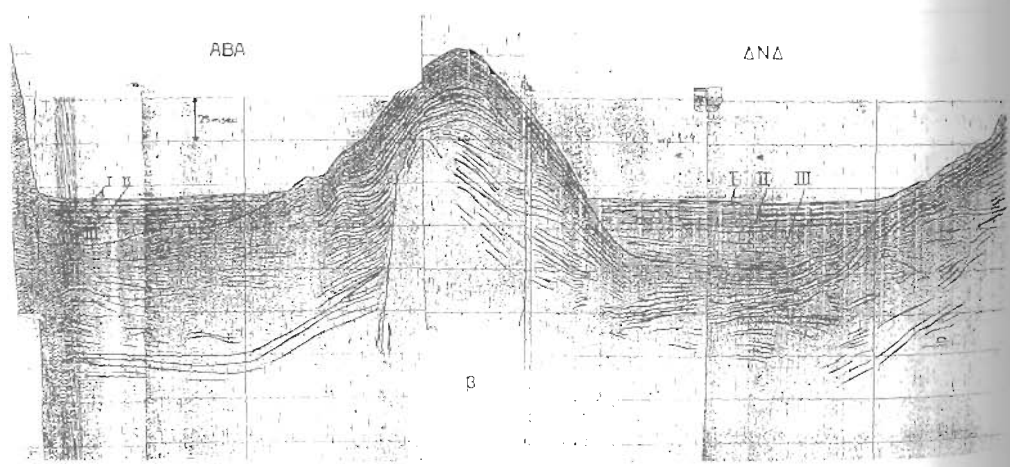
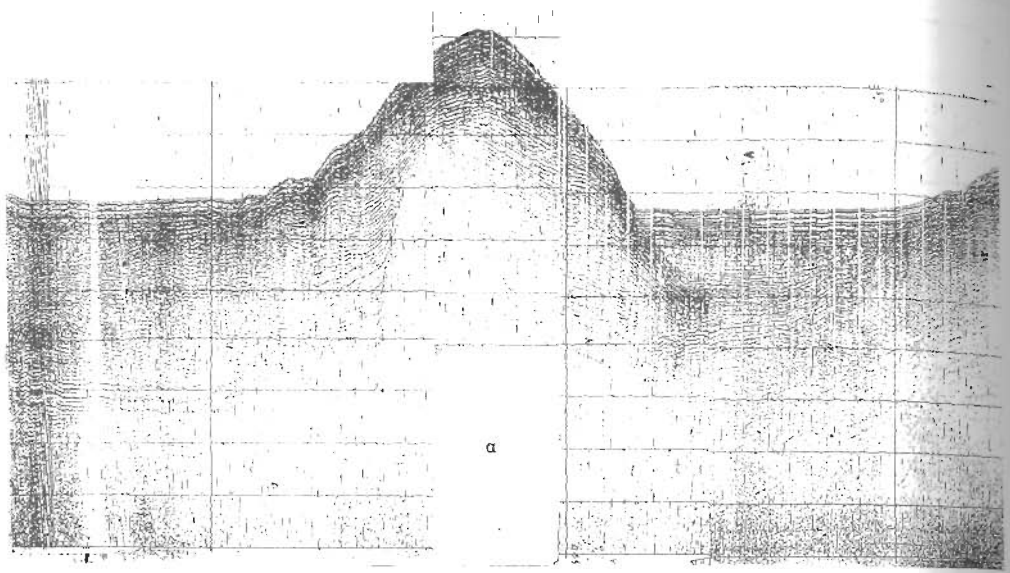
Pc.15, up 20



Pc.15, up 21-22

Σχ.10: Βόρεια και δυτική λεκάνη: (α) Προφίλ Sparker, (β) Ερμηνεία Sparker, (γ) Βαθυμετρική διαδρομή.  
 Fig.10: Northern and Western basin: (a) Sparker profile, (b) Interpretation of Sparker profile, (c) bathymetric profile.

Φηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.



Σχ. 11: Ανατολική (αριστερά) και νότια (δεξιά) λεκάνη. (α) Προφίλ Sparker, (β) Ερμηνεία Sparker.

Fig.11: Eastern (left) and southern (right) basin. (a) Sparker profile, (b) Interpretation of Sparker profile.

Ο επίπεδος πυθμένας των λεκανών παρουσιάζει τοπικά μερικές αναβολώσεις που έχουν ύψος από 5 έως 12μ. και εύρος από 200 έως 700μ. Χαρτογραφήθηκαν τρεις αναβολώσεις στη βόρεια λεκάνη και μία στη δυτική (Σχ. 1, 8, 9,10,Υ).

Στο ΝΑ μέρος της καλδέρας η θήρα και η θηρασία ενώνονται με μία αβαθή περιοχή (μέγιστο βάθος 80μ.) ενώ προς τα ΒΔ η βόρεια λεκάνη επικοινωνεί με την εκτός καλδέρας έκταση με ένα επίμηκες βύθισμα μέγιστου βάθους 330μ.

Γύρω από την Σαντορίνη παρατηρείται μία ομαλή κλίση πυθμένα χωρίς να διακρίνεται υφαλοόριο. Προς τα ΒΔ όμως ο πυθμένας ανυψώνεται απότομα και σχηματίζεται το ύψωμα του Κολόμβου που θεωρείται ότι είναι ένας ηφαιστειογενής σχηματισμός που δημιουργήθηκε το 1650 Α.Δ. (Fytikas et.al.1990). Πρόκειται για μια κωνοειδή προεξοχή της οποίας η κορυφή ανέρχεται μέχρι απόστασης 18μ. από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ η βάση του κώνου κατέρχεται μέχρι του βάθους των 300 έως 400μ. (Σχ. 3).

3.ΙΖΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

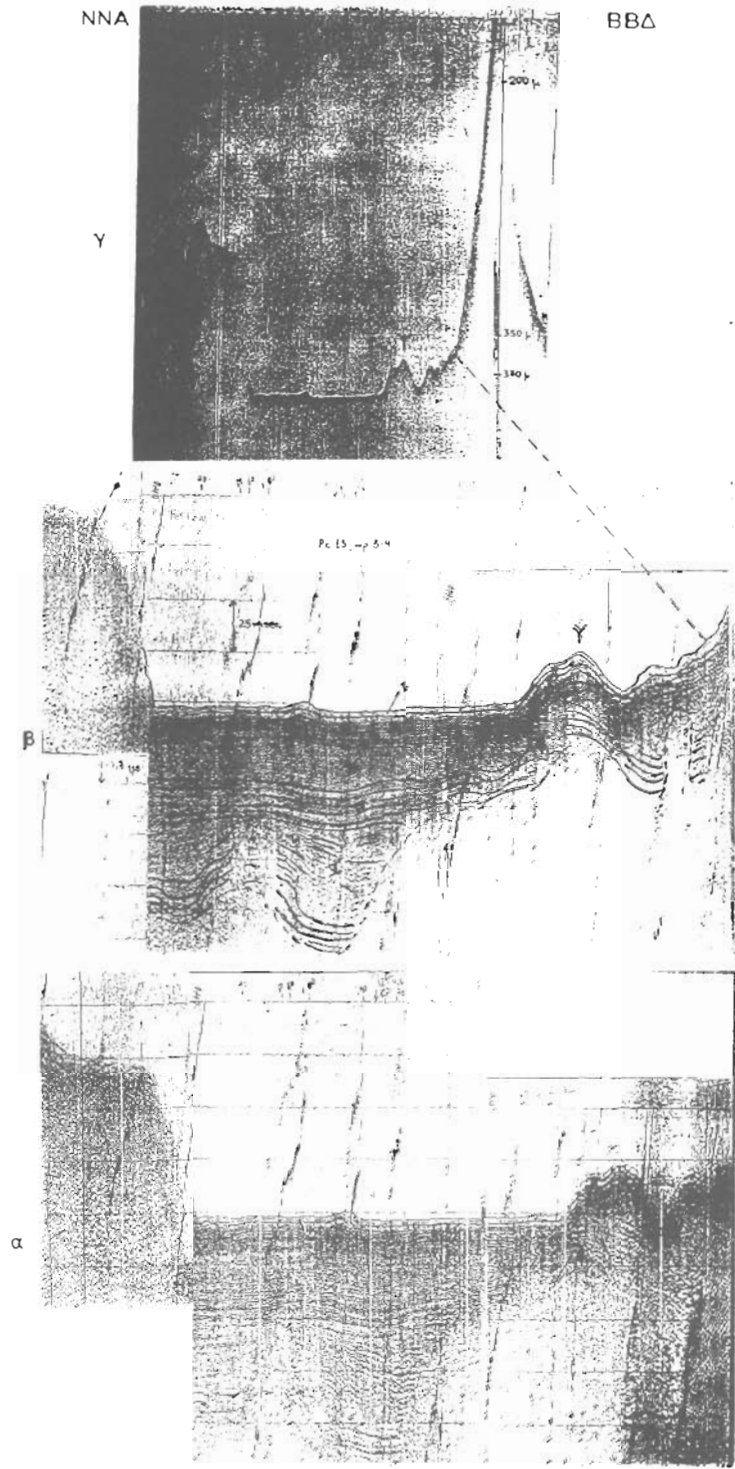
3.1.ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

3.1.1.Κοκκομετρία (Σχ.4): Τα ιζήματα που καλύπτουν τις αβαθείς περιοχές εντός και εκτός καλδέρας είναι άμμοι με σημαντικό κατά τύπους ποσοστό χαλίκων. Τα αδρομερή ιζήματα (πηλούχοι άμμοι, αμμούχοι πηλοί) συνεχίζουν να καλύπτουν τον πυθμένα και σε μεγαλύτερα βάθη γύρω από την Σαντορίνη. Στο ηφαιστείο του Κολόμβου οι πλευρές και η κορυφή του είναι ακάλυπτες από χαλαρά ιζήματα, όπως αυτό φαίνεται τόσο από την εξέταση των σεισμικών διασκοπήσεων όσο και από το ότι οι επανειλημμένες προσπάθειες δειγματοληψίας έφεραν μόνο ευμεγέθη τμήματα πετρωμάτων. Από την άλλη μεριά όλες οι απότομες πλευρές της καλδέρας είναι ακάλυπτες από χαλαρά ιζήματα ενώ και στους πυθμένες των λεκανών τα ιζήματα είναι αδρομερή, παρά το μεγάλο βάθος τους, με σημαντικό όμως ποσοστό λεπτοκόκκων συστατικών (αμμούχοι πηλοί, άμμος-πηλός-άργιλος). Όλα τα ιζήματα είναι συνήθως πολύ ασθενώς διαβαθμισμένα.

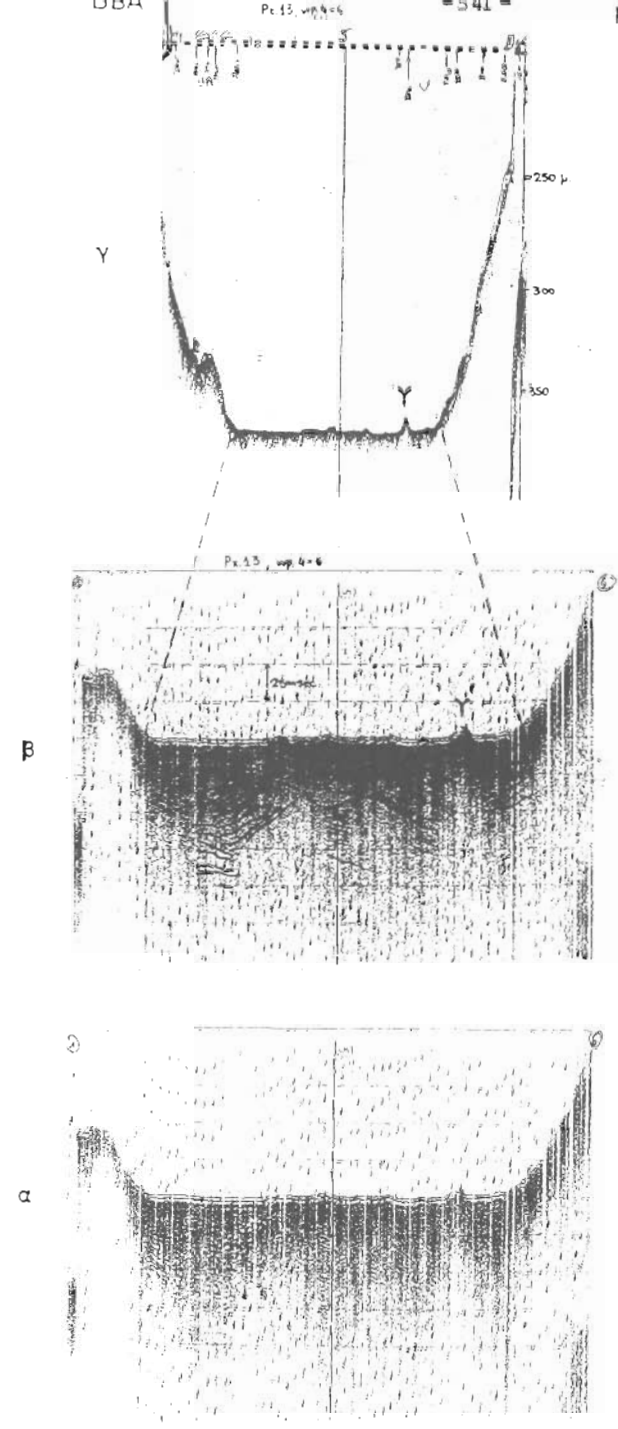
3.1.2.Ανάλυση του κλάσματος της άμμου: Το επικρατούν συστατικό του κλάσματος της άμμου στα ιζήματα που εξετάστηκαν είναι φυσικά τα τμήματα των ηφαιστειακών πετρωμάτων και μόνο τοπικά επικρατούν τα βιογενή ή αυθιγενή συστατικά. Όσον αφορά τα αυθιγενή συστατικά, αυτά αντιπροσωπεύονται από οξειδία σιδήρου που παρουσιάζονται με την μορφή ευδιάκριτων κόκκων ή συσσωματωμάτων. Ιδιαίτερα αυξημένη παρουσιάζεται η παρουσία των οξειδίων σιδήρου στο βορειοανατολικό τμήμα της βόρειας λεκάνης (Σχ.5), γεγονός που συνδέεται με την εκεί υδροθερμική δράση (Perissoratis, et.al., 1990). Επίσης από την εξέταση των πυρήνων που λήφθηκαν στις αναβολώσεις φαίνεται ότι στις περισσότερες απ'αυτές υπάρχει υψηλή παρουσία οξειδίων σιδήρου. Από τα άλλα συστατικά του κλάσματος της άμμου τα βιογενή έχουν σημαντικά υψηλότερη παρουσία εκτός της καλδέρας, ενώ η παρουσία χαλαζία και βαρέων ορυκτών είναι τοπική και εξαρτάται κυρίως από την ύπαρξη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων στην αντίστοιχη Ξηρά.

Τέλος η πετρογραφική ανάλυση δείχνει ότι πρόκειται για ρυοδακτιτική λάβα. Ο ηφαιστείου του Κολόμβου έδειξε ότι πρόκειται για ρυοδακτιτική λάβα. Ο ιστός είναι έντονα μελώδης, υποαφυρικός με ρευστική υφή κρυσταλλιτών



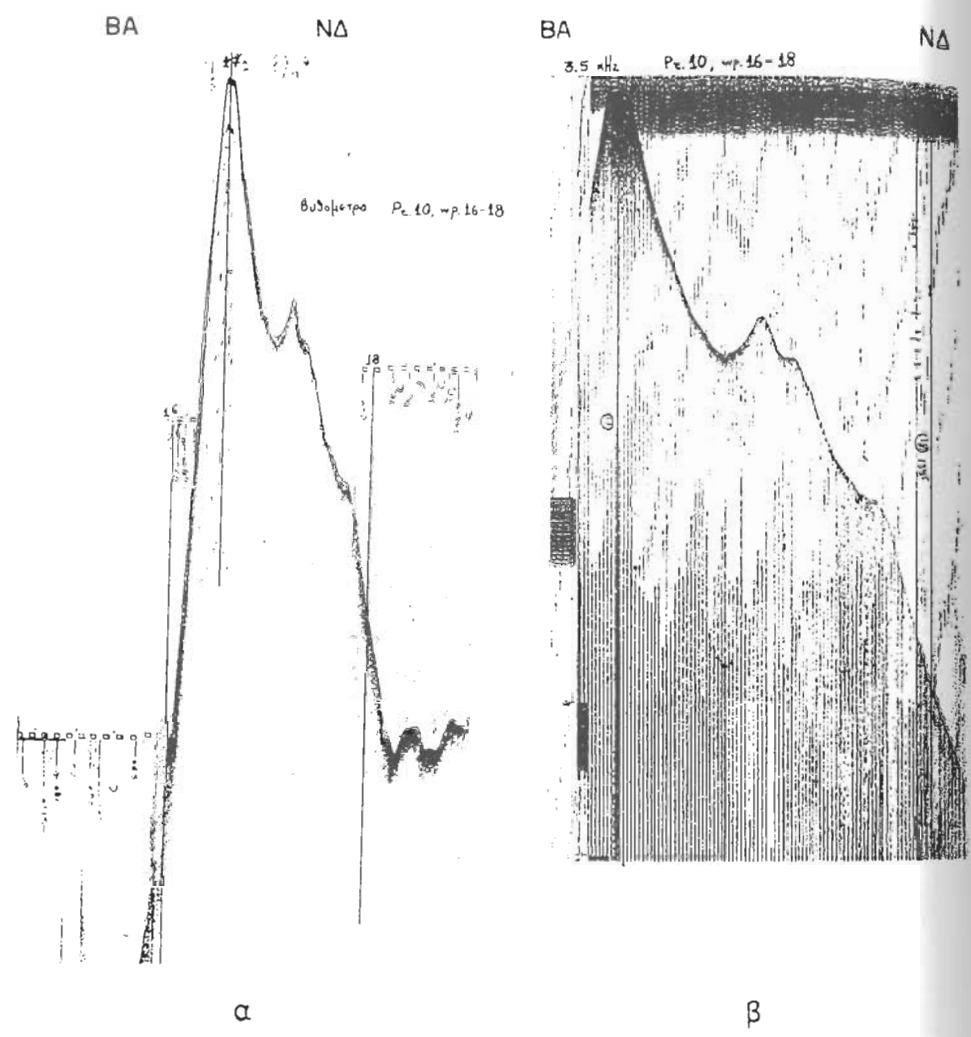


Σχ. 8: Βόρεια λεκάνη: (α) Προφίλ Sparker, (β) Ερμηνεία Sparker, (γ) Βαθυμετρική διαδρομή.  
 Fig.8: Northern basin: (a) Sparker profile, (b) interpretation of Sparker profile, (c) bathymetric profile.



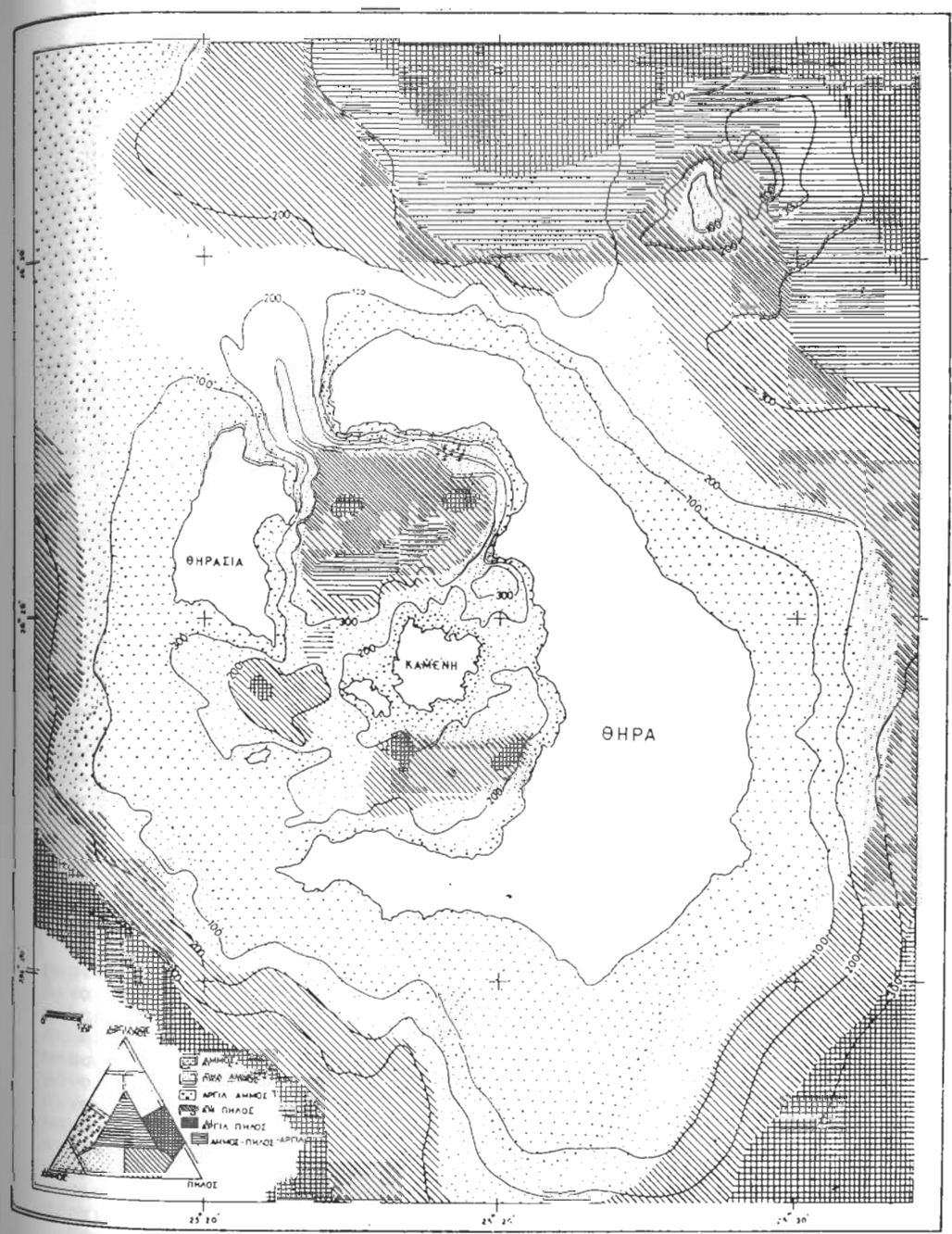
Σχ. 9: Βόρεια λεκάνη: (α) Προφίλ Sparker, (β) Ερμηνεία Sparker, (γ) Βαθυμετρική διαδρομή.  
 Fig. 9: Northern basin: (a) Sparker profile, (b) interpretation of Sparker profile, (c) bathymetric profile.

Φηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.



Σχ. 3: Βαθυμετρική (α) και 3,5 ΚHz (β) διαδρομή στο ηφαίστειο του Κολόμβου. Η κορυφή απέχει περίπου 18μ. από την επιφάνεια της θάλασσας.

Fig.3: Bathymetric (a) and 3,5 KHz (b) profile of Columbus volcano. Top is about 18m. below sea level.



Σχ. 4: Κατανομή των κοκκομετρικών ενότητων,

Fig.4: Distribution of the granulometric units.



Σχ. 5: Κατανομή της περιεκτικότητας των οξειδίων σιδήρου στο κλάσμα της άμμου.   
 // <10%,   
 // >10%,   
 - - - - - Ρήγματα.

Fig.5: Distribution of iron oxides content in the sand.   
 // <10%,   
 // >10%,   
 - - - - - Faults.

και τριχιτών. Επίσης υπάρχει σκωριώδης υφή με κοιλότητες και σχεδόν παντελής έλλειψη αφυάλωσης και δευτερογενών ορυκτών.

3.2. ΠΥΡΗΝΕΣ

Από την καλδέρα της Ξαντορίνης έχουν ληφθεί 9 πυρήνες από τους οποίους οι 4 επάνω ή κοντά στις αντίστοιχες αναβολώσεις των πυθμένων των λεκανών (Σχ.6). Το μήκος τους κυμαίνεται από 0,17 έως 0,64μ. εκτός του πυρήνα SNT-17 που έχει μήκος 3,98μ. Ο τελευταίος λήφθηκε στην βόρεια λεκάνη και δείχνει χαρακτηριστικά την υφή των χαλαρών υποστρωμάτων των λεκανών της καλδέρας που αποτελείται από ένα στρώμα ηλλού στην κορυφή (0-56 εκ.) και στη συνέχεια από εναλλαγές στρωμάτων άμμου και χαλίκων. Το στρώμα αυτό του ηλλού διακρίνεται και σε όλους σχεδόν του άλλους πυρήνες (Σχ.6) ακολουθείται δε από ένα στρώμα χαλίκων και/ή κροκαλών. Μεταξύ των δύο αυτών στρωμάτων παρεμβάλλεται σε μερικούς πυρήνες ένα στρώμα άμμου. Η περιεκτικότητα σε οξείδια του σιδήρου στους πυρήνες εμφανίζει μεγάλη διακύμανση κατά μήκος τους, χωρίς όμως να διαφαίνεται μια συγκεκριμένη ενιαία τάση αύξησης ή ελάττωσης. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν με γεωχημικές αναλύσεις στους ίδιους πυρήνες τις οποίες εκτελούν το Πανεπιστήμιο Πατρών και το Imperial College.

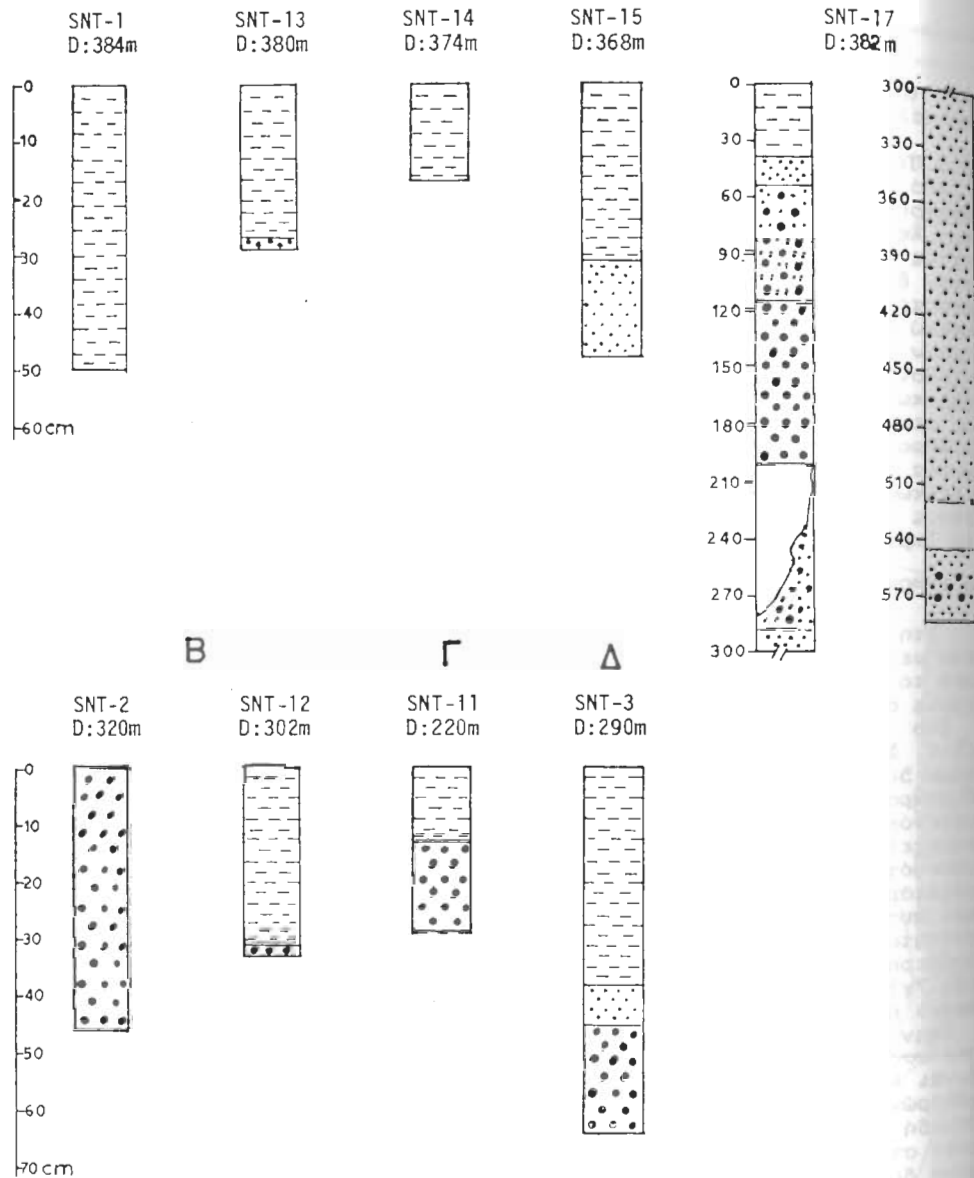
4. ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ - ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Στην βόρεια λεκάνη διακρίνεται στις σεισμικές καταγραφές Sparkler ένα μεγάλο πακέτο χαλαρών ιζημάτων (έως 150 msec, Σχ. 7,8,9,10). Κάτω από το πακέτο αυτό, στο υπόβαθρο της λεκάνης, οι ανακλαστές είναι χωρίς στρώση και δομή, εικόνα που συνεχίζεται και στις πλευρές της.

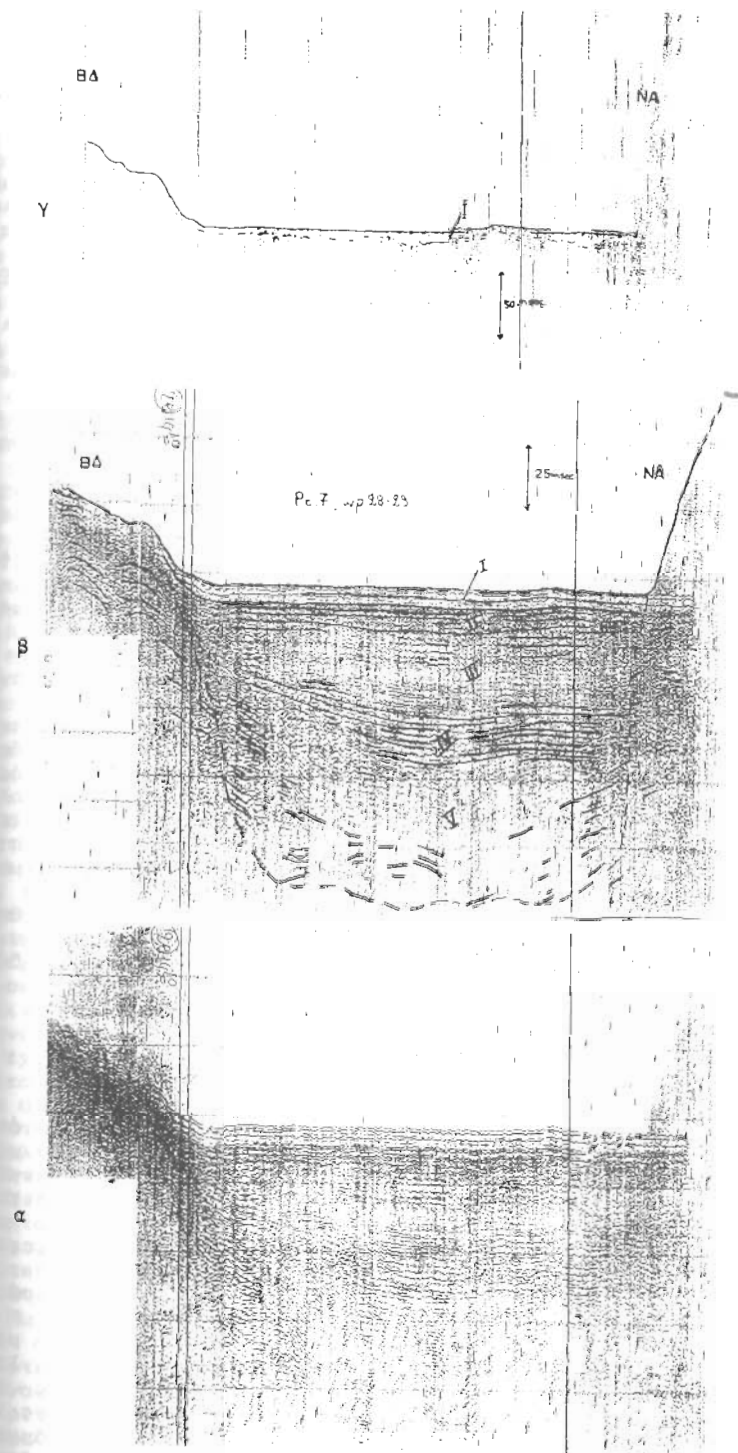
Στο πακέτο των χαλαρών ιζημάτων παρατηρήθηκαν πέντε υποενότητες (I-V, Σχ. 7,8). Η κατώτερη υποενότητα (V) έχει μεταβαλλόμενο πάχος (έως 50 msec), μία χωδύ δομή, διαφανή χαρακτήρα με ασυνεχείς, διαταραγμένους, διακοπτόμενους ανακλαστές και ακολουθείται από την υποενότητα IV (πάχους έως 20 msec) στην οποία οι ανακλαστές είναι συνεχείς, παχείς, έντονοι και υποπαράλληλοι με σαφή στρώση. Η υποενότητα III έχει διαφανή χαρακτήρα με λεπτούς συνεχείς, αδιατάρακτους οριζόντες σταθερού πάχους (30 έως 40 msec) και καλύπτεται και αυτή από την υποενότητα II που έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την ενότητα IV αλλά είναι μικρότερου πάχους (περίπου 15-20 msec). Η ανώτερη υποενότητα I φαίνεται σαφέστερα στις καταγραφές 3,5KHz (Σχ.7γ) και έχει διαφανή χαρακτήρα και μικρό μεταβλητό πάχος (έως 8 msec) η δε βάση της έχει ανώμαλο ανάγλυφο.

Στην περιοχή νότια των Καμμένων στη δυτική λεκάνη και ακόμη περισσότερο στην νότια και ανατολική λεκάνη η στρωματογραφική εικόνα είναι διαφορετική (Σχ. 10,11). Διακρίνεται και πάλι ένα πακέτο χαλαρών ιζημάτων που έχει μικρότερο πάχος από ότι στη βόρεια λεκάνη, δηλαδή είναι περίπου 35-50 msec στην δυτική και νότια λεκάνη, και 25 msec στην ανατολική. Στο πακέτο των χαλαρών ιζημάτων διακρίνονται μόνο δύο υποενότητες, μία κατώτερη με διαφανή χαρακτήρα και λεπτούς συνεχείς οριζόντες και μία ανώτερη αδιαφανής στα ακουστικά κύματα με παχύτερους συνεχείς ανακλαστές. Στο ανώτερο τμήμα της υποενότητας αυτής διακρίνεται πάλι στις καταγραφές 3,5 KHz ένα διαφανές στρώμα μικρού μεταβλητού πάχους. Δηλαδή μπορεί να λεχθεί ότι στις λεκάνες νότια των Καμμένων διακρίνονται οι υποενότητες III, II, και I της βόρειας λεκάνης ενώ απουσιάζουν οι ενότητες IV και V.

Κάτω από το πακέτο των χαλαρών ιζημάτων το υπόβαθρο της ανατολικής και νότιας λεκάνης (Σχ.11) εμφανίζει σαφή στρώση, με μεγάλο αριθμό



Σχ. 6: Λιθολογία των ιζημάτων των πυρήνων: Πηλός, Άμμος, Χάλικες ψηφίδες. Η θέση των πυρήνων φαίνεται στο Σχ.2.  
A: Βόρεια λεκάνη, B: Δυτική, Γ: Νότια και Δ: Ανατολική λεκάνη.  
Fig.6: Lithology of the core sediments: Mud, Sand, gravel, pebbles. The core location is shown at Fig.2.  
A: Northern Basin, B: Western Basin, Γ: Southern Basin and Δ: Eastern basin.



Σχ. 7: Βόρεια λεκάνη: (α) Προφίλ Sparker, (β) Ερμηνεία Sparker, (γ) Προφίλ 3.5 KHz.  
Fig.7: Northern basin: (a) Sparker profile, (b) interpretation of Sparker profile, (c) 3.5 KHz profile.



υποπαράλληλων κατά τόπους αποσφηνούμενων, πτυχωμένων και ρηγματωμένων οριζόντων. Η δομή αυτή μπορεί να ακολουθηθεί από την ανατολική πλευρά της ανατολικής λεκάνης μέχρι την νότια λεκάνη καθώς και στο ύψωμα που παρεμβάλλεται μεταξύ τους (Σχ.11).

Σε ότι αφορά τις αναβολώσεις στον πυθμένα των λεκανών (Σχ.8, 9,10,Υ), φαίνεται ότι πρόκειται για μία επιφανειακή εκδήλωση ενός βαθύτερου τεκτονικού φαινομένου που συνίσταται από διεύθυνση υλικού από βαθύτερα σημεία του υποβάθρου προς τα πάνω. Το υλικό αυτό συμπιέζει και παραμορφώνει τα στρώματα του υποβάθρου καθώς και τα χαλαρά ιζήματα, η δε παραμόρφωση αυτή φθάνει μερικές φορές μέχρι την επιφάνεια των λεκανών (Σχ. 7,8,9,10).

Εκτός της καλδέρας, γύρω από τον νησιωτικό δακτύλιο θήρας-θηρασίας, είναι δύσκολο να διακριθούν γεωλογικές ενότητες στα υποστρώματα του πυθμένα. Οι τελευταίοι καλύπτεται από ένα στρώμα άμμων και χαλίκων μικρού πάχους (2-3μ.) που κατά τόπους αποσφηνώνεται. Μόνο νότια και νοτιοανατολικά της θήρας εκεί που στην ξηρα εμφανίζεται το μεταμορφωμένο υπόβαθρο (Perisoratis 1990), παρατηρήθηκαν στα υποστρώματα του πυθμένα συνεχείς, υποπαράλληλοι, αδιαφανείς ορίζοντες, ρηγματωμένοι και πτυχωμένοι παρόμοιας μορφής με εκείνες που παρατηρήθηκαν στο υπόβαθρο των λεκανών νότια των Καμμένων.

Από την άποψη της τεκτονικής είναι δύσκολο να διακριθεί εάν τα απότομα πρηνή της καλδέρας οφείλονται σε κατακρημνίσεις λόγω εκρήξεων, σε προϋπάρχουσα της Μινωικής έκρηξης ρηματογόνο τεκτονική ή και στα δύο. Επίσης η μελέτη της μορφολογίας των λεκανών έδειξε, όπως προαναφέρθηκε, μία μονομερή καταβύθιση του πυθμένα της βόρειας λεκάνης προς νότια και ανατολικά, και της νότιας και ανατολικής λεκάνης προς βόρεια και ανατολικά, ενώ η βόρεια και η δυτική λεκάνη χωρίζονται με ένα απότομο πρηνές που φαίνεται ότι είναι κατοπτρική επιφάνεια ρήγματος (Σχ.10). Δηλαδή συνάγεται ότι το όλο σύμπλεγμα των Καμμένων περιχαράκωνεται από ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΑ. Μια άλλη κατηγορία ρημάτων ΒΑ-ΝΑ κατεύθυνσης αναγνωρίστηκαν νότια της θήρας, στο ύψωμα μεταξύ ανατολικής και νότιας λεκάνης και στις πλευρές του βυθίσματος μεταξύ θήρας-θηρασίας στο ΒΔ τμήμα της καλδέρας. (Σχ.5).

Τέλος η όλη μορφολογία και τοποθέτηση του συμπλέγματος του Κολόμβου οφείλεται σε δράση ρημάτων, παρόμοιας κατεύθυνσης (Σχ. 1,5).

### 5.ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξετάζοντας τα στοιχεία που παρατέθηκαν πιο πάνω, συνάγεται ότι η περιοχή στην καλδέρα της Σαντορίνης, αλλά και γύρω απ'αυτήν με το ηφαιστείο του Κολόμβου, αποτελεί μια έκταση διαφορετική γεωλογικά από το υπόλοιπο τμήμα του κεντρικού ηφαιστειακού τόξου του Ν.Αιγαίου. Αυτό φυσικά οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή αποτέλεσε μέχρι πρόσφατα πεδίο συνεχών εκρήξεων με αποτέλεσμα τα γεωλογικά γεγονότα να διαδέχονται το ένα το άλλο σε σύντομο χρονικό διάστημα και έτσι δεν είναι εύκολο με τα στοιχεία που έχουμε να διακριθεί η σειρά των γεωλογικών συμβάντων.

Μέσα στην καλδέρα τα ιζήματα είναι χονδρόκοκκα, παρά το μεγάλο βάθος των λεκανών. Στην επιφάνεια του πυθμένα στην βόρεια λεκάνη επικρατούν οι άμμοι και οι πηλούχοι άμμοι, με κατά τόπους υψηλό ποσοστό χαλίκων. Πιο λεπτόκοκκα ιζήματα βρίσκονται στις λεκάνες νότια των Καμμένων, όπου επικρατεί ο αμμούχος πηλός και ο πηλούχος άμμος. Η εξέταση των πυρήνων βέβαια έδειξε ότι η κοκκομετρική υφή των ιζημάτων

μεταβάλλεται σε υψηλό βαθμό σε μικρό βάθος από τον πυθμένα, αλλά και σε μικρή απόσταση από το ένα δείγμα στο άλλο. Προφανώς η συσσώρευση των ιζημάτων ακολουθεί δύο διαδικασίες, τόσο με την καθίζηση των λεπτόκοκκων υλικών, που μεταφέρονται με τα ρεύματα και καθιζάνουν σε βαθιές λεκάνες όσο και με τις κατολισθήσεις από τις απότομες πλευρές των λεκανών, που κατακρημνίζουν χάλικες και κροκάλες στις βαθιές περιοχές. Είναι γεγονός πάντως ότι στους περισσότερους πυρήνες (Σχ. 6), το στρώμα των χαλίκων και των κροκαλών καλύπτεται από ένα στρώμα πηλού και λεπτόκοκκου άμμου μικρού πάχους. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε ότι προϋπήρξε πρόσφατα μία φάση απόθεσης αδρομερών υλικών ενώ σήμερα επικρατεί ιζηματογένεση λεπτόκοκκου υλικού.

Εξετάζοντας το πακέτο των στρωμάτων όπως απεικονίσθηκε στις σεισμικές καταγραφές, διαπιστώνουμε ότι στην βόρεια λεκάνη το πάχος των χαλαρών ιζημάτων υπερβαίνει τα 150 msec, δηλαδή πάνω από 120μ. (ταχύτητα ήχου περίπου 1600 μ/δευτερόλεπτο). Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η γένεση της καλδέρας τοποθετείται προ 3500 ετών περίπου, τότε υπάρχει μία μέση ταχύτητα ιζηματογένεσης περίπου 35μ. την χιλιοετία, που προφανώς ήταν κατά πολύ ταχύτερη κατά το αρχικό στάδιο σχηματισμού και πλήρωσης της καλδέρας απ'ότι σήμερα.

Σύμφωνα με τα στοιχεία όμως από την γεωλογία της ξηράς (Heicken and Mc Coy 1984, Druitt et al 1989), οι αποθέσεις που προήλθαν από την Μινωική έκρηξη διακρίνονται σε τρεις φάσεις. Η κατώτερα Α Μινωική φάση αποτελείται από άστρωτη απόθεση σποδού και άλλων αδρομερέστερων ηφαιστειακών υλικών. Η μέση Β Μινωική φάση αποτελεί την καλώς εστρωμένη λεπτομερέστερη ενότητα και η ανώτερη C Μινωική φάση που αποτελεί και αυτή μία φρεατομαγματική καλώς εστρωμένη φάση. Οι τρεις αυτές φάσεις αποτέθηκαν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, όσο δηλαδή διήρκεσε η ηφαιστειακή δράση.

Από την εξέταση των σεισμικών διασκοπίσεων που λήφθηκαν στην βόρεια λεκάνη, διακρίθηκαν πέντε ακουστικές ενότητες με την μορφή εναλλασσομένων διαφανών - αδιαφανών πακέτων. Η κατώτερη ενότητα V έχει χαώδη δομή ενώ η επικείμενη της ενότητα IV παρουσιάζει μια σαφή στρώση. Είναι πιθανόν οι ενότητες V και IV να αντιστοιχούν με την Α Μινωική φάση, όταν δηλαδή πληρώθηκε κατ'αρχάς η νεοσχηματισθείσα καλδέρα με τα υλικά της έκρηξης και μετά προς το τέλος της φάσης Α άρχισε και η καθίζηση και δημιουργία στρώσης. Η επόμενη ενότητα III είναι λεπτομερέστερη, με σαφέστερη στρώση λεπτών οριζόντων και πιθανόν να αντιστοιχεί στην Β φρεατομαγματική φάση, ενώ η ενότητα II που έχει έντονη στρώση και αδρομερή πιθανόν υλικά να αντιστοιχεί στην C φρεατομαγματική φάση.

Το ανώτατο στρώμα I, στις σεισμικές καταγραφές υψηλής διακριτικής ικανότητας (3.5 KHz) είναι διαφανές ακουστικά, η βάση του είναι ανώμαλη και το πάχος του μεταβαλλόμενο (έως 6μ.). Εάν οι προηγούμενες ενότητες V έως II είναι υλικά πληρώσεως της καλδέρας που προήλθαν από την Μινωική έκρηξη και αποτέθηκαν σε σύντομο χρονικό διάστημα, τότε η ενότητα I θα αντιπροσωπεύει το ιζήμα που έχει αποθεθεί από την δημιουργία και πλήρωση της καλδέρας μέχρι σήμερα. Αυτό δίνει μία ταχύτητα ιζηματογένεσης έως 1.5μ. την χιλιοετία. Παρόμοιες τιμές ιζηματογένεσης για την βόρεια λεκάνη έχουν δοθεί από τους Petersen and Muller (1974).

Οι σεισμικές καταγραφές στις λεκάνες νότια της καλδέρας και ιδιαίτερα στην ανατολική και νότια λεκάνη, παρουσιάζουν διαφορετική εικόνα. Τα χαλαρά ιζήματα έχουν σημαντικά μικρότερο πάχος και διακρίνονται μόνο δύο ενότητες, μία κατώτερη διαφανής και μία ανώτερη αδιαφανής, που έχουν σαφή και συνεχή στρώση. Δεν διακρίνονται δηλαδή

Οι κατώτερες ενότητες V και IV της βόρειας λεκάνης. Επίσης το υποστρώμα των λεκανών είναι καλώς εστρωμένο και η στρώση του συνεχίζεται από το ανατολικό άκρο της ανατολικής λεκάνης στην δυτική λεκάνη και στο ύψωμα που τις χωρίζει. Δεδομένου ότι στην αντίστοιχη ανατολική πλευρά της θήρας εμφανίζονται τα μεταμορφωμένα πετρώματα του υποβάθρου της Σαντορίνης, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το υποβάθρο της ανατολικής και νότιας λεκάνης δομείται από το υποβάθρο της Σαντορίνης. Αυτό δείχνει ότι πιθανότατα οι λεκάνες αυτές προϋπήρχαν της βόρειας λεκάνης και δεν δημιουργήθηκαν από την Μινωική έκρηξη. Άλλωστε σ' αυτό συμφωνεί και η απουσία των κατωτέρων ενοτήτων V και IV της βόρειας λεκάνης καθώς επίσης και το μικρό πάχος των χαλαρών ιζημάτων.

Η παρουσία των αναβολώσεων που διαπερνούν τα σύγχρονα ιζήματα οφείλεται προφανώς στην διεύθυνση ηφαιστειακών μαζών από τα βαθύτερα σημεία της καλδέρας. Οι αυξημένη παρουσία οξειδίων σιδήρου στους πυρήνες που λήφθηκαν ενισχύει την άποψη αυτή. Το ύψωμα στην δυτική λεκάνη (Σχ. 10) φαίνεται να σχετίζεται με τις Καμμένες, ενώ στην βόρεια λεκάνη οι αναβολώσεις δεν έχουν μια ορισμένη ταξινόμηση.

Εκτός της καλδέρας τα ιζήματα είναι αδρομερή στις παράκτιες περιοχές, όπου επικρατούν οι άμμοι με λίγο ποσοστό χαλίκων κατά τόπους. Μετά την ισοβαθή των 200μ., επικρατούν τα λεπτόκοκκα ιζήματα (αμμούχος πηλός). Στα υποστρώματα του πυθμένα οι ακουστικοί ορίζοντες είναι συνήθως ασυνεχείς και μόνο στην περιοχή νότια της Σαντορίνης εμφανίζονται συνεχείς ρηγματωμένοι ορίζοντες διακοπόμενοι από ρήγματα διεύθυνσης Β-Ν. Είναι δύσκολο να συσχετισθούν οι ορίζοντες αυτοί με γεωλογικές διαπλάσεις της Ξηράς εκτός από την περιοχή νότια και νοτιοανατολικά της θήρας όπου οι συνεχείς ορίζοντες των υποστρωμάτων του πυθμένα είναι προφανώς συνέχεια των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, που εμφανίζονται στο αντίστοιχο τμήμα της Ξηράς (perissoratis 1990).

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της εκτός καλδέρας περιοχής αποτελεί το ηφαίστειο του Κολόμβου. Η κορυφή του κώνου καθώς και οι πλευρές του είναι ακάλυπτες από σύγχρονα ιζήματα, αποτελείται δε από ρυοδακτυλική λάβα της οποίας ο υελώδης ιστός δείχνει κρυστάλλωση σε πολύ γρήγορο χρονικό διάστημα σε θαλάσσιο περιβάλλον, ενώ η σκωριώδης υφή με τις κοιλότητες δείχνει ότι η έκχυση περιείχε υψηλή ποσότητα αερίων, γεγονός που συμφωνεί και με τις ιστορικές μαρτυρίες της έκρηξης (Ψυτικός, et al., 1990). Τέλος η έλλειψη αφυάλωσης και δευτερογενών ορυκτών είναι χαρακτηριστικά της εντελώς πρόσφατης χρονικά έκρηξης (1650 μ.Χ.).

Η γενική διεύθυνση του ηφαιστείου του Κολόμβου είναι ΒΑ-ΝΑ, όπως και η γενική κατανομή των οξειδίων σιδήρου εντός και εκτός της καλδέρας (Σχ. 4) καθώς και η διεύθυνση των νησιών Καμμένων. Η ΒΑ-ΝΑ αυτή διεύθυνση, γνωστή ως γραμμή της Καμμένης (Kammeni Line) αποτελεί την διεύθυνση κατά την οποία εμφανίζεται σήμερα η ηφαιστειακή δράση και η δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων.

Η ηφαιστειακή δράση λοιπόν εκδηλώνεται τόσο στην Καμμένη και στον Κολόμβο όσο και στις αναβολώσεις με την άνοδο μάγματος, ενώ η υδροθερμική δράση εκδηλώνεται με τον σχηματισμό και την συγκέντρωση αυθιγενών οξειδίων του σιδήρου στα χαλαρά ιζήματα του πυθμένα. Πιστεύουμε ότι ο συνδυασμός των στοιχείων της μελέτης αυτής με δεδομένα από άλλους κλάδους γεωεπιστημών (π.χ. μικροσεισμικότητα) ίσως δείξει εάν το επόμενο θέατρο ηφαιστειακής δράσης στην καλδέρα θα είναι οι Καμμένες, οι αναβολώσεις ή ο Κολόμβος.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά τον Γενικό Δ/γτή του Ι.Γ.Μ.Ε. Δρ.Β. Ανδρονόπουλο που μας επέτρεψε να δημοσιεύσουμε τα στοιχεία της μελέτης αυτής καθώς και την Ε.Ο.Κ. για την μερική χρηματοδότηση των ερευνών από το πρόγραμμα "MAST-0015-C(TT)". Ευχαριστούμε επίσης ιδιαίτερα τους γεωλόγους κ.κ. Γ.Βουγιουκαλάκη και Δρ.Μ.Βαρθή-Ματαράγκα για την πετρογραφική εξέταση του δείγματος από το ηφαίστειο του Κολόμβου.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BOSTROM, K., PERISSORATIS, C., et al., 1990: Geochemistry and Structural control of hydrothermal sediments and new Hot Spring in the Caldera of Santorini, Greece. In: D.A. Hardy ed., *There and the Aegean World*, III, p.312-324.
- BUTUZOVA, G.Yu., 1969: Recent volcano-sedimentary iron ore processes in Santorini volcano caldera (Aegean Sea) and its effect on the geochemistry of the sediments, *Abd. Naft. SSR, Geol. Inst.*, v.94.
- DRUITT, T. H., MELLORS, R. A., PYLE, D. M. and SPARKS, R. S. J., 1989: Explosive volcanism on Santorini, Greece, *Geol. Mag.*, 126, 2, 95-126.
- FYTIKAS, M., KOLIOS, N., and VOUGIOUKALAKIS, G., 1990: Post-Minoan Volcanic Activity of the Santorini Volcano. Volcanic Hazard and Risk, Forecasting Possibilities, In: D.A. Hardy, ed., *There and the Aegean World*, III, v.II, p.183-198.
- HEICKEN, G., and Mc COY, F. E., 1984: Caldera development during the Minoan eruption, *Thera, Cyclades, Greece. Journ. Geoph. Res.*, 89, p.8441-8462.
- HOSKINS, H., and EDGERTON, H. E., 1971: Normal-incidence 5 and 6 KHz sonar profiles delineate sea floor rock and sediment types at Thera, Greece, *Acta of the International Scientific Congress on the Volcano of Thera, Athens*, 325-365.
- PERISSORATIS, C., ANGELOPOULOS, I. and ZACHARAKI, P., 1990: Petrographic description of marine sediments from Santorini: Evidence for a New Submarine Hot-Spring field in the Bottom of the Caldera. In: D.A. Hardy, ed. *Thera and the Aegean World*, III, v.II, p.300-304.
- PERISSORATIS, C., 1990: Marine Geological Research on Santorini: Preliminary Results, *As above*, p.305-311.
- PERISSORATIS, C., and ANGELOPOULOS, I., 1990: Geologic controls of the Santorini Caldera and the Columbus Volcano, IIII, *C.I.E.S.N., Congr.*, v.32, Fasc.1, p.101.
- PETERSEN, M. D., and MULLER, G., 1974: Rezente tuffitische Sedimente im Bereich der Santorin-Inselgruppe (Griechenland) Teil I: Mineralogie Petrographie, Tephrochronologie, *Neues Jahrb. Miner.*, 186, 323, 1, 96-199.

- PETERSEN, M.D., and MULLER, G., 1978: Recent tuffitic sediments around Santorini Greece, Part IV: Geochemistry of the iron rich sediments from the Santorini Caldera. In C. Bonnes, ed. Thera and the Aegean World, 1, p. 311-332.
- SMITH, P.A., and CRONAN D.S., 1978: Geochemical dispersion of metals in and around the Caldera of Thera, As above, p. 332-361.
- VARNAVAS, S.P., CRONAN, D.S., and ANDERSON, R.K., 1990: Spatial and time series analysis of Santorini hydrothermal waters. Thera and the Aegean world, vol. 3, p. 312-324.