



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ (ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ,
ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ, ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Μελέτη συσχετισμού ορυκτολογικών και φυσικών ιδιοτήτων πετρωμάτων από τη Νήσο Σαντορίνη και διερεύνηση αναλόγων στον πλανήτη Άρη"

Αύγουστος Ν. Πανταζίδης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής Εμμανουήλ Μανούτσογλου (Επιβλέπων)

Επίκουρος Καθηγητής Ιωάννης Μπαζιώτης (Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών)

Δρ. Ανεζίνα Σολωμονίδου (Jet Propulsion Laboratory)

Χανιά, Οκτώβριος 2016

Η έγκριση της παρούσας διπλωματικής εργασίας από το Πολυτεχνείο Κρήτης, δεν σημαίνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202)

Αφιέρωση,

Στην οικογένεια μου που με στήριξε και συνεχίζει να με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια και
στον αδελφικό μου φίλο Λεωνίδα Γαργάλη.

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίηση της. Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω την τριμελή επιτροπή της παρούσας εργασίας. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα από το Πολυτεχνείο Κρήτης Καθηγητή Εμμανουήλ Μανούτσογλου και την Δρ Ανεζίνα Σολωμονίδου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν για την διεκπεραίωση του θέματος της παρούσας εργασίας. Κυρίως όμως, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά τον επίκουρο καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Ιωάννη Μπαζιώτη, διότι χωρίς την καθημερινή του καθοδήγηση, τις ιδέες του, και την υπομονή του, η παρούσα εργασία αφενός δεν θα είχε πάρει την τελική της μορφή και αφετέρου μέρος της, δε θα είχε δημοσιευτεί στο συνέδριο της Meteoritical Society of America στο Βερολίνο (Αύγουστος 2016). Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Stephan Klemme και Jasper Bernst από το Πανεπιστήμιο του Munster για τις ορυκτοχημικές αναλύσεις με χρήση του Ηλεκτρονικού Μικροαναλυτή. Τον Δρ. Γεώργιο Οικονόμου και κ. Μιχαήλ Σακαλή (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) για την Παρασκευή των λεπτών στιλπνών τομών και τις αναλύσεις με χρήση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου, τον Δρ. Δημήτρη Παλλέ και Δρ. Μιχαήλ Καμίτσο (Εθνικό Κέντρο Έρευνών) για τις αναλύσεις υπέρυθρης φασματοσκοπίας, τον Δρ. Χρήστο Αρβανιτίδη (Εθνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών) για τις αναλύσεις Φθορισμομετρίας ακτίνων-X και τους Δρ. Νίκο Κούκουζα και Νικόλαο Τσουκαλά (Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης) για τις αναλύσεις Περιθλασιμετρίας ακτίνων-X. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συνεργάτες μου Κωσταντίνο Μαυρογόνατο και Σταμάτιο Ξυδού, οι οποίοι με τις πολύτιμες συμβουλές και την εμπειρία τους, συνέβαλαν αποφασιστικά στη διαμόρφωση τα σκέψης μου σε θέματα ορυκτολογίας και πετρολογίας.

«Μελέτη συσχετισμού ορυκτολογικών και φυσικών ιδιοτήτων πετρωμάτων από τη Νήσο Σαντορίνη και διερεύνηση ανάλογων στον πλανήτη Άρη»

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά τη μελέτη των ηφαιστειακών πετρωμάτων από την περιοχή Μάλου, Σαντορίνης. Η εν λόγω περιοχή αποτελείται από σκωριώδη και πυροκλαστικά πετρώματα βασαλτικής έως ανδεσιτικής σύστασης. Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι ο χαρακτηρισμός των βασαλτών με χρήση διαφορετικών μεθόδων, και η εξέταση της πιθανότητας να αποτελέσουν γήινα ανάλογα μίας ομάδας μετεωριτών–εκείνης των ολιβινικών σεργκοτιτών (βασαλτικής σύστασης)– με προέλευση τον πλανήτη Άρη. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχουν ενεργές αποστολές που να έχουν επιστρέψει δείγματα στη Γη από τον πλανήτη Άρη. Γι’ αυτό, η επέκταση της βάσης δεδομένων με γήινα πετρώματα των οποίων οι ιδιότητες ομοιάζουν με τις αντίστοιχες εκείνων του πλανήτη Άρη, φαντάζει εξαιρετική ευκαιρία για τη βελτίωση των γνώσεων μας σχετικά με τις συνθήκες που θα συναντήσουν μελλοντικές αποστολές στην επιφάνεια του πλανήτη.

Μελετήθηκαν οι ορυκτολογικές, πετρολογικές και φυσικές ιδιότητες των βασαλτών της περιοχής Μάλου και σε επιλεγμένα πετρώματα –χαρακτηρισμένα ως αρειανά ανάλογα– που δανειστήκαμε από τη Διεθνή Βάση Πετρωμάτων Διαστημικών Αναλόγων (International Space Analogue Rockstore - ISAR). Τα πετρώματα αυτά είναι καλά χαρακτηρισμένα ως προς τις ιδιότητές τους, και αποτελούν τα πρότυπα δείγματα με τα οποία βαθμονομούνται τα αναλυτικά μηχανήματα διαστημικών αποστολών.

Έγινε συλλογή 20 δειγμάτων από την περιοχή του Μάλου, με αρχικό κριτήριο τον ελάχιστο βαθμό εξαλλοίωσης, και την ομοιότητα με βασάλη στο πεδίο δειγματοληψίας. Επιπρόσθετα, δανειστήκαμε 4 δείγματα (2 λεπτές τομές, 2 τεμάχια βασάλη και 4 κονιοποιημένα δείγματα βασάλη) από τη Διεθνή Βάση πετρωμάτων Διαστημικών αναλόγων. Τα δείγματα ISAR αναλύθηκαν με τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν και στα δείγματα της Σαντορίνης για λόγους ενδοσυμβατότητας και επέκτασης των δεδομένων. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν μία σειρά αναλυτικών μεθόδων-εργαλείων όπως: το οπτική μικροσκοπία, το ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, ο ηλεκτρονικός μικροαναλύτης, η περιθλασιμετρία ακτίνων-X, η φθορισμετρία ακτίνων-X, και η φασματοσκοπία υπέρυθρου

με μετασχηματισμό Fourier. Παράλληλα, η εφαρμογή ενός προγράμματος επεξεργασίας εικόνας (ImageJ) βοήθησε στην εκτίμηση του ποσοστού του πορώδους των πετρωμάτων.

Η πετρογραφική παρατήρηση των βασαλτών της Σαντορίνης έδειξε ότι έχουν πιλοταξιτική έως τραχιτική δομή, με φαινοκρυστάλλους ολιβίνη και κλινοπυρόξενου, σε μία κύρια μάζα αποτελούμενη από ολιβίνη, κλινοπυρόξενο, πλαγιόκλαστο και μαγνητίτη, και μικρό ποσοστό (7-15 % κ.ο.) πορώδους. Όμοια χαρακτηριστικά, αλλά με μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους (>20% κ.ο.) εμφανίζουν τα πετρώματα από το ISAR. Τα ορυκτοχημικά δεδομένα όπως η σύσταση του κλινοπυρόξενου ($\text{En}_{36-48}\text{Wo}_{41-44}\text{Fs}_{11-21}$), του ολιβίνη (Fo_{88-70}) και του πλαγιόκλαστου (An_{85-60}), έδειξαν ότι τα πετρώματα της Σαντορίνης είναι περισσότερο διαφοροποιημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα που δανειστήκαμε από το ISAR. Επιπλέον, τα διαγράμματα περιθλασιμετρίας ακτίνων-X έδειξαν ότι τα δείγματα από τη Σαντορίνη και το ISAR έχουν παρόμοια ορυκτολογική σύσταση, με εξαίρεση ένα δείγμα από το ISAR που ήταν αρκετά εξαλλοιωμένο (παρουσία αμφιβόλου και χλωρίτη). Όμοια συμπεράσματα για την ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων προέκυψαν από την εφαρμογή της φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier. Αξίως αναφοράς είναι ότι τα πετρώματα της Σαντορίνης είναι πιο όξινα –αλλά εντός του βασαλτικού πεδίου στο διάγραμμα SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ – σε σχέση με τα αντίστοιχα προτεινόμενα ως αρειανά ανάλογα.

Η σύγκριση της χημικής σύστασης ολικού πετρώματος των βασαλτικών πετρωμάτων της Σαντορίνης με βιβλιογραφικά δεδομένα ολιβινικών σεργκοτιτών έδειξε όμοιες τιμές αλκαλίων και πυριτίου ως προς το ανώτερο όριό τους, και ως προς τη μέση σύσταση των δεδομένων από τον κρατήρα Gusev του Άρη. Οι βασάλτες της Σαντορίνης και οι ολιβινικοί σεργκοτίτες εμφανίζουν μεγάλους φαινοκρυστάλλους ολιβίνη και μικρότερους κλινοπυρόξενου. Επιπλέον, η συγκριτική αξιολόγηση των ορυκτοχημικών δεδομένων των βασαλτών της Σαντορίνης με αντίστοιχα δημοσιευμένα από ολιβινικούς σεργκοτίτες, έδειξε ότι οι πρώτοι έχουν όμοιες συστάσεις στο κέντρο των φαινοκρυστάλλων, αλλά εμφανίζουν μικρότερο βαθμό κλασμάτωσης (λιγότερο εξελιγμένες συστάσεις ολιβίνη και κλινοπυρόξενου).

Συνολικά, τα βασαλτικά πετρώματα της Σαντορίνης εμφανίζουν όμοια ιστολογικά, ορυκτολογικά και γεωχημικά χαρακτηριστικά με τα πετρώματα που βιβλιογραφικά αναφέρονται ως αρειανά ανάλογα. Επίσης οι βασάλτες της Σαντορίνης φαίνεται ότι προσεγγίζουν καλύτερα τη χημική και ορυκτολογική σύσταση των ολιβινικών σεργκοτιτών. Με βάση τα προηγούμενα, η περιοχή Μφάλου της Σαντορίνης, διαθέτει βασαλτικά

πετρώματα που φαίνεται ότι αξίζει να αποτελέσουν αρειανό ανάλογο ως προς τις
ορυκτολογικές και χημικές ιδιότητές τους.

Abstract

The objective of the present thesis is to study volcanic rocks from the area of Balos, Santorini. This area consists of scoria and pyroclastic rocks with a composition ranging from basaltic to andesitic. We aim to evaluate the resemblance of the mineralogical and physical properties of Santorini rocks with verified Martian analogues and to examine Santorini's potential as a Martian analogue sampling site. In that framework, we use as test cases olivine-phyric basaltic shergottites which serve as martian analogues. Therefore, extending the currently available martian rock analogue database (International Space Analogue Rockstore - ISAR) with more terrestrial rocks which exhibit properties similar to those of Mars, provides an excellent opportunity for the improvement of our knowledge in relation to the conditions that future missions will face on the surface of planet Mars.

An extensive study has been conducted using rock samples from the Balos area in addition to Martian analogue rock samples, loaned by the International Space Analogue Rockstore (ISAR). The selection of samples is based on their petrological, mineralogical, and natural properties. The ISAR collection consists of well-characterized rock samples, mainly used for testing and instrument calibration purposes for potential future missions.

We collected 20 rock samples from the Balos area based on their freshness, integrity and basaltic appearance in the field. We made detailed comparisons between one thin section (sample 09SJ15), two basalt fragments, and four basalt powders loaned by ISAR. We have applied the same analytical methods for both the Santorini and ISAR rocks. We used a number of tools and techniques to characterize the texture, chemistry and spectroscopic properties of the samples including: optical microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), electron probe microanalysis (EPMA), X-ray Diffraction (XRD), Infrared–Attenuated Total Reflectance (IR-ATR), and X-ray Fluorescence (XRF)). Additionally, the porosity of the samples has been estimated using ImageJ on 2D sections images.

Optical microscopy of Santorini basalts showed a pilotaxitic to trachytic texture, with olivine (Ol) and clinopyroxene (Cpx) phenocrysts on a fine groundmass of Ol, Cpx, Plagioclase (Pl), Magnetite (Mt), devitrified glass, and porosity in the range of 7-15%. Similar texture but with higher porosity is found in the ISAR samples. The predominant mineral composition for the Santorini rocks is calcic Pl (core An_{78-85} and rim An_{60-76}), Cpx ($En_{36-48}Wo_{41-44}Fs_{11-21}$) and Ol (Fo_{74-88}). XRD confirms that the Santorini rocks appear unweathered, with dominant minerals being anorthitic Pl (mainly labradorite), Cpx (mix of

diopside and augite), and Ol (forsteritic). XRD of ISAR sample 07ZA20 indicated a relatively altered assemblage of calcic Pl, Cpx (mainly augite), Qtz and hydrated minerals including actinolite and chlorite; while the rest of the ISAR samples are unaltered. Also, the dominant bands in IR-ATR spectra from both Santorini basalts and ISAR rocks, at ~ 875 , 1130 and 970 cm^{-1} , can be assigned to Ol, calcic Pl and augite, respectively. The Santorini samples have higher SiO_2 content than the ISAR rocks, however, both plotted in the basalt field in the TAS diagram ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2).

The results from the comparison of the chemical composition of basaltic rocks from Santorini with published data from olivine-phyric shergottites, indicate similar maximum values in alkalis and silica content, and good fit with the average composition of Gusev crater data (crater on Mars).

Textural analysis showed that both Santorini rocks and olivine-phyric basaltic shergottites have large Ol crystals and smaller phenocrysts of Cpx. In addition, comparison of the mineralogical and chemical data of Santorini's basalts with published measurements from olivine-phyric basaltic shergottites indicates that the former have similar composition with the crystals core and less evolved/sophisticated compositions for Ol and Cpx. Santorini's basalts resemble those rocks interpreted as Martian analogues (ISAR) in most of the methods that were employed in this study, while they better approximate the less fractionated mineral compositions of olivine-phyric basaltic shergottites.

In conclusion, the basalts from Balos area of Santorini seem deserve to expand the list of terrestrial Mars-simulant rocks sites for their mineralogical and chemical properties.

Κεφάλαιο 1ο Ο πλανήτης Άρης και Γη

Εισαγωγή

1.1.1 Εξερεύνηση του πλανήτη Άρη	14
1.1.2 Η Γεωλογία του πλανήτη Άρη	17
1.1.2.1 Τύποι πετρωμάτων του πλανήτη Άρη	17
1.1.3 Τύποι μετεωριτών με προέλευση τον Άρη	19
1.2 Τα γήινα ανάλογα	21
1.2.1 Τα κυριότερα ανάλογα	23
1.2.1.1 Ηφαίστειο Kilauea (Χαβάη)	23
1.2.1.2 Έρημος Atacama (Χιλή)	23
1.2.1.3 Έρημος Mojave ΗΠΑ	23
1.2.1.4 Ρίο Τίντο (Ισπανία)	23
1.2.2 Δείγματα ISAR	24
1.2.2.1 Δείγμα 09SJ15	24
1.2.2.2 Δείγμα 07ZA20	25
1.3 Οι βασάλτες της Σαντορίνης (Μπάλος)	26

Κεφάλαιο 2 Αναλυτικές Μέθοδοι

2.1 Οπτική Κρυσταλλογραφία	31
2.2 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης Scanning electron microscope (SEM)	31
2.3 Ηλεκτρονικός Μικροαναλυτής (EPMA)	31
2.3 Μέθοδος περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (X-ray Diffraction)	31
2.4 Φασματοσκοπία Ακτίνων-X Φθορισμού (XRF)	31
2.6 Υπέρυθρη φασματοσκοπία (IR -ATR)	32
2.7 Ειδικό βάρος	32
2.8 Πορώδες	33

Κεφάλαιο 3 Αποτελέσματα

3.1 Πετρογραφικό Μικροσκόπιο	34
3.2 Αποτελέσματα μεθόδου Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης	46
3.2.1 Δείγματα Σαντορίνης	46
3.2.2 Αποτελέσματα ISAR 09SJ153.3	
3.3 Ορυκτοχημικές μικροαναλύσεις	49
3.4 Εφαρμογή της μεθόδου XRD	56
3.5 Αποτελέσματα της μεθόδου φθορισσιμετρίας ακτίνων X	63
3.6 Αποτελέσματα μεθόδου IR-ATR	65
3.7 Υπολογισμός ειδικού βάρους των δειγμάτων της Σαντορίνης	72
3.8 Υπολογισμός πορώδους	72

Κεφάλαιο 4 Συζήτηση-Σύγκριση αποτελεσμάτων

4.1 Χημική σύσταση ολικού πετρώματος	75
4.2 Αναλύσεις ορυκτολογικής σύστασης ολικού πετρώματος	78
4.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων XRD	78
4.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων FTIRIR-ATR	80
4.3 Σύγκριση ορυκτοχημικών δεδομένων	82
4.4 Ειδικό Βάρος	87

5 Συμπεράσματα

6 Βιβλιογραφία	89
----------------	----

Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας 3.1 Χημική σύσταση ολιβινών από τα δείγματα της Σαντορίνης.
- Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση πυροξένων από τα δείγματα της Σαντορίνης.
- Πίνακας 3.3 Χημική σύσταση πλαγιокλάστων από τα δείγματα της Σαντορίνης.
- Πίνακας 3.4 Χημική σύσταση ολιβινών του δείγματος 09SJ15.
- Πίνακας 3.5 Χημική σύσταση πλαγιокλάστων του δείγματος 09SJ15.
- Πίνακας 3.6 Χημική σύσταση πυροξένων του δείγματος 09SJ15.
- Πίνακας 3.7 Πίνακας αποτελεσμάτων μεθόδου XRD.
- Πίνακας 3.8 Χημική σύσταση οξειδίων των δειγμάτων της Σαντορίνης.
- Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα της μεθόδου IR-ATR.
- Πίνακας 3.10 Υπολογισμός ειδικού βάρους των δειγμάτων της Σαντορίνης.
- Πίνακας 3.11 Υπολογισμός ειδικού βάρους για τα δείγματα της Σαντορίνης.
- Πίνακας 3.12 Αποτελέσματα πορώδους των δειγμάτων μέσω του προγράμματος ImageJ.
- Πίνακας 4.1 Χημική σύσταση ολικού πετρώματος για τα δείγματα της Σαντορίνης.
- Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα μεθόδου XRD.
- Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα μεθόδου IR-ATR.
- Πίνακας 4.4 Ειδικό βάρος δειγμάτων Σαντορίνης.
- Πίνακας 4.5 Ειδικό βάρος μετεωριτών με προέλευση τον Άρη.

Κατάλογος Σχημάτων

- Διάγραμμα 1.1 Διάγραμμα ροής το οποίο απεικονίζει βήμα προς βήμα την διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία από την αρχή μέχρι τα συμπεράσματα.
- Διάγραμμα 3.1 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-1.
- Διάγραμμα 3.2 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-2.
- Διάγραμμα 3.3 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-3A.
- Διάγραμμα 3.4 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-3B.
- Διάγραμμα 3.5 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-4A.
- Διάγραμμα 3.6 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-4B.
- Διάγραμμα 3.7 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-5.
- Διάγραμμα 3.8 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-6.

Διάγραμμα 3.9 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-7.

Διάγραμμα 3.10 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-8.

Διάγραμμα 3.11 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα 05IS02.

Διάγραμμα 3.13 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα 05IS03.

Διάγραμμα 3.14 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα 07ZA20.

Διάγραμμα 3.15 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα 09SJ15.

Διάγραμμα 3.16 Διάγραμμα TAS για τα δείγματα της Σαντορίνης. Όπως φαίνεται όλα τα δείγματα της Σαντορίνης προβάλλοντας τα ως $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)$ ανήκουν στο πεδίο των βασαλτών.

Διάγραμμα 3.17 Διαγράμματα μεθόδου IR-ATR για τα δείγματα της Σαντορίνης.

Διάγραμμα 3.18 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα San-Bal-3B.

Διάγραμμα 3.19 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα San-Bal-4A.

Διάγραμμα 3.20 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα San-Bal-5.

Διάγραμμα 3.21 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα San-Bal-6.

Διάγραμμα 3.22 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για τα δείγματα ISAR
Διάγραμμα 3.24 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα 05IS02-01.

Διάγραμμα 3.23 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα 05IS03-01

Διάγραμμα 3.24 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα 09SJ15.

Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα TAS στο οποίο έχουν συγκριθεί τα δεδομένα από τα δείγματα της Σαντορίνης (μαύρο χρώμα), από μετεωρίτες με προέλευση τον Άρη (Shergotites), μετρήσεις που έχουν γίνει από το διαστημικό όχημα Spirit στον Άρη (πράσινο χρώμα, δείγματα ISAR 07ZA20, 05IS01).

Διάγραμμα 4.2 Διαγράμματα σύγκρισης χημικών συστάσεων δειγμάτων Σαντορίνης, ISAR, σεργκοτίτες, Gusev.

Διάγραμμα 4.3 Σύγκριση φασμάτων της μεθόδου XRD.

Διαγράμματα 4.4 A,B Φάσματα IR-ATR για τα δείγματα της Σαντορίνης και ISAR.

Διάγραμμα 4.5 Συγκριτικό διάγραμμα χημικής σύστασης ολιβινών (Σαντορίνη, ISAR, ολιβινικοί σεργκοτίτες).

Διάγραμμα 4.7 Συγκριτικό διάγραμμα χημικής σύστασης πυροξένων (Σαντορίνη, ISAR, ολιβινικοί σεργκοτίτες).

Διάγραμμα 4.8 Συγκριτικό διάγραμμα χημικής σύστασης πλαγιокλάστων (Σαντορίνη, ISAR, ολιβινικοί σεργκοτίτες).

Διάγραμμα 4.9 Διαγράμματα προβολής κατιόντων Mg# (Ολιβίνης, Πυρόξενοι) και Ca# (Πλαγιόκλαστα) των δειγμάτων της Σαντορίνης προς τα δεδομένα του ISAR 09SJ15.

Διάγραμμα 4.10 Διαγράμματα προβολής κατιόντων Mg# (Ολιβίνης, Πυρόξενοι) προς τα αντίστοιχα των Σεργοτιτών Shergotty, NWA 5789, Dhofar 019, Yamato 593, SaU 005)

Διάγραμμα 4.11 Διάγραμμα σύγκριση ειδικού βάρους (Σαντορίνη, Μετεωρίτες).

Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα ροής μεθόδου ολοκληρωμένης μεθόδου. Οι μπλε ελλείψεις είναι οι μέθοδοι που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής, ενώ οι μπορντό είναι ότι προτείνουμε να γίνει στο μέλλον σαν επέκταση της υπάρχουσας μελέτης.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Εικόνα του ημισφαιρίου Vales Marineris του Άρη (πηγή NASA/JPL-Caltech)

Εικόνα 1.2 Αυτή η εικόνα του ανατολικού ημισφαιρίου του Άρη μας παρέχει μία απεικόνιση της διχοτομίας του. Τα νότια υψίπεδα εμφανίζονται με κόκκινο και κίτρινο χρώμα ενώ οι πεδιάδες του Βόρειου εμφανίζονται με μπλε χρώμα (Kiefer et al.2008)

Εικόνα 1.3 Χάρτης ηφαιστειακών δομών βάση μορφολογικών παρατηρήσεων. Τα δεδομένα προέρχονται από το σύστημα καταγραφής MOLA (Πηγή: Hauber et al. 2009, Xiao et al. 2012, Ody et al. 2012).

Εικόνα 1.4 Η εικόνα αναφέρεται σε πυριγενή πετρώματα που εντοπίστηκαν από τα rovers στην επιφάνεια του Άρη. (α) Το Spirit Microscopic Imager view στον κρατήρα Gusev μας δείχνει σκούρους φαινοκρυστάλλους (β) Εικόνα από το Spirit δείχνει κόκκους και δισκοειδείς δομές. (γ) Βασάλτης από τον κρατήρα Gale (δ) Φωτογραφία από το Curiosity μας δείχνει κρυστάλλους αστρίων σε ένα πυριγενές πέτρωμα του κρατήρα Gale (McSween 2014).

Εικόνα 1.5 Ο βασαλτικός σεργοτιτίτης Los Angeles (πηγή: curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/LosAngeles.pdf).

Εικόνα 1.6 Στην αριστερή φωτογραφία βλέπουμε την κύρια μάζα του μετεωρίτη NWA 7034, με την μία πλευρά να έχει υποστεί κοπή και έτσι μπορούμε να δούμε την ετερογένεια της λατυποπαγούς δομής. Οι λευκοί κρύσταλλοι είναι πλαγιόκλαστα και οι σκουρόχρωμοι πυρόξενοι. Η δεξιά φωτογραφία προέρχεται από ανάλυση SEM (Scanning electron microscope), οι κρύσταλλοι πυροξένων (ανοιχτό γκρι), τα πλαγιόκλαστα (σκούρο γκρι), τα οξείδια και τα θειούχα (άσπρο) (Agee et al.2012).

Εικόνα 1.7 Δείγμα ISAR 09SJ15 (Bost et al. 2013).

Εικόνα 1.8 Δείγμα 07ZA20 (Bost et al. 2013).

Εικόνα 1.9 Δείγμα ISAR 05IS01.

Εικόνα 1.10 Χάρτης της Ελλάδας. Το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου απεικονίζεται με κίτρινη γραμμή.

Εικόνα 1.11 Η περιοχή δειγματοληψίας (Μπάλος, Σαντορίνη).

Εικόνα 1.12 Περιοχή δειγματοληψίας στην Σαντορίνη.

Εικόνα 1.13 Δείγματα μελέτης από την περιοχή του Μπάλου (Σαντορίνη).

Εικόνα 2.1 Στα αριστερά απεικονίζονται φωτογραφίες λεπτής τομής από οπτικό μικροσκόπιο. Στα δεξιά οι ίδιες φωτογραφίες μετά από την επεξεργασία με το πρόγραμμα ImageJ. Το λευκό χρώμα αντιστοιχεί στους πόρους του πετρώματος ενώ το μαύρο στην κύρια μάζα του.

Εικόνα 3.1 Το συγκεκριμένο δείγμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Σε σχέση με το San-Bal-2. Το San-Bal-3A έχει πολύ μικρό πορώδες. Παρουσιάζει φαινοκρυστάλλους κυρίως ολιβίνη, οι οποίοι όμως έχουν εξαλλοιωθεί πλήρως (Γ,Δ). Η κύρια μάζα του αποτελείται από ολιβίνη πλαγιόκλαστα και πυρόξενους και γυαλί (Α,Β). Τα πλαγιόκλαστα παρουσιάζουν πρισματικό έως και σκελετικό σχήμα και έχουν μέγεθος (100-200μm) ενώ είναι τοποθετημένα προς μία κατεύθυνση. Οι πυρόξενοι εμφανίζονται σε μεγάλο ποσοστό και ως ποικιλιτικοί φαινοκρύσταλλοι στους οποίους εγκλείονται πλαγιόκλαστα αλλά και στην κύρια μάζα του πετρώματος.

Εικόνα 3.2 Το δείγμα SanBalSan-Bal-3B έχει πορώδες περίπου που ανέρχεται στο 10%. (Α) Χαρακτηρίζεται από διεριγμένους Διαρρηγμένοι κρυστάλλους κρύσταλλοι ολιβίνη μεσαίας τάξης οι οποίοι έχουν εξαλλοιωθεί (Γ,Δ). Απαντώνται φαινοκρύσταλλοι πυροξένων και ολιβίνη. Η κύρια μάζα αποτελείται κατά κύριο λόγο από λεπτούς μικροπρισματικούς μεγαλοπρισματικούς κρυστάλλους πλαγιοκλάστων, τα οποία εμφανίζουν διδυμία (Ε,Ζ)Η έχοντας μία υποημιπαράλληλη και σε ορισμένα σημεία ειδικά στο κέντρο του δέειγματος παράλληλη κατεύθυνση, η υφή του πετρώματος μπορεί να χαρακτηριστεί ρευστική. Στην κύρια μάζα απαντώνται επίσης μικροκρύσταλλοι ολιβίνη και πυροξένων (ποσοστό περίπου 30%)(Α,Β).

Εικόνα 3.3 Το δείγμα SanBalSan-Bal-6 έχει πορώδες < ~10%. Αποτελείται κυρίως από λεπτούς υποδιόμορφους πρισματικούς κρυστάλλους πλαγιοκλάστων (ΑΒ), και επί το πλείστον τα πλαγιόκλαστα φαίνεται να μην έχουν καταφέρει να σχηματίσουν κρυστάλλους έχοντας μία δενδριτική μορφή και χωρίς κάποιο συγκεκριμένο προσανατολισμό. Οι ολιβίνες απαντούν ως φαινοκρύσταλλοι και μικροκρυσταλλίτες μέσα στην κύρια μάζα.

Εικόνα 3.4 Το κύριο στοιχείο αυτής του πετρώματος είναι το πορώδες του (>30%) (Γ,Δ) παρουσία ευεδρικών και υποεδρικών φαινοκρυστάλλων ολιβίνη οι οποίοι στις άκρες τους έχουν εξαλλοιωθεί σε αργιλικά ορυκτά. (Α,Β) Στην κύρια μάζα, υπάρχουν πλαγιόκλαστα περίπου στο 40% μικροπρισματικού σχήματος (Ε,Ζ). Οι πυρόξενοι στην κύρια μάζα απαντώνται σε ποσοστό περίπου στο 15% σε υπιδιόμορφους κρυστάλλους. Τέλος τόσο οι φαινοκρύσταλλοι ολιβίνη όσο και οι μικροκρύσταλλοι εμφανίζονται αλλοτριόμορφοι με αρκετά σπασίματα στο εσωτερικό τους. Ο ιστός του πετρώματος χαρακτηρίζεται ως πορφυριτικός, ενώ η υφή σύμφωνα με τον συγκεκριμένο προσανατολισμό που έχουν τα πλαγιόκλαστα τα οποία είναι τοποθετημένα σε μία παράλληλη και ημι-παράλληλη κατεύθυνση, θα την χαρακτηρίζαμε ως ρευστική.

Εικόνα 3.5 Το συγκεκριμένο δείγμα San-Bal-4a είναι σκωριώδες με ποσοστό πόρων περίπου 20% (Α,Β). Η διάταξη των πόρων φαίνεται να έχει μία συγκεκριμένη κατεύθυνση σε ζώνες. Έντονο πορώδες υπάρχει στο άνω και στο κάτω μέρος της τομής, ενώ στο κέντρο φαίνεται να είναι πιο συμπαγές το δείγμα. Ο ολιβίνης απαντάται και με την μορφή φαινοκρυστάλλων αλλά και μέσα στην κύρια μάζα (Γ,Δ). Η κύρια μάζα αποτελείται από λεπτούς μικροπρισματικούς κρυστάλλους πλαγιοκλάστων (Α,Β). Ο προσανατολισμός τους είναι

διαφορετικός σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα, καθώς είναι ξεκάθαρος, με την διάταξη των πλαγιοκλάστων να είναι παράλληλη προς μία κατεύθυνση (κατά μήκος της μεγάλης πλευράς της τομής), εκτός από ένα σημείο της τομής όπου η διάταξη τους αλλάζει και είναι ιδιαίτερα ακανόνιστη. Οι πυρόξενοι απαντώνται ως μικροκρύσταλλοι στην κύρια μάζα. Τέλος παρατηρείται μία αντικατάσταση κρυστάλλου, πιθανώς πυροξένου, από μικροκρυστάλλους πλαγιοκλάστων ολιβίνη και πυροξένων (E,Z).

Εικόνα 3.6 Το συγκεκριμένο δείγμα έχει πορώδες (>30% (A,B), ενώ δεν εμφανίζει καθόλου (Γ,Δ) φαινοκρυστάλλους. Η κύρια μάζα του αποτελείται σε πολύ μεγάλο ποσοστό (περίπου 60%) από πλαγιόκλαστα, τα οποία απαντώνται με πρισματική μορφή, ενώ φαίνεται να είναι τοποθετημένα προς μία κατεύθυνση, Ολιβίνης και πυρόξενοι απαντώνται σε πολύ μικρό ποσοστό σαν μικροκρύσταλλοι, ενώ είναι έντονη η εμφάνιση γυαλιού, η οποία σε συνδυασμό με το μεγάλο ποσοστών πόρων, μας δείχνει μία ενδεχόμενη ταχεία κρυστάλλωση του μάγματος (E,Z).

Εικόνα 3.7 Το δείγμα San-Bal-9 έχει πορώδες περίπου στο (30%) (A,B). Η διαφορά του σε σχέση με το δείγμα San-Bal-7 είναι η παρουσία φαινοκρυστάλλων ολιβίνη και πυροξένων (Γ,Z). Το ποσοστό των πλαγιοκλάστων στην κύρια μάζα ξεπερνά το 40%. Παρουσιάζουν πρισματικό σχήμα και διδυμία, ενώ είναι τοποθετημένα παράλληλα προς μία κατεύθυνση. Στην κύρια μάζα επίσης απαντούν μικροκρύσταλλοι ολιβίνη και πυροξένων (A,B).

Εικόνα 3.9 San-Bal-5 είναι το μόνο από τα εξεταζόμενα δείγματα στο οποίο όλα τα επουσιώδη ορυκτά (ολιβίνης, πλαγιόκλαστα, πυρόξενοι), εμφανίζονται τόσο σαν φαινοκρύσταλλοι όσο και στην κύρια μάζα. Οι φαινοκρύσταλλοι των ολιβινών και των πυροξένων (>600) εμφανίζουν ιδιαίτερα έντονο ανάγλυφο. Ορισμένα πλαγιόκλαστα εμφανίζονται ως φαινοκρύσταλλοι με το μέγεθος τους να ξεπερνάει το 1mm και παρουσιάζουν ιδιαίτερη ζώνωση. Χαρακτηριστικό είναι το πλαγιόκλαστο (βλ. εικόνα) το οποίο παρουσιάζει τρία διαφορετικά στάδια ζώνωσης. Τα πλαγιόκλαστα στην κύρια μάζα εμφανίζονται με την μορφή λεπτών πρισματικών κρυστάλλων, τα οποία όμως δεν φαίνεται να έχουν κάποιο συγκεκριμένη ροή, με τον προσανατολισμό τους να είναι ακανόνιστος. Οι πόροι είναι σε ποσοστό περίπου 20%.

Εικόνα 3.10 Στο δείγμα 09SJ15, βλέπουμε την κύρια μάζα η οποία αποτελείται από μικροπρισματικούς κρυστάλλους πλαγιοκλάστων, ολιβίνη και πυροξένων (Γ,Δ), φαινοκρυστάλλους ολιβίνη (A,B) και κρυστάλλους χαλαζία που εμφανίζονται ως ξενοκρύσταλλοι (E,Z).

Εικόνα 3.12 Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) για τα δείγματα της Σαντορίνης. Στις εικόνες Α και Δ βλέπουμε φαινοκρυστάλλους ολιβίνη και πυροξένων στους οποίους υπζώνωση (παρατηρείται μία αλλαγή του γκρι χρώματος στον κρύσταλλο από το κέντρο προ της άκρης). Η κύρια μάζα αποτελείται από ολιβίνες, πλαγιόκλαστα και πυρόξενους (Α,Γ), ενώ βλέπουμε και αδιαφανή μεταλλικά ορυκτά (έντονο λευκό χρώμα) (Δ)

Εικόνα 3.13 Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για το δείγμα 09SJ15.

Κεφάλαιο 1^ο

Ο Πλανήτης Άρης και η Γη

Οι πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος που βρίσκονται στο εσωτερικό της ζώνης των αστεροειδών και διαθέτουν στερεό φλοιό, ονομάζονται Γήινοι. Αυτοί οι πλανήτες είναι ο Ερμής, η Αφροδίτη, η Γη και ο Άρης. Οι αντίστοιχοι δορυφόροι αυτών των πλανητών που χαρακτηρίζονται ως Γήινοι είναι η Σελήνη (δορυφόρος της Γης), ο Φόβος και ο Δείμος (δορυφόροι του Άρη).

Σήμερα και ενώ διανύουμε την δεύτερη δεκαετία του 21^{ου} αιώνα, η ιδέα της εξερεύνησης και της κατάκτησης άλλων πλανητών συνεχώς μεγαλώνει και πλέον δεκάδες αποστολές έχουν πραγματοποιηθεί με επιτυχία. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν μία πληθώρα μεθόδων με σκοπό να μελετήσουν γεωλογικά, γεωχημικά και ορυκτολογικά άλλα πλανητικά σώματα, πέραν της Γης (Grier and Rivkin 2010). Για τις μελέτες αυτές χρησιμοποιούνται:

- Εικόνες με τη χρήση γήινων ή διαστημικών τηλεσκοπίων.
- Εικόνες της επιφάνειας πλανητών από διαστημόπλοια σε τροχιά.
- Εικόνες από αποστολές που έχουν προσεδαφιστεί στο πλανητικά σώματα.
- Ράδιο-φυσικές μέθοδοι, οι οποίες γίνονται με ραδιοτηλεσκόπια.
- Οπτικές μέθοδοι, οι οποίες επιτυγχάνονται με φασματογράφους.
- Απευθείας μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, η οποία επιτυγχάνεται από αεροσκάφη που προσεδαφίζονται και φέρουν ειδικά όργανα.

-Προσομοίωση του εδάφους, των κλιματικών και φυσικών συνθηκών των άλλων πλανητών σε παρόμοιες περιοχές πάνω στη Γη. Η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει εδαφικά ανάλογα, τα οποία παρουσιάζουν ομοιότητες (γεωλογικές, ορυκτολογικές, χημικές, μηχανικές κ.α) με κάποιο άλλο πλανητικό σώμα. Αυτές οι περιοχές μας παρέχουν γενικές γνώσεις για τη φύση των σχηματισμών στην επιφάνεια ενός άλλου πλανητικού σώματος (Krotikov et. al. 1963, Cherkasov et al. 1975, Moroz, 1978, Kemurjian et al. 1993). Η μελέτη των ιδιοτήτων των γήινων πλανητικών αναλόγων είναι πολύ χρήσιμη για τον σχεδιασμό μελλοντικών αποστολών καθώς και για την ενίσχυση της γνώσης μας αναφορικά με την κατανόηση της ιστορίας και της εξέλιξης της επιφάνειας άλλων πλανητών.

Τα ανάλογα μας παρέχουν την ευκαιρία για μία περαιτέρω προσομοίωση αποστολών είτε στην Σελήνη είτε στον Άρη. Ένας από τους κύριους στόχους της ύπαρξης των αποστολών είναι η κατανόηση της προέλευσης ;και την εξέλιξης των γεωλογικών χαρακτηριστικών των πλανητικών σωμάτων καθώς και την σχέση τους με τις παρούσες ή

παρελθοντικές κλιματικές συνθήκες. Η πλήρης κατανόηση και επεξήγηση των γεωλογικών αυτών διεργασιών οδηγεί, την έρευνα να διεξάγεται σε περιβάλλοντα πάνω στη Γη τα οποία είναι πανομοιότυπα (ανάλογα) με περιοχές της επιφάνειας άλλων πλανητών ή δορυφόρων. Για παράδειγμα, ένα ιδανικό γήινο ανάλογο του Άρη θα έπρεπε να παρέχει ένα ψυχρό και ξηρό περιβάλλον, όπως είναι για παράδειγμα οι περιοχές των πόλων της Γης. Ως εκ τούτου οι ανάλογες περιοχές κατατάσσονται σύμφωνα με τον βαθμό ομοιότητας τους για κάποιο συγκεκριμένο ανάλογο του εκάστοτε πλανήτη (Snook and Mendell, 2004).

Εάν υπήρχε η δυνατότητα συλλογής δειγμάτων από τον Άρη και επιστροφή τους στη Γη, θα μπορούσαμε να κατανοήσουμε πολύ καλύτερα την εξέλιξη του πλανήτη. Σε αντίθεση με την περίπτωση της Σελήνης, για την οποία υπάρχουν δείγματα πετρωμάτων από τις ερευνητικές αποστολές Apollo (11, 12, 14, 15, 16, 17) που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των ετών 1967 και 1972 (Neukum and Ivanov 1994), δεν έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής η απευθείας δειγματοληψία πετρωμάτων από την επιφάνεια του Άρη και αποστολή τους στη Γη (Mc Lennan et al. 2011). Το μεγάλο αυτό κενό συμπληρώνουν οι μετεωρίτες, με προέλευση τον Άρη, οι οποίοι μας παρέχουν πολλές πληροφορίες αλλά και τα λεγόμενα αρειανά ανάλογα (Marlow et al. 2008). Επίσης, αυτό που πρέπει να γνωρίζουμε γενικά για τις διαστημικές αποστολές είναι πως τα όργανα τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αυτές, όπως προαναφέραμε, είναι απαραίτητο να βαθμονομηθούν μέσω μίας βάσης δεδομένων παρόμοιων πετρωμάτων που βρίσκονται στη Γη.

Βασιζόμενοι σε αυτή τη λογική, οι επιστήμονες στο National Center for Scientific Research της Ορλεάνης στη Γαλλία δημιούργησαν την τράπεζα αναλόγων International Space Analogue Rockstore (ISAR), η οποία επί της ουσίας είναι μία βάση δεδομένων μελετημένων δειγμάτων τα οποία χαρακτηρίστηκαν ως αρειανά ανάλογα (Bost et al. 2013). Έχοντας αυτή τη βάση, θέτουμε το ερώτημα αν θα μπορούσε να υπάρχει μία ανάλογη περιοχή στην Ελλάδα η οποία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα ολοκληρωμένο γεωλογικό, πετρολογικό και γεωχημικό ανάλογο του Άρη επεκτείνοντας την ήδη υπάρχουσα λίστα των αρειανών αναλόγων.

Για να ερευνήσουμε αυτό το ενδεχόμενο εφαρμόσαμε μία συγκεκριμένη μεθοδολογία, η οποία αναπτύσσεται στα παρακάτω κεφάλαια.

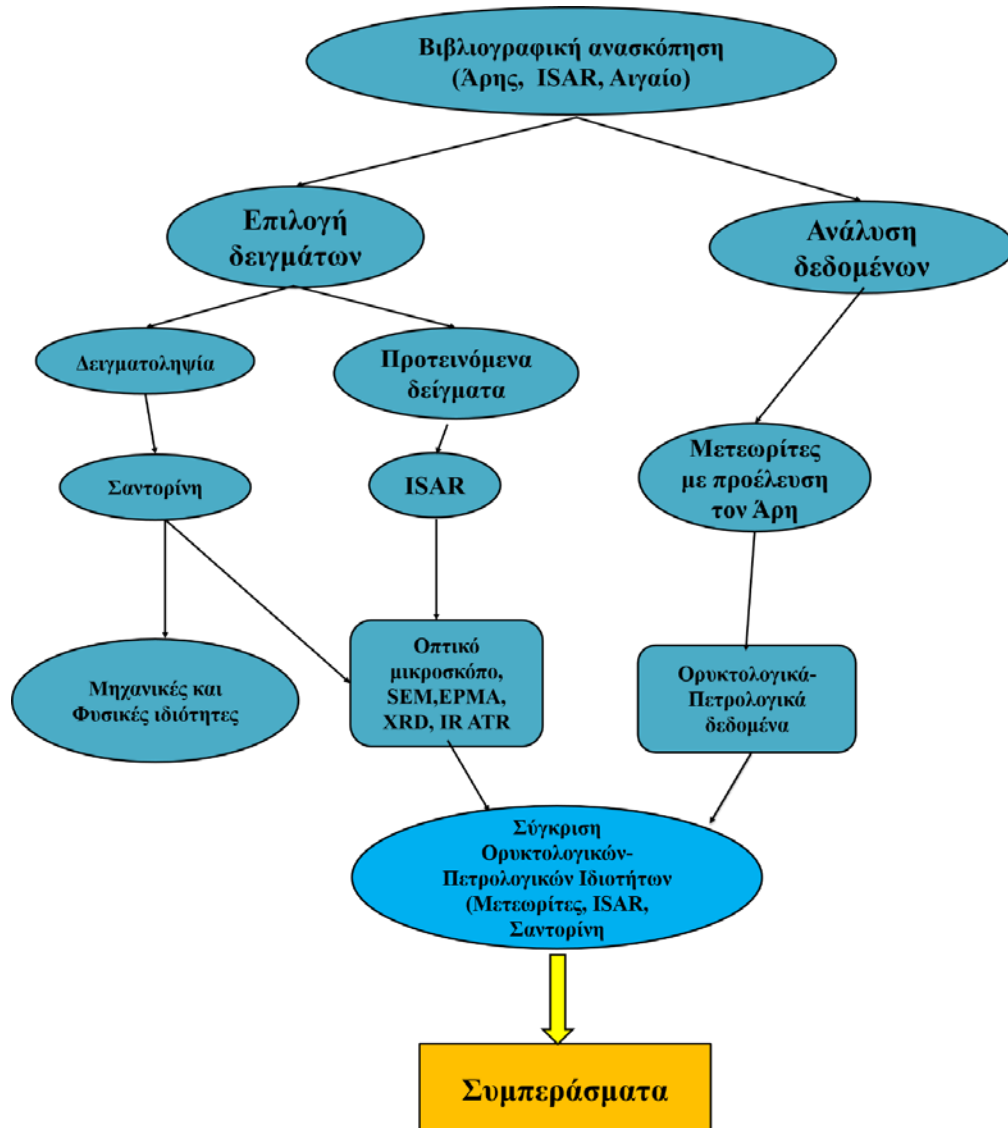
1^ο κεφάλαιο: Αρχικά μελετήθηκε λεπτομερώς η σχετική βιβλιογραφία συγκεντρώνοντας τις απαραίτητες πληροφορίες για την επιφάνεια του πλανήτη Άρη, την περιοχή μελέτη στην Ελλάδα, όπως και για τα χαρακτηρισμένα αρειανά ανάλογα που δανειστήκαμε από το ISAR.

2^ο Κεφάλαιο: Αναφορά των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση της εργασίας.

3^ο Κεφάλαιο: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μεθόδων για τα δείγματα της Σαντορίνης και του ISAR.

4^ο Κεφάλαιο: Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων των δειγμάτων της Σαντορίνης και των δειγμάτων από το ISAR, όπως και με είδη δημοσιευμένα δεδομένα από μετρήσεις που έχουν γίνει στην επιφάνεια του Άρη και σε μετεωρίτες που έχουν προέλευση τον πλανήτη Άρη.

5^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα της έρευνας και προτάσεις για περαιτέρω έρευνας στο μέλλον.

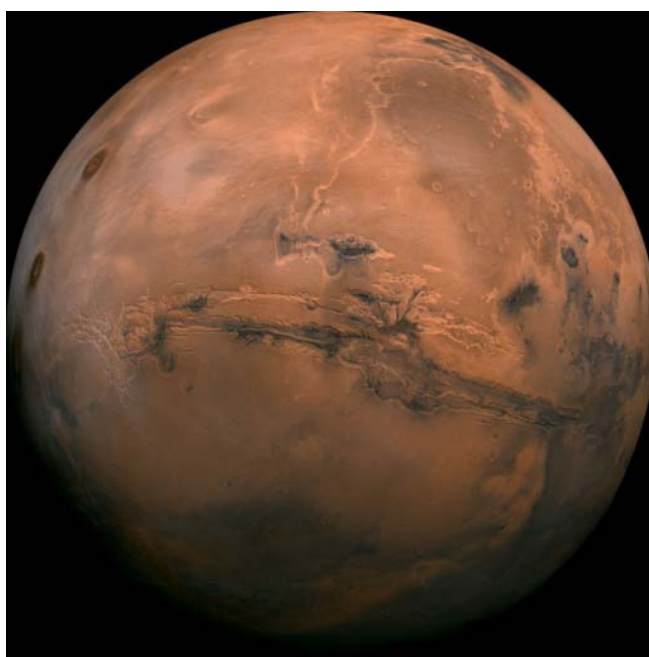


Διάγραμμα 1.1 Διάγραμμα ροής το οποίο απεικονίζει βήμα προς βήμα την διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία από την αρχή μέχρι τα συμπεράσματα.

1.1 Ο Άρης

1.1.1 Εξερεύνηση του Άρη

Ο Άρης ο τέταρτος πλανήτης από τον Ήλιο, αποτελούσε ανέκαθεν μία εχθρική προς τις προσπάθειες της Γης περιοχή για να την επισκεφθούμε αλλά ταυτόχρονα είναι ο πιο κοντινός και προσιτός πλανήτης στο ηλιακό μας σύστημα. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν στην διάθεση των επιστημόνων δεδομένα από τέσσερις δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά ενώ οι τέσσερις επιτυχημένες αποστολές προσεδάφισης έχουν δώσει δεδομένα από την επιφάνεια του κόκκινου πλανήτη.



Εικόνα 1.1 Εικόνα του ημισφαιρίου Vales Marineris του Άρη (πηγή NASA/JPL-Caltech)

Αρχικά το 1971 το Σοβιετικό διαστημικό πρόγραμμα σημείωσε μεγάλη επιτυχία με την τοποθέτηση του πρώτου διαστημικού οχήματος σε τροχιά γύρω από τον Άρη και με την επιτυχημένη προσεδάφισή του. Το Mars 3 κατάφερε να επιστρέψει δεδομένα περίπου οκτώ μηνών, τα οποία μας αποκάλυψαν πολλά για την τοπογραφία του πλανήτη, το κλίμα, τον καιρό και την γεωλογία του (Sidiqi 2002). Αργότερα, ο δορυφόρος της Nasa Mariner 9 επέστρεψε ακόμη πιο λεπτομερή στοιχεία για την ατμόσφαιρα του πλανήτη. Οι αποστολές αυτές λύνουν κάποια μυστήρια, όπως τις εικασίες που έγιναν για τον ρόλο των καναλιών του πλανήτη τον προηγούμενο αιώνα. Στη συνέχεια οι Viking 1 και 2, ένα ζευγάρι δορυφόρων και rover έφθασε στον Άρη το 1976. Αυτά τα διαστημόπλοια μας παρείχαν δεδομένα ως και το 1982. Τα ρομπότ που συμμετείχαν σε αυτή την αποστολή εκτέλεσαν επίσης βιολογικά

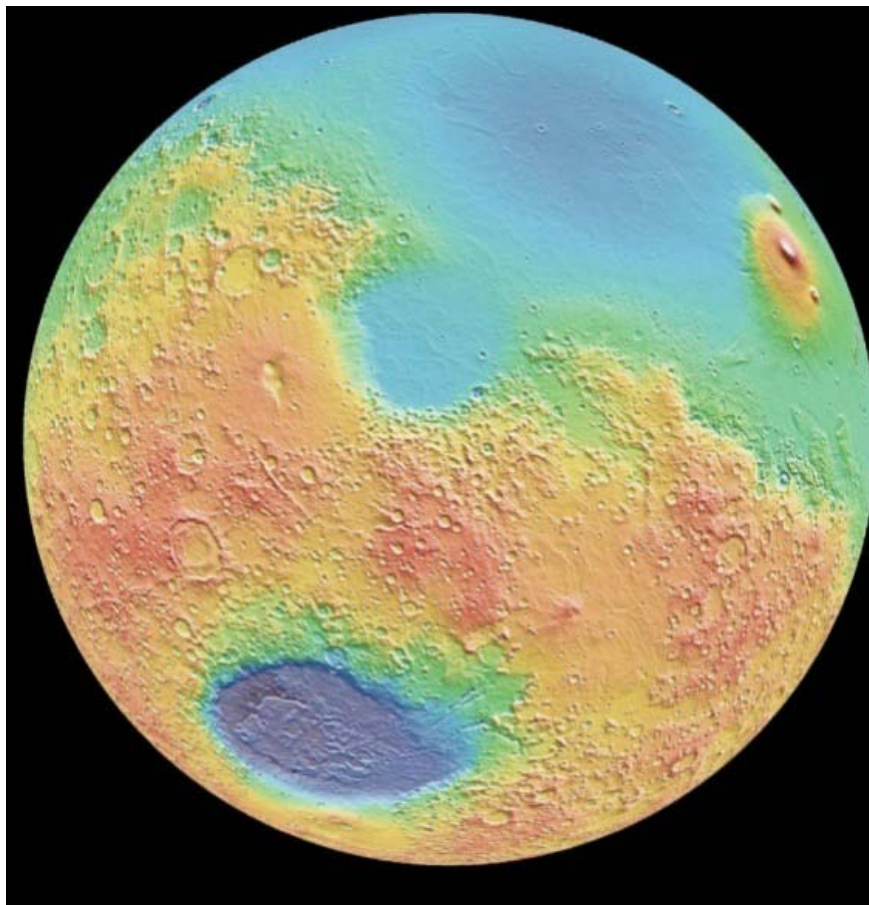
πειράματα στο έδαφος του Άρη τα οποία είχαν σχεδιαστεί για να ερευνήσουν τυχόν σημάδια ζωής στον πλανήτη κατά το παρελθόν. Η αποστολή Mars Pathfinder, που ξεκίνησε το 1996, είχε τη δυνατότητα να προσεδαφίσει ένα αυτοκινούμενο όχημα (rover) το οποίο θα μπορούσε να ταξιδέψει πάνω στην επιφάνεια του Άρη. Το rover επέστρεψε έναν απρόσμενο πλούτο επιστημονικών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων εικόνων, παρατηρήσεων του καιρού και χημικών αναλύσεων του εδάφους (Bell et al. 2000).

Ίσως η πιο διάσημη αποστολή στον Άρη ήταν αυτή των διδύμων Spirit και Opportunity τα οποία προσεδαφίστηκαν τον Ιανουάριο του 2004 σε διαφορετικές πλευρές του κόκκινου πλανήτη. Με πολύ μεγαλύτερη ικανότητα κίνησης, από τις αποστολές Mars Pathfinder του 1997, αυτά τα ρομπότ είχαν την ικανότητα να κάνουν οδοιπορικό για μίλια σε όλη την επιφάνεια του Άρη πραγματοποιώντας γεωλογικές και ατμοσφαιρικές μετρήσεις. Από την έναρξη της αποστολής τους τα δύο rover έχουν στείλει πάνω από 100.000 φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης καθώς και λεπτομερείς μικροσκοπικές εικόνες από τα πετρώματα και το έδαφος του Άρη. Τέσσερα διαφορετικά φασματόμετρα έχουν συγκεντρώσει πληροφορίες για την χημική σύσταση και την ορυκτολογική σύνθεση των πετρωμάτων του Άρη. Το Opportunity ερεύνησε τον κρατήρα “Eagle” και “Edurance” εξετάζοντας ιζηματογενή πετρώματα κατά μήκος της διαδρομής των δύο κρατήρων (Squyres et al. 2006). Το Spirit ενώ αρχικά εξερεύνησε τον κρατήρα Gusev, αποκαλύπτοντας κυρίως βασαλτικές δομές, μετά το πέρας του από το Columbia Hills το rover βρήκε μια ποικιλία πετρωμάτων που δείχνει πως η επιφάνεια του Άρη χαρακτηριζόταν από ηφαιστειακά πετρώματα. Το έδαφος αποδείχθηκε πως είχε πολλά άλατα ενώ είχε υποστεί διάβρωση από την ύπαρξη νερού κατά το παρελθόν. Στο Home Plate ανακαλύφθηκαν γεωλογικές στρώσεις. Όμοιες με εκείνες που ανακάλυψε το Opportunity στον κρατήρα Gusev, σχετίζονται με την ύπαρξη (Squyres et al. 2004).

Η τελευταία αποστολή έγινε στις 6 Αυγούστου του 2012 όταν το Curiosity έφτασε στην επιφάνεια του Άρη. Αποτελείται από 10 όργανα στα οποία ανατέθηκε να εργαστούν και να συλλέξουν ένα σύνολο στοιχείων συμπεριλαμβανομένων πετρωμάτων, εδάφους, ατμόσφαιρας τις πρώτες 100 ημέρες της αποστολής. (Edgett and Mallin 2000, Christensen 2001). Ένα από τα αναλυτικά όργανα που είναι τοποθετημένο στο Curiosity, το λεγόμενο H Chem Cam (Chemical Camera), έχει εντοπίσει τόσο τις περιεκτικότητες των κύριων στοιχείων Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, O, καθώς και των ιχνοστοιχείων όπως το Li, το Rb, ο C και το H (Leshin et al. 2013)

1.1.2. Η Γεωλογία του Άρη

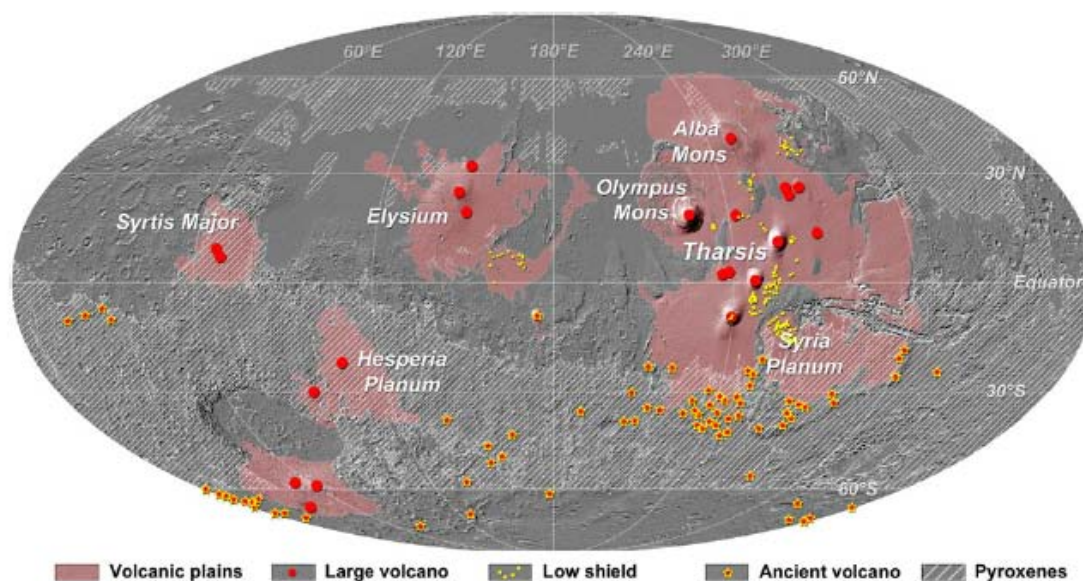
Η επιφάνειά του Άρη αποτελείται από δύο διακριτές μορφολογικά περιοχές. Ομαλές κοιλάδες στο Βορρά και υψίπεδα με πολλούς κρατήρες στο Νότο. Το γεωλογικό αυτό χαρακτηριστικό ονομάζεται διχοτομία (Watters et al. 2007). Η ηλικία των υψιπέδων είναι ότι είναι περίπου 4 Ga (McGill and Dimitriou, 1990).



1.2 Αυτή η εικόνα του ανατολικού ημισφαιρίου του Άρη μας παρέχει μία απεικόνιση της διχοτομίας του. Τα νότια υψίπεδα εμφανίζονται με κόκκινο και κίτρινο χρώμα ενώ οι πεδιάδες του Βόρειου εμφανίζονται με μπλε χρώμα (Kiefer et al. 2008)

Χαρτογράφηση του πλανήτη με βάση μορφολογικά (Tanaka et al. 1992) και φασματοσκοπικά δεδομένα (Christensen et al. 2001, Bibring et al. 2005), έδειξε ότι μεγάλα τμήματα της επιφάνειας του Άρη δομούνται από ηφαιστειακά πετρώματα. Για παράδειγμα, ανιχνεύτηκαν βασαλτικής σύστασης πετρώματα όπως αποδεικνύεται από την παρουσία πυροξένων (Poulet et al. 2007) και πλαγιοκλάστων (Rogers and Christensen 2007, Poulet et al. 2007). Η βόρεια πεδινή πλευρά καλύπτεται κυρίως από πετρώματα ανδεσιτικής σύστασης (Banfield et al. 2000), όπως επίσης και εξαλλοιωμένα πετρώματα βασαλτικής σύστασης (Wyatt and McSween 2002). Από μορφολογικής απόψεως, οι ηφαιστειακές δομές δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες σε όλη την επιφάνεια του Άρη. Οι περισσότερες είναι κοντά στις

λεκάνες Tharsis και Elysium (Hodges and Moore 1994), και κοντά στον κρατήρα Hellas (Williams et al. 2009) και Syrtis Major.



Εικόνα 1.3 Χάρτης ηφαιστειακών δομών βάση μορφολογικών παρατηρήσεων. Τα δεδομένα προέρχονται από το σύστημα καταγραφής MOLA (Πηγή: Hauber et al. 2009, Xiao et al. 2012, Ody et al. 2012)

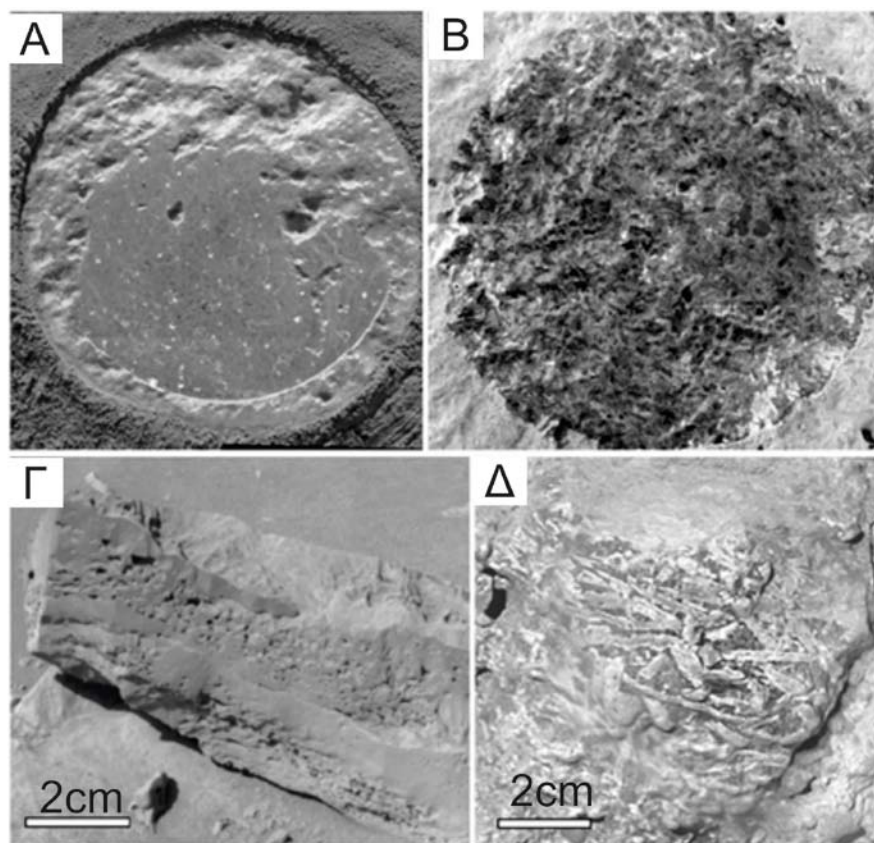
Τα τελευταία χρόνια δορυφορικές εικόνες μας έδωσαν τις πρώτες ενδείξεις για την ύπαρξη Δέλτα στον πλανήτη (Malin and Edgett 2003). Τα καλά διατηρημένα κανάλια που εντοπίστηκαν, έδωσαν την δυνατότητα να υπολογιστεί το πλάτος, το βάθος και την κλίση αρχαίων ποταμών που ενδέχεται να υπήρχαν στην επιφάνεια του Άρη κατά το παρελθόν. (Moore et al. 2003, Jerolmack et al. 2003). Αυτή η ανακάλυψη έδωσε ένα επιπλέον στοιχείο στην υπόθεση του υγρού και ζεστού παρελθόντος (Moore and Howard 2003). Από την άλλη πλευρά άλλες μελέτες υποστηρίζουν (Mangold et al. 2012), πως αυτές δομές μπορεί να σχηματίστηκαν από μία απότομη θέρμανση (π.χ. πρόσκρουση μετεωρίτη, ηφαιστειακές εκρήξεις) και όχι από ένα γενικότερο θερμότερο κλίμα στον πλανήτη.

1.1.2.1 Τύποι πετρωμάτων του Άρη

Τα τελευταία χρόνια η έρευνα της επιφάνειας του Άρη έχει επιτύχει σημαντικά βήματα προόδου συμβάλλοντας έτσι, στην καλύτερη ορυκτολογική, πετρολογική και γεωχημική ανάλυση της επιφάνειάς του. Σε αυτό συνέβαλαν οι αναλύσεις που εκτέλεσαν τα Rovers τα οποία στάλθηκαν στον πλανήτη (Grotzinger 2013, R.E Advirson 2006), οι δορυφόροι που είναι σε τροχιά γύρω από τον Άρη (Murcihe et al. 2009) και η ανάλυση μετεωριτών που έχουν προέλυσή τον πλανήτη Άρη (McSween 1998).

Για παράδειγμα, στον κρατήρα Gusev έχει γίνει μία εκτενής μελέτη των πυριγενών πετρωμάτων της περιοχής από το rover Spirit (Mc Sween et al. 2004). Οι βασάλτες με τους οποίους ήρθε αντιμέτωπο το Spirit στις πεδιάδες του Gusev προήλθαν από ροές λάβας στην επιφάνεια. Τα βασαλτικά πετρώματα του Gusev είναι ιδιαίτερα οξειδωμένα, ήπια αλκαλικά και το ποσοστό του ολιβίνη στα πετρώματα είναι της τάξης του 20-30%. Όπως και στον Gusev, έτσι και στον κρατήρα Gale τον οποίο έχει επισκεφτεί το Curiosity συναντώνται πυριγενή πετρώματα

Το Spirit έδωσε αρκετά αποδεικτικά στοιχεία για την κατά τόπους εξέλιξη των πυριγενών πετρωμάτων και της σύνθεσή τους, η οποία κυμαίνεται από τους αλκαλικούς βασάλτες, στον τόπο προσγείωσης του, μέχρι και δακτιλικές συστάσεις οι οποίες έχουν παρατηρηθεί από τους δορυφόρους (McSween 2004).



Εικόνα 1.4 Η εικόνα αναφέρεται σε πυριγενή πετρώματα που εντοπίστηκαν από τα rovers στην επιφάνεια του Άρη. (α) Το Spirit Microscopic Imager view στον κρατήρα Gusev μας δείχνει σκούρους φαινοκρυστάλους ολιβίνη και λευκά (alteration veins) (β) Το Spirit RAT View, δείχνει κόκκους και δισκοειδής δομές. (γ) Βασάλτης από τον κρατήρα Gale (δ) Φωτογραφία από το Curiosity μας δείχνει κρυστάλλους αστρίων σε ένα πυριγενές πέτρωμα του κρατήρα Gale (McSween 2014).

Στον Άρη επίσης υπάρχουν ιζηματογενή πετρώματα τα οποία είναι αρκετά διαδεδομένα στην επιφάνεια του πλανήτη, και παλαιότερα από τα αντίστοιχα της Γης

(McSween 2015). Επίσης, παρατηρήθηκε πως οι περισσότεροι κρατήρες του πλανήτη Άρη περιέχουν ιζηματογενή πετρώματα (Malin and Edgett 2000, 2003). Οι κροκάλες και οι λατύπες που δημιουργήθηκαν λόγω της διάβρωσης των ηφαιστειακών πετρωμάτων μεταφέρθηκαν, ταξινομήθηκαν και εκ νέου αποτέθηκαν. Η πρώτη επιστημονική τοποθέτηση ότι ο Άρης για την ύπαρξη ιζηματογενών πετρωμάτων στον Άρη έγινε το 1948 (Carpenter 1948).

1.1.3 Τύποι μετεωριτών με προέλευση τον Άρη

Μία ακόμη πολύ σημαντική πηγή πληροφοριών για την επιφάνεια του Άρη αποτελεί η μελέτη των μετεωριτών που έχουν βρεθεί στη Γη και έχουν ως προέλευση το συγκεκριμένο πλανητικό σώμα. Ωστόσο, δεν είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τις ακριβείς τοποθεσίες από τις οποίες προέρχονται αυτοί οι μετεωρίτες παρόλο που αρκετοί κρατήρες έχουν βρεθεί σε ηφαιστειογενείς περιοχές, όπως τα Tharsis και Elysium, περιοχές οι οποίες θα μπορούσαν να είναι οι τοποθεσίες προέλευσης αυτών των μετεωριτών (Tornabene et al. 2006). Η πιο συνήθης κατηγορία μετεωριτών με προέλευση τον πλανήτη Άρη είναι οι σεργκοτίτες (shergottites). Πρόκειται για βασάλτες και γάββρους (McSween 2015) που σχηματίστηκαν από αλκαλικά μάγματα και τα κύρια ορυκτά τους είναι ο κλινοπυρόξενος, πλαγιόκλαστο, σπινέλιος, και ολιβίνης (Stolper and McSween 1979, Goodrich 2003).

Μία από τις υπό-ομάδες των σεργκοτιτών είναι οι ολιβινικοί σεργκοτίτες που περιέχουν τα ίδια ορυκτά με τους σεργκοτίτες, αλλά και επιπλέον μεγάλους κρυστάλλους ολιβίνης σε ποσοστό που κυμαίνεται από 5 έως 28 % κ.ο. (Goodrich 2003, Greshake et al. 2004)). Θεωρείται πως η σύσταση τους αντιπροσωπεύει την σύσταση του ανώτερου μανδύα του πλανήτη (McSween 2015). Παρόλο που οι σεργκοτίτες είναι άνυδροι αρκετά στοιχεία μας φανερώνουν πως τα μητρικά μάγματα, από τα οποία δημιουργήθηκαν, ήταν ένυδρα των οποίων όμως το νερό χάθηκε κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης (McCubbin et al. 2008).



Εικόνα 1.5 Ο βασαλτικός σεργκοτίτης Los angeles (πηγή: curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/LosAngeles.pdf)

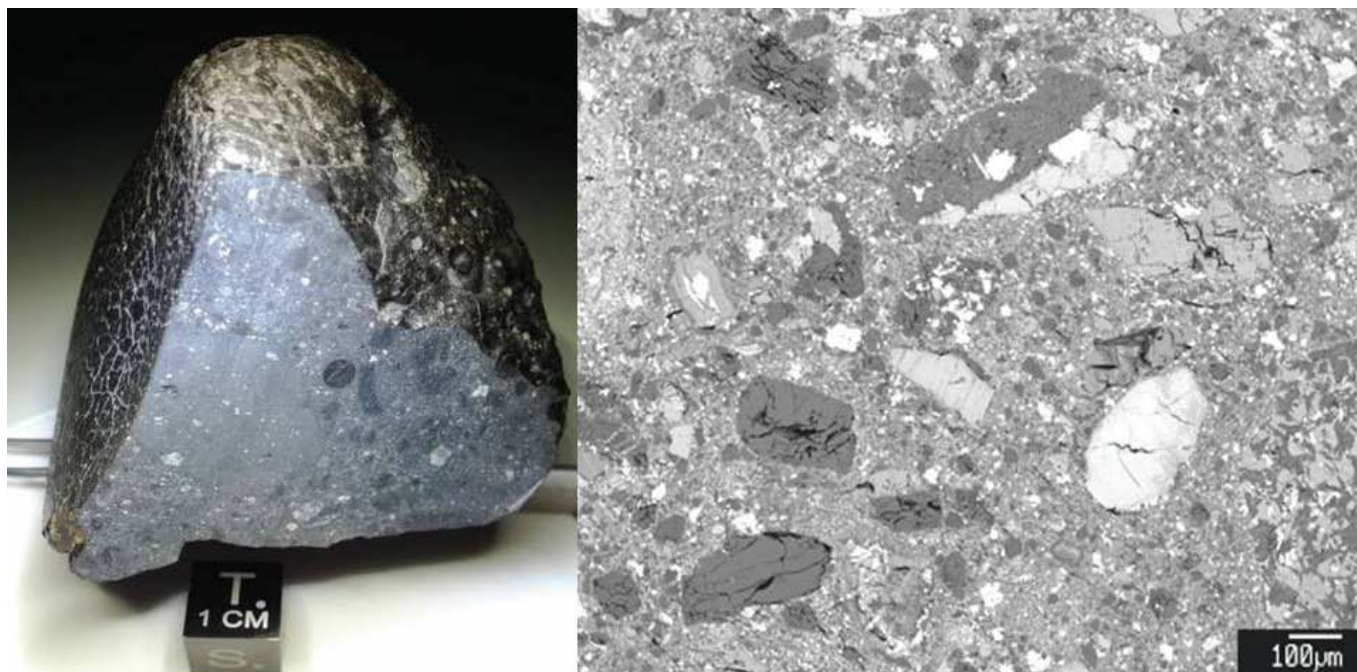
Υπάρχουν άλλοι δύο τύποι μετεωριτών οι νακλίτες (Day et al. 2006) αντιστοιχούν σε σωρειτικούς πυροξενίτες και οι τσασινίτες οι οποίοι αντιστοιχούν σε σωρειτικούς δουνίτες. Οι νακλίτες αποτελούνται από κλινοπυρόξενο (70-80 %κ.ο.), ολιβίνη (9-17 %κ.ο.) και σε μικρότερο ποσοστό οξείδια Fe και Ti, νατριούχα πλαγιόκλαστα και καλιούχο άστριο (Treiman 2005). Αποτελούνται κυρίως από επιμήκη και προσανατολισμένους κρυστάλλους αυγίτη (Goodrich et al. 2013). Οι τσασινίτες αποτελούνται από ολιβίνη (90-92%), κλινοπυρόξενο (3-5%), αστρίους (2%), χρωμίτη (2-5%), από οξείδια Fe και Ti, θειούχα και φωσφορικά ορυκτά (απατίτης). Αποτελούνται κυρίως από κρυστάλλους ολιβίνης.

Η πετρολογική σχέση μεταξύ νακλιτών και τσασινιτών είναι ασαφής (Day et al. 2006). Γνωρίζουμε όμως πως έχουν την ίδια ηλικία κρυστάλλωσης και εκτίναξης από τον Άρη. Οι πρόσφατα αναγνωρισμένοι βασάλτες αποτελούνται από αυγίτη και πλαγιόκλαστα καθώς και μικρές ποσότητες από ολιβίνη και οξείδια (Lodders et al. 1998). Η σύνθεση των μετεωριτών NWA 7635 και NWA 8159 είναι χημικά πανομοιότυπες με αυτή των νακλιτικών τηγμάτων.

Οι μόνοι ιζηματογενείς μετεωρίτες που έχουν βρεθεί και μελετηθεί ως σήμερα είναι οι NWA 7034 και NWA 7533 και αποτελούν πολύμικτα λατυποπαγή (Muttik et al. 2014).

NWA 7034 ή αλλιώς «black beauty» αποτελεί ένα πέτρωμα βάρους 319 gr το οποίο περιέχει λατύπες βασαλτικής σύστασης, φαινοκρυστάλλους ένυδρων ορυκτών, θραύσματα πετρωμάτων ανδεσιτικής σύστασης και αδιαφανή ορυκτά. Επίσης περιέχει πιζονίτη και κλινοπυρόξενους. Η εφαρμογή της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X σε κονιοποιημένο δείγμα

του συγκεκριμένου μετεωρίτη έχει δείξει ότι τα κύρια ορυκτά είναι πλαγιόκλαστο, κλινοπυρόξενος, οξειδία σιδήρου, και χρωμίτης (Agee et al. 2012)



Εικόνα 1.6 Στην αριστερή φωτογραφία βλέπουμε την κύρια μάζα του μετεωρίτη NWA 7034, με την μία πλευρά να αποτυπώνει την ετερογένεια της λατυποπαγούς δομής. Οι λευκοί κρύσταλλοι είναι πλαγιόκλαστα και οι σκουρόχρωμοι πυρόξενοι. Η δεξιά φωτογραφία προέρχεται από ανάλυση SEM (Scanning electron microscope), οι κρύσταλλοι πυροξένων (ανοιχτό γκρι), τα πλαγιόκλαστα (σκούρο γκρι), τα οξειδία και τα θειούχα ορυκτά (άσπρο) (Agee et al. 2012)

1.2 Τα γήινα ανάλογα

Γήινα ανάλογα ονομάζονται περιοχές στην επιφάνεια της Γης οι οποίες σε έχουν κοινές ή πανομοιότυπες γεωλογικές, περιβαλλοντικές και βιολογικές συνθήκες με κάποιο συγκεκριμένο πλανητικό σώμα είτε σήμερα είτε κατά το παρελθόν. Η μελέτη τέτοιων περιοχών στην Γη μας οδηγεί να κατανοήσουμε αφενός τις διαδικασίες που δημιούργησαν ορισμένα χαρακτηριστικά στη Γη, και αφετέρου να καταφέρουμε να δώσουμε μία ερμηνεία για άλλα πανομοιότυπα πλανητικά σώματα.

Τα ανάλογα μας παρέχουν την ευκαιρία για μία περαιτέρω προσομοίωση αποστολών είτε στην Σελήνη είτε στον Άρη.

Οι ανάλογες περιοχές κατατάσσονται σύμφωνα με τον βαθμό ομοιότητας τους σε

σχέση με ένα χαρακτηριστικό κάποιου άλλου πλανήτη (Snook and Mendell 2004)

Τα γήινα ανάλογα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το κατά πόσον οι ιδιότητες τους ταυτίζονται με αυτές του Άρη όπως επίσης και να σαν τύπος πρόβλεψης επιστημονικών ευρημάτων στον τύπο προορισμού. Για παράδειγμα, η κατανόηση διαδικασιών όπως αυτή της πετρογένεσης στην Γη μας βοηθά στο σχηματισμό υποθέσεων για πιθανή ύπαρξη αντίστοιχων γεωλογικών διεργασιών στον Άρη.

Οι κυριότερες κατηγορίες γήινων αναλόγων είναι οι εξής (Marlow 2008):

Χημικά ανάλογα: Αυτά περιλαμβάνουν τα εδάφη που σχετίζονται με την επιφάνεια του Άρη από την άποψη των χημικών ιδιοτήτων, όπως η διηλεκτρική σταθερά, το οξειδοαναγωγικό δυναμικό, το pH, στη στοιχειακή και ορυκτολογική σύνθεση. Η συγκεκριμένη κατηγορία είναι χρήσιμη για δοκιμές βαθμονόμησης φασματομέτρων.

Μηχανικά ανάλογα: Αυτή η κατηγορία αφορά εδάφη που φέρουν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με την επιφάνεια του Άρη όπως η συνεκτικότητα, η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής. Η μελέτη τέτοιων αναλόγων είναι χρήσιμη για τον συνολικό σχεδιασμό περιοχών απογείωσης και προσγείωσης των αποστολών.

Φυσικά ανάλογα: Είναι τα εδάφη που περιλαμβάνουν ιδιότητες όπως, την κατανομή των κόκκων στο έδαφος, το σχήμα τους, την πυκνότητα, το πορώδες, την περιεκτικότητα σε νερό, τη φαινομενική πυκνότητα και τις θερμοφυσικές ιδιότητες. Τα φυσικά ανάλογα αξιολογούν τα φυσικά φαινόμενα της επιφάνειας του πλανήτη Άρη βοηθώντας έτσι στον σχεδιασμό και την κατασκευή τεχνικών λεπτομερών στοιχείων της αποστολής.

Μαγνητικά ανάλογα: Είναι οι περιοχές που παρουσιάζουν παρόμοιες μαγνητικές ιδιότητες με αυτές του Άρη. Αυτά τα εδάφη είναι ιδιαίτερα πολύτιμα σε δοκιμές που σχετίζονται με τον μαγνητισμό.

Βιολογικά Ανάλογα: Τα σχεδόν άγωνα εδάφη είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την προσομοίωση του χαμηλού βιολογικά περιεχομένου του Άρη. Η αναζήτηση και οι ενδείξεις για το παρελθόν και την πιθανή παρουσία ζωής στον Άρη είναι ένας από τους πιο σημαντικούς στόχους για την εξερεύνηση του Άρη. Επιπλέον αυτές οι περιοχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δοκιμή οργάνων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση βιολογικής δραστηριότητας σε μία ενδεχόμενη μελλοντική αποστολή στον Άρη. Τέτοιες δοκιμές σε γήινα ανάλογα επιτρέπουν στους επιστήμονες και τους μηχανικούς να αξιολογήσουν την ευαισθησία του οργάνου και την βαθμονόμηση του.

1.2.1 Τα κυριότερα ανάλογα

1.2.1.1 Ηφαίστειο Kilauea (Χαβάη)

Ο Άρης και η Χαβάη εμφανίζουν μία παρόμοια ηφαιστειακή ιστορία, και οι σχεδόν συνεχείς εκρήξεις του ηφαιστείου Kilauea παρέχει την ευκαιρία να μελετήσουμε σε πραγματικό χρόνο τον σχηματισμό και την αλλοίωση της λάβας (Farr 2004). Οι ηφαιστειακές δομές στις περιοχές Kilauea, Mauna Loa και Mauna Kea παρέχουν μία σειρά από χρήσιμες χημικές πληροφορίες. Φασματικές καταγραφές των περιοχών πλούσιες σε βασάλτη δείχνουν σημαντικές ομοιότητες σε αντίστοιχες περιοχές με υψηλή ανακλαστικότητα στον Άρη (Singer 1982). Η γεωλογική μελέτη της Χαβάης επέτρεψε στους επιστήμονες να προβλέψουν την ύπαρξη καολινίτη (Ming et al. 1988)

1.2.1.2 Έρημος Atacama (Χιλή)

Ο πρόσφατα αυξημένος ρυθμός για την αναζήτηση ύπαρξης ζωής στον Άρη έχει οδηγήσει στην ταυτοποίηση οργανικών αναλόγων εδάφους, ένα υλικό που περιέχει οργανικά μόρια σε ποσότητες ιχνών που αναμένεται να υπάρχουν και στον Άρη. Δεδομένης της ιδιαιτερότητας αυτών των οργανισμών, αυτό δεν ήταν καθόλου εύκολο έργο, αλλά οι ερευνητές έχουν προτείνει την έρημο Ατακάμα ως το πιο ξηρό μέρος στον πλανήτη μας και ως το κατάλληλο στείρο περιβάλλον για την προσομοίωση του Άρη. Μελέτες της χημικής σύνθεσης του εδάφους (Sutter et al. 2005, Ewing et al. 2006) δείχνουν ιδιαίτερα οξειδωτικές συνθήκες που προκύπτουν ενδεχομένως από τα αυξημένα επίπεδα νιτρικών αλάτων και οξέων, που πιθανόν αντιπροσωπεύουν την χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη (Navarro-Gonzales et al. 2003). Πρόσφατα οι επιστήμονες δημιούργησαν όργανα ανίχνευσης οργανικής ύλης τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά στην συγκεκριμένη περιοχή.

1.2.1.3 Έρημος Mojave (ΗΠΑ)

Η έρημος Mojave στην Ανατολική Καλιφόρνια παρουσιάζει μία εξέλιξη της ηφαιστειακής και τεκτονικής δραστηριότητας καθιστώντας την κατάλληλη περιοχή ως ανάλογη των υψιπέδων του Άρη (Howard and Matsubara 2007). Η περιοχή χρησιμοποιείται κυρίως ως μηχανικό ανάλογο της περιοχής και συγκεκριμένο πεδίο δοκιμών του Άρη για συστήματα προσγείωσης Rover.

1.2.1.4 Ρίο Τίντο (Ισπανία)

Το Ρίο Τίντο που βρίσκεται στη νοτιοδυτική Ισπανία , αντιπροσωπεύει ένα νέο μεγάλο βήμα στην εξέλιξη των αναλογικών μελετών. Το Ρίο Τίντο είναι ένα κόκκινου χρώματος ποτάμι με pH το οποίο πλησιάζει τη μονάδα. Παρόλο το χαμηλό pH που έχει, παρουσιάζει μία αξιοσημείωτη μικροβιακή δραστηριότητα (Gonzalez-Toril et al. 2003). Λόγω της εύκολης πρόσβασης το Ρίο Τίντο θεωρείται ένα εξαιρετικό παράδειγμα μελέτης της

οργανισμών σε ακραία όξινα περιβάλλοντα.

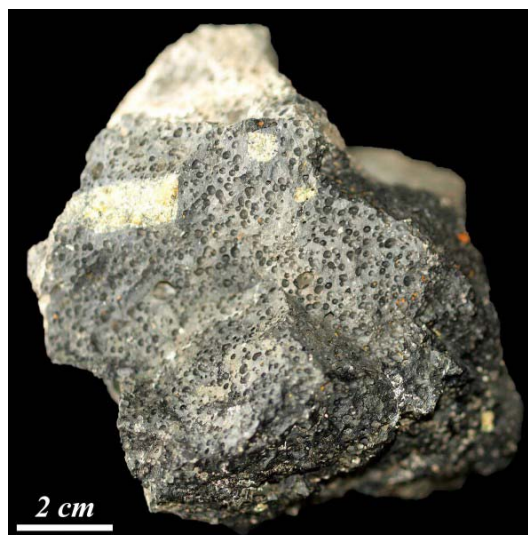
1.2.2 Δείγματα ISAR

Οι επιστήμονες στο CRNS της Ορλεάνης στη Γαλλία δημιούργησαν τη Διεθνή Βάση πετρωμάτων Διαστημικών αναλόγων ISAR (Bost et al. 2013), η οποία επί της ουσίας είναι μία βάση δεδομένων μελετημένων δειγμάτων τα οποία έχουν χαρακτηριστεί ως αρειανά ανάλογα. Για τις ανάγκες της εργασίας δανειστήκαμε 4 δείγματα (1 λεπτή στιλπνή τομή, 2 τεμάχια βασάλτη και 4 κονιοποιημένα δείγματα βασάλτη). Τα δείγματα ISAR αναλύθηκαν με τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν και στα δείγματα της Σαντορίνης για λόγους ενδοσυμβατότητας και επέκτασης των δεδομένων. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν μία σειρά αναλυτικών μεθόδων για την ανάλυση των δειγμάτων ISAR όπως: το οπτικό μικροσκόπιο, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, ο ηλεκτρονικός μικροαναλυτής, η περιθλασιμετρία ακτίνων-X, η φθορισμετρία ακτίνων-X, και η φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier. Τα δείγματα που δανειστήκαμε και μελετήσαμε παρατίθενται στα επόμενα:

1.2.2.1 Δείγμα 09SJ15

Το δείγμα αυτό συλλέχθηκε στην περιοχή Svalbard της Νορβηγίας κατά τη διάρκεια της αποστολής AMASE το 2009. Το πέτρωμα αυτό σχηματίστηκε από μάγμα αλκαλικής σύστασης το οποίο δημιουργεί υπερβασικά πετρώματα τα οποία περιέχουν έως και 20% ξενόλιθους και στην δέεται με την λεκάνη της Αρκτικής στην ευρύτερη περιοχή της Γροιλανδίας.

Το συγκεκριμένο δείγμα είναι εξαιρετικά σκωριώδες (μέγεθος πόρων 0.5-1mm). Τα κύρια ορυκτά από τα οποία αποτελείται είναι ο ολιβίνης (Fe_{90}) ο οποίος εμφανίζεται με την μορφή φαινοκρυστάλλων, οι πυρόξενοι ενώ η κύρια μάζα αποτελείται από πλαγιόκλαστα σπινελίους και γυαλί. Η ιδιαιτερότητα αυτού του δείγματος είναι ότι περιέχει κρυστάλλους χαλαζία ξενολιθικής προέλευσης. Η χημική σύσταση αυτού του δείγματος σχετίζεται με αυτή των τεφριτικών «αρειανών» βασάλτων πλούσιων σε αλκαλικά στοιχεία. Θεωρείται ανάλογο των βασάλτων του κρατήρα Gusev.

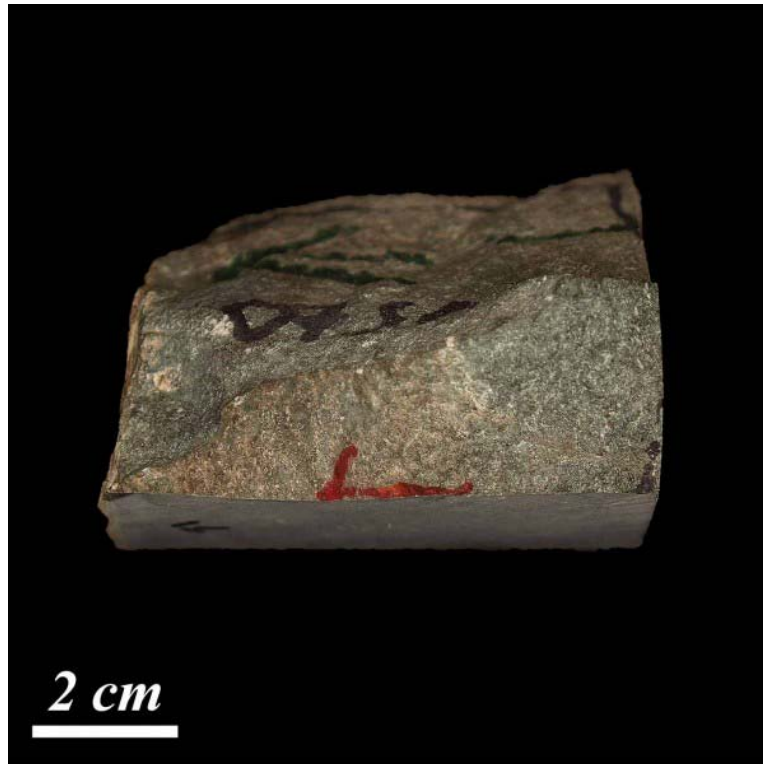


Εικόνα 1 Δείγμα ISAR 09SJ15(Bost et al. 2013)

1.2.2.2 Δείγμα 07ZA20

Το δείγμα αυτό είναι ένας βασάλτης οποίος προέρχεται από την ζώνη Barberton της Νότιας Αφρικής. Το δείγμα είναι λεπτόκκοκο και αρκετά σκωριώδες. Η υψηλή περιεκτικότητα του θαλασσινού νερού σε πυρίτιο και οι υδροθερμικές οδήγησαν στην δημιουργία βασαλτών και ενδιάμεσων στρωμάτων ιζηματογενών σχηματισμών (Hofmann et al. 2007).

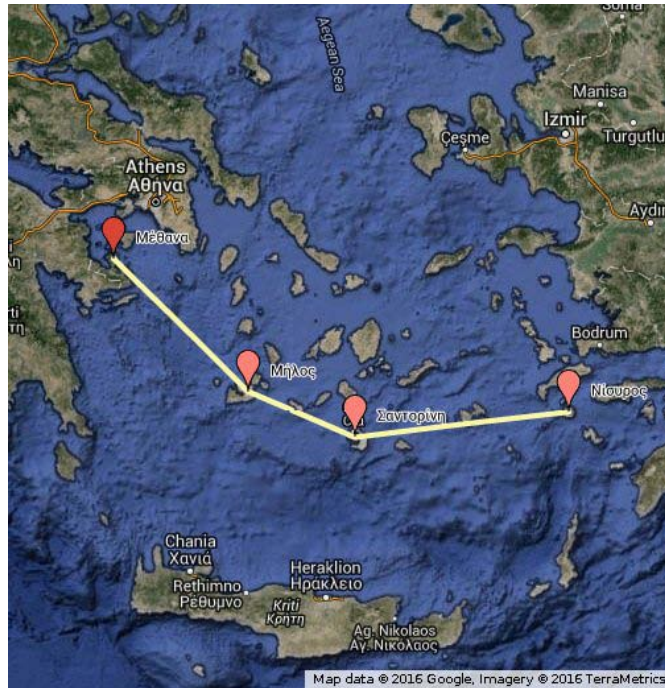
Το πέτρωμα αυτό αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από πλαγιόκλαστα και σπινελίους. Η ύπαρξη του χαλαζία φανερώνει ότι το δείγμα είναι ιδιαίτερα πυριτιωμένο. Τέτοια πυριτιωμένα πετρώματα δεν έχουν παρατηρηθεί ακόμα στην επιφάνεια του Άρη. Ωστόσο το δείγμα αυτό παρουσιάζει την εξής ιδιαιτερότητα, χαρακτηρίζεται από μία υαλώδη κρούστα παρόμοια με αυτή που έχει παρατηρηθεί σε κάποια βασαλτικά πετρώματα του Άρη (Furnes et al. 2004, 2007), στα οποία απαντώνται ορυκτά τα οποία ενδέχεται να είναι προϊόντα μικροβιακής δραστηριότητας. Το δείγμα 07ZA20, θα μπορούσε να συγκριθεί με βασάλτες του Άρη που δημιουργήθηκαν κατά την Neochian, και οι οποίοι ενδέχεται να σχηματίστηκαν υπό την επίδραση υδροθερμικής δραστηριότητας σε θαλασσινό νερό έντονα εμπλουτισμένο σε πυρίτιο.



Εικόνα 2 Δείγμα 07ZA20 (Bost et al. 2013)

1.3 Οι βασάλτες της Σαντορίνης (περιοχή Μπάλος)

Το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές γεωλογικές δομές στην περιοχή της Μεσογείου. Πρόκειται για μία ηφαιστειακή ζώνη που αποτελείται από πετρώματα βασαλτικής, ανδεσιτικής και ρυολιθικής σύστασης (Pe and Piper 1972). Τα πιο συνήθη πετρώματα που εμφανίζονται είναι οι ανδεσίτες και οι δακίτες. Δημιουργήθηκε κατά το Πλειόκαινο και η ηφαιστειότητά του συνδέεται άμεσα με την υποβύθιση της Ωκεάνιας λιθόσφαιρας νότια της Κρήτης κάτω από την Ευρασιατική πλάκα (Nicholls 1971, Pe and Piper 1972). Η ηφαιστειακή ζώνη εκτείνεται από τα Μέθανα (Νότια της Αθήνας) έως και τη Νίσυρο. Ηφαιστειακά πετρώματα έχουν επίσης βρεθεί και κατά μήκος του Σαρωνικού κόλπου, όπως στα νησιά Αίγινα και Πόρος. Τα ενεργά ηφαίστεια της περιοχής βρίσκονται περίπου 130-150 km από την επονομαζόμενη σεισμική ζώνη Benioff (Makropoulos and Button 1986) και λίγο πιο μέσα από το κεντρικό τμήμα του τόξου (Papadopoulos 1982, 1989).



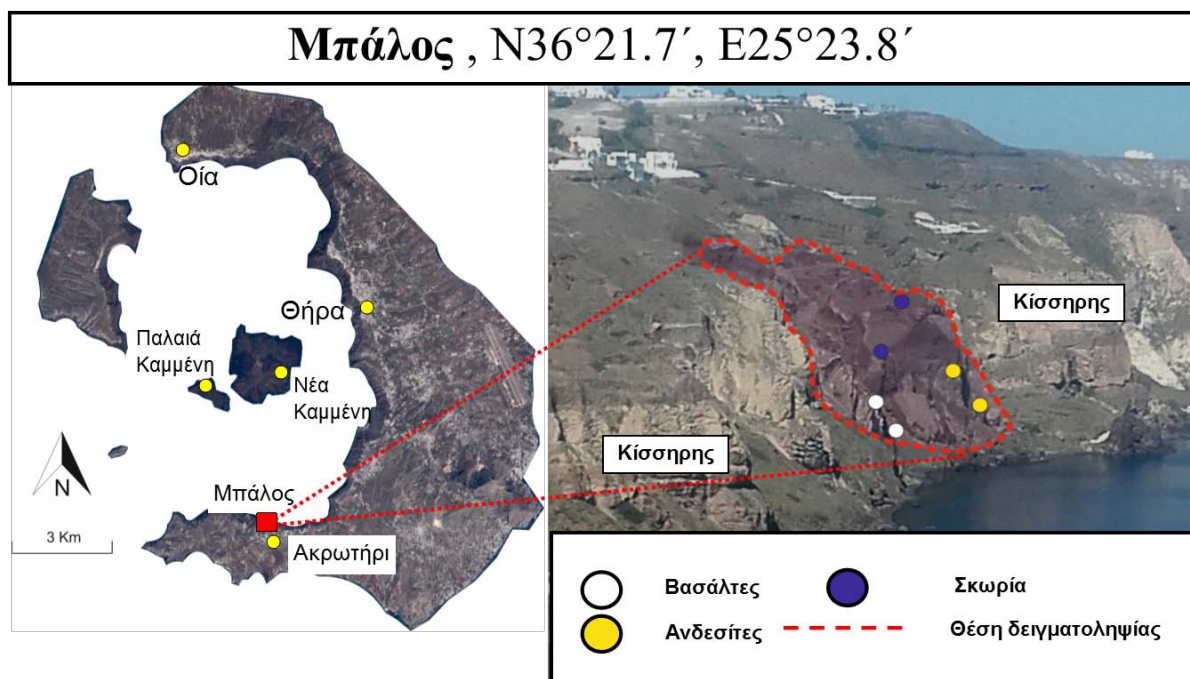
Εικόνα 1.10 Χάρτης της Ελλάδας. Το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου απεικονίζεται με κίτρινη γραμμή

1.3.1 Το ηφαίστειο της Σαντορίνης

Ο πρώτος ο οποίος εξέφρασε επιστημονικό ενδιαφέρον για το νησί της Σαντορίνης ήταν ο Duke Jacobo (1397-1418) και καταγράφεται ότι μελέτησε το ηφαίστειο και έκανε πειράματα στον κρατήρα του. Ο Pegues το 1842 ήταν ο πρώτος ιστορικός ο οποίος αντιλήφθηκε ότι η παρεμβολή της θάλασσας μεταξύ των νησιών Θήρας, Θηρασίας και Ασπρνησίου ήταν αποτέλεσμα της καταβύθισης του προϋπάρχοντος νησιού μετά από την ιστορική έκρηξη των προϊστορικών χρόνων. Ο Fouque το 1879 ήταν ο πρώτος ο οποίος έκανε μία λεπτομερή γεωλογική και πετρογραφική μελέτη της Σαντορίνης. Υπέθεσε επίσης ότι το αρχικό νησί με έκταση περίπου 82 τετραγωνικά χιλιόμετρα βυθίστηκε κάτω από τη θάλασσα κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης της καλντέρας.

Συστηματική μελέτη της στρωματογραφίας της Σαντορίνης έγινε από τον Reck (1936), και οι μελέτες του θεωρούνται θεμελιώδεις αρχές για οποιαδήποτε μεταγενέστερη κατανόηση της γεωλογίας του νησιού. Αναγνώρισε δύο παλαιότερες ξεχωριστές μονάδες με ονομασία Loumaravi-Archangelo και Akrotiri Volcanic και ανάμεσα στα νεότερα στρώματα της Σαντορίνης ερμήνευσε τα προϊόντα ενδιάμεσων χρονολογικά ηφαιστειακών. Άλλες μελέτες έγιναν από τους (Ktenas 1935, Neumman van Padang 1936 και Liatsikas 1942). Το επόμενο διάστημα οι περισσότερες έρευνες από το 1960 και μετά περιορίστηκαν στις λάβες της Νέας Καμένης με το σύγγραμμα «Κατάλογος των ενεργών ηφαιστειών» (Georgalas 1962).

Το νησί της Θήρας αποτελεί το πιο ενεργό τμήμα του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου το οποίο σχετίζεται με την καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική (Le Pichon and Angelier 1979). Οι λάβες της Σαντορίνης κυμαίνονται σε σύνθεση από βασαλτική έως ρυοδακτιτική και σπάνια σε ρυολιθική (Nicholls 1971, Davis et al. 1978, Dietrich et al. 1998). Τα κύρια ορυκτά που απαντώνται είναι τα εξής: πλαγιόκλαστα, κλινοπυρόξενοι, ορθοπυρόξενοι, ολιβίνης, μαγνητίτης και ιλμενίτης. Οι ρυοδακίτες και οι ρυόλιθοι περιέχουν αμφίβολου, βιοτίτη και ζirkόνιο, ενώ αποτελούν την πρώιμη δομή της Χερσονήσου του Ακρωτηρίου. Ο ολιβίνης και τα πλαγιόκλαστα προηγούνται κατά την κρυστάλλωση (Davis et al. 1978).



Εικόνα 1.11 Η περιοχή δειγματοληψίας (Μπάλος, Σαντορίνη)

Ο Όρμος του Μπάλου βρίσκεται στο Νότιο τμήμα του νησιού και βορειοδυτικά του χωριού του Ακρωτηρίου. Η κύρια μάζα των βασαλτικών δειγμάτων του Μπάλου σύμφωνα με τον Andujar et al. (2015) περιέχουν περίπου 41% φαινοκρυστάλλους εκ των οποίων το 7% είναι ολιβίνης (Fo₇₄₋₇₈), 32% πλαγιόκλαστο (An₇₈₋₈₀), 2% περίπου κλινοπυρόξενο (Cpx).



Εικόνα 1.12 Περιοχή δειγματοληψίας στην Σαντορίνη

Κατά τη δειγματοληψία στον Όρμο του Μάλου στην περιοχή του Ακρωτηρίου, έγινε συλλογή είκοσι δειγμάτων τα οποία διαχωρίστηκαν σε εννέα διαφορετικές κατηγορίες με κύριο παράγοντα την όψη τους στην περιοχή δειγματοληψίας. Τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Ορυκτολογίας και Γεωλογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την απαραίτητη προετοιμασία (κοπή, κονιοποίηση, δημιουργία λεπτών τομών και τους δόθηκε κωδικοποιημένη ονομασία από San-Bal-1 έως και San-Bal- 9. Για κοπή και παρασκευή λεπτών στιλπνών τομών δόθηκαν τα δείγματα San-Bal-2, San-Bal-3A, San-Bal-3B, San-Bal-4A, San-Bal-4B, San-Bal-5, San-Bal-6, San-Bal-7, και San-Bal-9. Όλα τα δείγματα κονιοποιήθηκαν για να χρησιμοποιηθούν στις μεθόδους περιθλασιμετρίας ακτίνων X, φασματοσκοπίας υπερύθρου (IR-ATR), και φθορισμετρίας ακτίνων –X.



Εικόνα 1.13 Δείγματα μελέτης από την περιοχή του Μφάλου (Σαντορίνη)

Κεφάλαιο 2 Μέθοδοι Ανάλυσης

2.1 Οπτική μικροσκοπία

Η μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων έγινε σε λεπτές στιλπνές τομές πάχους 30-50 μm , με χρήση πολωτικού μικροσκοπίου διερχόμενου και ανακλώμενου φωτός. Κατά το βήμα αυτό ελήφθησαν φωτογραφίες σε μικρή μεγέθυνση με σκοπό τη δημιουργία ενός πανοράματος της λεπτής τομής με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος ImageJ.

2.2 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης Scanning electron microscope (SEM)

Για το χαρακτηρισμό της δομής, προσδιορισμό ορυκτολογικών φάσεων και ημι-ποσοτικό προσδιορισμό των κύριων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης JEOLJSM 5600, μαζί με το φασματόμετρο διασποράς ενέργειας ακτίνων-X ISIS 2000 Oxford. Οι συνθήκες λειτουργίας του οργάνου ήταν: τάση 15 KV, ένταση ρεύματος 20 nA, και δέσμη διαμέτρου 1-2 μm . Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για χρόνο μέτρησης της μέγιστης κορυφής 20 sec και 10 sec για το υπόβαθρο. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν φυσικά ορυκτά ως ακολούθως: κορούνδιο (Al), ιαδείτης (Na), αλβίτης (Si), βολλαστονίτης (Ca), περίκλαστο (Mg), σιδηροπυρίτης (Fe), ορθόκλαστο (K), ρουτίλιο (Ti) και απατίτης (P).

2.3 Ηλεκτρονικός μικραναλυτής (EPMA)

Ο ηλεκτρονικός μικραναλυτής τύπου JEOL JXA-8530F, που χρησιμοποιήσαμε στο Ινστιτούτο Ορυκτολογίας του Πανεπιστημίου του Μύνστερ, Γερμανία πραγματοποιεί την ανάλυση των δεδομένων την μέτρηση των βασικών οξειδίων σε γυάλινες λεπτές τομές των δειγμάτων. Είναι εξοπλισμένος με πέντε φασματόμετρα (WDS) και ένα φασματόμετρο ενέργειας (EDS). Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με μία επιταχυνόμενη τάση των 15kV και έντασης 20 n A. Τα φυσικά στάνταρ που χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση του οργάνου ήταν ο αλβίτης (Na,Si,Al), βολλαστονίτης (Ca), ολιβίνης (Mg), αλμανδίνης (Fe), σπессαρτίνης (Mn), ορθόκλαστο (K), ρουτίλιο (Ti), χρωμίτη (Cr) και Ni οξείδιο (Ni).

2.4 Φασματοσκοπία ακτίνων Φθορισμού XRF

Η φασματοσκοπία ακτίνων φθορισμού (XRF) είναι μία από της καλύτερες αναλυτικές τεχνικές που εφαρμόζονται για την στοιχειακή ανάλυση σε όλα τα ήδη δειγμάτων (υγρά, στερεά, σκόνη). Η μέθοδος αυτή συνδυάζει την υψηλή ακρίβεια και την γρήγορη ανάλυση των μετρήσεων από περιεκτικότητες 100% έως και ppm. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται με ένα φάσμα το οποίο αντιπροσωπεύει το κάθε στοιχείο ξεχωριστά και η ένταση κάθε

κορυφής αντιπροσωπεύει την περιεκτικότητα του κάθε στοιχείου στο δείγμα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εθνικό Κέντρο Θαλασσιών ερευνών στο φασματομέτρο Panalytical's PW 2400.

2.5 Περιθλασιμετρία ακτίνων –X

Την μέθοδο αυτή την χρησιμοποιούμε για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης του ολικού πετρώματος με βάση την κρυσταλλική του δομή. Το όργανο περιθλασιμετρίας ακτίνων X που χρησιμοποιήθηκε είναι το Siemens Diffractometer D-5000, X-ray πηγής Cu και Ka ($\lambda=1.54184 \text{ \AA}$) και φίλτρο Ni. Οι συνθήκες του οργάνου ήταν: τάση 35kV και ένταση ρεύματος 25mA. Η θερμοκρασία δωματίου 25°C και γωνία περίθλασης 2θ από 3 σε 70° . Η ταχύτητα του βήματος των μετρήσεων $0.02^\circ/\text{s}$.

2.6 Υπέρυθρη φασματοσκοπία (IR -ATR)

Η μέθοδος υπέρυθρης φασματοσκοπίας FTIR IR-ATR, είναι μία τεχνική μελέτης ολικού πετρώματος την οποία εφαρμόσαμε στο Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Ινστιτούτο Θεωρητικής και Φυσικής χημείας. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Equinox 55 εξοπλισμένο με ένα διαμάντι μονής περίθλασης και μία μηχανικά περιστρεφόμενη πρέσα. Το κάθε φάσμα IR ATR αντιπροσωπεύει ένα μέσο όρο εκατό «χτυπημάτων» εύρους $525\text{--}2500 \text{ cm}^{-1}$ και ανάλυσης 4 cm^{-1} .

2.7 Ειδικό βάρος

Για τη μελέτη κάθε υλικού είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το μοναδιαίο βάρος. Αυτό καθορίζεται στο εργαστήριο με την εξής τεχνική.

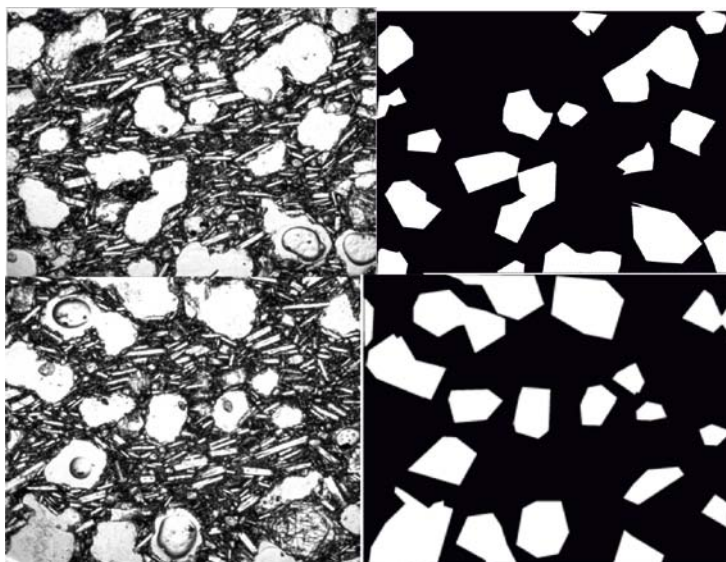
- A) Ένα κομμάτι από το δείγμα μας, ξηραίνεται για 24 ώρες σε θερμοκρασία 104°C και το αφήνουμε να κρυώσει πριν μετρήσουμε το βάρος του ($M_{\text{δείγματος}}$).
- 2) Μετράμε το βάρος του και στη συνέχεια το επικαλύπτουμε με παραφίνη.
- 3) Ζυγίζουμε με παραφίνη. Γνωρίζοντας το αρχικό βάρος του δείγματος βρίσκουμε το βάρος της παραφίνης.
- 4) Γνωρίζοντας το μοναδιαίο βάρος της παραφίνης, υπολογίζουμε τον όγκο της $V = \text{μάζα παραφίνης} / \text{μοναδιαίο βάρος}$.
- 5) Τοποθετούμε το δείγμα σε ογκομετρικό κύλινδρο, οποίος περιέχει γνωστή ποσότητα νερού (αρχική ένδειξη όγκου). Μετράμε την τελική ένδειξη του κυλίνδρου και αφαιρούμε το όγκο της παραφίνης ($V_{\text{δείγματος}}$).

$$6) \text{Ειδικό βάρος δείγματος} = M_{\text{δείγματος}} / V_{\text{δείγματος}}$$

2.8 Πορώδες

Το πορώδες είναι ο λόγος του όγκου των κενών (δηλαδή πόρων, μικρορωγμών) προς το συνολικό όγκο του πετρώματος εκφρασμένος %. Στη συγκεκριμένη μελέτη έγινε προσδιορισμός του ειδικού βάρους των δειγμάτων της Σαντορίνης με τη χρήση του προγράμματος ImageJ. Το ImageJ είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασία εικόνων που το οποίο σχεδιάστηκε για την επεξεργασία και την αποτίμηση εικόνων επιστημονικού ενδιαφέροντος (Schneider et al. 2012). Στην συγκεκριμένη εργασία το χρησιμοποιήσαμε σε φωτογραφίες που είχαμε τραβήξει από το πετρογραφικό μικροσκόπιο σε λεπτές στιλπνές τομές, ώστε να μετρήσουμε ποσοτικά του πόρους που υπάρχουν σε αυτές.

Η εύρεση του πορώδους μέσω του προγράμματος ImageJ, έχει ως εξής. Αρχικά κάνουμε εισαγωγή μία εικόνα λεπτής τομής από το οπτικό μικροσκόπιο, στη συνέχεια μετατρέπουμε αυτή την εικόνα σε gray scale ώστε να είναι ευδιάκριτοι σε μεγαλύτερο βαθμό οι πόροι του δείγματος μας. Με προσεκτικές κινήσεις περιχαράκωνουμε τον κάθε πόρο και στην συνέχεια γεμίζουμε το εσωτερικό του με ένα χρώμα διαφορετικό από τα υπόλοιπα της φωτογραφίας μας. Σε αυτό το σημείο το Image J έχει την δυνατότητα μετρήσει ποσοτικά το ποσοστό της φωτογραφίας που καταλαμβάνει οι πόροι του δείγματος.



Εικόνα 2.1 Στις αριστερές εικόνες εμφανίζονται οι φωτογραφίες μίας λεπτής τομής. Στα δεξιά εμφανίζονται οι ίδιες φωτογραφίες μετά από την επεξεργασία με το πρόγραμμα ImageJ. Το

λευκό μέρος της φωτογραφίας είναι εκείνο που αντιστοιχεί στο πορώδες ενώ με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η κύρια μάζα του πετρώματος.

Κεφάλαιο 3 Μέθοδοι ανάλυσης

3.1 Πετρογραφικό Μικροσκόπιο

Τα πετρώματα της Σαντορίνης χαρακτηρίζονται από διερρηγμένους φαινοκρυστάλλους ολιβίνη με μεσαίας τάξης χρώματα πόλωσης, στων οποίων τις ρωγμές εμφανίζονται αργιλικά ορυκτά λόγω εξαλλοίωσης. Μικρότεροι μεγέθους κρύσταλλοι ολιβίνη βρίσκονται στην κύρια μάζα και παρουσιάζουν και αυτοί καφέ χρώμα λόγω της μερικής αντικατάστασης τους από αργιλικά ορυκτά. Σε όλα σχεδόν τα δείγματα τα πλαγιόκλαστα εμφανίζονται στην κύρια μάζα μεγέθους 100-200μm έχοντας μικροπρισματικό ή σκελετικό σχήμα παρουσιάζοντας και διδυμία. Τους μικροκρυστάλλους πλαγιόκλαστων «σπάνε» φαινοκρύσταλλοι που εμφανίζονται στο δείγμα San-Bal5 και παρουσιάζουν ιδιαίτερη ζώνωση. Οι πυρόξενοι εμφανίζονται ως φαινοκρύσταλλοι με χρώμα απαλό ροζ (ή πράσινο) έχοντας χαρακτηριστικό υποεδρικό σχήμα. Ο ιστός των δειγμάτων είναι κυρίως πορφυριτικός, καθώς σχεδόν σε όλα τα δείγματα υπάρχουν τόσο φαινοκρύσταλλοι όσο και μικροκρύσταλλοι των ορυκτών στην κύρια μάζα. Η υφή είναι κυρίως ρευστική καθώς τα πλαγιόκλαστα έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό.

Τα παραπάνω αποτελούν τα γενικά πετρογραφικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων της Σαντορίνης. Μέσω της παρατήρησης χωρίσαμε τα δείγματα σε τρεις διαφορετικές ομάδες, ανάλογα με το πορώδες, τον ιστό, την υφή των πετρωμάτων. Η ομαδοποίηση των δειγμάτων με κοινά χαρακτηριστικά είναι η εξής: Ομάδα 1 (San-Bal-3A, San-Bal-3B και San-Bal-6), ομάδα 2 (San-Bal-2, San-Bal-4A και San-Bal-9), Ομάδα 3 (San-Bal-4B και San-Bal-5).

Ομάδα 1: Βλέποντας τα δείγματα αυτής της ομάδας στο πετρογραφικό μικροσκόπιο, το πρώτο χαρακτηριστικό που θα μας κάνει να τα ξεχωρίσουμε είναι η λευκή κύρια μάζα λόγω των πλαγιόκλαστων και οι κόκκινοι φαινοκρύσταλλοι. Πιο συγκεκριμένα πετρώματα αυτά χαρακτηρίζονται από διερρηγμένους φαινοκρυστάλλους υποεδρικού σχήματος ολιβίνη οι οποίοι έχουν εξαλλοιωθεί γι' αυτό παρουσιάζουν ένα χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα σε όλη την έκταση του κρυστάλλου. Η κύρια μάζα τους αποτελείται από μικροπρισματικούς, μακροπρισματικούς και σκελετικής μορφής μικροκρυστάλλους πλαγιόκλαστων τα οποία παρουσιάζουν διδυμία. Ο ιστός τους είναι πορφυριτικός. Ο ιστός του πετρώματος

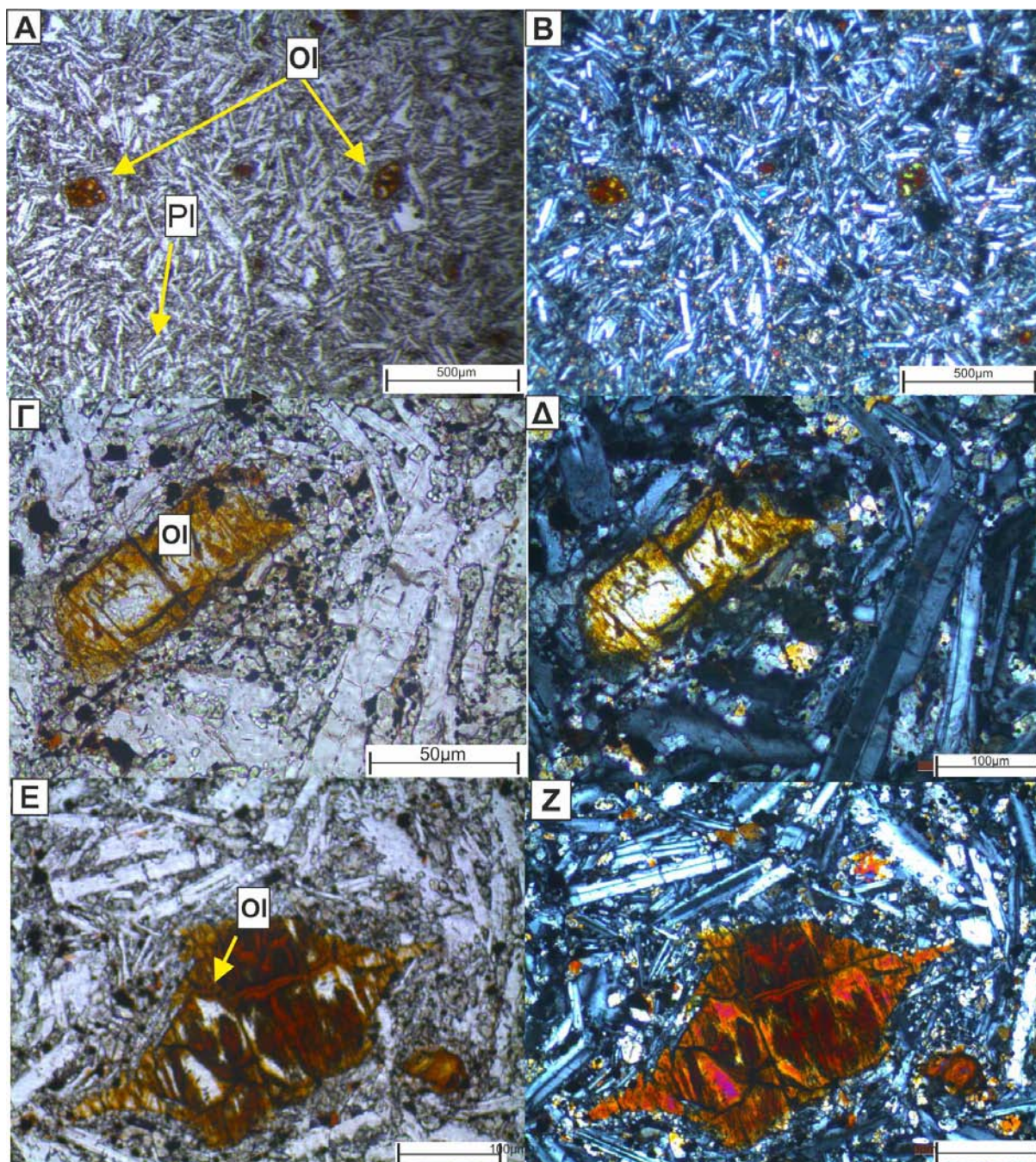
χαρακτηρίζεται ως πορφυριτικός, διότι εμφανίζονται τόσο φαινοκρύσταλλοι όσο και μικροκρύσταλλοι, ενώ η υφή σύμφωνα με τον συγκεκριμένο προσανατολισμό που έχουν τα πλαγιόκλαστα, θα την χαρακτηρίσαμε ως ρευστική. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό αυτών των δειγμάτων είναι το πολύ χαμηλό πορώδες που έχουν.

Ομάδα 2: Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της ομάδας είναι το υψηλό πορώδες που έχουν (>30%). Τα δείγματα εμφανίζουν διερρηγμένους κρυστάλλους ολιβίνη, οι οποίοι εμφανίζουν εξαλλοίωση στα όρια των ρωγμών τους. Στην κύρια μάζα υπάρχουν τόσο μικροκρύσταλλοι πυροξένων όσο και ολιβινών, κυρίως όμως αποτελείται από πλαγιόκλαστα μικροπρισματικού σχήματος τα οποία είναι παράλληλα μεταξύ τους δείχνοντας ρευστική υφή. Στα δείγματα υπάρχουν τόσο φαινοκρύσταλλοι όσο και μικρότεροι σε μέγεθος, επομένως ο ιστός χαρακτηρίζεται ως πορφυριτικός.

Ομάδα 3 Τα δείγματα αυτή της ομάδας περιέχουν φαινοκρυστάλλους ολιβίνη και πυροξένων. Εμφανίζονται μακροπρισματικά πλαγιόκλαστα ως και φαινοκρύσταλλοι πλαγιόκλαστων στην τομή San-Bal-5. Το κύριο χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει τα συγκεκριμένα δείγματα από τις υπόλοιπες ομάδες είναι η ύπαρξη προσανατολισμένων φαινοκρυστάλλων πλαγιόκλαστων σε συνδυασμό με το χαμηλό πορώδες του δείγματος.

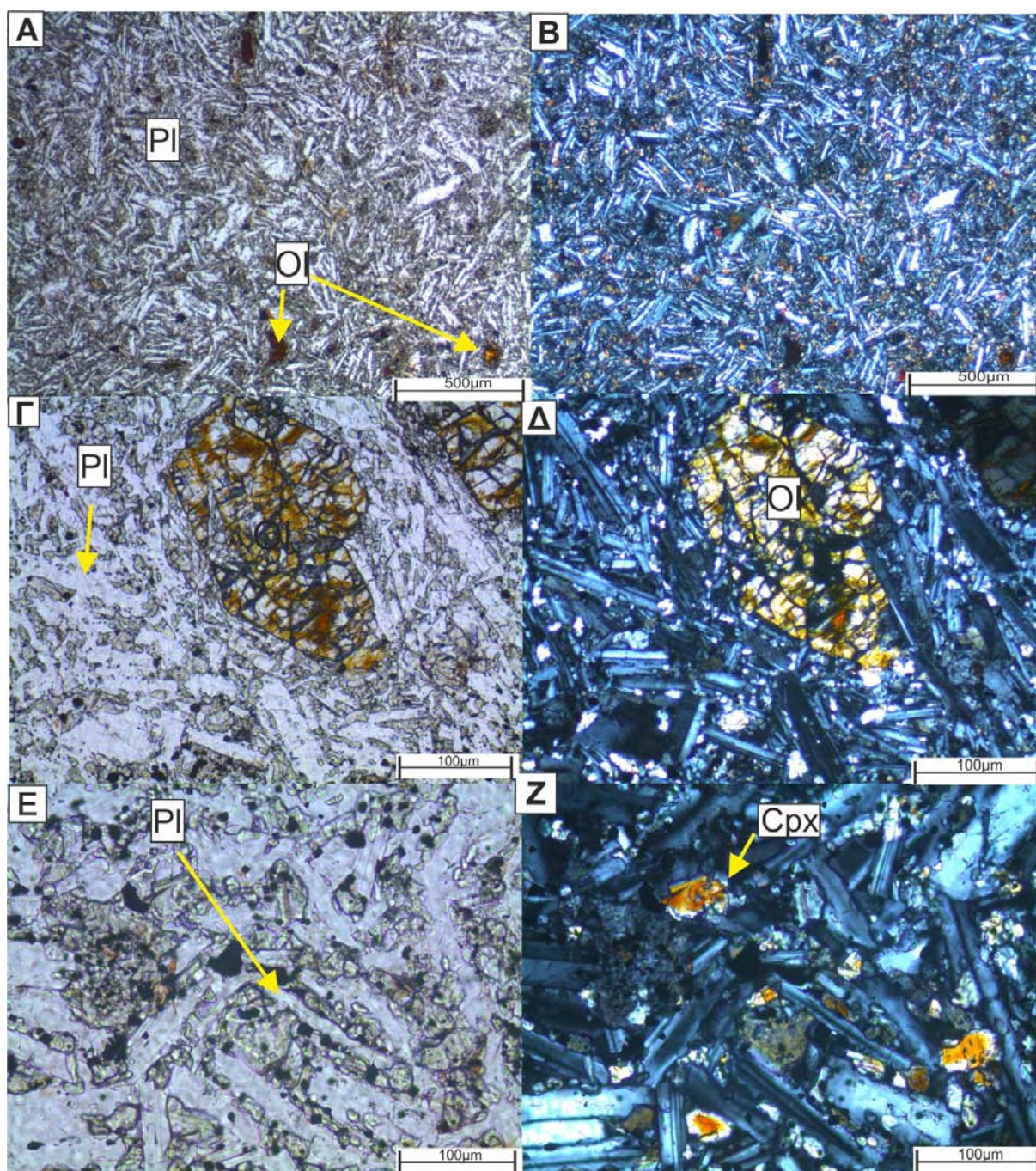
Ομάδα 1

Δείγμα San-Bal-3A



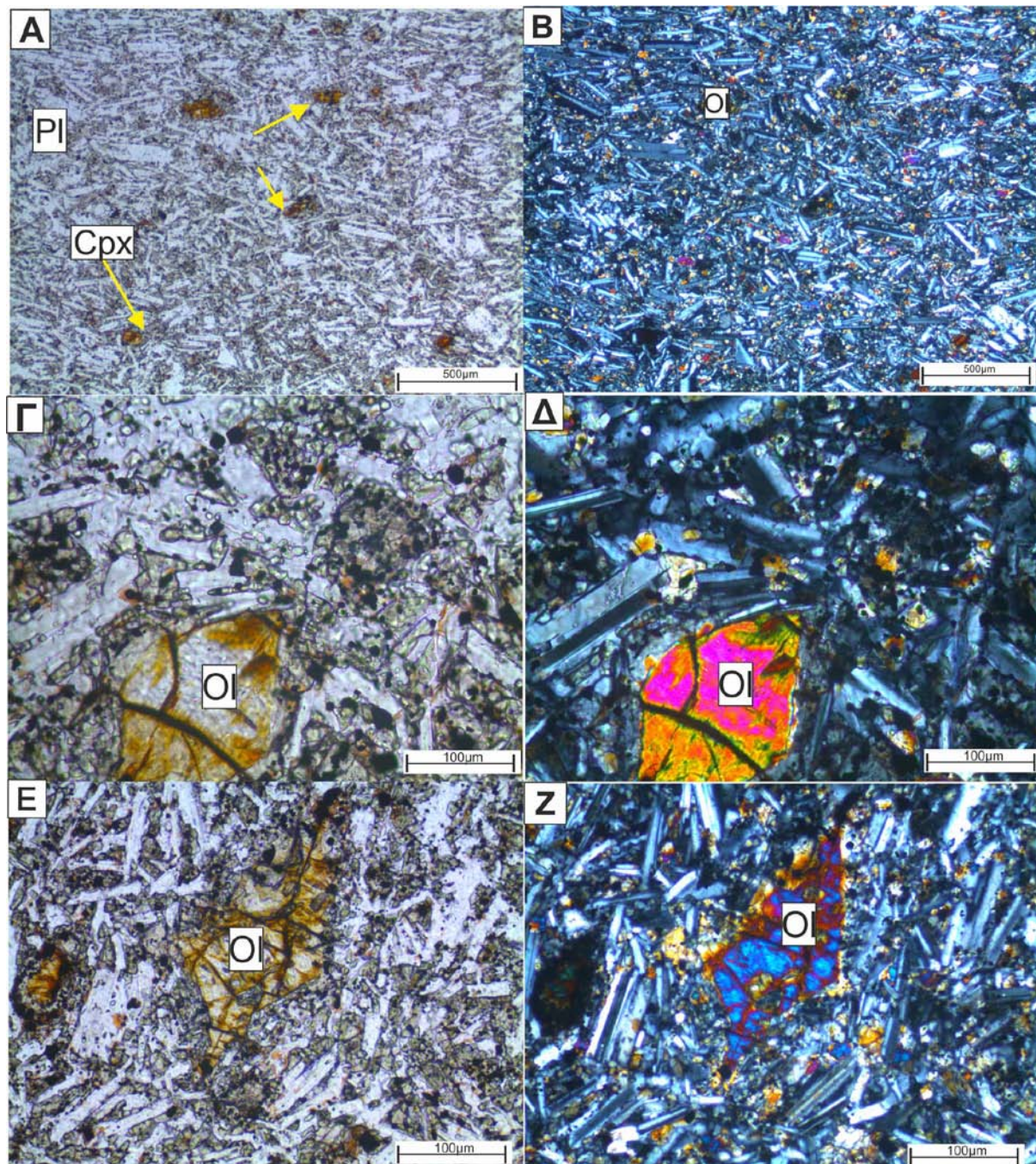
Εικόνα 3.1 Το συγκεκριμένο δείγμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Σε σχέση με το San-Bal-2. Το San-Bal-3A εμφανίζει πολύ μικρό πορώδες. Παρουσιάζει φαινοκρυστάλλους κυρίως ολιβίνη, οι οποίοι όμως έχουν εξαλλοιωθεί πλήρως (Γ,Δ). Η κύρια μάζα του αποτελείται από ολιβίνη πλαγιόκλαστα και πυρόξενους και γυαλί (Α,Β). Τα πλαγιόκλαστα παρουσιάζουν πρισματικό έως και σκελετικό σχήμα και έχουν μέγεθος (100-200μm) ενώ είναι τοποθετημένα προς μία κατεύθυνση. Οι πυρόξενοι εμφανίζονται σε μεγάλο ποσοστό και ως ποικιλιτικοί φαινοκρύσταλλοι στους οποίους εγκλείονται πλαγιόκλαστα αλλά και στην κύρια μάζα του πετρώματος.

Δείγμα San-Bal-3B



Εικόνα 3.2 Το δείγμα San-Bal-3B έχει πορώδες που ανέρχεται στο 10%. (Α) Διαρρηγμένοι κρύσταλλοι ολιβίνη μεσαίας τάξης οι οποίοι έχουν εξαλλοιωθεί (Γ,Δ). Απαντώνται φαινοκρύσταλλοι πυροξένων και ολιβίνη. Η κύρια μάζα αποτελείται κατά κύριο λόγο από λεπτούς μικροπρισματικούς κρυστάλλους πλαγιокλάστων, τα οποία εμφανίζουν διδυμία (Ε,Ζ)Η έχοντας μία υποπαράλληλη και σε ορισμένα σημεία ειδικά στο κέντρο του δείγματος παράλληλη κατεύθυνση, η υφή του πετρώματος μπορεί να χαρακτηριστεί ρευστική. Στην κύρια μάζα απαντώνται επίσης μικροκρύσταλλοι ολιβίνη και πυροξένων (ποσοστό περίπου 30%)(Α,Β).

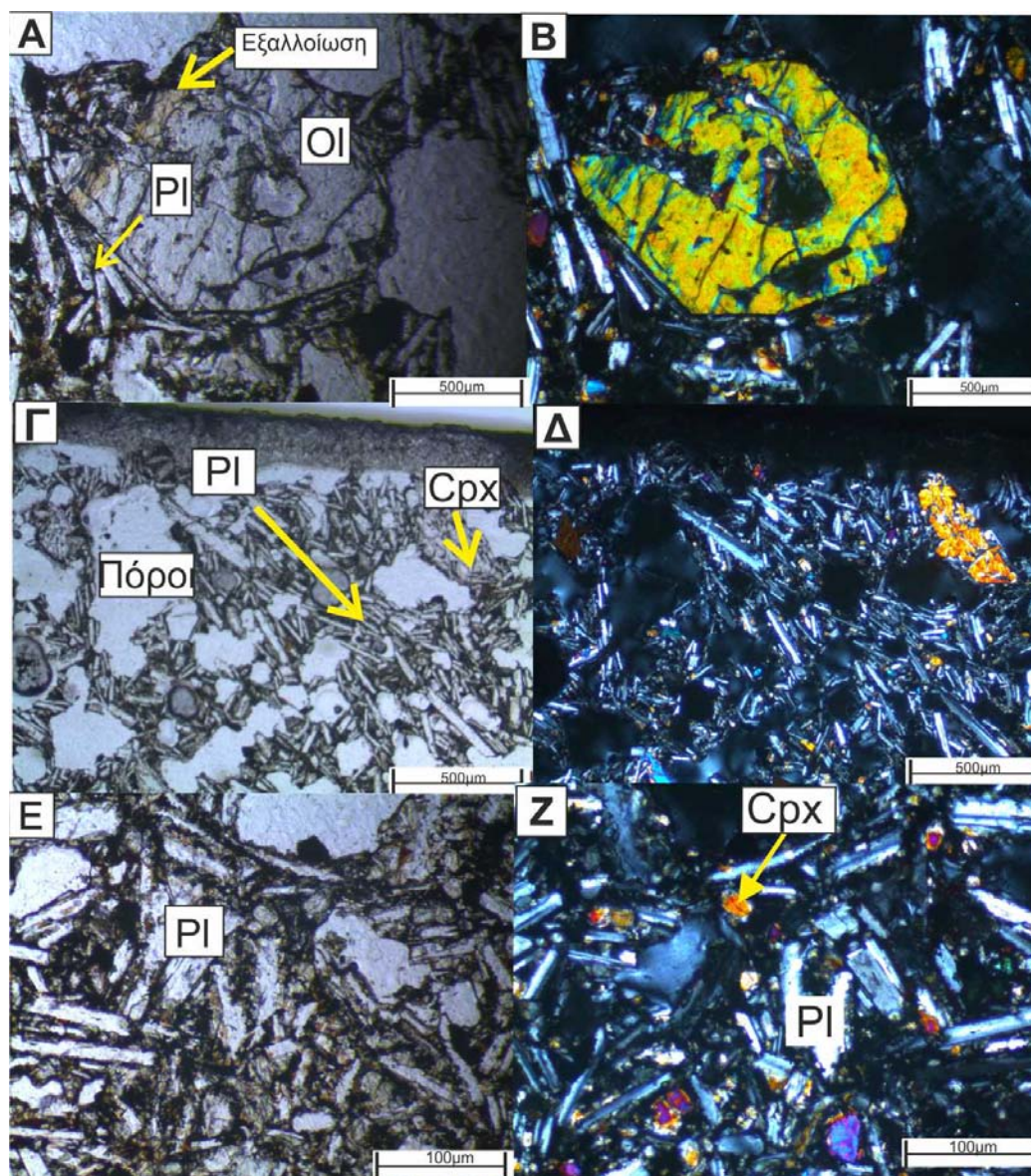
Δείγμα San-Bal-6



Εικόνα 3.3 Το δείγμα San-Bal-6 έχει πορώδες ~10%. Αποτελείται κυρίως από λεπτούς υποδιόμορφους πρισματικούς κρυστάλλους πλαγιокλάστων (AB), και επί το πλείστον τα πλαγιόκλαστα φαίνεται να μην έχουν καταφέρει να σχηματίσουν κρυστάλλους έχοντας μία δενδριτική μορφή και χωρίς κάποιο συγκεκριμένο προσανατολισμό. Οι ολιβίνες απαντούν ως φαινοκρύσταλλοι και μικροκρυσταλλίτες μέσα στην κύρια μάζα.

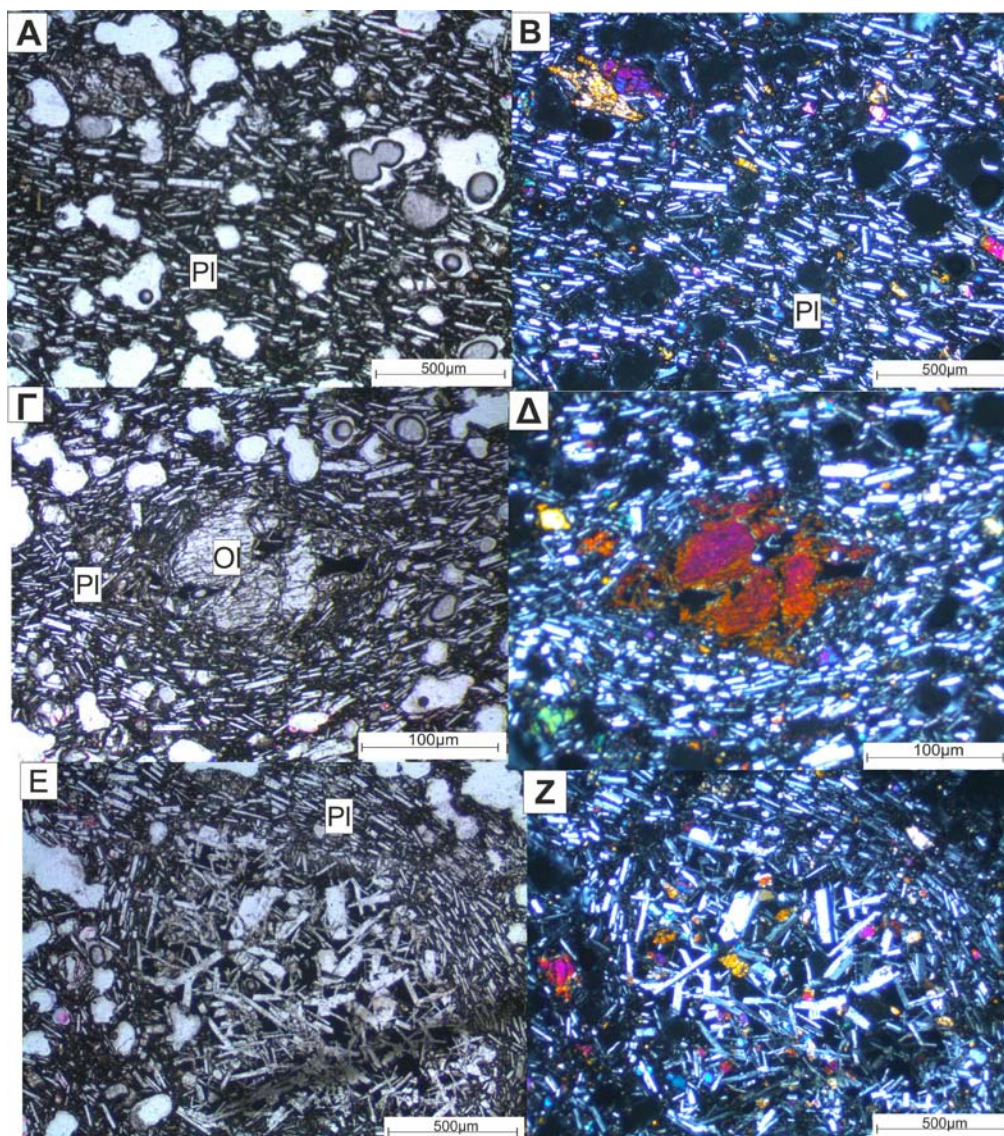
Ομάδα 2

Δείγμα San-Bal-2



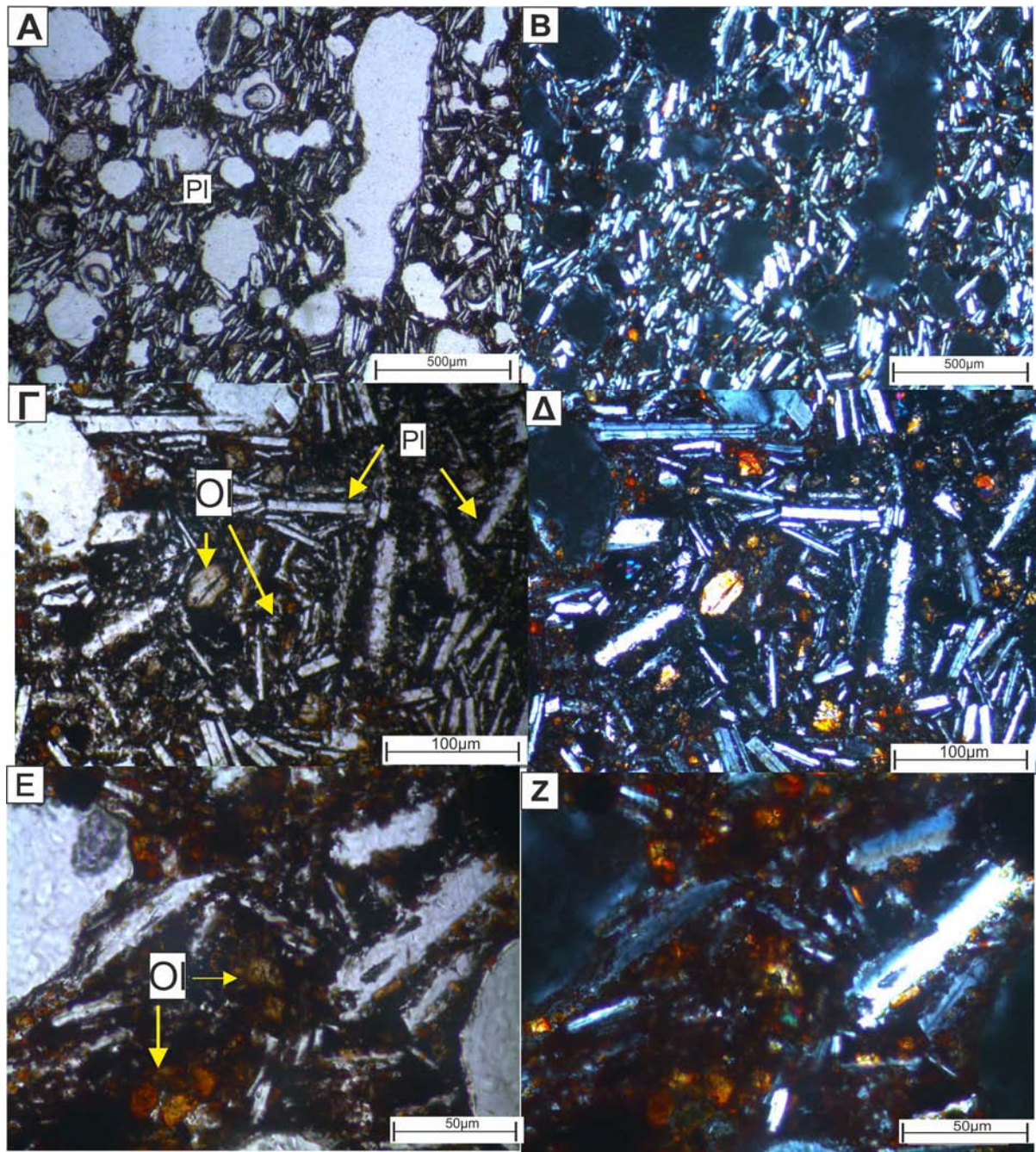
Εικόνα 3.4 Το πέτρωμα αυτό έχει πορώδες που φθάνει το 30% (Γ,Δ), με παρουσία ευεδρικών και υποεδρικών φαινοκρυστάλλων ολιβίνη οι οποίοι στις άκρες τους έχουν εξαλλοιωθεί σε αργιλικά ορυκτά. (Α,Β) Στην κύρια μάζα, υπάρχουν πλαγιόκλαστα περίπου στο 40% μικροπρισματικού σχήματος (Ε,Ζ). Οι πυρόξενοι στην κύρια μάζα απαντώνται σε ποσοστό περίπου στο 15% σε υποιδιόμορφους κρυστάλλους. Τέλος τόσο οι φαινοκρύσταλλοι ολιβίνη όσο και οι μικροκρύσταλλοι εμφανίζονται αλλοτριόμορφοι με αρκετά σπασίματα στο εσωτερικό τους. Ο ιστός του πετρώματος χαρακτηρίζεται ως πορφυριτικός, ενώ η υφή σύμφωνα με τον συγκεκριμένο προσανατολισμό που έχουν τα πλαγιόκλαστα τα οποία είναι τοποθετημένα σε μία παράλληλη και υποπαράλληλη κατεύθυνση, θα την χαρακτηρίζαμε ως ρευστική.

Δείγμα San-Bal-4A



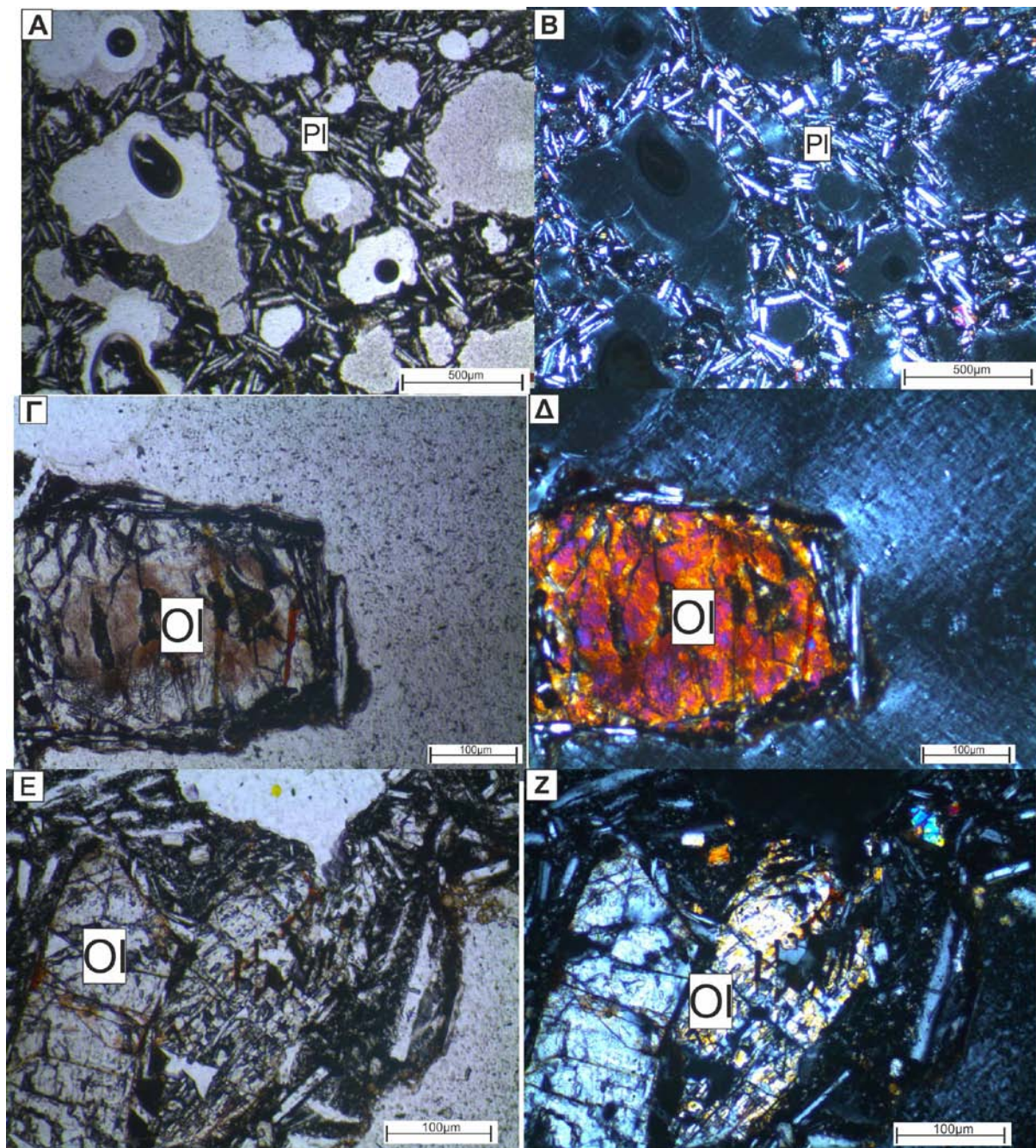
Εικόνα 3.5 Το δείγμα San-Bal-4A είναι σκωριώδες με ποσοστό πόρων περίπου 20% (Α,Β). Η διάταξη των πόρων φαίνεται να έχει μία συγκεκριμένη κατεύθυνση σε ζώνες. Μεγάλο πορώδες υπάρχει στο άνω και στο κάτω μέρος της τομής, ενώ στο κέντρο φαίνεται να είναι πιο συμπαγές το δείγμα. Ο ολιβίνης απαντάται και με την μορφή φαινοκρυστάλλων αλλά και μέσα στην κύρια μάζα (Γ,Δ). Η κύρια μάζα αποτελείται από λεπτούς μικροπρισματικούς κρυστάλλους πλαγιокλάστων (Α,Β). Ο προσανατολισμός τους είναι διαφορετικός σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα, καθώς είναι ξεκάθαρος, με την διάταξη των πλαγιокλάστων να είναι παράλληλη προς μία κατεύθυνση (κατά μήκος της μεγάλης πλευράς της τομής), εκτός από ένα σημείο της τομής όπου η διάταξη τους αλλάζει και είναι ιδιαίτερα ακανόνιστη. Οι πυρόξενοι απαντώνται ως μικροκρύσταλλοι στην κύρια μάζα. Τέλος παρατηρείται μία αντικατάσταση κρυστάλλου, πιθανώς πυροξένου, από μικροκρυστάλλους πλαγιокλάστων ολιβίνης και πυροξένων (Ε,Ζ.)

Δείγμα San-Bal-7



Εικόνα 3.6 Το συγκεκριμένο δείγμα έχει πορώδες ($>30\%$ (A,B), ενώ δεν εμφανίζει καθόλου (Γ,Δ) φαινοκρυστάλλους. Η κύρια μάζα του αποτελείται σε πολύ μεγάλο ποσοστό (περίπου 60%) από πλαγιόκλαστα, τα οποία απαντώνται με πρισματική μορφή, ενώ φαίνεται να είναι τοποθετημένα προς μία κατεύθυνση. Ολιβίνης και πυρόξενοι απαντώνται σε πολύ μικρό ποσοστό σαν μικροκρύσταλλοι, ενώ είναι έντονη η εμφάνιση νέλου, η οποία σε συνδυασμό με το μεγάλο ποσοστό των πόρων, μας δείχνει μία ενδεχόμενη ταχεία κρυστάλλωση του μάγματος (E,Z).

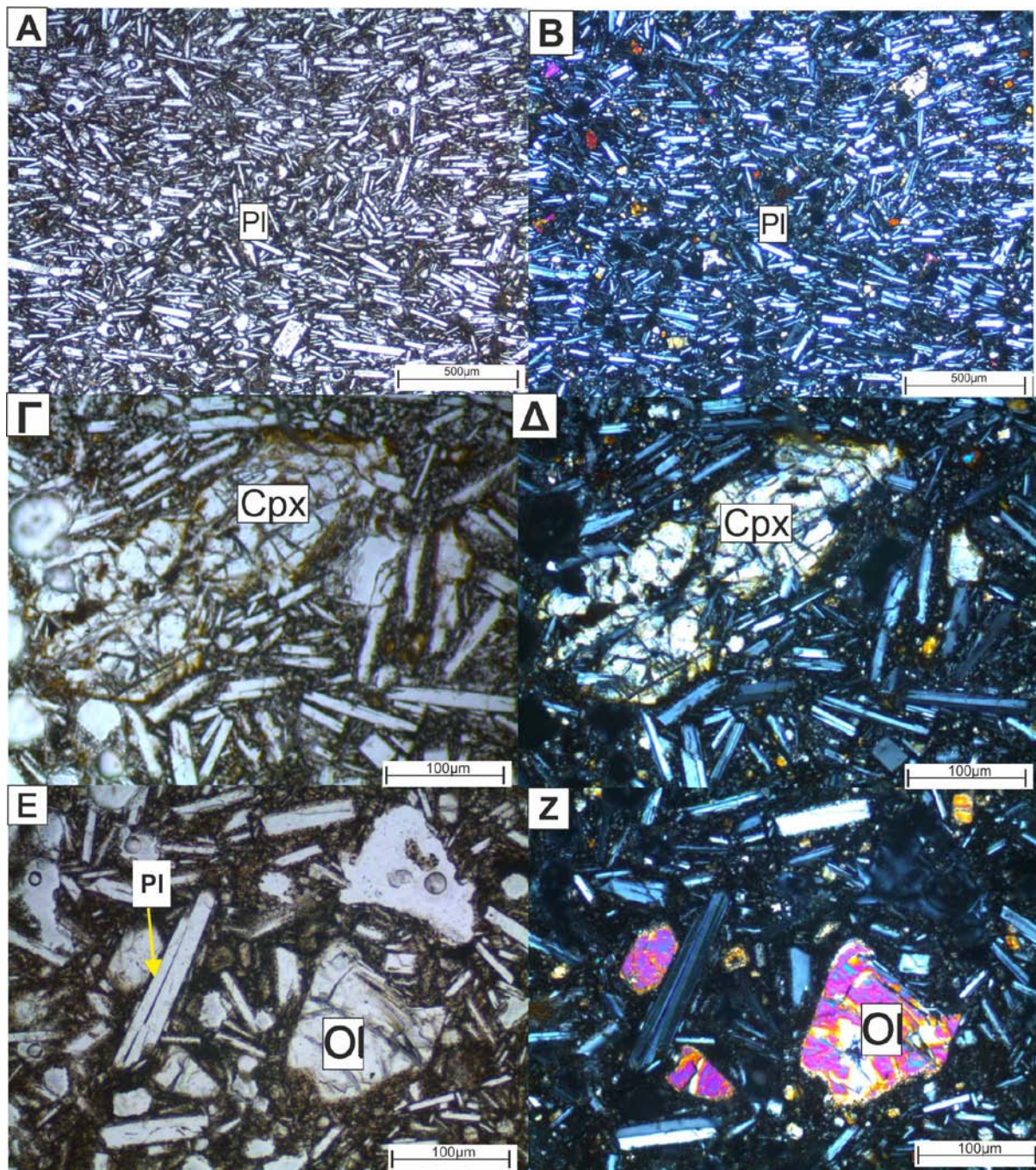
Δείγμα San-Bal-9



Εικόνα 3.7 Το δείγμα San-Bal-9 έχει πορώδες περίπου στο (30%) (A,B). Η διαφορά του σε σχέση με το δείγμα San-Bal-7 είναι η παρουσία φαινοκρυστάλλων ολιβίνη και πυροξένων (Γ,Ζ). Το ποσοστό των πλαγιокλάστων στην κύρια μάζα ξεπερνά το 40%. Παρουσιάζουν πρισματικό σχήμα και διδυμία, ενώ είναι τοποθετημένα παράλληλα προς μία κατεύθυνση. Στην κύρια μάζα επίσης απαντούν μικροκρύσταλλοι ολιβίνη και πυροξένων (A,B).

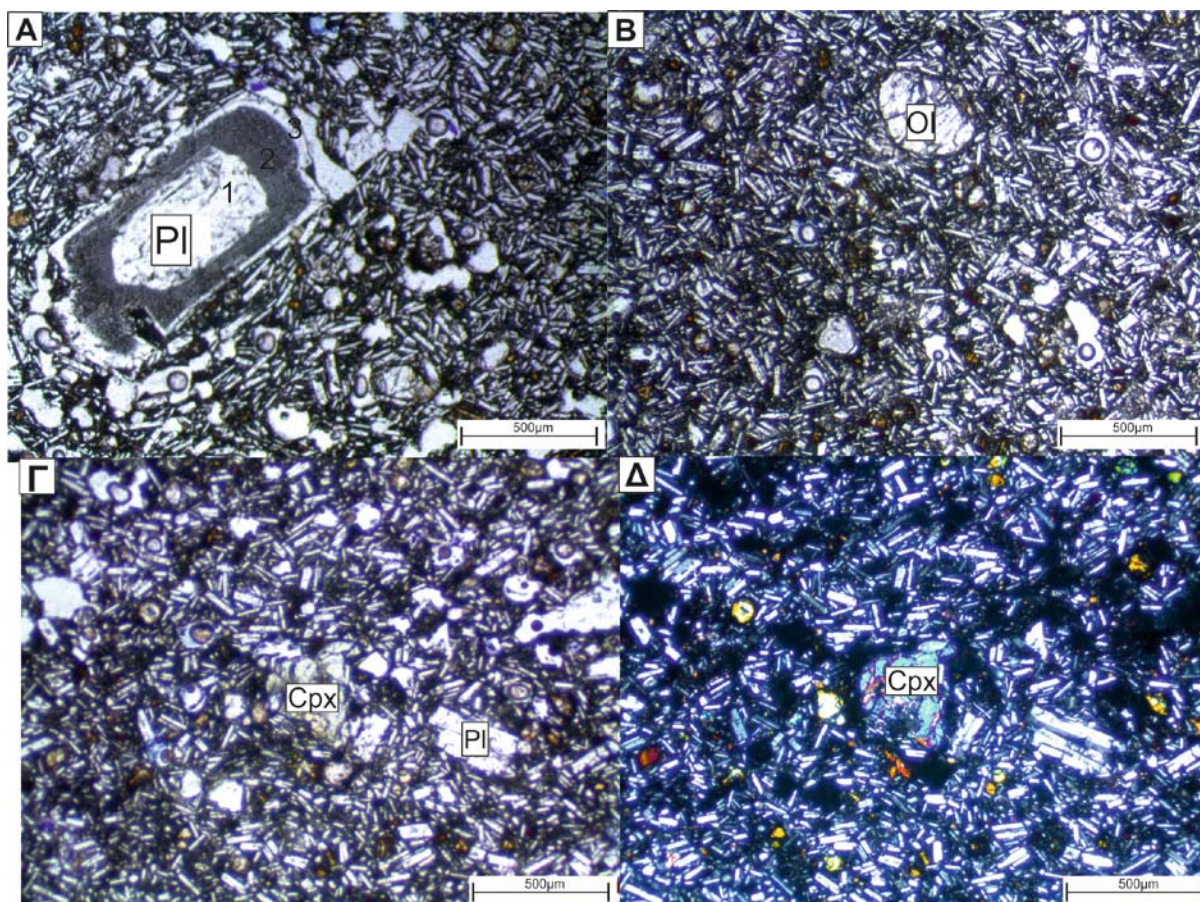
Ομάδα 3

Δείγμα San-Bal-4B



Εικόνα 3.8 Στο δείγμα αυτό στο, κέντρο της τομής τα πλαγιόκλαστα είναι τοποθετημένα προς μία κατεύθυνση προς τα δεξιά. Απαντώνται δύο διαφορετικά μεγέθη ολιβινών μεγάλοι φαινοκρύσταλλοι και μικρότεροι μέσα στην κύρια μάζα. Η κύρια μάζα αποτελείται κυρίως από πλαγιόκλαστα αλλά μπορούμε να δούμε και μεγάλους κρυστάλλους πλαγιοκλάστων σε κάποια σημεία της τομής. Το πορώδες είναι περίπου στο 15%.

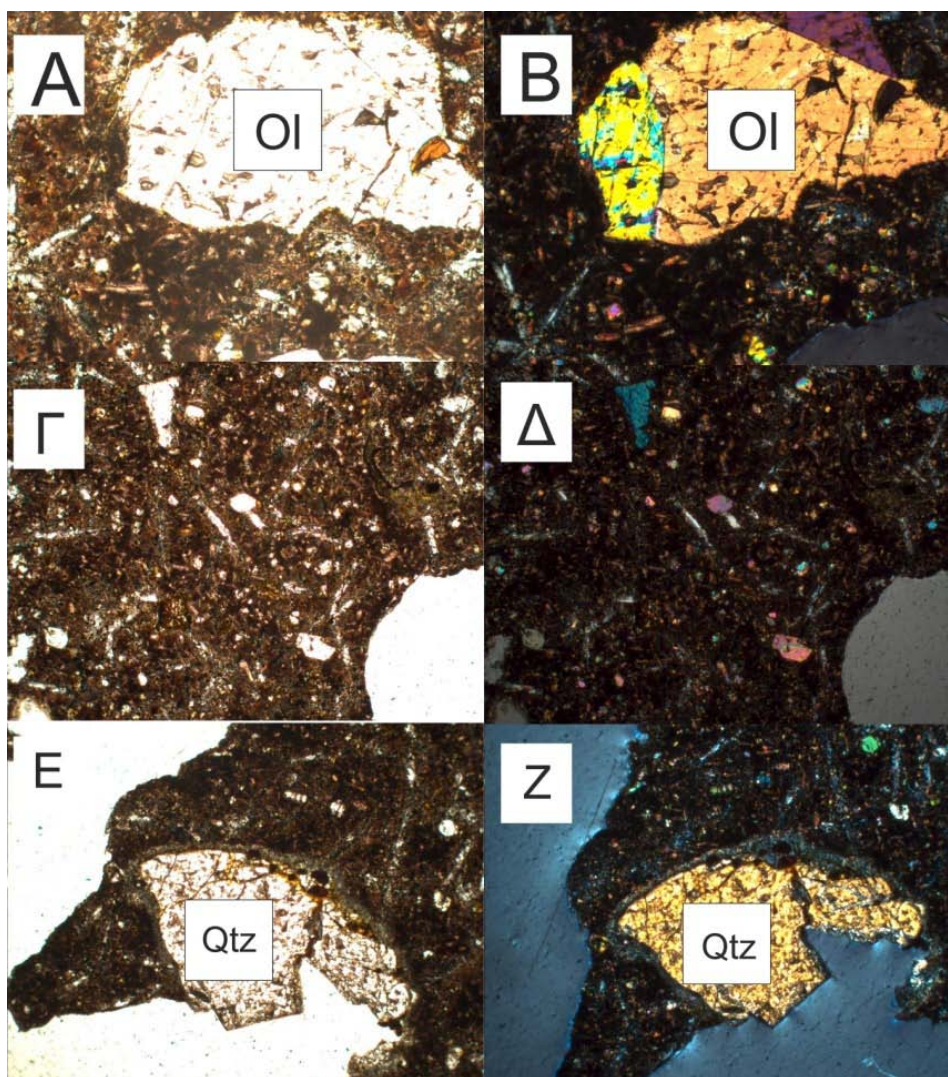
Δείγμα San-Bal-5



Εικόνα 3.9 Το San-Bal-5 είναι το μόνο από τα εξεταζόμενα δείγματα στο οποίο όλα τα επουσιώδη ορυκτά (ολιβίνη, πλαγιόκλαστα, πυρόξενοι), εμφανίζονται τόσο σαν φαινοκρύσταλλοι όσο και στην κύρια μάζα. Οι φαινοκρύσταλλοι των ολιβίνη και πυροξένων έχουν μέγεθος $>600 \mu\text{m}$ (σε διάμετρο). Ορισμένα πλαγιόκλαστα εμφανίζονται ως φαινοκρύσταλλοι με το μέγεθος τους να ξεπερνάει το 1mm και παρουσιάζουν ιδιαίτερη ζώνωση. Χαρακτηριστικό είναι ότι το πλαγιόκλαστο παρουσιάζει τρεις ζώνες. Τα πλαγιόκλαστα στην κύρια μάζα εμφανίζονται με την μορφή λεπτών πρισματικών κρυστάλλων, τα οποία όμως δεν φαίνεται να έχουν κάποιο συγκεκριμένη ροή, με τον προσανατολισμό τους να είναι ακανόνιστος. Οι πόροι είναι σε ποσοστό περίπου 20%.

Δείγμα 09SJ15 (ISAR)

Το δείγμα ISAR 09SJ15 (προέλευση Νορβηγία) έχει χαρακτηριστεί ως βασάλτης ανάλογος του κρατήρα Gusev του Άρη (Bost et al. 2013). Περιέχει υπιδιόμορφους φαινοκρυστάλλους ολιβίνη. Η κύρια μάζα αποτελείται από μικροπρισματικούς κρυστάλλους πλαγιοκλάστων (<100μm σε διάμετρο), μικρο-φαινοκρυστάλλους ολιβίνη, πυροξένων και γυαλί, ενώ απαντώνται και κρύσταλλοι χαλαζία ως ξενοκρύσταλλοι. Ο ιστός χαρακτηρίζεται ως πορφυριτικός ενώ η υφή είναι σκωριώδης με το πορώδες να φθάνει στο 20%. Οι πυρόξενοι εμφανίζονται με την μορφή υπιδιόμορφων κρυστάλλων. Τα πλαγιόκλαστα εμφανίζονται ως επιμήκεις πρισματικοί μικροκρύσταλλοι ενώ δεν παρουσιάζουν κάποια διδυμία. Κρύσταλλοι χαλαζία εμφανίζονται ως ξενοκρύσταλλοι, ενώ ως επουσιώδη ορυκτά είναι ο μαγνητίτης και το κλινόχλωρο.

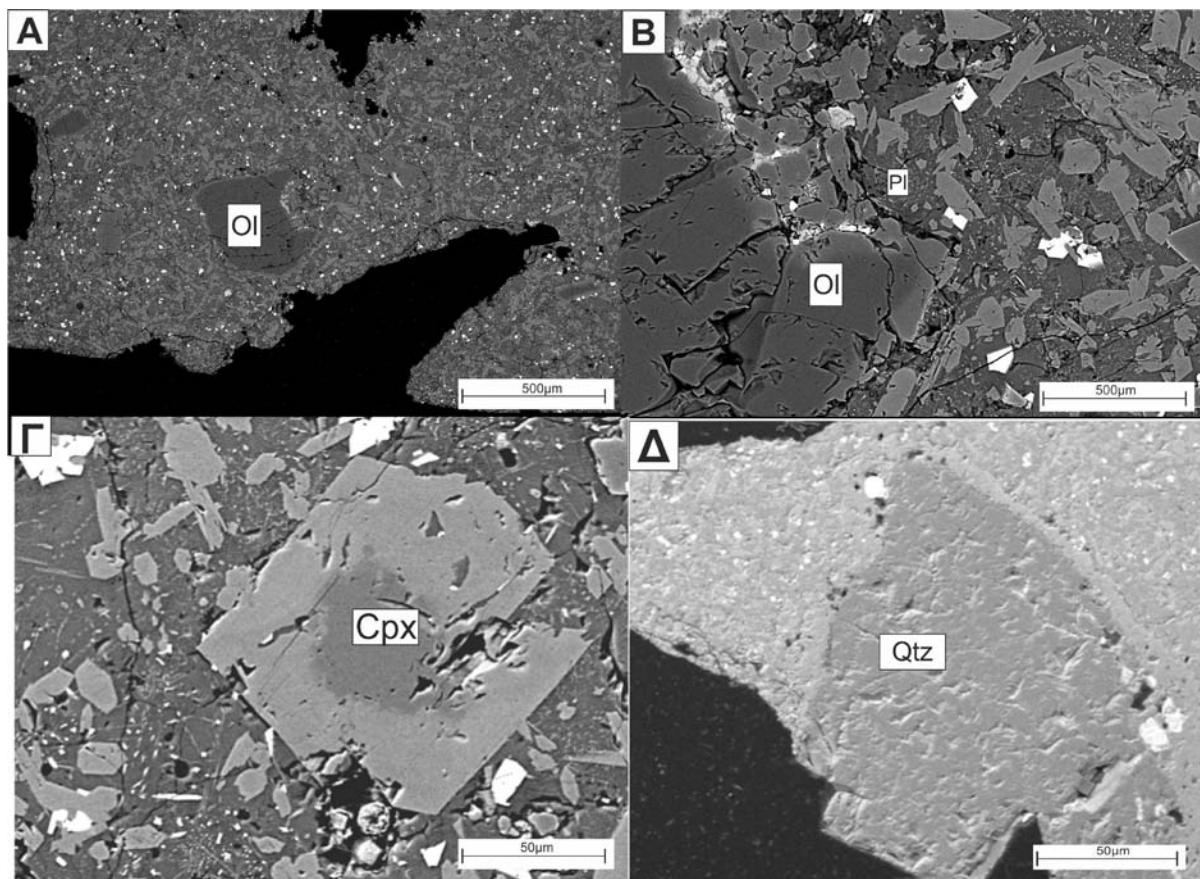


Εικόνα 3.10 Στο δείγμα 09SJ15, βλέπουμε την κύρια μάζα η οποία αποτελείται από μικροπρισματικούς κρυστάλλους πλαγιοκλάστων, ολιβίνη και πυροξένων (Γ,Δ), φαινοκρυστάλλους ολιβίνη (Α,Β) και κρυστάλλους χαλαζία που εμφανίζονται ως ξενοκρύσταλλοι (Ε,Ζ)

3.2 Αποτελέσματα μεθόδου Ηλεκτρονικού μικροσκοπίου Σάρωσης

3.2.1 Δείγματα της Σαντορίνης

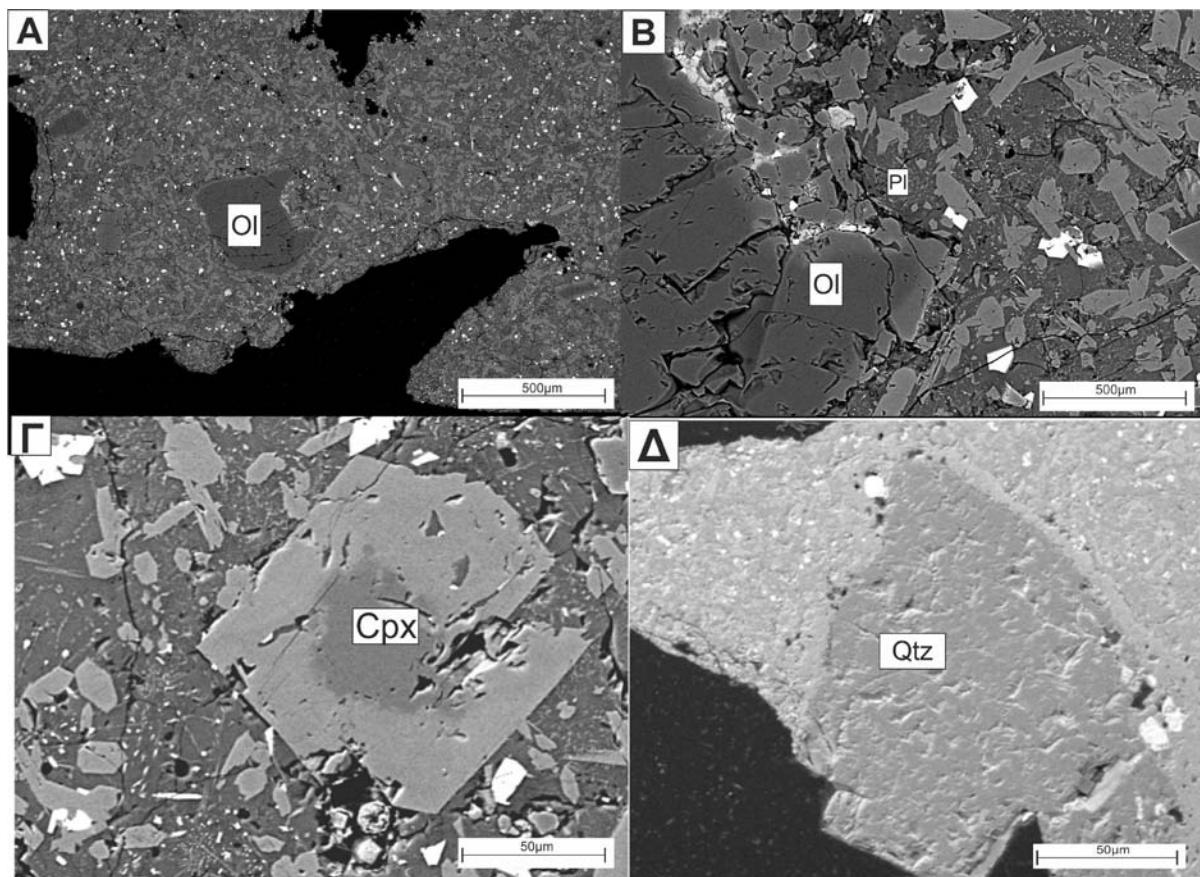
Η μέθοδος του Ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης μας επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σε επίπεδο μικρο- κλίμακας. Οι ολιβίνες εμφανίζονται και οι πυρόξενοι απαντώνται ως φαινοκρύσταλλοι και ως μικροκρύσταλλοι στην κύρια μάζα. Τα πλαγιόκλαστα απαντώνται με τη μορφή πρισματικών κρυστάλλων. Παρατηρήθηκε επίσης μικρό ποσοστό (<1%) αδιαφανών ορυκτών.



Εικόνα 3.12 Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) για τα δείγματα της Σαντορίνης. Στις εικόνες Φωτογραφίες A και Δ βλέπουμε φαινοκρυστάλλους ολιβίνη και πυροξένων στους οποίους υπoι οποίοι πατρoυσιάζoν ζώνωση (παρατηρείται μία αλλαγή του γκρι χρώματος στον κρύσταλλο από το κέντρο προ της άκρης). Η κύρια μάζα αποτελείται από ολιβίνες, πλαγιόκλαστα και πυρόξενους (A,Γ), ενώ βλέπουμε και αδιαφανή μεταλλικά ορυκτά (έντονο λευκό χρώμα) (Δ)

3.2.2 Δείγμα ISAR

Η μέθοδος του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου στο δείγμα του ISAR 09SJ15 μας επιβεβαίωσε επίσης την παρουσία φαινοκρυστάλλων ολιβίνη και πυροξένων (B, Γ). Η κύρια μάζα αποτελείται από ακανόνιστου σχήματος κρυστάλλους πλαγιокλάστου, ολιβίνη, κλινοπυρόξενο και μαγνητίτη(A), ενώ χαλαζίας βρίσκεται ως ξενοκρύσταλλοι (Δ).



Εικόνα 3.13 Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης SEM για το δείγμα του ISAR, 09SJ15.

3.3 Ορυκτοχημικές μικροανάλυσεις

Εφαρμόσαμε την μέθοδο του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) σε 4 λεπτές τομές των δειγμάτων της Σαντορίνης (San-Bal-4A, San-Bal-4B, San-Bal-2 και San-Bal-5), καθώς και σε μία ακόμη τομή του δείγματος 09SJ15 των δειγμάτων του ISAR. Με τη μέθοδο EPMA αναλύθηκαν τα δείγματα San-Bal-4A και San-Bal-4B ενώ με την μέθοδο SEM αναλύθηκαν τα δείγματα 2, 5 και 09SJ15.

3.3.1 Δείγματα Σαντορίνης

3.3.1.1 Ολιβίνης

Ο ολιβίνης εμφανίζεται σε όλα τα δείγματα, τόσο με την μορφή φαινοκρυστάλλων όσο και με την μορφή μικροκρυστάλλων. Στην τομή San-Bal-4B εμφανίζει μία διακύμανση

μεταξύ του Fo_{77} – Fo_{83} , ενώ είναι και εμφανής η ζώνωση σε αρκετούς κρυστάλλους μεταξύ του κέντρου (core) και της άκρης του κρυστάλλου. Η διαφορά στην περιεκτικότητα του μαγνησίου μεταξύ του κέντρου και της άκρης φτάνει έως και το 6 %κ.β. Στο δείγμα San-Bal-4A, ο ολιβίνης είναι πιο πλούσιος σε μαγνήσιο (Fo_{86}). Η ζώνωση διατηρείται καθώς όπως φαίνεται στην ανάλυση 1 η τιμή στο κέντρο 1c είναι Fo_{86} ενώ στην άκρη 2r είναι Fo_{84} . Στο δείγμα San-Bal-2 η περιεκτικότητα του ολιβίνης παραμένει μεταξύ του Fo_{85-83} , ενώ η ζώνωση δεν είναι τόσο εμφανής. Στο δείγμα San-Bal-5 οι ολιβίνες εμφανίζονται λιγότερο πλούσιοι σε μαγνήσιο με την περιεκτικότητα τους να κυμαίνεται μεταξύ του Fo_{74-80} στο κέντρο ενώ από Fo_{66} ως Fo_{75} στην άκρη του κρυστάλλου.

3.3.1.2 Πλαγιόκλαστα

Στο δείγμα San-Bal-4B τα πλαγιόκλαστα εμφανίζονται τόσο ως βυτοβνίτης, όσο και ως λαβραδόριο, διότι η σύσταση τους κυμαίνεται από An_{66} σε An_{78} . Υπάρχει ζώνωση η οποία μεταβάλλει την περιεκτικότητα του κρυστάλλου από το κέντρο στην άκρη του πχ το δείγμα 2c είναι λαβραδόριο με An_{66} στο κέντρο ενώ το 2r είναι An_{58} . Τα πλαγιόκλαστα στην τομή San-Bal-4A κυμαίνονται εξίσου σε παρόμοια χημική σύσταση μεταξύ An_{66} σε An_{85} , έχοντας εξίσου ζώνωση πχ το δείγμα 2c είναι An_{85} ενώ το 2r είναι An_{77} . Στις τομές 2 και 5 το πλαγιόκλαστο είναι λιγότερο μαγνησιοπλούσιο έως και An_{80} εξακολουθώντας όμως να εμφανίζεται ως λαβραδόριο και βυτοβνίτης. Παρατηρώντας εξίσου ζώνωση μεταξύ του κέντρου και της άκρης των μεγαλύτερων κρυστάλλων.

3.2.1.3 Πυρόξενοι

Οι πυρόξενοι στο δείγμα San-Bal-4B εμφανίζονται με την ορυκτολογική σύσταση $\text{En}_{44}\text{Wo}_{42}\text{Fe}_{13}$ ως $\text{En}_{52}\text{Wo}_{32}\text{Fs}_{16}$. Το ποσοστό του Ca κυμαίνεται από 16.1 έως 21 %κ.β. Το δείγμα San-Bal-4A εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση στην ορυκτολογική του σύσταση $\text{En}_{38}\text{Wo}_{48}\text{Fs}_{14}$ ως $\text{En}_{51}\text{Wo}_{33}\text{Fs}_{16}$, το Ca κυμαίνεται μεταξύ 15.8% στη μέτρηση 1c έως και 25.8 %κ.β. στη μέτρηση 4c. Στο δείγμα San-Bal-5 η ορυκτολογική κυμαίνεται μεταξύ $\text{En}_{47}\text{Wo}_{37}\text{Fs}_{20}$ ως και $\text{En}_{41}\text{Wo}_{38}\text{Fs}_{12}$. Το Ca κυμαίνεται από 16.1 %κ.β. στην ανάλυση 2c έως και 18.3 %κ.β. στην ανάλυση 3c. Στο δείγμα San-Bal-2 η σύσταση κυμαίνεται μεταξύ $\text{En}_{45}\text{Wo}_{33}\text{Fs}_{12}$ και $\text{En}_{51}\text{Wo}_{37}\text{Fs}_{12}$. Επομένως εμφανίζονται κυρίως ως αυγίτες και διοψίδιος. Η ζώνωση είναι εμφανής στα δείγματα San-Bal-2 και San-Bal-5. επίσης, στο δείγμα San-Bal-2 υπάρχει μία διαφορά μεταξύ της μέτρησης 1c και 1r με En_{50} και En_{45} αντίστοιχα. Ενώ στο δείγμα San-Bal-5 στις μετρήσεις 3c και 3r με En_{51} και En_{45} αντίστοιχα.

3.3.2 Αποτελέσματα ISAR 09SJ15

Στο δείγμα 09SJ15 η χημική σύσταση των ολιβινών κυμαίνεται μεταξύ Fo_{82} και Fo_{90} . Η ζώνωση είναι εμφανής σε σχεδόν όλες τις μετρήσεις και ειδικά στην μέτρηση 2 όπου η τιμή μεταξύ του κέντρου 2c και της άκρης 2r είναι Fo_{90} και Fo_{84} αντίστοιχα, όπως και στην μέτρηση 7 όπου η τιμή στο κέντρο 7c είναι Fo_{89} και στην άκρη 7r είναι Fo_{83} , ενώ η τιμή του μαγνησίου κυμαίνεται από 42.8% ως 49.8% στα κέντρα core των κρυστάλλων. Τα πλαγιόκλαστα αναλύθηκαν όσον αφορά την χημική τους σύσταση από An_{40} έως An_{52} . Αυτό σημαίνει πως εμφανίζονται ως ανδεσίνης και λαβραδόριο, ενώ η τιμή του ασβεστίου κυμαίνεται μεταξύ του 7.6% στη μέτρηση 2c και 10% στην μέτρηση 10. Οι πυρόξενοι παρουσιάζουν μια διακύμανση στη χημική τους σύσταση από $\text{En}_{32}\text{Wo}_{48}\text{Fs}_{20}$ έως $\text{En}_{41}\text{Wo}_{47}\text{Fs}_{13}$, που σημαίνει πως εμφανίζεται κυρίως ως αυγίτης. Ως επουσιώδη αδιαφανή ορυκτά απαντούν ο μαγνητίτης και ο ιλμενίτης.

Πίνακας 3.1 Χημική σύσταση ολιβινών από τα δείγματα της Σαντορίνης

Οξείδια(σε κ.β.%)	1c	2c	2r	3c	3r	1r	1c	2c	3c	1c	1r	2c	3r	4c	4r	1c	1r	2c	2r
SiO₂	40,5	40,2	39,7	40,0	40,0	41,0	40,4	41,4	39,5	40,4	39,8	40,5	41,1	40,1	39,8	38,8	38,5	39,3	38,8
TiO₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al₂O₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeO	15,2	15,7	20,2	16,0	18,0	15,0	12,8	13,6	15,1	13,5	14,7	13,3	13,9	16,2	17,0	23,5	-	18,6	23,5
Mno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	44,3	44	40,1	43,0	42,0	44,0	46,8	44,9	45,3	46,1	45,4	46,2	45,0	43,6	43,2	37,7	32,3	42,0	37,7
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na₂O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σύνολο	100,0	99,9	100	99,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,9	100	99,9	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0
Ακραία μέλη	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fo	83	83	77	82	80	84	86	85	84	86	84	86	85	83	82	74	66	80	75
Fa	17	17	23	18	20	16	14	15	16	14	16	14	15	17	18	26	34	20	25
Κατιόντα	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Si⁴⁺	1,519	1,014	1,024	1,02	1,02	1	1,001	1,038	1,01	1,007	1,003	1,008	1,029	0,964	1,008	1,02	1,039	1,004	1,015
Cr³⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe³⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe²⁺	0,32	0,331	0,435	0,34	0,384	0,3	0,267	0,285	0,3	0,281	0,302	0,277	0,291	0,393	0,36	0,52	0,66	0,397	0,514
Mn²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg²⁺	1,161	1,655	1,541	1,64	1,596	1,7	1,732	1,677	1,69	1,712	1,695	1,715	1,68	1,643	1,632	1,46	1,301	1,599	1,471
Ca²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
c = κέντρο του κρυστάλλου, r= άκρη του κρυστάλλου																			

Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση πυροξένων

Οξειδία(σε κ.β.%)	San-Bal-4B												5											
	4A						2																	
	1c	1int	1r	2r	3c	3r	1c	1r	2c	3c	3r	4c	4r	1c	1r	2c	2r	3c	3r	1c	1r	2c	2r	3c
SiO ₂																								
TiO ₂	50,2	51,4	50,2	51,9	53,9	54	54,1	53,3	46,7	44,3	45	45,3	46,8	51,02	51,8	52,1	52,6	53,4	50,9	54,2	53	52,7	53,5	53,4
Al ₂ O ₃	4,8	3,88	4,77	2,65	1,93	3,3	2,08	2,71	1,52	3,7	2,91	1,64	1,67	3,39	2,25	2,73	1,56	1,31	3,45	2,52	6	3	3,2	1,48
FeO	8,4	8,52	8,37	11,7	10	9,3	10,1	9,91	6,8	7,1	7,77	10,1	5,83	8,09	13	12	6	8	13	6,63	6,8	11,3	10,4	7,19
MgO	15,7	16,2	15,8	15,9	18,9	17	17,8	18	18,9	27,5	26,8	15,7	19,5	16,5	14,8	16	16,7	18,8	15,7	17,9	14,8	17,2	17,5	19,6
CaO	21	20,1	21	17,8	16,1	17	15,8	14,9	26,01	17,3	17,6	27,3	26,2	20	18,5	16,1	21,1	18,3	16,7	18,8	19,3	15,76	15,4	18,3
Σύνολο	100,1	100,1	100,1	100	100,83	100	99,88	98,82	99,93	99,9	100,1	100,04	100	99,93	100,35	98,9	98,96	99,81	99,75	100,05	99,9	99,96	100	99,97
Ακραία	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
μέλη	44	45	45	45	52	50	51	51	45	42	43	38	47	46	41	47	43	51	44	50	45	49	51	53
En	42	40	36	16	32	35	33	33	45	48	47	48	45	40	37	33	37	37	34	40	43	33	32	36
Wo	13	13	18	28	16	15	16	16	10	19	10	14	8	12	20	20	20	12	20	10	12	18	17	11
Fs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Κατιόντα																								
Si ⁴⁺	1,846	1,892	1,844	1,93	1,961	2	1,995	1,982	1,695	0,694	1,583	1,814	1,69	1,881	1,933	1,96	1,967	1,955	1,9	1,979	1,967	1,948	1,971	1,942
Ti ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,026	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ³⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ²⁺	0,208	0,165	0,207	0,12	0,083	0,1	0,09	0,119	0,065	0,206	0,121	0,077	0,071	0,147	0,099	0,12	0,069	0,057	0,152	0,108	0,261	0,131	0,139	0,063
Mg ²⁺	0,158	0,21	0,167	0,36	0,304	0,3	0,312	0,308	0,545	0,281	0,714	0,295	0,525	0,525	0,525	0,53	0,525	0,034	0,047	0,047	0,047	0,047	0,139	0,052
Ca ²⁺	0,861	0,889	0,865	0,88	1,025	0,9	0,979	0,998	1,023	1,042	1,405	0,937	1,05	0,907	0,823	0,9	0,931	1,026	0,874	0,974	0,813	0,948	0,961	1,063
Na ²⁺	0,827	0,793	0,827	0,71	0,627	0,7	0,624	0,594	1,011	0,877	0,663	1,171	1,014	0,79	0,74	0,65	0,845	0,718	0,668	0,736	0,762	0,624	0,608	0,713
c = κέντρο του κρυστάλλου. r= άκρη του κρυστάλλου																								

SiO₂	51,7	52	56	53,4	50,1	50	53,6	50,3	49,8	50,1	53,3	50,5	50,8	50	53,3	50,8	55,1	52,8	52	53,3	48,9	51,9	50,7	50
Al₂O₃	30,5	30,1	26	29,7	31,7	32	29	31,1	32,2	31,9	30,1	31,3	31	31,6	29,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30,5	28	30	30,8	29,5	32,5	29,2	31,3	32
Mno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	15,3	15,1	13	13,2	16	16	13,5	16,9	15,2	15,5	14,3	15,6	15,5	15,7	14,4	15,9	12,5	13	13,3	12,7	16,4	13,8	15,5	15,6
Na₂O	2,5	2,9	5	3,7	2,2	2,9	3,9	1,73	2,59	2,57	3,24	2,5	2,69	2,72	3,36	2,81	4,25	4,21	3,91	4,53	2,13	3,64	2,44	2,22
Σύνολο	100	100,1	100	100	100	100	100	100,03	99,79	100,1	100,9	99,9	99,99	100,02	100,96	100	99,85	100,01	100,01	100,03	99,93	98,54	99,94	99,82

Πίνακας 3.3Χημική σύσταση πλαγιокλάστων από τα δείγματα της Σαντορίνης

Οξείδια(σε κ.β.%)	1c	1r	2c	2r	3c	3r	4c	4r	5c	5r	6c	7c	7r	8c	8r
SiO ₂	38,83	38,14	41,9	39,9	41,05	40,3	39,1	40,4	42	42,8	41,9	39,8	41,6	38,8	40
TiO ₂	0,31	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeO	16,71	17,8	8,91	15,1	9,04	9,44	11,4	11,5	8,9	8,5	15,3	10,4	15,9	16	17
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	42,8	41,78	49,19	44,95	49,8	48,6	49,4	48,1	49,1	48,7	42,8	49,8	42,6	45,2	43
CaO	0,31	0,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O		0,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σύνολο	98,96	98,51	100	99,95	99,89	98,34	99,9	100	100	100	100	100	100,1	100	100
Ακραία μέλη															
Fo	81	80	90	84	90	90	88	88	91	91	83	89	83	83	82
Fa	19	20	10	16	10	10	12	12	9	9	17	11	17	17	18
Κατιόντα															
Si ⁴⁺	1,002	0,987	1,02	1,001	1,002	1,005	0,959	0,996	1,027	1,048	1,061	0,973	1,054	0,974	1,014
Cr ³⁺	0,006	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ³⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ²⁺	0,361	0,385	0,181	0,317	0,185	0,197	0,233	0,237	0,182	0,174	0,324	0,212	0,337	0,236	0,36
Mn ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg ²⁺	1,623	1,612	1,785	1,682	1,813	1,799	1,807	1,767	1,799	1,778	1,615	1,815	1,609	1,691	1,625
Ca ²⁺	0,009	0,015													
c = κέντρο του κρυστάλλου. r= άκρη του κρυστάλλου															

Πίνακας 3.5 Χημική σύσταση πλαγιοκλάστων του δείγματος 09SJ15

Οξειδία(σε κ.β.%)	2c	2r	3c	3r	4c	5	6	7	8c	8r	9c	10
SiO ₂	59,6	59,4	57,8	59,1	59,8	58,9	57,6	56,1	56,5	55,3	59,6	59,8
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	26,6	25	27,2	26,7	25,7	26,4	27,7	28,6	27,5	28,7	25,8	22,8
FeO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	7,6	8,1	8,4	7,9	8,1	9,7	10	9,7	10,3	10,7	8,6	12
Na ₂ O	6,2	7,4	6,5	6,2	6,3	5	4,5	5,5	5,5	5,2	5,8	5,3
Σύνολο	100	99,9	99,9	99,9	99,9	100	99,8	99,9	99,8	99,9	99,8	99,9
Ακραία μέλη												
An	40	38	42	41	42	52	55	50	51	53	45	56
Ab	60	62	58	59	58	48	45	50	49	47	55	44
Κατιόντα												
Si ⁴⁺	2,682	2,654	2,593	2,661	2,694	2,675	2,626	2,53	2,554	2,498	2,698	2,723
Ti ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ³⁺	1,411	1,317	1,436	1,417	1,365	1,413	1,488	1,52	1,465	1,528	1,376	1,224
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca ²⁺	0,366	0,388	0,404	0,387	0,391	0,472	0,488	0,469	0,498	0,518	0,417	0,585
Na ²⁺	0,541	0,641	0,565	0,541	0,55	0,44	0,398	0,481	0,482	0,455	0,509	0,468
c = κέντρο του κρυστάλλου. r= άκρη του κρυστάλλου												

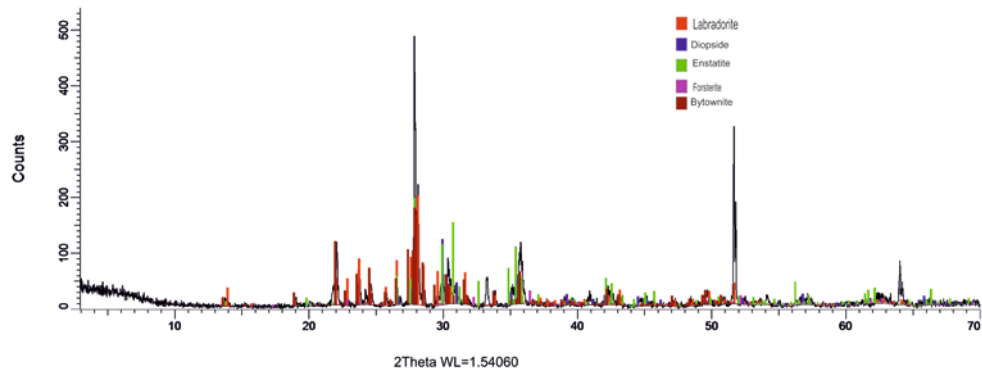
3.4 Εφαρμογή της μεθόδου XRD

Η μέθοδος της περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD) εφαρμόστηκε στα τέσσερα δείγματα τα οποία δανειστήκαμε από το ISAR (09SJ15,05IS02,05IS03 και 07ZA20), όπως και στα δείγματα της Σαντορίνης (San-Bal-2, San-Bal-3, San-Bal-4A, San-Bal-4B, San-Bal-5 San-Bal-6, San-Bal-7, San-Bal-8, San-Bal-9). Στο δείγμα 05IS02 απαντάται φορστερίτης, λαβραδορίτης, ανορθίτης, διοψίδιος και χαλαζίας (βλxx). Στο δείγμα 05IS03 απαντάται λαβραδορίτης, βυτοβνίτης, διοψίδιος, πιγεονίτης, ανδεδίνης και ολιγόκλαστο. Στο δείγμα 09SJ15 φορστερίτης, λαβραδορίτης Αυγίτης, διοψίδιος και ιλίτης (βλxx). Τέλος στο δείγμα 07ZA20 υπάρχει ανορθίτης, αυγίτης, χαλαζίας, κλινόχλωρο και Ακτινόλιθος. Σύμφωνα με τις παραπάνω αναλύσεις των δειγμάτων του ISAR τα κύρια ορυκτά τα οποία εμφανίζονται είναι ο ολιβίνης (φορστερίτης), πυρόξενοι (αυγίτης, διοψίδιος) και πλαγιόκλαστα (Ααδεδίνης, λαβραδορίο, βυτοβνίτης και ανορθίτης).

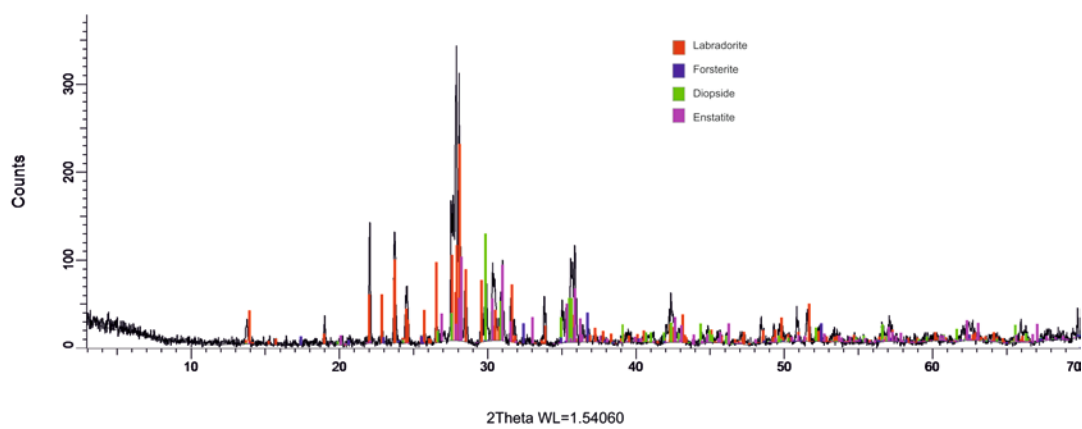
Η μέθοδος επιβεβαιώνει ότι τα πετρώματα της Σαντορίνης είναι μη εξαλλοιωμένα, με τα κύρια ορυκτά να είναι ο Ολιβίνης ,το Πλαγιόκλαστο και οι Πυρόξενοι. Πιο αναλυτικά, εμφανίζεται φορστερίτης σε όλα τα δείγματα (San-Bal-2, San-Bal-3, San-Bal-4A, San-Bal-4B, San-Bal-5, San-Bal-6, San-Bal-7, San-Bal-8, San-Bal-9). Όσον αφορά τα πλαγιόκλαστα, λαβραδόριο απαντάται στα δείγματα San-Bal-2, San-Bal-3, San-Bal-5, San-Bal-7, San-Bal-8, San-Bal-9), βυτοβνίτης στα δείγματα San-Bal-2, San-Bal-3, San-Bal-4B, San-Bal-6, San-Bal-7), ενώ ανορθίτης στο δείγμα San-Bal-4A. Οι πυρόξενοι εμφανίζονται ως αυγίτης στα δείγματα San-Bal-4A, San-Bal-4B, San-Bal-6, San-Bal-7 San-Bal-1, San-Bal-9 και ως διοψίδιος στα δείγματα San-Bal-2 και San-Bal-3).

Πίνακας 3.7 Πίνακας αποτελεσμάτων μεθόδου XRD

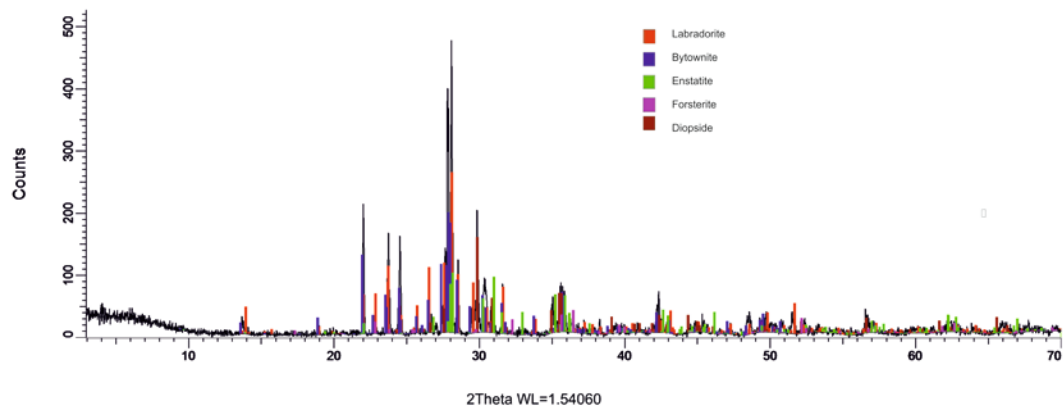
Δείγματα	Φορστερίτης	Λαβραδορίτης	Βυτοβνίτης	Ανορθίτης	Αυγίτης	Ενστατίτης	Διοψίδιος	Χαλαζίας
05IS02	NAI	NAI	-	NAI	-	-	NAI	NAI
05IS03	-	NAI	-	-	-	-	NAI	-
09SJ15	NAI	NAI	-	-	NAI	-	NAI	-
07ZA20	-	-	-	NAI	NAI	-	-	NAI
San-Bal-2	NAI	NAI	NAI	-	-	NAI	NAI	-
San-Bal-3	NAI	NAI	NAI	-	-	NAI	NAI	-
San-Bal-4A	NAI	-	-	NAI	NAI	NAI	-	-
San-Bal-4B	NAI	-	NAI	-	NAI	NAI	-	-
San-Bal-5	NAI	NAI	-	-	-	NAI	-	-
San-Bal-6	NAI	-	NAI	-	NAI	NAI	-	-
San-Bal-7	NAI	NAI	NAI	-	NAI	-	-	-
San-Bal-8	NAI	NAI	-	-	-	NAI	-	-
San-Bal-9	NAI	NAI	-	-	NAI	-	-	-



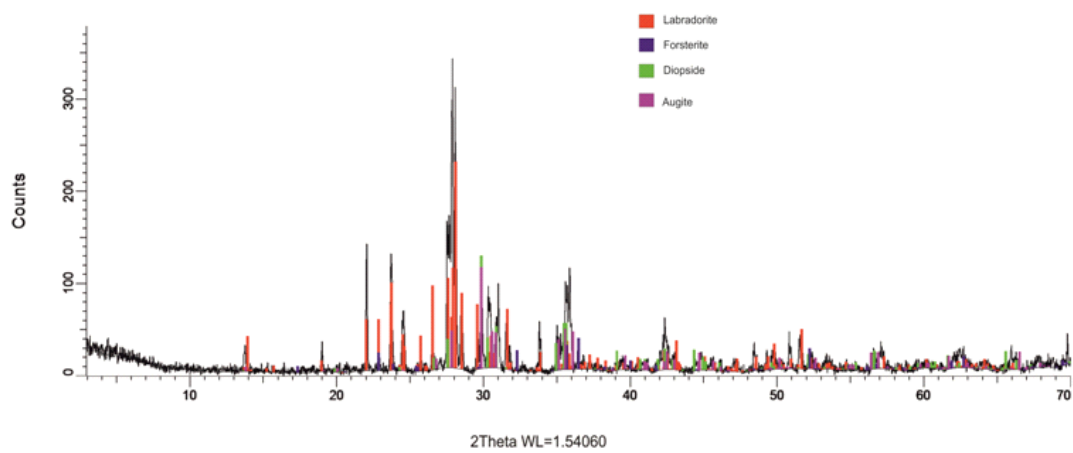
Διάγραμμα 3.1 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-1



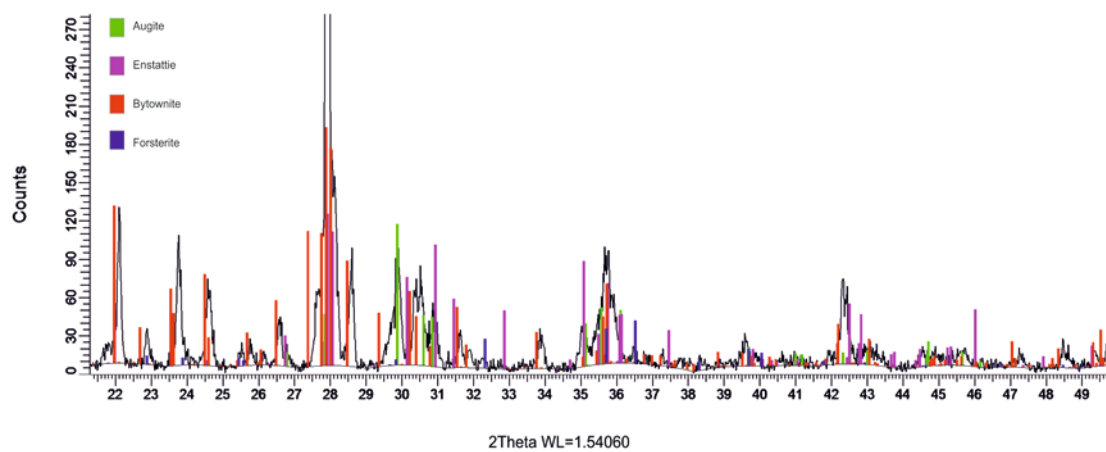
Διάγραμμα 3.2 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-2



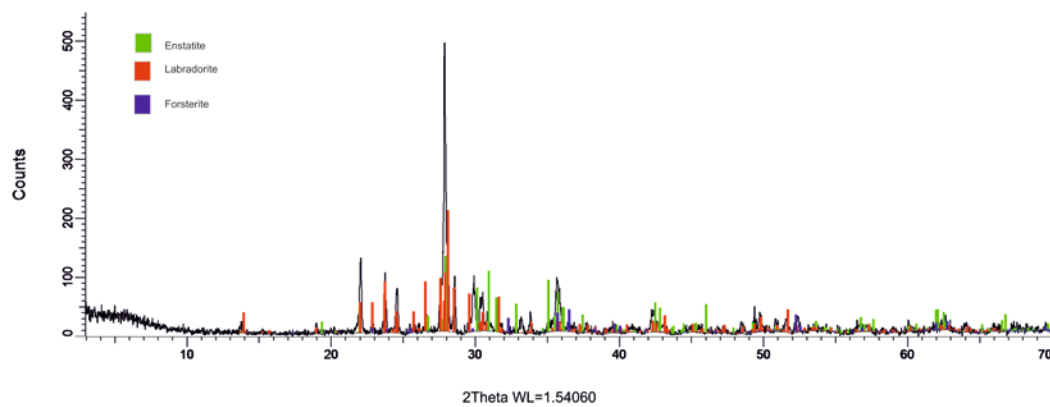
Διάγραμμα 3.3 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-3A



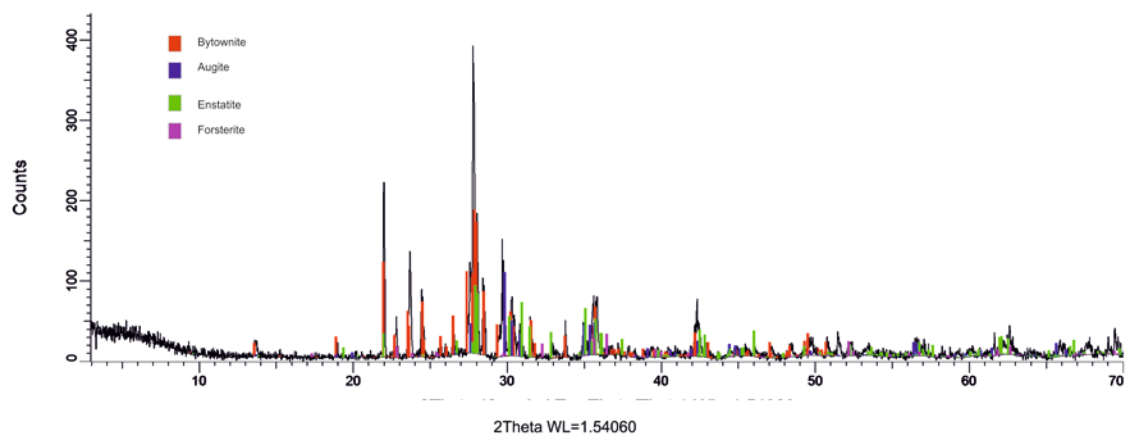
Διάγραμμα 3.4 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-3B



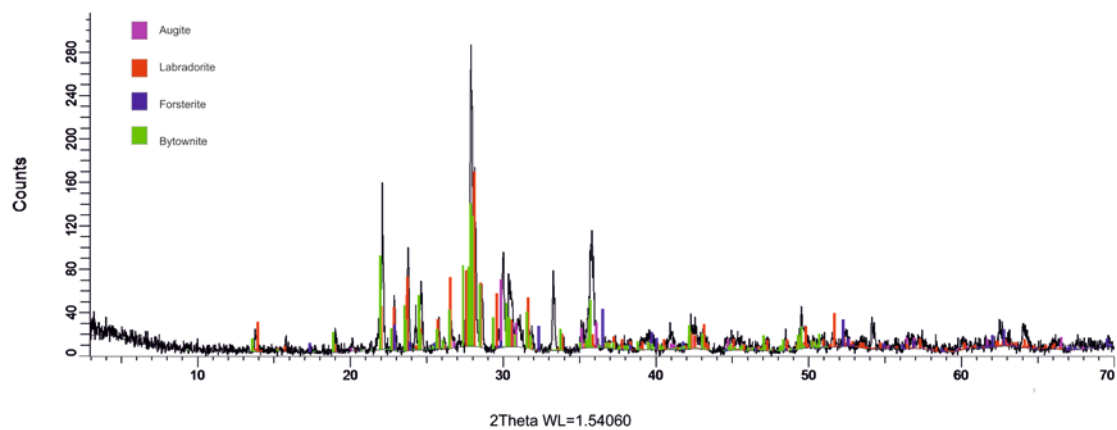
Διάγραμμα 3.5 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-4B



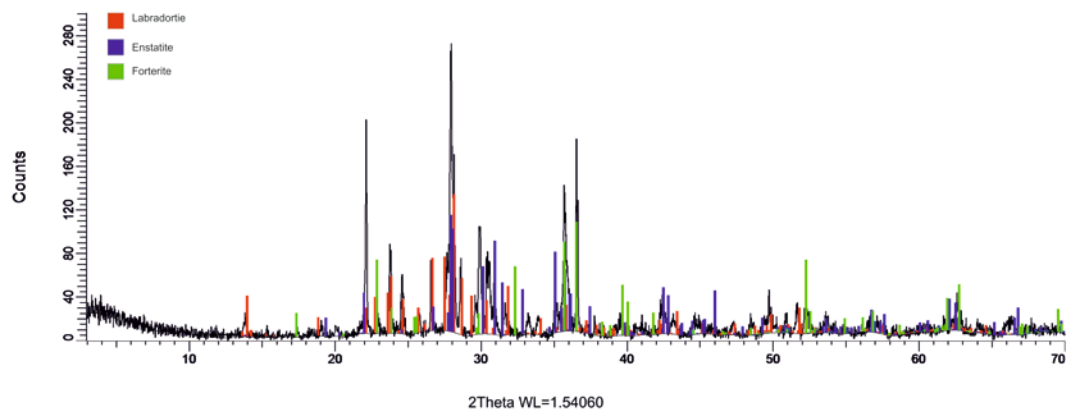
Διάγραμμα 3.6 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-5



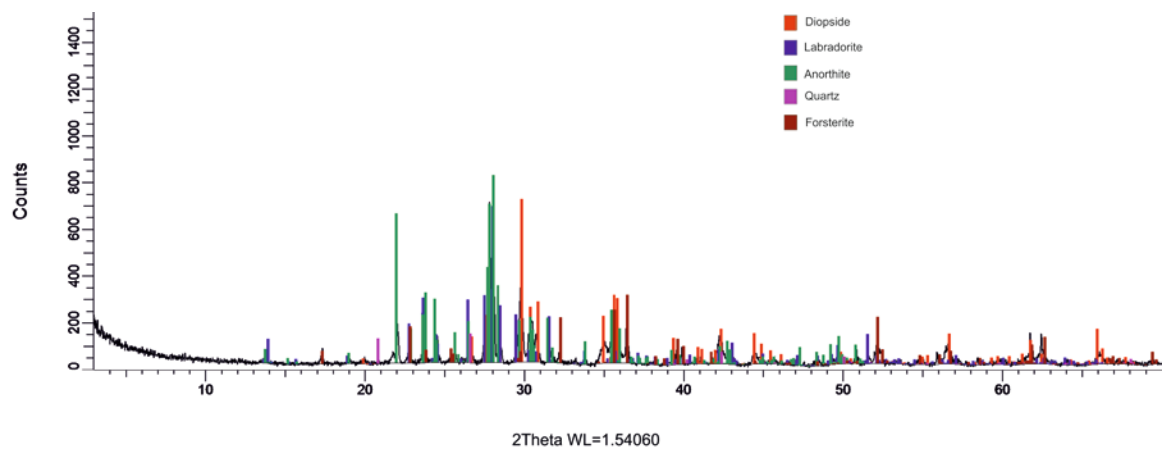
Διάγραμμα 3.7 Αποτελέσματα XRD San-Bal-6



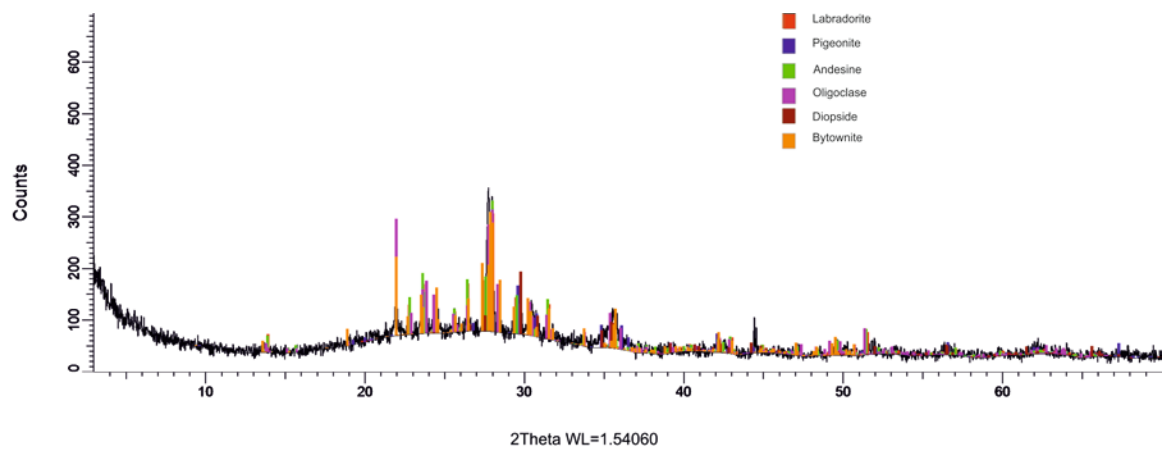
Διάγραμμα 3.9 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-7



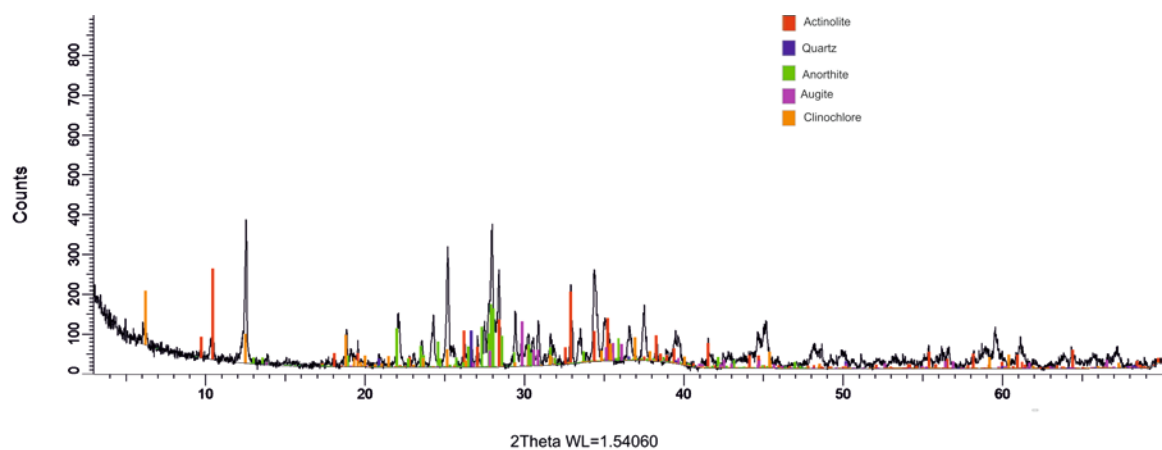
Διάγραμμα 3.10 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα San-Bal-8



Διάγραμμα 3.11 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα 05IS02



Διάγραμμα 3.12 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα 05IS03



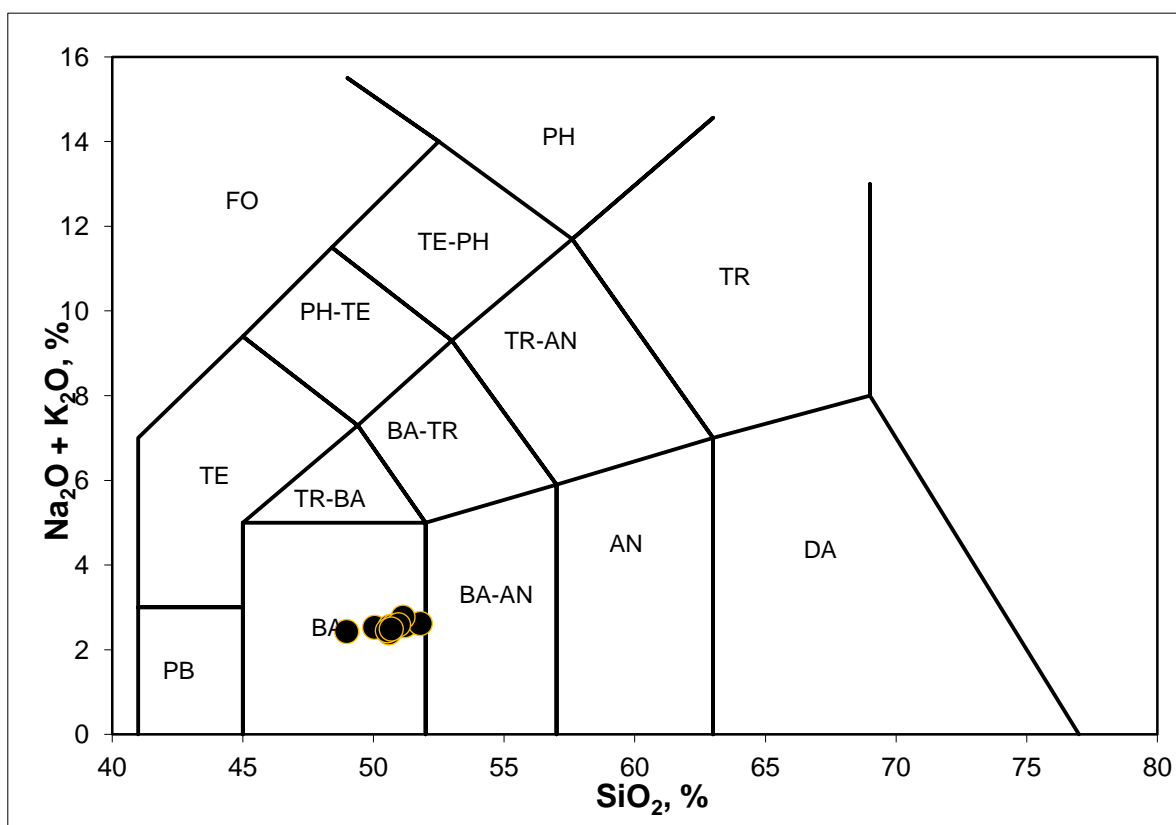
Διάγραμμα 3.13 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα 07ZA20

Πίνακας 3.8 Χημική σύσταση οξειδίων των δειγμάτων της Σαντορίνης														
Δείγμα														
San-Bal-	2	3A	3B	4A	4B	5	6	7A	7B	8A	8B	9A	9b	
Counts	SiO ₂	50,6	50	49	51	51,2	51,8	50,9	51,1	50,6	50,8	51	50,5	50,7
	TiO ₂	0,82	0,9	0,81	0,85	0,85	0,86	0,81	0,85	0,83	0,84	0,84	0,82	0,83
	Al ₂ O ₃	18,1	18,4	18,7	18,1	18,3	18,5	18,3	18,1	18,5	18,1	18,1	18,2	18
	Fe ₂ O ₃	8,84	9,28	8,28	8,93	9	9,08	8,95	8,96	8,73	8,97	8,94	8,15	8,84
	MnO	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	MgO	6,27	5,93	6,12	6,1	6,13	5,89	6,22	5,39	6,24	6,25	6,13	6,35	5,97
	CaO	11,1	10,8	10,6	10,8	10,8	10,8	10,9	10,7	10,6	10,7	10,7	10,8	10,7
	Na ₂ O	1,98	2,07	2,06	2,15	2,15	2,14	2,16	2,24	2,14	2,12	2,14	2,04	2,03
	K ₂ O	0,42	0,46	0,37	0,41	0,42	0,48	0,42	0,53	0,41	0,44	0,45	0,41	0,46
	P ₂ O ₅	0,09	0,1	0,08	0,1	0,1	0,1	0,09	0,09	0,1	0,1	0,1	0,09	0,1

Διάγραμμα 3.14 Αποτελέσματα XRD για το δείγμα 09SJ15

3.5 Αποτελέσματα της μεθόδου φθορισμετρίας ακτίνων X

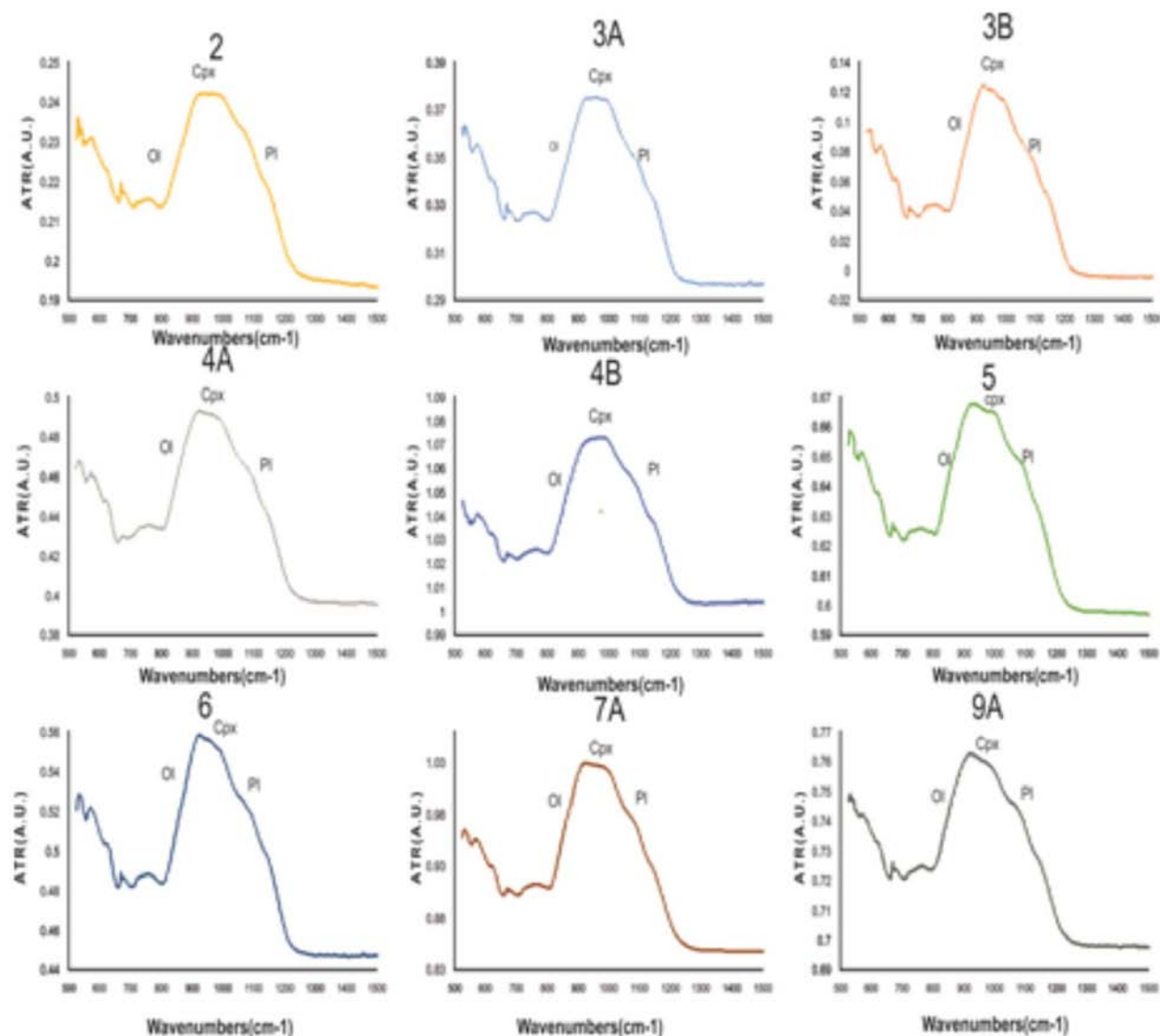
Εφαρμόστηκε η μέθοδος φθορισμετρίας ακτίνων X (XRF) στα δείγματα της Σαντορίνης San-Bal-1, San-Bal-2, San-Bal-3A, San-Bal-3B, San-Bal-4B, San-Bal-4A, San-Bal-5, San-Bal-6, San-Bal-7A, San-Bal-7B, San-Bal-8A, San-Bal 9A και San-Bal-9B. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το SiO₂ κυμαίνεται από 49 έως 51.2 %κ.β., το CaO από 10.6 έως 11.1% κ.β., το FeO από 8.28 έως 9.08 % κ.β., το MgO 5.89 έως 6.35% κ.β. ενώ το Na₂O από 1.98 έως 2.24 % κ.β.. Τα υπόλοιπα οξείδια P₂O₅, MnO, TiO₂, K₂O εμφανίζουν τιμές <1 % κ.β.. Προβάλλοντας τα δεδομένα στο διάγραμμα TAS (Total Alkali Silica), επιβεβαιώνεται η βασαλτική σύσταση των δειγμάτων.



Διάγραμμα 3.15 Διάγραμμα TAS για τα δείγματα της Σαντορίνης. Όπως φαίνεται όλα τα δείγματα της Σαντορίνης προβάλλοντας τα ως $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)$ ανήκουν στο πεδίο των βασαλτών.

3.6 Αποτελέσματα μεθόδου FTIR-IR ATR

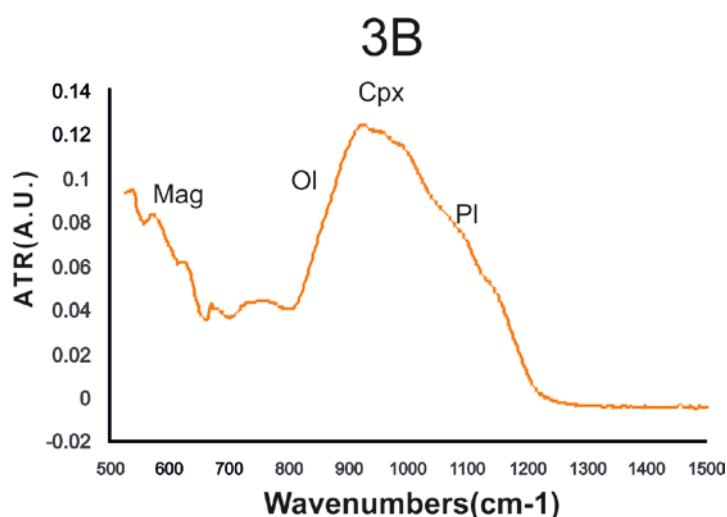
Κατά την διάρκεια του πειράματος μετρήσαμε τις κύριες ζώνες απορρόφησης IR-ATR για τα δείγματα ISAR (05IS02-1,05IS02-1,09SJ15-7,07ZA20-1), και της Σαντορίνης (San-Bal-2, San-Bal-3 ,San-Bal-4A, San-Bal-4B, San-Bal-5, San-Bal-6, San-Bal-7, San-Bal-9A). Η ταυτοποίηση των κορυφών του φάσματος με τα αντίστοιχα ορυκτά έγινε μέσω της βάσης δεδομένων RRUFF. Η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε με το πρόγραμμα Fityk ver. 0.9.8 εφαρμόζοντας τη συνάρτηση LongNormal.



Διάγραμμα 3.16 Διαγράμματα μεθόδου IR-ATR για τα δείγματα της Σαντορίνης. Για λόγους απλοποίησης του κάθε διαγράμματος, έχει αφαιρεθεί το συνθετικό San-Bal- από το όνομα του κάθε δείγματος της Σαντορίνης.

Δείγμα San-Bal-3B

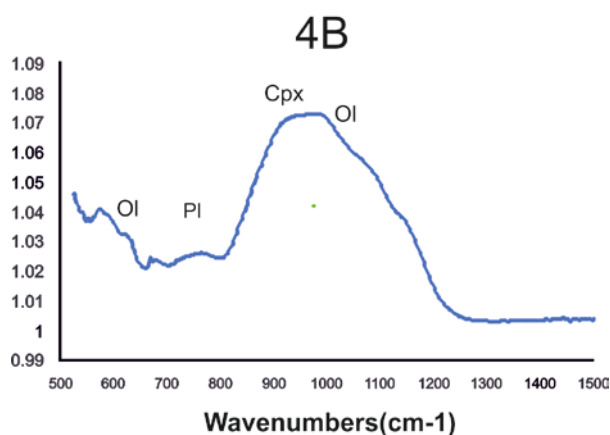
Σύμφωνα με την σύγκριση μπορούμε να δούμε την κορυφή στο 1115 σημείο του οριζόντιου άξονα να ταυτίζεται με την κορυφή του ανορθίτη (Pl), όπως οι κορυφές στα σημεία 1009 και 575 αντίστοιχα. Στις κορυφές τα σημεία του οριζόντιου άξονα 1057 και 676 ταυτίζονται με τις αντίστοιχες του αυγίτη ενώ η κορυφή στο σημείο 537 αντιστοιχεί στην κορυφή του μαγνητίτη.



Διάγραμμα 3.17 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα San-Bal-3B

Δείγμα San-Bal-4B

Στο δείγμα San-Bal-4B μπορούμε να δούμε ότι η κορυφή που αντιστοιχεί στο σημείο του κάθετου άξονα 1020 cm^{-1} αντιστοιχεί με εκείνη του φορστερίτη (Fo), η κορυφή στο σημείο 917 cm^{-1} αντιστοιχεί στον αυγίτη (Cpx), η κορυφή στο σημείο 734 cm^{-1} αντιστοιχεί στην αντίστοιχη κορυφή του ανορθίτη (An) και η κορυφή στο σημείο 595 cm^{-1} αντιστοιχεί στο φορστερίτη (Fo).

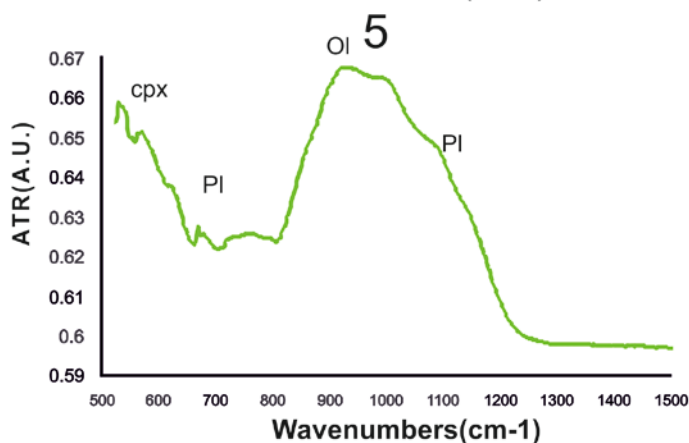


Δείγμα San-Bal-4A

Στο δείγμα San-Bal-4A οι κορυφές στα 1166, 996, 908, 736 και 578 cm^{-1} αντιστοιχούν στην πρότυπη καμπύλη του ανορθίτη (An) ενώ οι κορυφές 1055, 628, 558, 534, 530 αντιστοιχούν στον αυγίτη (Cpx).

Δείγμα San-Bal-5

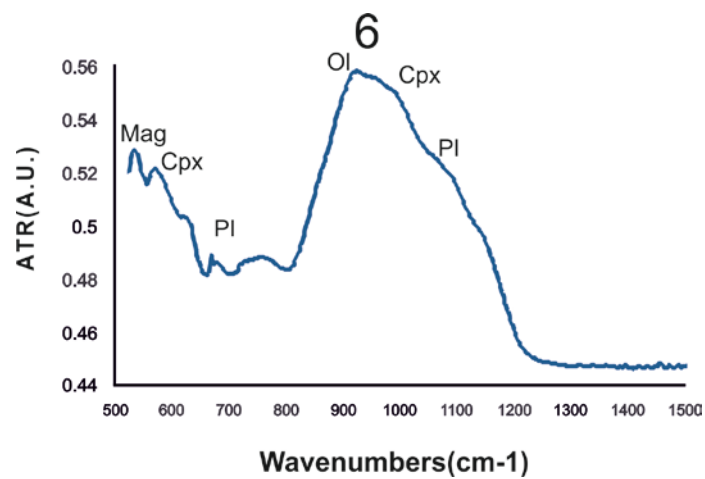
Στο δείγμα San-Bal-5 βλέπουμε οι κορυφές που αντιστοιχούν στον οριζόντιο άξονα στα σημεία (1120, 896, 732) συμπίπτουν με κορυφές του ανορθίτη (An). Τα σημεία 1007 και 958 cm^{-1} αντιστοιχούν στις κορυφές του φορστερίτη (Fo), ενώ τα σημεία 628 και 540 cm^{-1} αντιστοιχούν σε αυγίτη (Cpx).



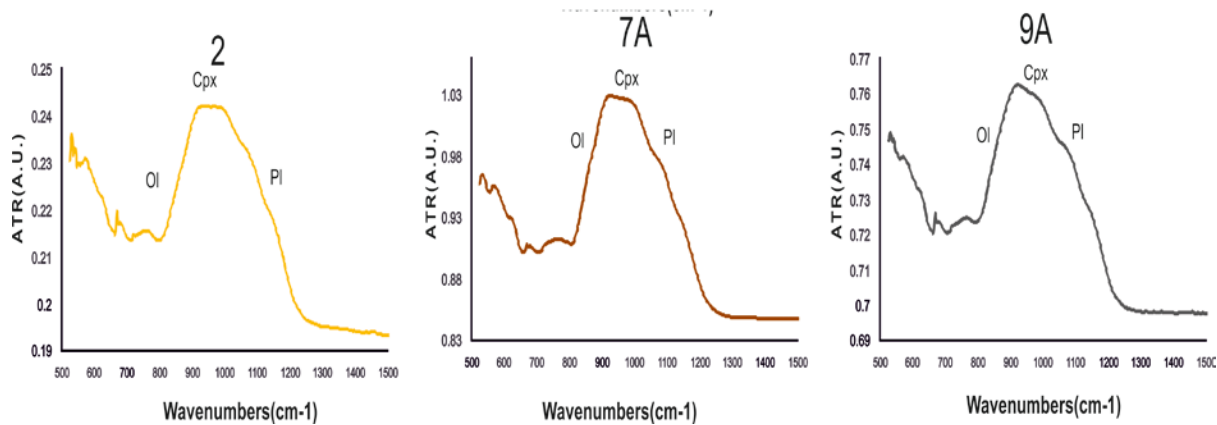
Διάγραμμα 3.19 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα San-Bal-5

Δείγμα San-Bal-6

Στο δείγμα San-Bal-6, οι κορυφές που αντιστοιχούν στα σημεία του οριζόντιου άξονα 1163, 903, 741 cm^{-1} αντιστοιχούν στις κορυφές του ανορθίτη (An). Η κορυφή 989 cm^{-1} αντιστοιχεί σε φορστερίτη (Fo) οι κορυφές 1062, 920, 668, 629 σε αυγίτη (Cpx) και η κορυφή 586 cm^{-1} σε μαγνητίτη (Mag).



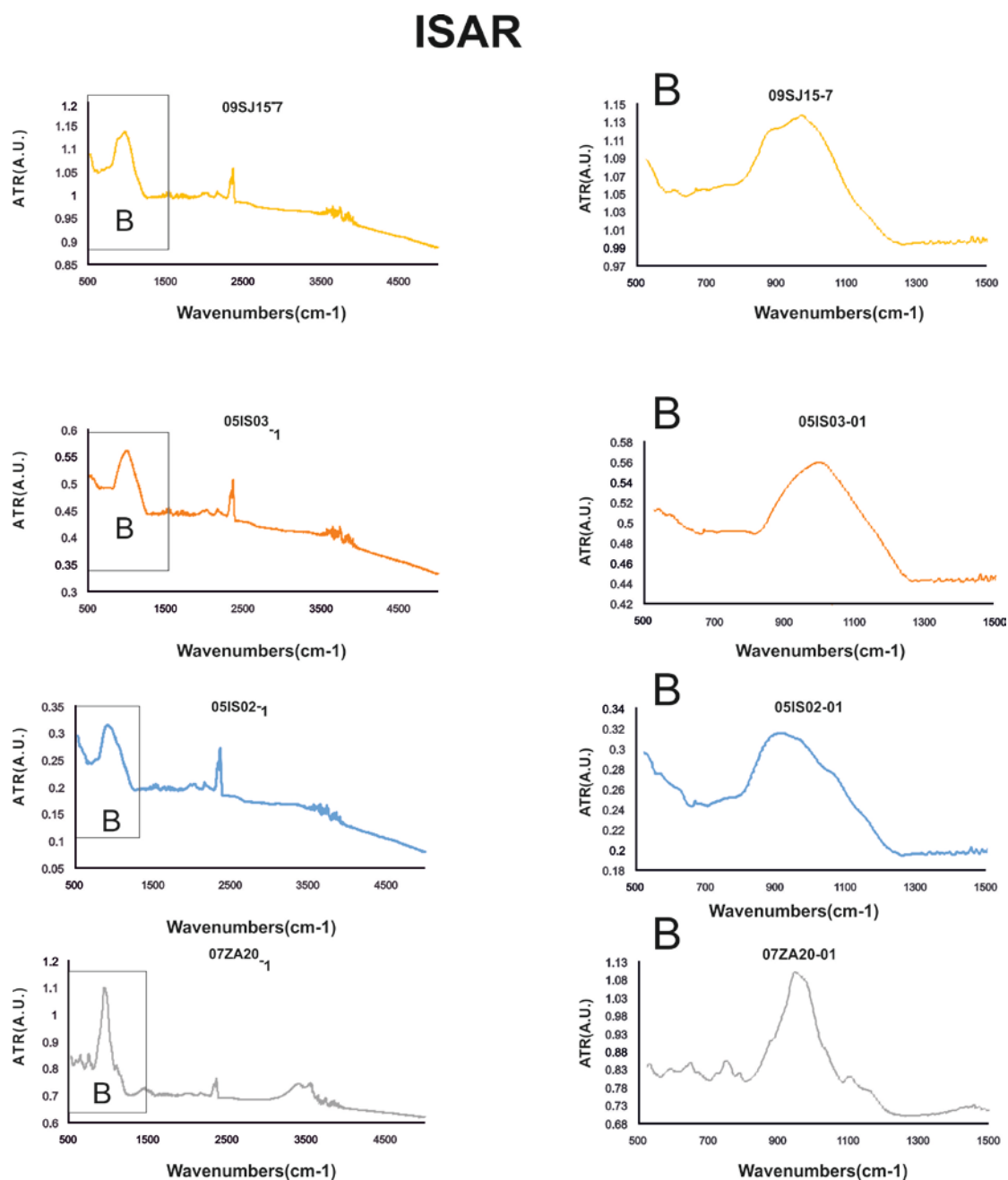
Διάγραμμα 3.20 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα San-Bal6



Εικόνα 3.12 Αποτελέσματα της μεθόδου για τα δείγματα San-Bal-2, San-Bal-7A και San-Bal-9A

Τα δείγματα ISAR

Η μέθοδος IR-ATR εκτός από τα δείγματα τα οποία συλλέξαμε από την Σαντορίνη εφαρμόστηκε και στα δείγματα 05IS02, 05IS03, 09SJ15 και 07ZA20 τα οποία έχουμε δανειστεί από το ISAR. Στον παρακάτω πίνακα τα φάσματα για το κάθε δείγμα ξεχωριστά, έτσι όπως αποτιμήθηκαν από την συγκεκριμένη μέθοδο.

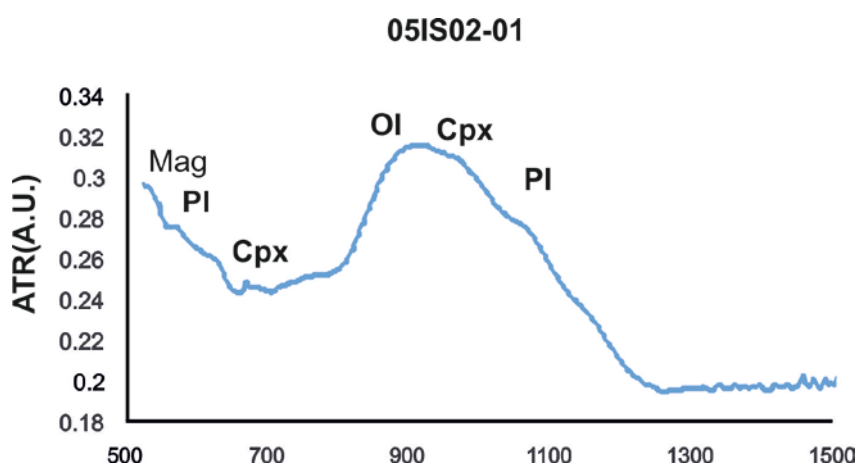


Διάγραμμα 3.21 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για τα δείγματα ISAR

Τα δείγματα τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια τόσο μεταξύ τους όσο και με τα δείγματα της Σαντορίνης είναι τα 05IS02-1, 05IS03-1 και 09SJ15.

Δείγμα 05IS02-1

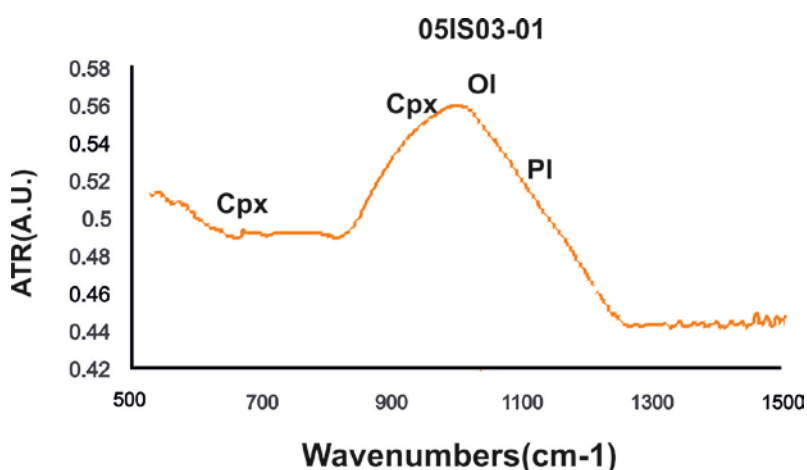
Στο δείγμα του ISAR 05IS02 βλέπουμε την κορυφές 1154 και 570 cm^{-1} να αντιστοιχούν στις κορυφές του ανορθίτη (An), οι κορυφές 1069, 911, 672, 651 και 631 cm^{-1} αντιστοιχούν στον αυγίτη, οι κορυφές 1018 και 876 cm^{-1} αντιστοιχούν στο φορστερίτη (Fo) και η κορυφή 523 cm^{-1} σε μαγνητίτη (Mag).



Διάγραμμα 3.22 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα 05IS02-01

Δείγμα 05IS03-1

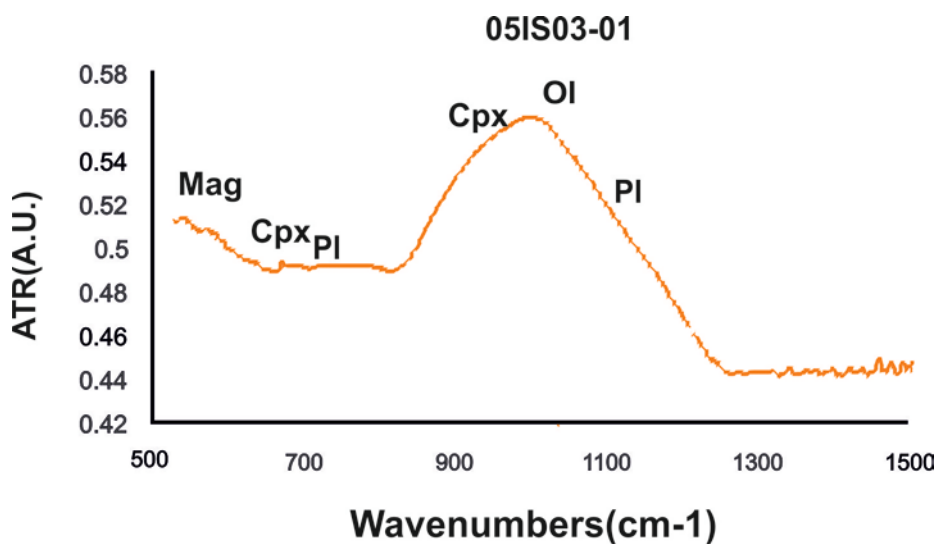
Στο δείγμα 05IS03 βλέπουμε τις κορυφές 1006 και 984 αντιστοιχούν σε φορστερίτη (Fo), κορυφές 891, 729, 581 και 568 cm^{-1} αντιστοιχούν σε ανορθίτη (An) και οι κορυφές 668, 664 και 643 cm^{-1} σε αυγίτη (Cpx).



Διάγραμμα 3.23 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα 05IS03-01

Δείγμα 09SJ15

Στο δείγμα 09SJ15 οι κορυφές 1001 και 945 cm^{-1} αντιστοιχούν σε φορστερίτη (Fo), οι κορυφές 904 και 755 cm^{-1} αντιστοιχούν σε ανορθίτη (An), η κορυφή 605 cm^{-1} αντιστοιχεί σε αυγίτη (Aug) ενώ η κορυφή 535 cm^{-1} σε μαγνητίτη (Mt).



Διάγραμμα 3. 24 Διάγραμμα μεθόδου IR-ATR για το δείγμα 09SJ15

Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα της μεθόδου IR-ATR

Δείγματα /Ορυκτά	San-Bal- 3B	San-Bal- 4B	San-Bal- 5	San-Bal- 4A	San- Bal-6	05IS02	05IS03	09SJ15
Φορστερίτης		X	X		X	X	X	X
Αυγίτης	X	X	X	X	X	X	X	X
Πλαγιόκλαστα)	X	X	X	X	X	X	X	X
Μαγνητίτης	X				X	X	X	X

3.7 Υπολογισμός ειδικού βάρους των δειγμάτων της Σαντορίνης

Για τον υπολογισμό του ειδικού βάρους τα δείγματα αρχικά ξηράθηκαν για μία ημέρα σε φούρνο στους 105 °C. Στη συνέχεια το κάθε δείγμα ζυγίστηκε σε ζυγαριά ακριβείας. Η επιφάνεια των δειγμάτων επικαλύφθηκε με παραφίνη ώστε να γίνουν στεγανά και στην συνέχεια επαναλάβαμε τη ζύγιση. Βρήκαμε το βάρος της παραφίνης αφαιρώντας την αρχική μετρηση από την δεύτερη και στη συνέχεια βρήκαμε τον όγκο της διαιρώντας το με το $\rho=0.89 \text{ g/cm}^3$. Τέλος εισαγάγαμε το κάθε δείγμα σε έναν ογκομετρικό κύλινδρο και αφαιρώντας τον όγκο της παραφίνης βρήκαμε τον όγκο του δείγματος. Το ειδικό βάρος υπολογίζεται διαιρώντας την αρχικό βάρος του δείγματος προς τον όγκο του.

Τα στοιχεία των μετρήσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3.10 Υπολογισμός ειδικού βάρους για τα δείγματα της Σαντορίνης

Δείγματα	m(gr)	Βάρος με Παραφίνη (gr)	m Παραφίνης (gr)	V2(ml)	V παραφίνης (ml)	V δείγματος (ml)	Ειδικό Βάρος (gr/cm ²)
San-Bal-1	2,01	2,23	0,22	16	0,24	0,75	2,68
San-Bal-2	1,81	1,93	0,12	16	0,13	0,86	2,09
San-Bal-3A	1,95	2	0,05	15,75	0,05	0,69	2,81
San-Bal-3B	2,24	2,46	0,22	16	0,24	0,75	2,97
San-Bal-3Γ	1,86	2,02	0,16	15,8	0,17	0,62	2,99
San-Bal-3Δ	2,75	2,95	0,2	16,1	0,22	0,87	3,14
San-Bal-4A	1,48	1,68	0,2	15,9	0,22	0,67	2,19
San-Bal-4B	1,8	1,89	0,09	15,9	0,1	0,79	2,25
San-Bal-4Γ	2,36	2,49	0,13	16	0,14	0,85	2,76
San-Bal-5	3,1	3,21	0,11	16,2	0,12	1,07	2,87
San-Bal-6	1,37	1,54	0,17	15,7	0,19	0,5	2,69
San-Bal-7A	1,32	1,38	0,06	15,7	0,06	0,63	2,08
San-Bal-8B	1,01	1,12	0,11	15,4	0,12	0,27	2,65
San-Bal-8Γ	2,33	2,48	0,15	15,9	0,16	0,73	3,18
San-Bal-9A	1,03	1,12	0,09	15,6	0,1	0,49	2,06
San-Bal-9B	1	1,13	0,13	15,6	0,14	0,45	2,2
San-Bal-9Γ	1,69	1,85	0,16	16,1	0,17	0,92	1,83

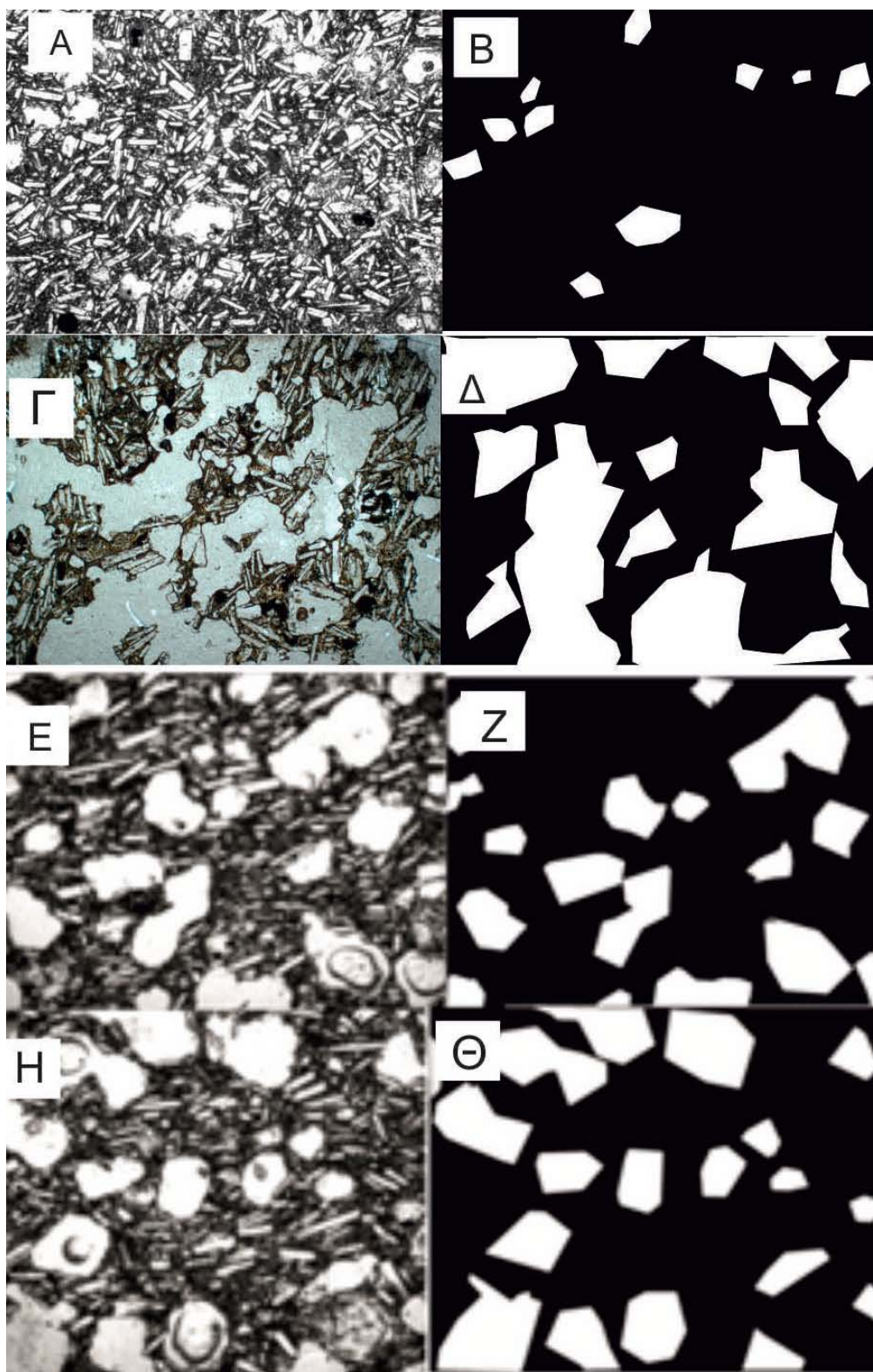
3.8 Υπολογισμός πορώδους

Το πορώδες των δειγμάτων τόσο της Σαντορίνης τόσο και της τομής του ISAR 09SJ15 προσδιορίστηκε με το πρόγραμμα ImageJ. Το imageJ είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνων, το οποίο έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία, πολυδιάστατων επιστημονικών

φωτογραφιών. Μπορούμε εύκολα, έχοντας μία φωτογραφία της τομής από το πετρογραφικό μικροσκόπιο, να επεξεργαστούμε τους πόρους της τομής και να υπολογίζουμε το ποσοστό τους ως προς τη συνολική τομή.

Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα πορώδους των δειγμάτων μέσω του προγράμματος ImageJ

Δείγμα	Πορώδες
San-Bal-4A-1	25.30%
San-Bal-4A-2	28%
San-Bal-2	44%
San-Bal-5(1)	4%
San-Bal-5(2)	5%
Isar 09SJ15	27.50%



Εικόνα 3.1 Φωτογραφίες από το πρόγραμμα ImageJ κατά την επεξεργασία των δειγμάτων. Οι Α,Β αναφέρονται στο δείγμα San-Bal-5, Γ,Δ στο δείγμα ISAR 09SJ15, και οι Ε-Θ στο δείγμα San-Bal-4Α

Κεφάλαιο 4 Συζήτηση-Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προηγούνται στα προηγούμενα κεφάλαια, με αποτελέσματα από τον Άρη (μετρήσεις του Spirit στο κρατήρα Gusev, μετεωρίτες με προέλευση τον Άρη). Επιπλέον γίνεται εκτεταμένη σύγκριση με τα είδη χαρακτηρισμένα αρειανά ανάλογα του ISAR (09SJ15, 05IS01, 07ZA20).

4.1 Χημική σύσταση ολικού πετρώματος

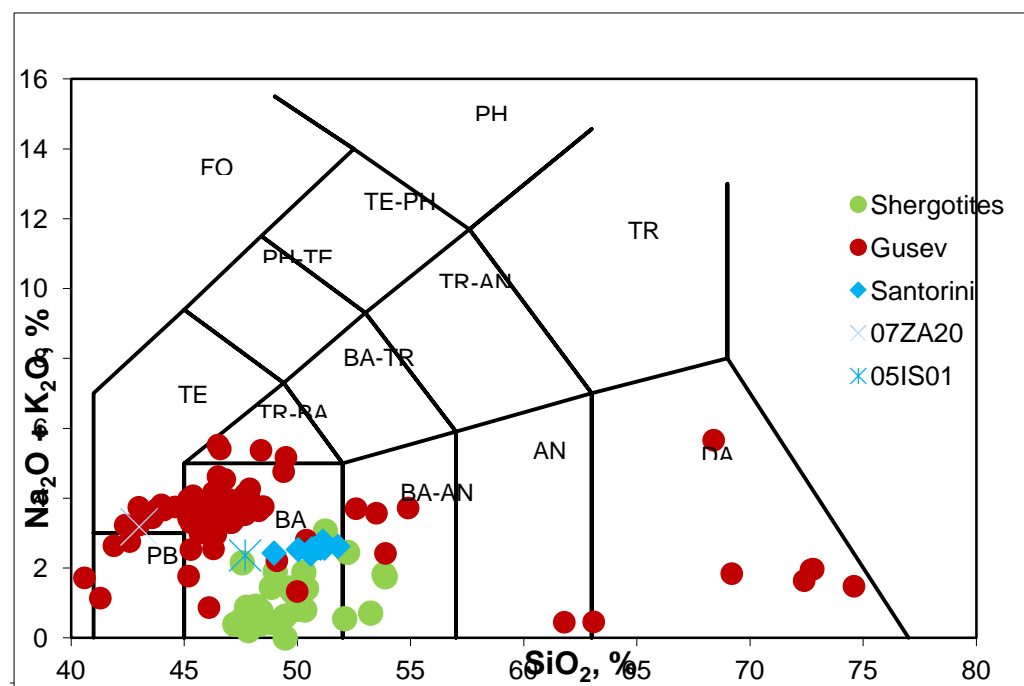
Για να πραγματοποιήσουμε την σύγκριση της χημικής σύστασης ολικού πετρώματος αρχικά προβάλαμε τα δεδομένα που έχουμε σε ένα διάγραμμα TAS (Total alkali Silica) με το οποίο κατηγοριοποιούμε τα ηφαιστειακά πετρώματα ανάλογα με την χημική τους σύσταση.

Δεδομένα που πήραμε από την βιβλιογραφία:

1. Μετεωρίτες με προέλευση τον Άρη: Los Angeles, NWA 2800, NWA 856, QUE 94201, Shergotty, Zagami, NWA 4924, NWA 5789, NWA 6162, Tissint, NWA 6342, Grove Mountains 99027, NWA 1950, Lewis Cliff 88516, NWA 4797, Yamato 793605, Dar al Gani 476, Dhofar 019, Dhofar 378, Elephant Moraine 79001, Larkman Nunatak 06319, NWA 1068, NWA 2990, Yamato 980459, NWA 5214, NWA 5990, Sayh al Uhaymir 005, NWA 1068 (*Martian Meteorites Compendium* <https://curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/>).
2. APXS αναλύσεις από τον Gusev (Gellet et al. 2006).
3. ISAR:05IS01, 07ZA20 (Bost et al. 2013).

Πίνακας 4.1 Χημική σύσταση ολικού πετρώματος για τα δείγματα της Σαντορίνης

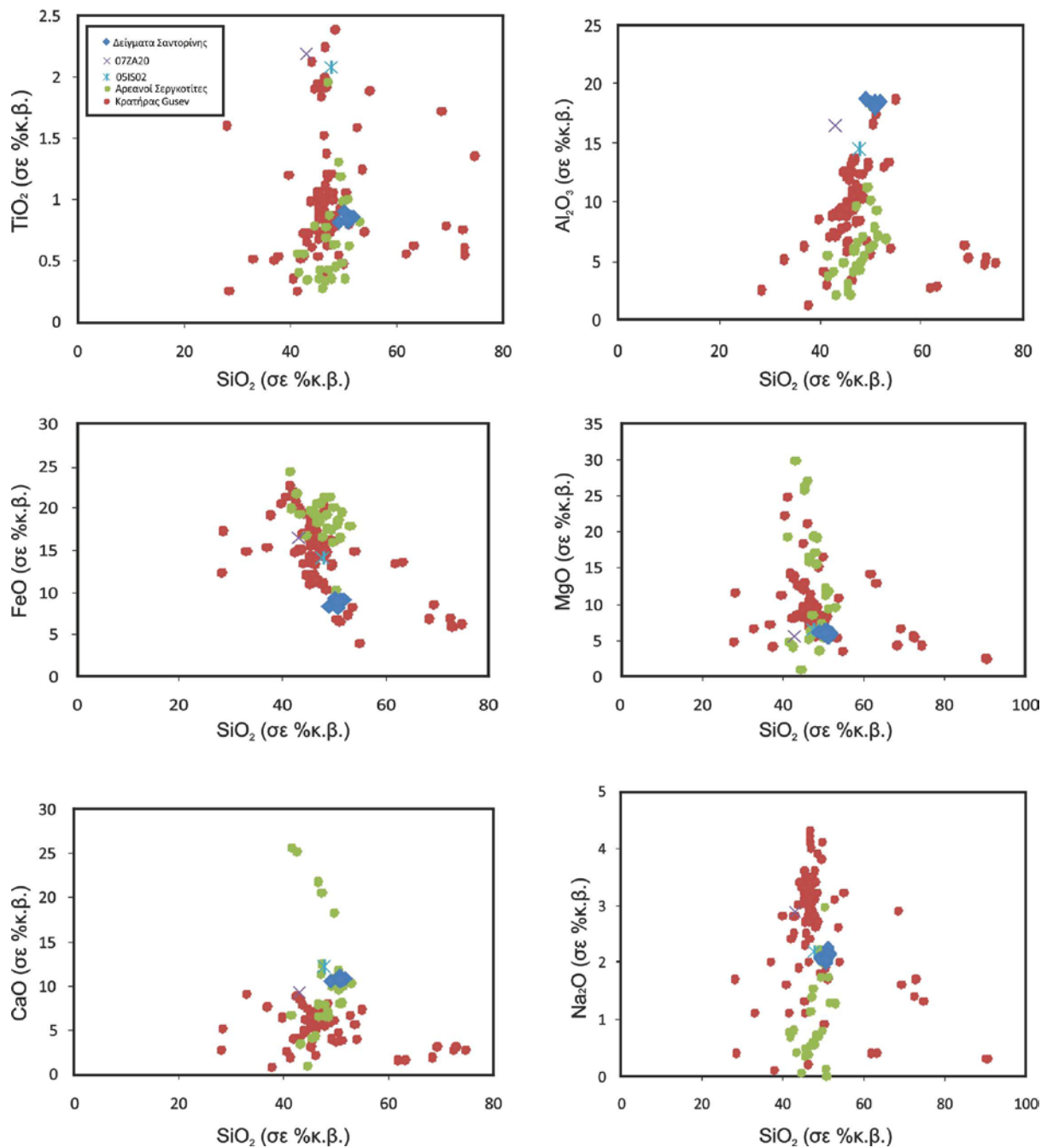
Δείγμα	2	3A	3B	4A	4B	5	6	7A	7B	18A	8B	9A	9b
San-Bal-													
SiO ₂	50.6	50	49	51	51.2	51.8	50.9	51.1	50.6	50.8	51	50.5	50.7
TiO ₂	0.82	0.9	0.81	0.85	0.85	0.86	0.81	0.85	0.83	0.84	0.84	0.82	0.83
Al ₂ O ₃	18.1	18.4	18.7	18.1	18.3	18.5	18.3	18.1	18.5	18.1	18.1	18.2	18
Fe ₂ O ₃	8.84	9.28	8.28	8.93	9	9.08	8.95	8.96	8.73	8.97	8.94	8.15	8.84
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
MgO	6.27	5.93	6.12	6.1	6.13	5.89	6.22	5.39	6.24	6.25	6.13	6.35	5.97
CaO	11.1	10.8	10.6	10.8	10.8	10.8	10.9	10.7	10.6	10.7	10.7	10.8	10.7
Na ₂ O	1.98	2.07	2.06	2.15	2.15	2.14	2.16	2.24	2.14	2.12	2.14	2.04	2.03
K ₂ O	0.42	0.46	0.37	0.41	0.42	0.48	0.42	0.53	0.41	0.44	0.45	0.41	0.46
P ₂ O ₅	0.09	0.1	0.08	0.1	0.1	0.1	0.09	0.09	0.1	0.1	0.1	0.09	0.1
Σύνολο	99.9	99.9	99.1	99.9	99.3	99.8	99.9	99.8	100	99.7	99.7	99.6	99.7



Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα TAS στο οποίο έχουν συγκριθεί τα δεδομένα από τα δείγματα της Σαντορίνης (μπλε χρώμα), από μετεωρίτες με προέλευση τον Άρη (Shergotites) (πράσινο χρώμα), μετρήσεις που έχουν γίνει από το rover Spirit στον Άρη (κόκκινο χρώμα, δείγματα ISAR 07ZA20, 05IS01)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα τα σημεία της Σαντορίνης ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με κάποια από τα δείγματα των μετεωριτών με προέλευση τον Άρη και των δειγμάτων που εκτέλεσε το rover Spirit στον κρατήρα Gusev. Όσον αφορά τα είδη χαρακτηρισμένα αρειανά ανάλογα 07ZA20 (Τρίγωνο) και 05IS0 (Μωβ κύκλος). Το πρώτο είναι στο όριο του τεφρίτη και πικριτικού βασάλτη, ενώ το δεύτερο είναι πολύ κοντά στα δείγματα της Σαντορίνης.

Στη συνέχεια συγκρίναμε τα ποσοστά των βασικών οξειδίων σε σχέση με το SiO_2 που είναι ένας από τους βασικούς δείκτες για τον χαρακτηρισμό ενός πυριγενούς πετρώματος. Στα διαγράμματα παρακάτω βλέπουμε σύγκριση των (TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO) ως προς τις αναλύσεις των μετεωριτών με προέλευση τον πλανήτη Άρη και τις μετρήσεις που έκανε το rover Spirit στον κρατήρα Gusev.



Στο παραπάνω διάγραμμα προβάλλονται τα ποσοστά των κυρίων οξειδίων των δειγμάτων του κρατήρα Gusev, των μετεωριτών με προέλευση τον πλανήτη Άρη (Martian Shergottites), των δειγμάτων ISAR 07ZA20, 05IS01 και των δειγμάτων της Σαντορίνης. Αρχικά παρατηρούμε πως το ποσοστό SiO_2 των δειγμάτων της Σαντορίνης είναι σε πολύ κοντινά επίπεδα σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα. Το ποσοστό Al_2O_3 είναι ψηλότερο σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα δείγματα. Στο διάγραμμα $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ αξίζει να σημειωθεί πως τα ποσοστά TiO_2 της Σαντορίνης ταυτίζονται με τα αντίστοιχα των Martian Shergottites και των δειγμάτων του Gusev σε σύγκριση με τα ήδη χαρακτηρισμένα ανάλογα του ISAR, υστερούν όμως στο ποσοστό FeO στο οποίο τα δείγματα του ISAR είναι πιο κοντά στα ποσοστά του

Άρη ενώ της Σαντορίνης είναι πιο χαμηλά. Τέλος τα ποσοστά MgO, CaO και Na₂O, των δειγμάτων της Σαντορίνης, μπορούμε να πούμε πως εμφανίζονται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό σε σχέση με τόσο με τα χαρακτηρισμένα αρειανά ανάλογα όσο και με τα δείγματα από τον κρατήρα Gusev και τους μετεωρίτες με προέλευση των πλανήτη Άρη.

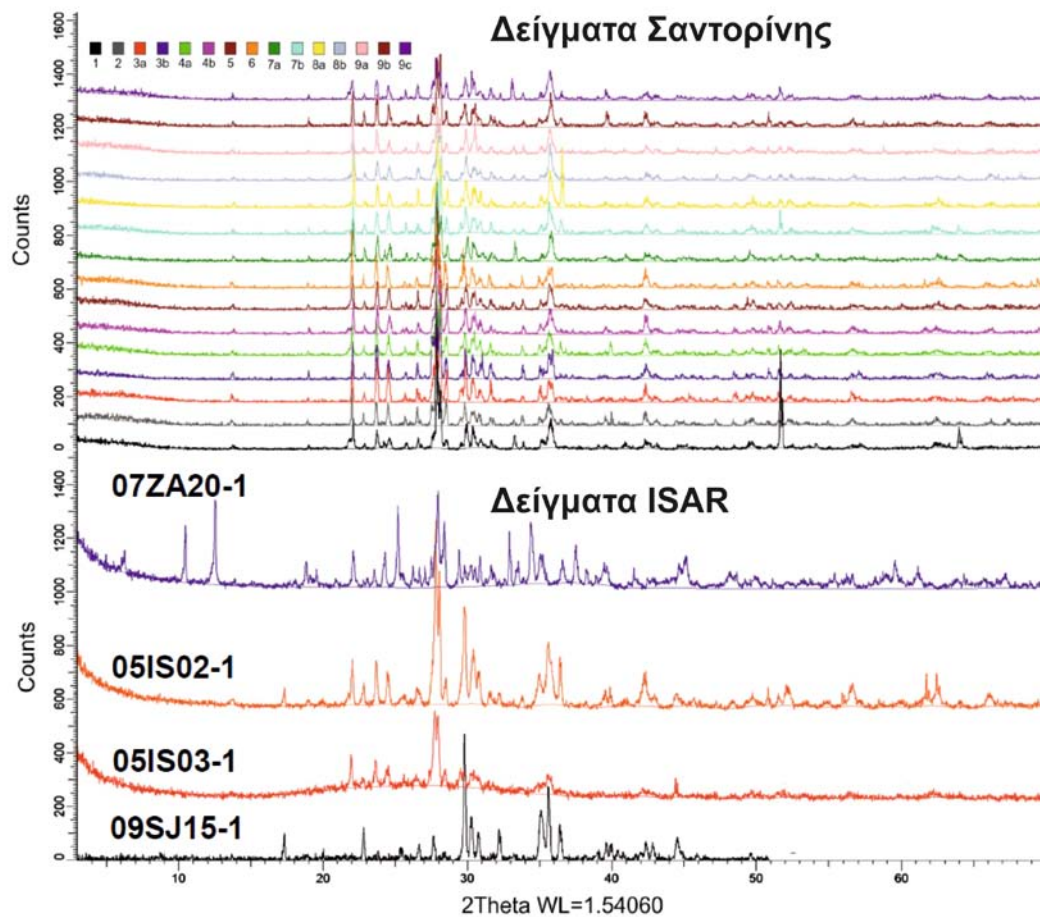
4.2 Αναλύσεις ορυκτολογικής σύστασης ολικού πετρώματος

4.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων XRD

Εφαρμόστηκε η μέθοδος περιθλασιμετρίας ακτίνων-X στα δείγματα της Σαντορίνης και στα δείγματα ISAR 07ZA20,09SJ 15, 05IS01, 05IS02.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα μεθόδου XRD

Δείγματα	Φοροστερίτης	Λαβραδορίτης	Βυτοβνίτης	Ανορθίτης	Αυγίτης	Ενστατίτης	Διοψίδιος	Χαλαζίας
05IS02	NAI	NAI	-	NAI	-	-	NAI	NAI
05IS03	-	NAI	-	-	-	-	NAI	-
09SJ15	NAI	NAI	-	-	NAI	-	NAI	-
07ZA20	-	-	-	NAI	NAI	-	-	NAI
San-Bal-2	NAI	NAI	NAI	-	-	NAI	NAI	-
San-Bal-3	NAI	NAI	NAI	-	-	NAI	NAI	-
San-Bal-4A	NAI	-	-	NAI	NAI	NAI	-	-
San-Bal-4B	NAI	-	NAI	-	NAI	NAI	-	-
San-Bal-5	NAI	NAI	-	-	-	NAI	-	-
San-Bal-6	NAI	-	NAI	-	NAI	NAI	-	-
San-Bal-7	NAI	NAI	NAI	-	NAI	-	-	-
San-Bal-8	NAI	NAI	-	-	-	NAI	-	-
San-Bal-9	NAI	NAI	-		NAI	-	-	-



Διάγραμμα 4.3 Σύγκριση φασμάτων της μεθόδου XRD

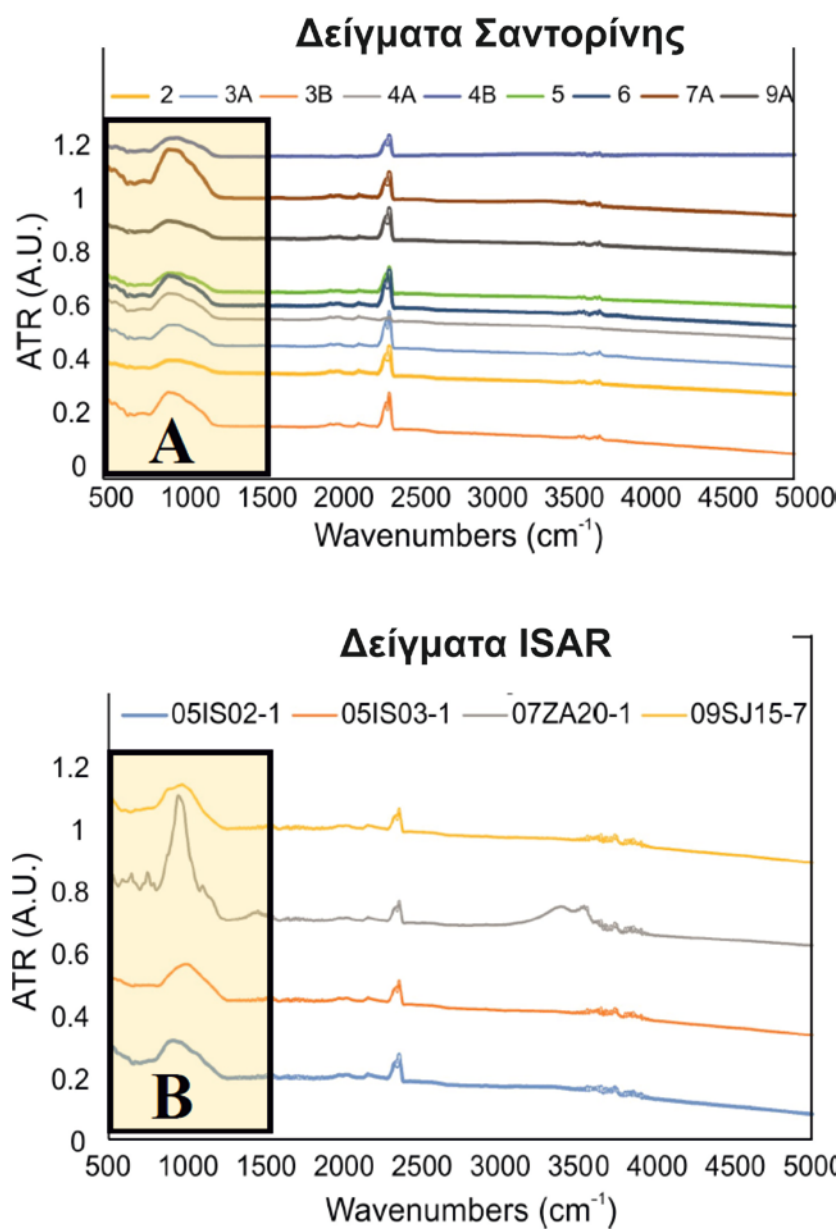
Μετά την σύγκριση των φασμάτων που προέκυψαν από τη τεχνικής περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ προέκυψαν τα ακόλουθα:

- 1) Ο φορστερίτης εμφανίζεται σε όλα τα δείγματα της Σαντορίνης και στα δείγματα του ISAR 05IS02 και 09SJ15.
- 2) Από τα πλαγιόκλαστα το λαβραδόριο εμφανίζεται στα δείγματα (San-Bal-2, San-Bal-3, San-Bal-4B, San-Bal-6, San-Bal-7) της Σαντορίνης και 05IS02, 05IS03, 09SJ15 του ISAR, ενώ ο βυτοβνίτης εμφανίζεται μόνο στα δείγματα της Σαντορίνης. Από αυτή την πληροφορία καταλαβαίνουμε ότι τα πλαγιόκλαστα της Σαντορίνης είναι πιο ανορθωτικά από τα αντίστοιχα των δειγμάτων του ISAR, αυτή είναι μία εικασία η οποία μένει να επιβεβαιωθεί από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

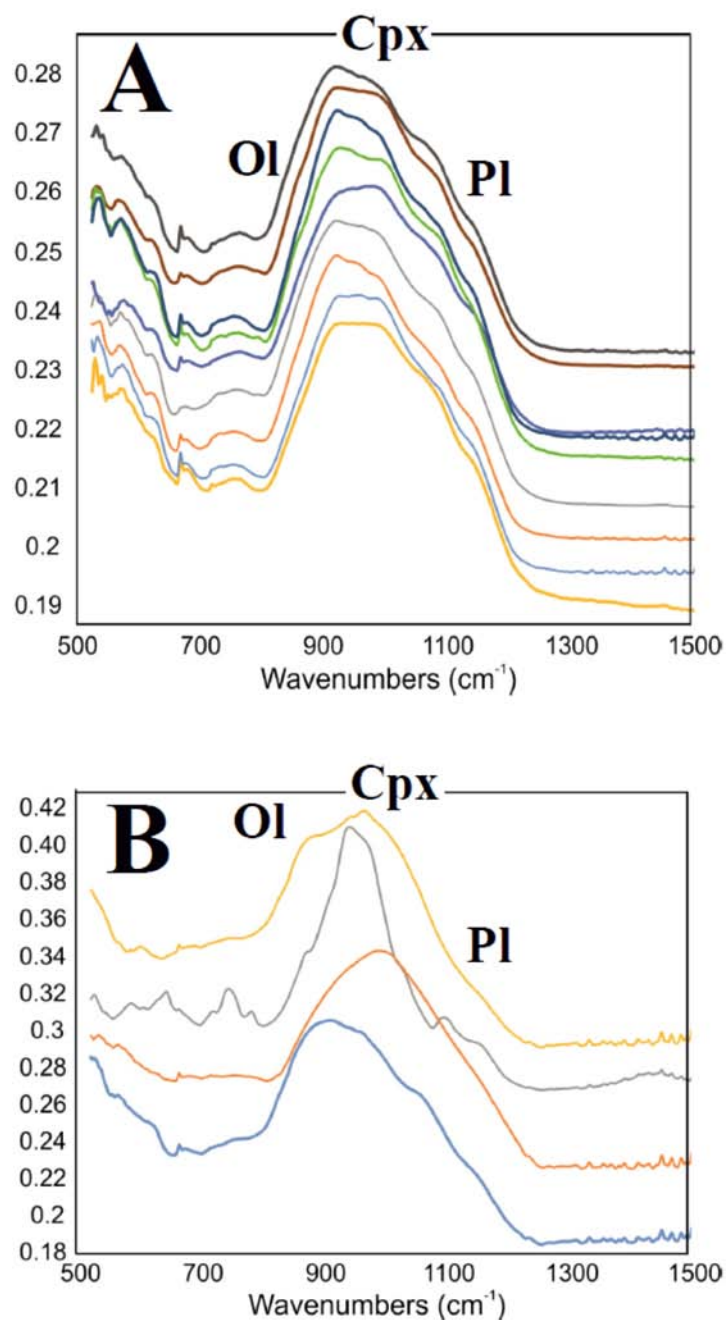
Στους πυρόξενους εντοπίσαμε αυγίτη στο δείγμα 09SJ14 και 07ZA20 του ISAR και San-Bal-4A, San-Bal-4B, San-Bal-6, San-Bal-7, San-Bal-9 της Σαντορίνης. ενστατίτη μόνο στα δείγματα της Σαντορίνης, ενώ διοσίδιο 05IS02, 05IS03 και 09SJ15 του ISAR και δείγματα San-Bal-2 και San-Bal-3 της Σαντορίνης.

4.2.2 Μέθοδος IR-ATR

Στην μέθοδο της υπέρυθρης φασματοσκοπίας IR-ATR συγκρίναμε και κάναμε αποτίμηση των φασμάτων στα δείγματα της Σαντορίνης με αυτά του ISAR 09SJ15, 05IS02, 05IS03, και 07ZA20.



Διαγράμματα 4.4α Α, Β Φάσματα IR-ATR για τα δείγματα της Σαντορίνης και ISAR



Διαγράμματα 4.4β A,B Φάσματα IR-ATR για τα δείγματα της Σαντορίνης και ISAR

Στα διαγράμματα (4.3) βλέπουμε το φάσμα υπερύθρου για την φασματική περιοχή 0-5000 cm^{-1} . Στα διαγράμματα (4.4) περιορίζουμε την ανάλυσή μας στο εύρος του φάσματος 500-1500 cm^{-1} το οποίο αντιστοιχεί στα πυριτικά ορυκτά που περιέχονται στο κάθε δείγμα. Παρατηρούμε ομοιότητες μεταξύ των φασμάτων των δειγμάτων της Σαντορίνης (διάγραμμα A) και των δειγμάτων του ISAR (διάγραμμα B). Τα φάσματα όλων των δειγμάτων έχουν το βασική καμπύλη των πυριτικών ορυκτών μεταξύ των 800-1200 cm^{-1} . Πιο συγκεκριμένα η

κορυφή στα $\sim 850\text{ cm}^{-1}$ υποδηλώνει την ύπαρξη ολιβίνη, το κεντρικό pick υποδηλώνει την ύπαρξη πυροξένων (κλινοπυρόξενου) περίπου στο 1000 και ένα τρίτο pick στα 1150 cm^{-1} περίπου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη πλαγιοκλάστων. Σημαντικό να αναφερθεί είναι πως η κεντρική καμπύλη των πυριτικών ορυκτών είναι πανομοιότυπο μεταξύ του $800\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ στα δείγματα της Σαντορίνης και τα δείγματα του ISAR εκτός από το δείγμα 07ZA20 το οποίο κυμαίνεται από $850\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$.

Στη συνέχεια αναζητήσαμε από την βάση δεδομένων RRUFF τα φάσματα που αντιστοιχούν στα συγκεκριμένα ορυκτά και μετά από κανονικοποίηση των φασμάτων μέσω του προγράμματος Fytk, κάναμε αποτίμηση του φάσματος δίνοντας ερμηνεία για το πιο ορυκτό βρίσκεται σε κάθε μία από τις κορυφές του φάσματος. Στη συγκεκριμένη αποτίμηση βρήκαμε πως ο φορστερίτης, αυγίτης και τα πλαγιόκλαστα υπάρχουν σε όλα τα δείγματα, αδιαφανή μεταλλικά ορυκτά όπως ο μαγνητίτης υπάρχουν στα δείγματα San-Bal-3B και San-Bal-4A της Σαντορίνης και σε όλα τα δείγματα του ISAR (05IS02, 05IS03, 09SJ15). Το δείγμα 07ZA20 λόγω της διαφοράς της κεντρικής καμπύλης των πυριτικών ορυκτών (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) δεν το συμπεριέλαβα καθόλου στην σύγκριση με τα δείγματα της Σαντορίνης.

4.3 Σύγκριση ορυκτοχημικών δεδομένων

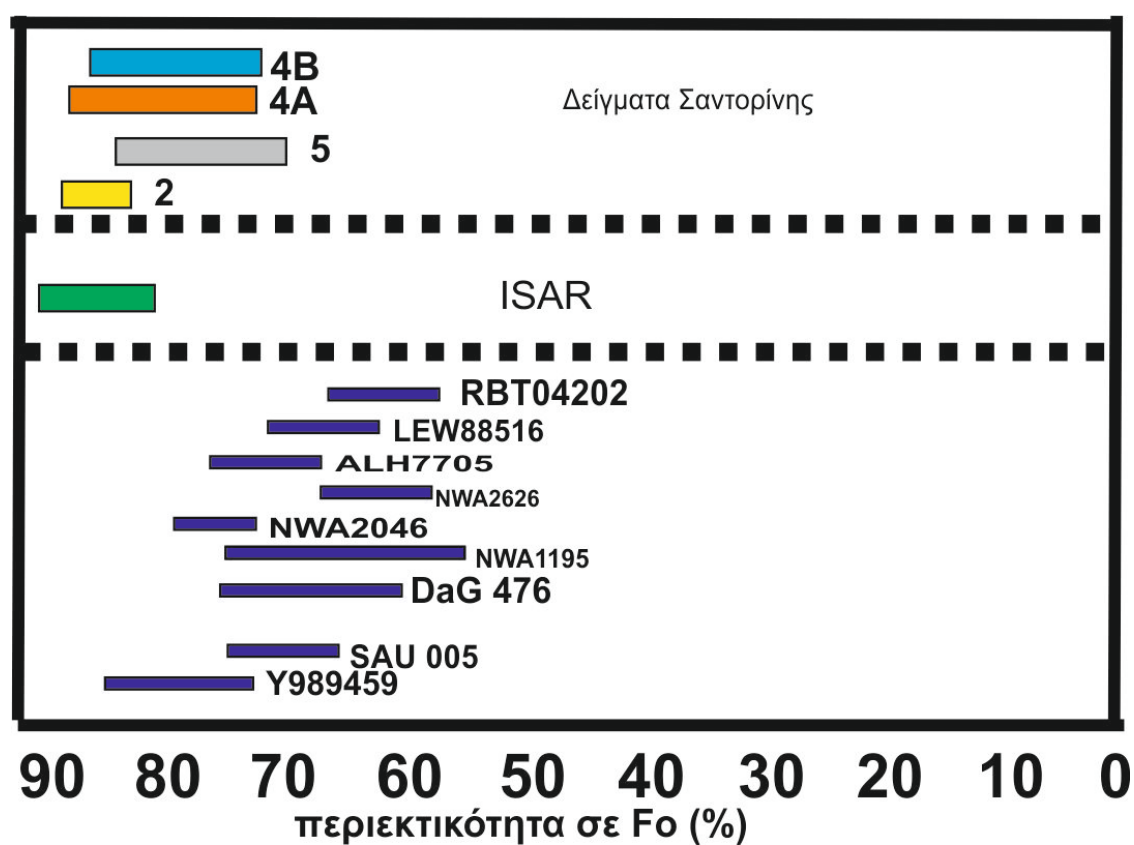
Σε αυτή την ενότητα γίνεται η σύγκριση των ορυκτοχημικών δεδομένων που προέκυψαν μετά από EPMA (Electron Probe MicroAnalysis) και SEM στα δείγματα της Σαντορίνης και του ISAR (09SJ15, 07ZA20).

4.3.1 Σύγκριση χημικής σύστασης ολιβίνη

Τα δεδομένα των EPMA αναλύσεων που έχουν γίνει μέχρι στιγμής μας δείχνουν ότι ο ολιβίνης στο δείγμα San-Bal-4A κυμαίνεται από Fo_{72} έως Fo_{86} ενώ στο δείγμα San-Bal-4B από Fo_{69} έως Fo_{86} . Από τα δεδομένα της μεθόδου SEM προέκυψε για το δείγμα San-Bal-5 ολιβίνης με σύσταση από Fo_{66} έως Fo_{75} και για το δείγμα San-Bal-2 από Fo_{82} έως Fo_{86} . Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται σύγκριση με τις μετρήσεις που έχουν γίνει σε ολιβίνες μετεωριτών από τον Άρη και δειγμάτων της αποστολής Apollo 2012 (Papike 2009, Alexander et al. 2016). Στα δύο αυτά διαγράμματα παρατηρείται ότι τα δείγματα της Σαντορίνης είναι πιο φορστεριτικά αλλά σε μεγάλο βαθμό ταυτίζονται τόσο με τα ISAR όσο και με τους ολιβινικούς σεργκοτίτες.

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα μεθόδου IR-ATR

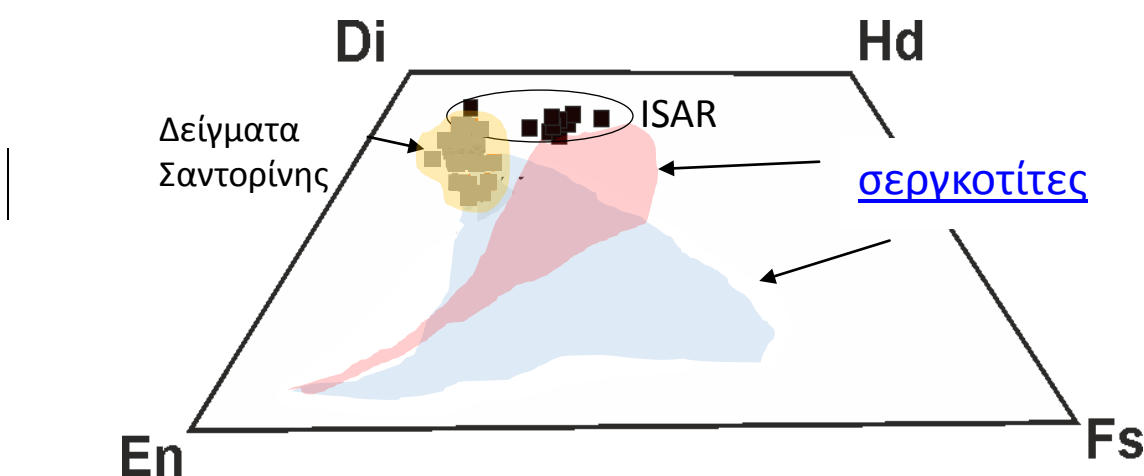
Δείγματα/Ορυκτά	San-Bal 3B	San-Bal 4B	San- Bal 5	San-Bal 4A	San-Bal 6	05IS02	05IS03	09SJ15
Φορστερίτης (Fe,Mg)SiO ₄		X	X		X	X	X	X
Αυγίτης ((Ca,Mg,Fe) ₂ (Si,Al)O ₆)	X	X	X	X	X	X	X	X
Πλαγιόκλαστα((Na,Ca,K)Al ₃ O ₈)	X	X	X	X	X	X	X	X
Μαγνητίτης(Fe ₃ O ₄)	X				X	X	X	X



Διάγραμμα 4.6 Συγκριτικό διάγραμμα χημικής σύστασης ολιβινών (Σαντορίνη, ISAR, ολιβινικοί σεργκοτίτες)

4.3.2 Σύγκριση χημικής σύστασης πυροξένων

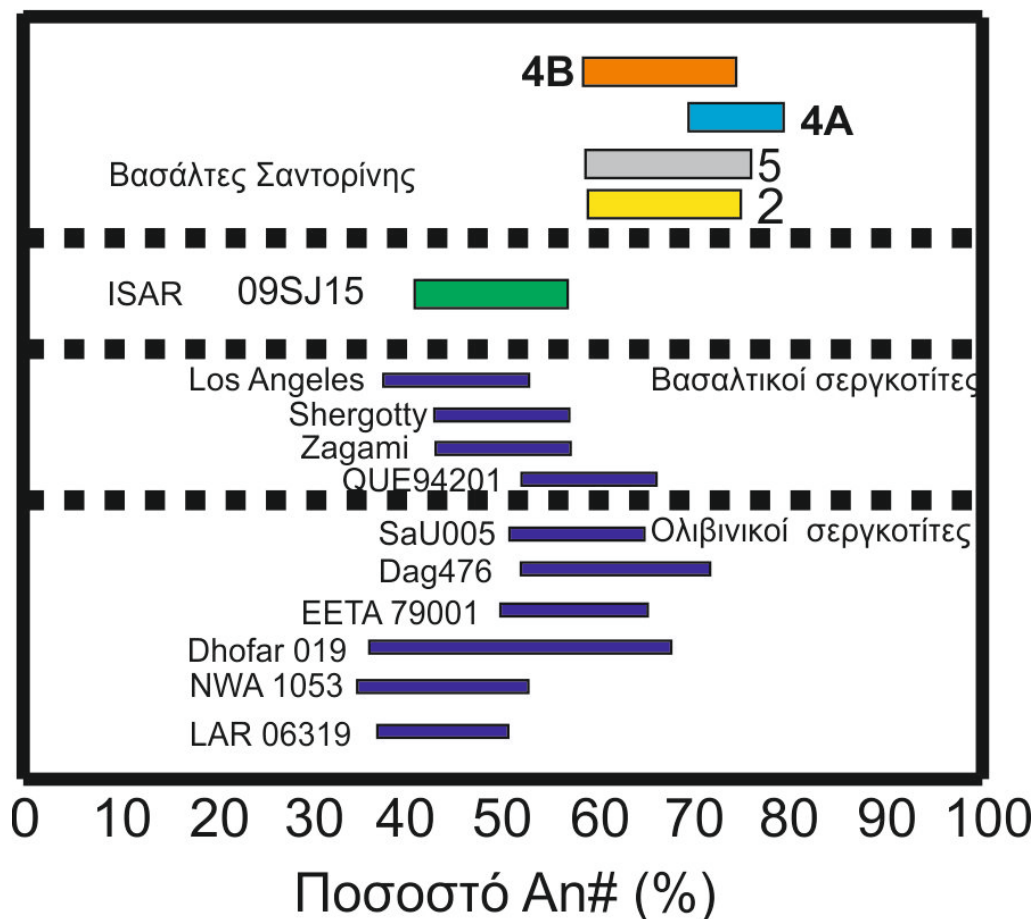
Συγκρίναμε τα αποτελέσματα των αναλύσεων των πυροξένων των δειγμάτων της Σαντορίνης και του ISAR, με δημοσιευμένα δεδομένα για ολιβινικούς σεργκοτίτες από τον πλανήτη Άρη (First et al. 2016, Balta et al. 2015). Παρατηρούμε ότι ορισμένες από τις μετρήσεις από τα δείγματα της Σαντορίνης συμπίπτουν με τα όρια των ολιβινικών σεργκοτιτών με προέλευση τον Άρη. Σε αντίθεση όλες οι μετρήσεις του δείγματος 09SJ15 είναι όλες σχεδόν εκτός ορίων εκτός των ορίων.



Διάγραμμα 4.7 Συγκριτικό διάγραμμα χημικής σύστασης πυροξένων (Σαντορίνη, ISAR, ολιβινικοί σεργκοτίτες)

4.3.3 Σύγκριση χημικής σύστασης πλαγιοκλάστων

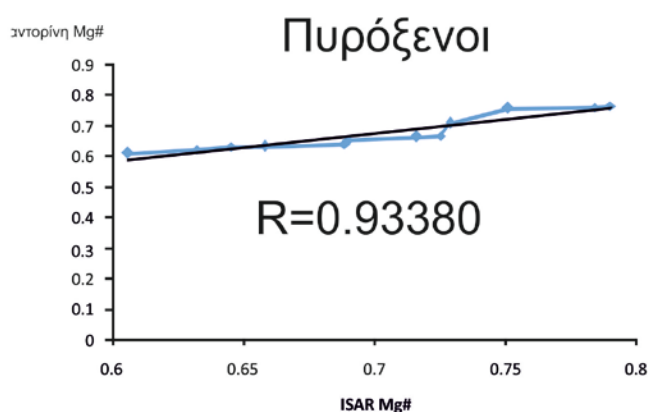
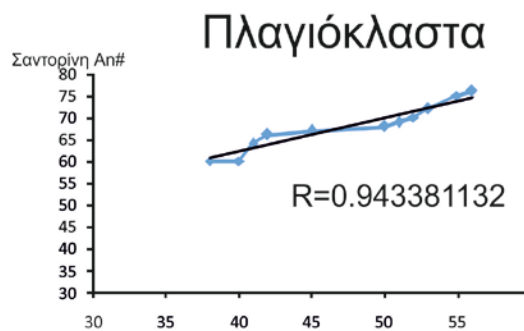
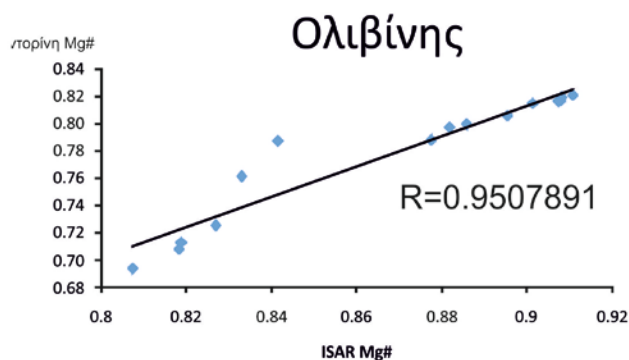
Στη σύγκριση των δεδομένων των πλαγιοκλάστων σε ποσοστό An (%), παρατηρούμε ότι τα δείγματα της Σαντορίνης είναι πιο ανορθιτικά από τους αντίστοιχους μετεωρίτες με προέλευση τον Άρη. Οι μετεωρίτες DaG 476 και Dhofar 019 ταυτίζονται σχεδόν με τα δεδομένα των δειγμάτων San-Bal-4B, San-Bal-5 και San-Bal-2. Τα δείγματα της Σαντορίνης, συμπίπτουν με το εύρος σχεδόν όλων των μετεωριτών με προέλευση τον Άρη. Το δείγμα ISAR 09SJ15 με ποσοστό ανορθίτη An₄₀₋₅₆ ταυτίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό με το εύρος της χημικής σύστασης των πλαγιοκλάστων των μετεωριτών.



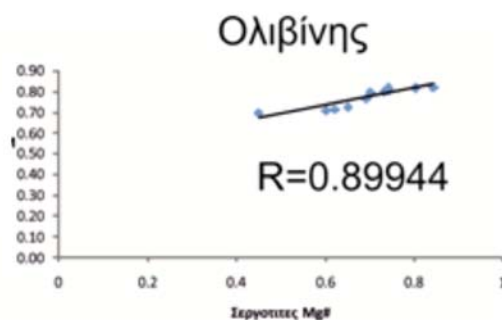
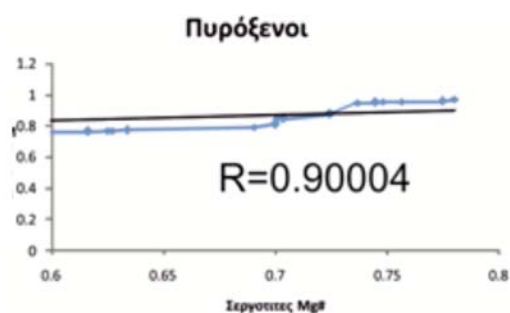
Διάγραμμα 4.8 Συγκριτικό διάγραμμα χημικής σύστασης πλαγιокλάστων (Σαντορίνη, ISAR, ολιβινικοί σεργκοτίτες)

Στη συνέχεια συγκρίναμε τους αριθμούς μαγνησίου (Mg#) των πυροξένων και των ολιβινών καθώς και τον αριθμό ανορθίτη των αποτελεσμάτων των δειγμάτων της Σαντορίνης αρχικά με τα ISAR 09SJ15 και μετέπειτα με ορυκτοχημικά δεδομένα σεργκοτιτών μετεωριτών (Shergotty, NWA 5789, Dhofar 019, Yamato 593, SaU 005). Βλέπουμε πως ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R στην περίπτωση των ολιβινών ισούνται με 0.95, 0.93 για τους πυρόξενους και 0.94 για τα πλαγιόκλαστα.

Στην αντίστοιχη σύγκριση του Mg# με τους ολιβινικούς σεργκοτίτες ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R είναι 0.90 για τους πυρόξενους και 0.89 για τους ολιβίνες.



Διάγραμμα 4.9 Διαγράμματα προβολής κατιόντων Mg# (ολιβίνης, πυρόξενοι) και Ca# (πλαγιόκλαστα) των δειγμάτων της Σαντορίνης προς τα δεδομένα του ISAR 09SJ15



Διάγραμμα 4.10 Διαγράμματα προβολής κατιόντων Mg# (ολιβίνης, πυρόξενοι) και Ca# (Πλαγιόκλαστα) των δειγμάτων της Σαντορίνης προς τα δεδομένα του ISAR 09SJ15

4.4 Ειδικό βάρος

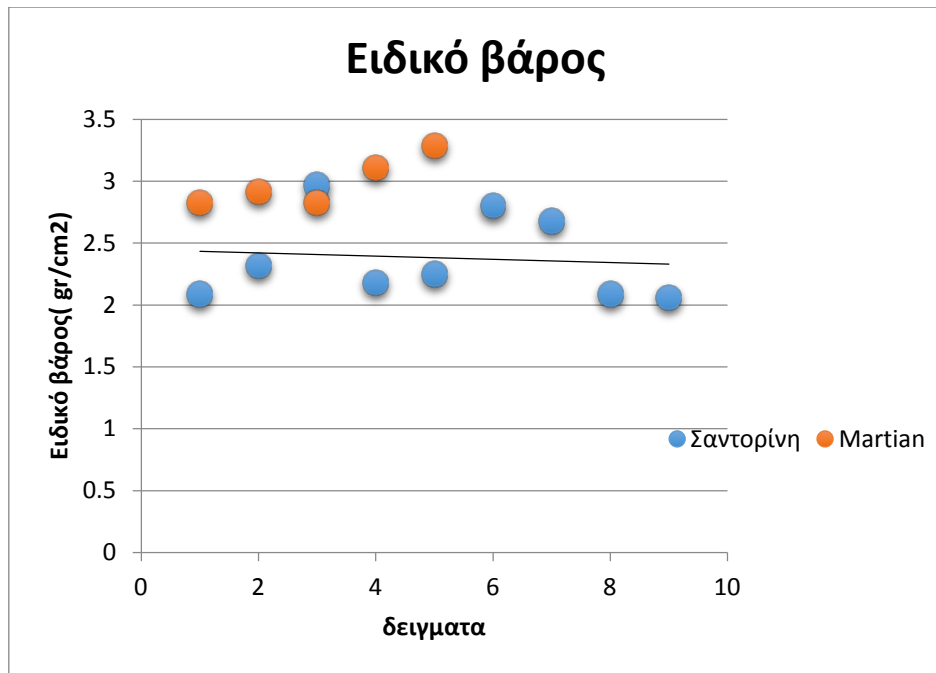
Έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων ειδικού βάρους των δειγμάτων της Σαντορίνης με το αντίστοιχο των ολιβινικών σεργκοτιτών (Shergotty, Zagami, Los Angeles, Govendador Valadares, SaU 005).

Πίνακας 4.4 Ειδικό βάρος δειγμάτων Σαντορίνης

Δείγματα Σαντορίνης	Ειδικό βάρος (gr/cm ³)
San-Bal-2	2,09
San-Bal-3A	2,32
San-Bal-3B	2,97
San-Bal-4A	2,18
San-Bal-4B	2,25
San-Bal-5	2,8
San-Bal-6	2,68
San-Bal-7A	2,09
San-Bal-9A	2,06

Πίνακας 4.5 Ειδικό βάρος μετεωριτών με προέλευση τον Άρη

Ολιβινικοί σεργκοτίτες	Ειδικό βάρος (gr/cm ³)
Shergotty	2,83
Zagami	2,92
Los Angeles	2,83
Govendador Valadares	3,11
Sayh al Uhaymir 005	3,29



Διάγραμμα 4.11 Διάγραμμα σύγκριση ειδικού βάρους (Σαντορίνη, Μετεωρίτες)

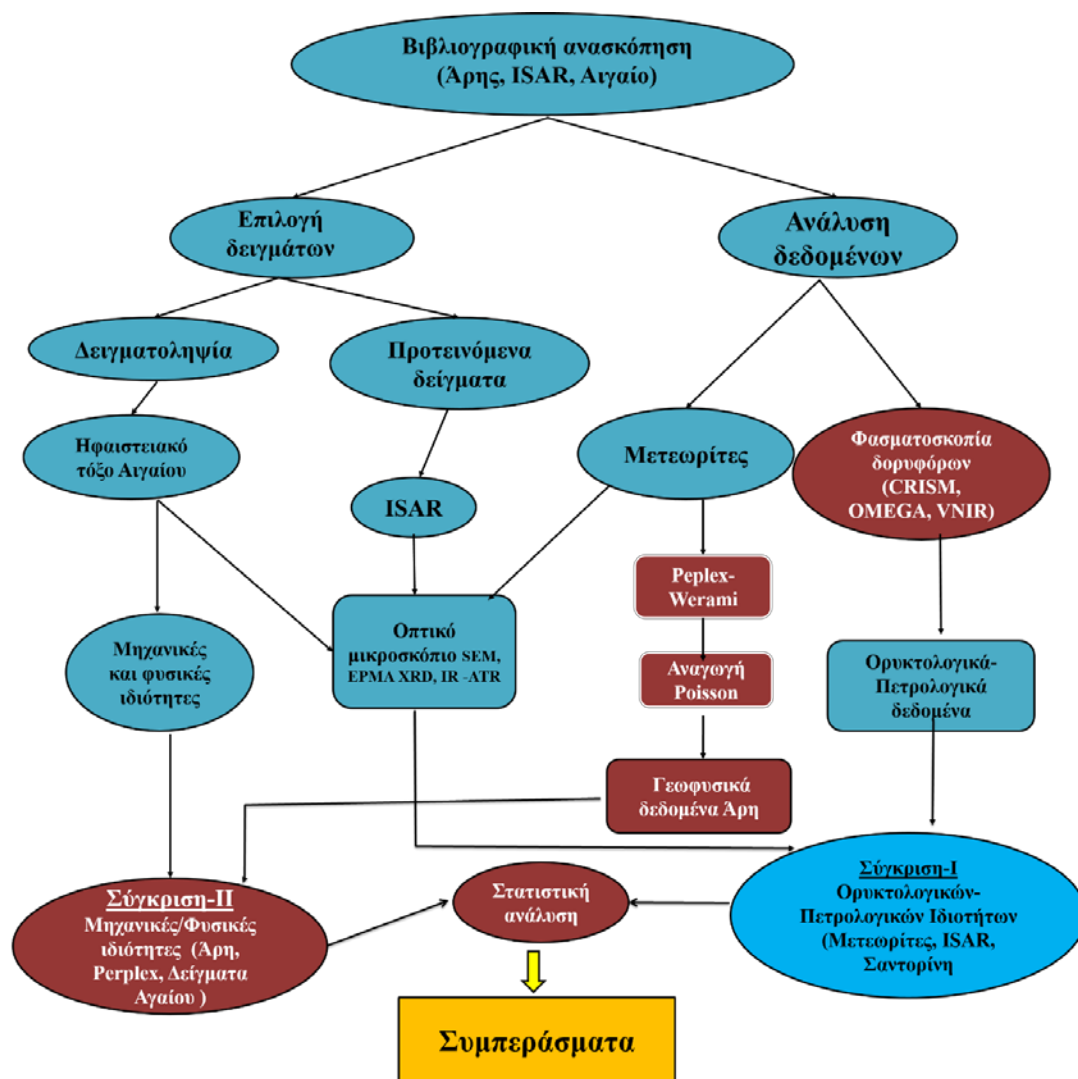
Κεφάλαιο 5^ο Συμπεράσματα

- 1) Η χημική σύσταση ολικού πετρώματος έδειξε πως τα ηφαιστειακά από την περιοχή του Μπάλου ανήκουν στην κατηγορία των βασαλτών. Επίσης, προβάλλονται πολύ κοντά στα αντίστοιχα δείγματα ολιβινικών σεργκοτιτών και στις μέσες συστάσεις που προέκυψαν από τα δεδομένα του Rover Spirit στον κρατήρα Gusev. Από τα δείγματα ISAR το δείγμα 07ZA20 ανήκει στην κατηγορία των τεφριτών και προβάλλεται μακριά από τα αντίστοιχα της Σαντορίνης. Αντίθετα το δείγμα 05IS02 ανήκει στους βασάλτες και προβάλλεται κοντά στα δείγματα της Σαντορίνης.
- 2) Οι μέθοδοι XRD και FTIR-IR ATR για τον προσδιορισμό της ολικής ορυκτολογικής σύστασης των δειγμάτων μας έδειξαν πως υπάρχει κοινή ύπαρξη ορυκτών μεταξύ των δειγμάτων της Σαντορίνης και των δειγμάτων του ISAR (09SJ15, 05IS02, 05IS03, 07ZA20), όπως του φορστερίτικού ολιβίνη, λαβραδόριου, βυτοβνίτη, ανορθίτη, αυγίτη, ενστατίτη και διοψίδιου. Στη μέθοδο IR-ATR συγκρίναμε τα φάσματα των δειγμάτων της Σαντορίνης και των δειγμάτων των ISAR. Αρχικά όλα τα δείγματα εμφανίζουν την κεντρική καμπύλη των πυριτικών ορυκτών μεταξύ 800-1200 Wavenumbers εκτός από το δείγμα 07ZA20 το οποίο έχει μικρότερο εύρος.
- 3) Στην πετρογραφική παρατήρηση συμπεραίνουμε ότι τα δείγματα της Σαντορίνης έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με το πέτρωμα 09S15 του ISAR. Τα πετρώματα της Σαντορίνης πιλοταξική και τραχιτική δομή και εμφανίζονται με διερρηγμένους φαινοκρυστάλλους ολιβίνη και πυρόξενων με μεσαίας τάξης χρώματα πόλωσης, στον οποίων τις ρωγμές εμφανίζονται αργιλικά ορυκτά λόγω εξαλλοίωσης. Μικρότεροι μεγέθους κρύσταλλοι ολιβίνη βρίσκονται στην κύρια μάζα και παρουσιάζουν και αυτοί καφέ χρώμα λόγω της μερικής αντικατάστασης τους από αργιλικά ορυκτά. Σε όλα σχεδόν τα δείγματα τα πλαγιόκλαστα εμφανίζονται στην κύρια μάζα μεγέθους 100-200 μm έχοντας μικροπρισματικό ή σκελετικό σχήμα παρουσιάζοντας και διδυμία. Τους μικροκρυστάλλους πλαγιοκλάστων «σπάνε» φαινοκρύσταλλοι που εμφανίζονται στο δείγμα San-Bal-5 και παρουσιάζουν ιδιαίτερη ζώνωση. Η πυρόξενοι εμφανίζονται ως φαινοκρύσταλλοι με χρώμα απαλό ροζ ή πράσινο έχοντας χαρακτηριστικό υποεδρικό σχήμα. Ο ιστός των δειγμάτων είναι κυρίως πορφυριτικός, καθώς σχεδόν σε όλα τα δείγματα υπάρχουν τόσο φαινοκρύσταλλοι όσο και μικροκρύσταλλοι των ορυκτών στην κύρια μάζα. Η υφή είναι κυρίως ρευστική καθώς τα πλαγιόκλαστα έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό στα δείγματα που μελετήθηκαν.

-
- 4) Το δείγμα ISAR 09SJ15 (Νορβηγία) έχει χαρακτηριστεί ως βασάλτης ανάλογος του κρατήρα Gusev του Άρη (Bost et al. 2013). Περιέχει υπιδιόμορφους φαινοκρυστάλλους ολιβίνη. Η κύρια μάζα αποτελείται από μικροπρισματικούς κρυστάλλους πλαγιόκλαστων (<100μm σε διάμετρο), μικρο-φαινοκρυστάλλους ολιβίνη, πυροξένων και γυαλί. Ο ιστός χαρακτηρίζεται ως πορφυριτικός ενώ η υφή είναι σκωριώδης με το πορώδες να είναι περίπου στο 20%. Οι πυρόξενοι εμφανίζονται με την μορφή υπιδιόμορφων κρυστάλλων. Τα πλαγιόκλαστα εμφανίζονται ως επιμήκεις πρισματικοί μικροκρύσταλλοι ενώ δεν παρουσιάζουν διδυμία. Κρύσταλλοι χαλαζία εμφανίζονται ως ξενοκρύσταλλοι, ενώ τα επουσιώδη ορυκτά που εμφανίζονται στο πέτρωμα αδιαφανή μεταλλικά ορυκτά.
- 5) Τα ορυκτοχημικά δεδομένα όπως η σύσταση του κλινοπυρόξενου ($\text{En}_{36-48}\text{Wo}_{41-44}\text{Fs}_{11-21}$), του ολιβίνη (Fo_{88-70}) και του πλαγιόκλαστου (An_{85-60}), έδειξαν ότι τα πετρώματα της Σαντορίνης είναι περισσότερο εξελιγμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα πετρώματα που δανειστήκαμε από το ISAR. Ιστολογικά, και οι δύο ομάδες πετρωμάτων (Σαντορίνης και ολιβινικοί σεργκοτίτες) εμφανίζουν μεγάλους κρυστάλλους ολιβίνη και μικρότερους κλινοπυρόξενου. Επιπλέον, η συγκριτική αξιολόγηση των ορυκτοχημικών δεδομένων των βασαλτών της Σαντορίνης με αντίστοιχα δημοσιευμένα από ολιβινικούς σεργκοτίτες, έδειξε ότι οι πρώτοι έχουν όμοιες συστάσεις του κέντρου των φαινοκρυστάλλων (γραμμικός συντελεστής συσχέτισης $R=0.90$), αλλά εμφανίζουν μικρότερο βαθμό κλασμάτωσης (λιγότερο εξελιγμένες συστάσεις ολιβίνη και κλινοπυρόξενου).
- 6) Τα βασαλτικά πετρώματα της Σαντορίνης εμφανίζουν αξιοσημείωτη ομοιότητα με τα πετρώματα που έχουν χαρακτηριστεί ως αρειανά ανάλογα ως προς τα δεδομένα των περισσότερων μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην παρούσα μελέτη, ενώ προσεγγίζουν καλύτερα τη χημική και ορυκτολογική σύσταση των ολιβινικών σεργκοτιτών. Καταλήγοντας, η περιοχή Μφάλου της Σαντορίνης, διαθέτει βασαλτικά πετρώματα που φαίνεται ότι αξίζει να αποτελέσουν αρειανό ανάλογο ως προς τις ορυκτολογικές και χημικές ιδιότητές τους.

Προτάσεις για περεταίρω έρευνα

Στην εισαγωγή της μελέτης παρουσιάσαμε ένα διάγραμμα ροής το οποίο περιείχε αναλυτικά τον τρόπο με τον οποίο ήρθε σε πέρας αυτή η μελέτη η οποία αποτελεί ένα κομμάτι μίας συνολικής έρευνας για την εύρεση νέων Αναλόγων στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα δεύτερο διάγραμμα ροής με τις επιπλέον μελέτες που προτείνουμε να γίνουν στον μέλλον.



Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα ροής μεθόδου ολοκληρωμένης μεθόδου. Οι μπλε ελλείψεις είναι οι μέθοδοι που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής, ενώ με μωβ χρώμα απεικονίζονται εκείνες οι μέθοδοι που προτείνουμε να γίνουν στο μέλλον σαν επέκταση της υπάρχουσας μελέτης.

- 1) Επέκταση της έρευνας σε μία δεύτερη περιοχή της Σαντορίνης και στα υπόλοιπα νησιά του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου, εξετάζοντας τα πετρώματα ως προς τα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.
- 2) Εκτίμηση των γεωφυσικών ιδιοτήτων της επιφάνειας του Άρη χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα perplex και το λογισμικό pywerami ώστε να υπολογίσουμε ιδιότητες που

έχουν σχέση με τον ανώτερο φλοιό του πλανήτη (π.χ. αναλογία poison). Για να το πετύχουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα που αφορούν τους μετεωρίτες με προέλευση τον Άρη. Η συγκεκριμένη μελέτη είναι σημαντική διότι θα μας δώσει περαιτέρω δεδομένα για τον ανώτερο φλοιό του Άρη τα οποία είναι απαραίτητα τα επόμενα χρόνια και λόγω της αναστολής της αποστολής Insight για δύο τουλάχιστον χρόνια (Haper et al. 2016).

- 3) Ανάλυση και σύγκριση φασματοσκοπικών δεδομένων από δορυφόρους (CRISM, OMEGA, VNIR) και σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα που παρέχει ο δορυφόρος Landsat-8 για τις περιοχές μελέτης.
- 4) Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων των δειγμάτων όπως η αντοχή στη σημειακή φόρτιση, η αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό.
- 5) Σε επόμενο στάδιο θα πρέπει να γίνουν in-situ φασματοσκοπικές αναλύσεις υπερύθρου με διακριτική ικανότητα που φθάνει το 1 cm ή και λιγότερο όπως εκτενώς περιγράφεται στη βιβλιογραφία (Greenberger et al. 2015).

Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία

- Andújar, J., Scaillet, B., Pichavant, M., & Druitt, T. H. (2015). Differentiation conditions of a basaltic magma from Santorini, and its bearing on the production of andesite in arc settings. *Journal of Petrology*, 56(4), 765-794.
- Agee, C. B., Wilson, N. V., Polyak, V. J., Ziegler, K., McCubbin, F. M., Asmerom, -Y., ... & Steele, A. (2012). Basaltic breccia NWA 7034: unique 2.1 Ga sample of enriched Martian crust. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 75, 5391.
- Bell, J. F., McSween, H. Y., Crisp, J. A., Morris, R. V., Murchie, S. L., Bridges, N. T., ... & Ghosh, A. (2000). Mineralogic and compositional properties of Martian soil and dust: Results from Mars Pathfinder. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E1), 1721-1755.
- Bibring P., Y. Langevin, A. Gendrin et al., *Science* 307, 1576–1581 (2005)
- Blasius KR, Cutts JA, Guest JE, Masursky H. 1977. Geology of the Valles Marineris: First analysis of imaging from the Viking 1 Orbiter Primary Mission. *Journal of Geophysical Research* 82:4067–4091.
- Bost, N., Westall, F., Ramboz, C., Foucher, F., Pullan, D., Meunier, A., ... & Vago, J. L. (2013). Missions to Mars: characterisation of Mars analogue rocks for the International Space Analogue Rockstore (ISAR). *Planetary and Space Science*, 82, 113-127.
- Bouvier, A., Blichert-Toft, J., Vervoort, J. D., & Albarede, F. (2005). The age of SNC meteorites and the antiquity of the Martian surface. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2), 221-233
- Carpenter, A. H. (1948). Principles of historical geology applied to neighboring planets and life on Mars. *Popular Astronomy*, 56, 233.
- Cherkasov, I. I., and V. V. Shvarev. "Lunar soil." Moscow, Izdatel'stvo Nauka, 1975. 144 p. In Russian. 1 (1975).
- Christensen PR, Bandfield JL, Hamilton VE, Ruff SW, Kieffer HH, Titus TN, Malin MC, Morris RV, Lane MD, Clark RL, Jakosky BM, Mellon MT, Pearl JC, Conrath BJ, Smith MD, Clancy RT, Kuzmin RO, Roush T, Mehall GL, Gorelick N, Bender K, Murray K, Dason S, Greene E, Silverman S, Greenfield M. 2001. Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: Investigation description and surface science results. *Journal of Geophysical Research* 106(E10):23823–23871.

-
- Day, J.M.D., Taylor, L.A., Floss, C., and McSween, H.Y. (2006) Petrology and chemistry of MIL 03346 and its significance in understanding the petrogenesis of nakhlites on Mars. *Meteoritics and Planetary Science*, 41, 581–606.
- Dietrich, V.J., Davis, E. and Gartzos, E. 1998. Amphibole in rhyodacites and dacites from the Akrotiri volcanoes and the complexity of discontinuous fractionation. In: CASALE, R. et al. (eds) *Proceedings of the second workshop, Santorini, Greece, 2 to 4 May 1996*. European Commission, 69-80.
- Ehlmann, B.L., Mustard, J.F., Swayze, G.A., Clark, R.N., Bishop, J.L., Poulet, F., Des Marais, D.J., Roach, L.H., Milliken, R.E., Wray, J.J., Barnouin-Jha, O., and Murchie, S.L. (2009) Identification of hydrated silicate minerals on Mars using MRO-CRISM: Geologic context near Nili Fossae and implications for aqueous alteration. *Journal of Geophysical Research*, 114, E00D08.
- Farr, T. G. (2004). Terrestrial analogs to Mars: The NRC community decadal report. *Planetary and Space Science*, 52(1), 3-10.
- First, E., & Hammer, J. (2016). Igneous cooling history of olivine-phyric shergottite Yamato 980459 constrained by dynamic crystallization experiments. *Meteoritics & Planetary Science*.
- Furnes H., Banerjee N. R., Staudigel H., Muehlenbachs K., McLoughlin N., de Wit M., and Van Kranendonk M., 2007. Comparing petrographic signatures of bioalteration in recent to Mesoarchean pillow lavas: Tracing subsurface life in oceanic igneous rocks. *Precambrian Research* 158: 156-176. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.012.
- Georgalas, G. C. 1953. L'éruption du volcan de Santorin en 1950. *Bulletin Volcanologique*. 13. 39-55.
- Gill, J. B. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer-Verlag. Berlin.
- González-Toril, E., Llobet-Brossa, E., Casamayor, E. O., Amann, R., & Amils, R. (2003). Microbial ecology of an extreme acidic environment, the Tinto River. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(8), 4853-4865.
- Goodrich, C. A. (2003). Petrogenesis of olivine-phyric shergottites Sayh al Uhaymir 005 and Elephant Moraine A79001 lithology A. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(19), 3735-3772.
- Goodrich, C. A., Treiman, A. H., Filiberto, J., Gross, J., & Jercinovic, M. (2013). K₂O-rich trapped melt in olivine in the Nakhla meteorite: Implications for petrogenesis of nakhlites and evolution of the Martian mantle. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(12), 2371-2405.

-
- Greenberger R. N., Mustard, J. F., Ehlmann, B. L., Blaney, D. L., Cloutis, E. A., Wilson, J. H., ... & Fraeman, A. A. (2015). Imaging spectroscopy of geological samples and outcrops: Novel insights from microns to meters. *GSA Today*, 25(12), 4-10.
- Greshake A., Fritz, J., and Stöffler, D. (2004) Petrology and shock metamorphism of the olivine-phyric shergottite Yamato 980459: Evidence for a two-stage cooling and a single-stage ejection history. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 3459–2377.
- Grotzinger J. P. (2013). Analysis of surface materials by the Curiosity Mars rover. *Science*, 341(6153), 1475-1475.
- Grier, Jennifer A., and Andrew S. Rivkin. *Inner Planets*. Vol. 2. ABC-CLIO, 2010.
- Howard A, Matsubara Y 2007 *Eos Trans. AGU* 88 P34A-01.
- Harper¹ E. D. Skulsky¹, M. R. Grover¹, C. E. Szalai¹, D. M. Kipp¹, J. A. Wertz¹, E. P. Bonfiglio¹, R. W. Maddock STATUS OF INSIGHT ENTRY, DESCENT, AND LANDING FOR 2018 LAUNCH OPPORTUNITY.
- Hodges C. A., & Moore, H. J. (1994). *Atlas of volcanic landforms on Mars* (No. 1534).
- D. Jerolmack et al., *Geophys. Res. Lett.* 31, L21701.
- Kiefer, W. S., & Li, Q. (2009). Mantle convection controls the observed lateral variations in lithospheric thickness on present-day Mars. *Geophysical Research Letters*, 36(18).
- Kemurjian, A. L., Gromov, V. V., Kazhukalo, I. F., Malenkov, M. I., Mishkinyuk, V. K., Petriga, V. N., & Rosentsweig, I. I. (1993). *Planet Rovers. Mashinostroyeniye*, Moscow.
- Krotikov, V. D., & Shchuko, O. B. (1963). The heat balance of the lunar surface layer during a lunation. *Soviet Astronomy*, 7, 228-232.
- Ktenas, C. 1935. Le groupe d'îles du Santorin. Contribution à l'étude des laves éruptives et quaternaires de la mer Égée. *Pragm. Academia Athens*, A4, 53-57.
- Lapen, T. J., Richter, M., Brandon, A. D., Debaille, V., Beard, B. L., Shafer, J. T., & Peslier, A. H. (2010). A younger age for ALH84001 and its geochemical link to shergottite sources in Mars. *Science*, 328(5976), 347-351.
- Leshin, L. A., Mahaffy, P. R., Webster, C. R., Cabane, M., Coll, P., Conrad, P. G., ... & Eigenbrode, J. L. (2013). Volatile, isotope, and organic analysis of martian fines with the Mars Curiosity rover. *Science*, 341(6153), 1238937.
- Le Pichon, X Angelier J Aubouin and 11 others 1979. From subduction to transform motion: a seabeam survey of the Hellenic trench system. *Earth and Planetary Science Letters*, 44, 441-450.
- Liatsikas Mineralogie und chemismus der laven des ausbruchs 1939-1941 des Santorin-vulkans. *Prakt. Academia Athens*, 17, 95-102.
-

-
- Lodders, K. (1998). A survey of shergottite, nakhlite and chassigny meteorites whole-rock compositions. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(S4), A183-A190.
- Malin, M. C. (1979). Mars: Evidence of indurated deposits of fine materials. In *Mars* (Vol. 1, p. 54).
- Mangold, N., Adeli, S., Conway, S., Ansan, V., & Langlais, B. (2012). A chronology of early Mars climatic evolution from impact crater degradation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117(E4).
- Marlow, J. J., Martins, Z., & Sephton, M. A. (2008). Mars on Earth: soil analogues for future Mars missions. *Astronomy & Geophysics*, 49(2), 2-20.
- McGill, G. E., & Dimitriou, A. M. (1990). Origin of the Martian global dichotomy by crustal thinning in the late Noachian or early Hesperian. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B8), 12595-12605.
- M. McLennan, M.A. Sephton, C. Allen et al., Planning for Mars Returned Sample Science: Final report of the MSR End-to-End International Science Analysis Group (E2E-iSAG) (2011). The Mars Exploration Program Analysis Group (MEPAG) at <http://mepag.jpl.nasa.gov/reports/>, 101 pp.
- Malin, M. C., & Edgett, K. S. (2000). Sedimentary rocks of early Mars. *Science*, 290(5498), 1927-1937.
- Malin, M. C., & Edgett, K. S. (2003). Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. *Science*, 302(5652), 1931-1934.
- Marlow, J. J., Martins, Z., & Sephton, M. A. (2008). Mars on Earth: soil analogues for future Mars missions. *Astronomy & Geophysics*, 49(2), 2-20.
- McLennan, S.M., and Grotzinger, J.P. (2008) The sedimentary cycle on Mars. In *McSweeney and Treiman A.H. "Martian meteorites Reviews in Mineralogy and Geochemistry"*, January 1998, v. 36, p. 6.1-6.
- McSween, H.Y., Arvidson, R.E., Bell, J.F., Blaney, D., Cabrol, N.A., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crisp, J.A., Crumpler, L.S., Des Marais, D.J., and others (2004). Basaltic rocks analyzed by the Spirit rover in Gusev Crater. *Science*, 305, 842–845.
- Ming, D. W., Morris, R. V., Bernhard, R. P., & Adams, J. B. (1988, March). Mineralogy of a suite of Martian analog soils from Hawaii. In *Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 19).
- Moore, J. M., & Howard, A. D. (2003, March). Ariadnes-Gorgonum knob fields of north-western Terra Sirenum, Mars. In *Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 34, p. 1402).
-

-
- Moroz, V. I. (1978). Physics of planet Mars. Physics of planet Mars., by Moroz, VI. Moskva (USSR): Nauka, Glavnaya Redaktsiya Fiziko-Matematicheskoy Literatury,
- Muttik, N., McCubbin, F. M., Keller, L. P., Santos, A. R., McCutcheon, W. A., Provencio, P. P., ... & Agee, C. B. (2014). Inventory of H₂O in the ancient Martian regolith from Northwest Africa 7034: The important role of Fe oxides. *Geophysical Research Letters*, 41(23), 8235-8244.
- Navarro-González, R. de la Rosa, J., Iñiguez, E., Molina, P., Miranda, L. D., ... & Amils, R. (2006). The limitations on organic detection in Mars-like soils by thermal volatilization–gas chromatography–MS and their implications for the Viking results. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(44), 16089-16094.
- Nedell SS, Squyres SW, Andersen DW. 1987. Origin and evolution of the layered deposits in the Valles Marineris, Mars. *Icarus* 70:409–441. Nimmo F, Tanaka K. 2005. Early crustal evolution of Mars. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33:133–161.
- Neukum G., Ivanov B.A, in *Hazards due to Comets and Asteroids*, ed. by T. Gehrels et al. (University of Arizona Press, Tucson, 1994), pp. 359–416.
- Neuman va Pandag M. 1936. Die geschichte des vukanismus Santorins von ihren Anafangen bis zum zerstoren Bimssteinausbruch um die mitte des 2. Jahrtausendv Chr. In: RECK, H. (ed.) *Santorin - Der Werdegang eines Inselvulkans und sein Ausbruch 1925-1928*, 1. D. Reimer, Berlin, 1-72.
- Pe, G. G., & Piper, D. J. W. (1972). Vulcanism at subduction zones; The Aegean area. *Bull. Geol. Soc. Greece*, 9, 113-144.
- F. Poulet, C. Gomez, J.-P. Bibring et al., *J. Geophys. Res.* 112, E08S02 (2007) A.D. Rogers, P.R. Christensen, *J. Geophys. Res.* 112, E01003 (2007).
- A.A. Siddiqi, *Deep Space Chronicle: A Chronology of Deep Space and Planetary Probes 1958-2000*, Monographs in Aerospace History 24, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 2002.
- Siddiqi, A. A., & Launius, R. (2002). *Deep Space Chronicle: A Chronology of Deep Space and Planetary Probes 1958-2000*.
- Singer R B 1982 *JGR* 87 10159–10168.
- Snook, K. J., & Mendell, W. W. (2004, March). The need for analogue missions in scientific human and robotic planetary exploration. In *Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 35, p. 2130).
-

-
- Stolper, E., & McSween, H. Y. (1979). Petrology and origin of the shergottite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(9), 1475-1485-1477-1483-1498. 352p., 1.
- Squyres S.W. et al., "The Spirit Rover's Athena Science Investigation at Gusev Crater Planum, Mars," *Science* 305: 794-799, 2004.
- Squyres, S. W., Arvidson, R. E., Bollen, D., Bell, J. F., Brueckner, J., Cabrol, N. A., ... & Crumpler, L. (2006). Overview of the opportunity mars exploration rover mission to meridiani planum: Eagle crater to purgatory ripple. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E12).
- Tanaka, K. L., Scott, D. H., & Greeley, R. (1992). Global stratigraphy. *Mars, 1*, 345-382.
- Tornabene, L.L., Moersch, J.E., McSween, H.Y., McEwen, A.S., Piatek, J.L., Milam, K.A., and Christensen, P.R. (2006) Identification of large (2–10 km) rayed craters on mars in THEMIS thermal infrared images: Implications for possible martian meteorite source regions. *Journal of Geophysical Research*, 111, E10006.
- Treiman, A. H. (2005). The nakhlite meteorites: Augite-rich igneous rocks from Mars. *Chemie der Erde*, 65(3), 203-270.
- Watters, T. R., McGovern, P. J., & Irwin III, R. P. (2007). Hemispheres apart: The crustal dichotomy on Mars. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 621-652.
- Williams, D. A., Greeley, R., Ferguson, R. L., Kuzmin, R., McCord, T. B., Combe, J. P., ... & Pinet, P. (2009). The Circum-Hellas Volcanic Province, Mars: Overview. *Planetary and Space Science*, 57(8), 895-916.
- Wyatt M. B., & McSween, H. Y. (2002). Spectral evidence for weathered basalt as an alternative to andesite in the northern lowlands of Mars. *Nature*, 417(6886), 263-266.