



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ
ΜΕΤΕΩΡΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ
ΧΗΜΕΙΑΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΠΑΛΜΙΚΟ
ΛΕΙΖΕΡ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΚΗ ΜΑΡΙΑ-ΡΟΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΗΛΙΑΣ ΧΑΤΖΙΘΕΟΔΩΡΙΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ
ΜΕΤΕΩΡΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ
ΧΗΜΕΙΑΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΠΑΛΜΙΚΟ
ΛΕΙΖΕΡ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΚΗ ΜΑΡΙΑ-ΡΟΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΗΛΙΑΣ ΧΑΤΖΙΘΕΟΔΩΡΙΔΗΣ

Η ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ηλίας
Χατζηθεοδωρίδης

Καθηγητής Μεταλλειολόγων -
Μεταλλουργών Μηχανικών

Μαρία Όξενκιουν –
Πετροπούλου

Ομότιμη καθηγήτρια Χημικών
Μηχανικών

Σπυρίδων
Παπαευθυμίου

Αναπληρωτής καθηγητής
Μεταλλειολόγων -
Μεταλλουργών Μηχανικών

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα προπτυχιακή μελέτη με τίτλο : **ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΜΕΤΕΩΡΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΠΑΛΜΙΚΟ ΛΕΙΖΕΡ**, μου ανατέθηκε από τον κ. Ηλία Χατζηθεοδωρίδη, καθηγητή της Σχολή Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Αθηνών, τον Ιούλιο του 2022. Τον ευχαριστώ θερμά για την αμέριστη συμπαράσταση και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μελέτης.

Στο σημείο αυτό, θέλω και οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την διδάκτορα Νίκη Αντωνοπούλου - Αθέρα, που με συμβούλεψε και μου έδωσε σημαντικές πληροφορίες.

Τέλος, ευχαριστώ όλους τους ανθρώπους που μου συμπαραστάθηκαν, συναναστράφηκαν μαζί μου, με δίδαξαν και συνέβαλλαν στην μέχρι στιγμής πορεία μου, ειδικά την οικογένειά για το «ζείν και το εύ ζείν».

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη επικεντρώνεται στην έρευνα της συμπεριφοράς των χημικών στοιχείων των ορυκτών στους μετεωρίτες κάτω από ακραίες συνθήκες όπως εκείνες που επικρατούν κατά την είσοδό τους στην ατμόσφαιρα της Γης και την τριβής που αναπτύσσεται. Η γνώση του τρόπου συμπεριφοράς τους είναι σημαντική καθώς η συγκεκριμένη πληροφορία συμβάλλει στην ερμηνεία των φασμάτων των μετεώρων και στην ορθότερη προσέγγιση της χημικής τους σύστασης κατά την πτώση τους, που με την σειρά της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση του είδους και της προέλευσής τους, ιδιαίτερα γιατί τα περισσότερα μετέωρα καταστρέφονται πλήρως πριν φτάσουν στην επιφάνεια της Γης. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος σκοπός, δείγματα μετεωριτών αλλά και καθαρών φάσεων ορυκτών ακτινοβολήθηκαν με παλμικά laser έτσι ώστε να γίνει μια προσπάθεια προσομοίωσης της αφαίρεσης υλικού λόγω τήξης που υφίστανται οι μετεωρίτες υπό τις φυσικές συνθήκες της πτώσης τους και της τριβής με την ατμόσφαιρα. Τα δείγματα και η χημική τους σύσταση εξετάστηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο πριν την ακτινοβολήση κι έπειτα από αυτή, μελετήθηκε το κατακεραματισμένο υλικό που συλλέχθηκε ενώ η ορυκτολογία προέκυψε μέσω στοιχειομετρικής ανάλυσης. Τόσο τα καθαρά ορυκτά όσο και τα δείγματα μετεωρίτη εμφάνισαν θραύσματα αλλά και σφαιρικούς σχηματισμούς από την σημειακή τήξη του δείγματος. Οι χημικές αναλύσεις με EDX που έγιναν στην κάθε φάση απεικονίστηκαν με διαγράμματα οξειδίων ενώ δημιουργήθηκαν και πίνακες με κάποιες βασικές παραμέτρους. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν σε κάποιες περιπτώσεις αυξημένη κινητικότητα στοιχείων, διαφυγή αυτών, αλλά και κάποια επικάθηση στις επιφάνειες των θραυσμάτων. Τα πιο ευπαθή ορυκτά παρατηρήθηκε να είναι τα πλαγιόκλαστα που χαρακτηρίζονται από την μεγάλη περιεκτικότητα στα γεωχημικώς ευκίνητα αλκάλια και αλκαλικές γαίες, ενώ τα υπόλοιπα ορυκτά εμφάνισαν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και μικρότερες αλλαγές.

ABSTRACT

This postgraduate study focuses on the investigation of the behavior of the chemical elements of minerals in meteorites under extreme conditions, such as those prevailing during their fall and the increased temperatures induced by the gases of the atmosphere. The knowledge of their behavior is necessary as this specific information contributes to the interpretation of the spectra of meteorites during their fall and a better approach to their chemical composition, which can suggest their recognition of the group and the origin of these meteors, a significant information to understand the whole inventory of materials of our Solar System, especially because many meteors do not survive the entry to the terrestrial atmosphere and thus, they are lost. To achieve this specific purpose, samples of meteorites as well as pure mineral phases have been irradiated with pulsed lasers to attempt to simulate the ablation that meteorites undergo under natural conditions. The samples and their chemical composition were examined under the electron microscope before the laser ablation process and after that, the fragmented material was collected and studied the same way while the mineralogy was determined through stoichiometric analysis. Both pure minerals and meteorite samples gave fragments as well as spherical formations, created by the spot-melting of the sample. The EDX chemical analyses performed in each phase were presented with oxide diagrams while some tables were also created, with some basic parameters. The results of the investigation presented in some cases show increased mobility of the elements, outgassing and some re-deposition. The most vulnerable minerals are observed to be the feldspars, of which their composition is characterized by alkalis and alkaline earths, while the rest of the minerals seem to have greater durability and lesser alterations.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Θεωρητικό Μέρος.....	1
Εισαγωγή.....	1
Είδη και Κατηγορίες Μετεωριτών.....	2
Σημασία των Μετεωριτών και των Μετεώρων Σωμάτων στην Αστρονομία.....	4
Lasers και Εφαρμογές.....	4
Μέθοδος του Laser Ablation.....	5
Ηλεκτρονική Μικροσκοπία.....	7
Αναλύσεις EDX.....	9
Πειραματικό Μέρος.....	11
Δείγματα.....	11
ERG CHECH 002 (EC 002).....	11
RAMLAT AS SAHMAH 445 (RAS 445).....	19
Καθαρές Φάσεις Ορυκτών (Άστριοι Και Πλαγιόκλαστα).....	21
Αναλυτικές Μέθοδοι.....	24
Laser Ablation.....	24
Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο.....	28
Αποτελέσματα – Συζήτηση.....	29
Καθαρές Φάσεις Ορυκτών (Πλαγιόκλαστα).....	30
Δείγματα Μετεωριτών.....	36
Συμπεράσματα.....	47
Βιβλιογραφία.....	49

Θεωρητικό Μέρος

Εισαγωγή

Η μελέτη των μετεώρων σωμάτων αλλά και των φασμάτων που εκπέμπουν είναι θεμελιώδους σημασίας για την επιστήμη της αστρονομίας. Καθώς ένα μετεωροειδές σώμα εισέρχεται στην εξώσφαιρα της Γης, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την πτώση του, λόγω των τριβών, μπορεί να υπερβούν και τους 10.000°C [1] ενώ οι ταχύτητες κυμαίνονται κατά μέσο όρο στα 50 km/s [2]. Δεδομένων των προαναφερθέντων συνθηκών το μετέωρο αποκτά μια μορφή πύρινης σφαίρας η οποία περιβάλλεται από πλάσμα λόγω των ιονισμένων αερίων και καταλήγει σε μια φωτεινή ουρά [3]. Κατά την πτώση τους τα περισσότερα μετέωρα ανιχνεύονται στο τμήμα της μεσόσφαιρας καθώς αφήνουν ένα φωτεινό ίχνος στον ουρανό το οποίο καταγράφεται από ένα δίκτυο καμερών και μετρείται από φασματογράφους. Με τον τρόπο αυτό παρέχονται ποιοτικές και ποσοτικές στοιχειακές αναλύσεις των σωμάτων αυτών [4]. Όταν οι πληροφορίες αυτές συνδυαστούν με τις πληροφορίες σχετικά με την τροχιά αυτών των σωμάτων, μπορεί να ανιχνευτεί η προέλευσή τους και να γίνει η σύνδεσή τους με κάποιο ουράνιο σώμα. Για να επιτευχθούν αυτές οι στοιχειακές αναλύσεις χρειάζεται βαθιά κατανόηση της οπτικής συμπεριφοράς του πλάσματος ενώ ακολουθείται μια περίπλοκη διαδικασία με την οποία γίνεται σύγκριση των φασμάτων που έχουν συλλεχθεί με πειραματικά φάσματα στοιχείων, από βάσεις δεδομένων [4], [5]. Για την πραγματοποίηση τέτοιων αποτιμήσεων είναι απαραίτητο να υπάρχουν εμπλουτισμένες βάσεις δεδομένων με φάσματα όλων των στοιχείων. Στην προσπάθεια μιας συνεχούς ανανέωσης τέτοιου είδους πληροφοριών πραγματοποιούνται πειράματα προσομοίωσης κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες. Σκοπός είναι να προσεγγιστούν, το δυνατόν περισσότερο, οι συνθήκες πτώσης των μετεώρων και αυτό μπορεί να γίνει με την χρήση laser ως πηγή ενέργειας για την ακτινοβολήση των δειγμάτων μετεωριτών και την δημιουργία πλάσματος, έτσι ώστε να καταγραφεί το εκπεμπόμενο φάσμα και να καταχωρηθεί [6], [7]. Σχετικά πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί και από τους Martin Fergus et al. προτείνοντας νέες μεθόδους για την αποτίμηση δεδομένων από φάσματα [4], ελέγχοντας την εγκυρότητα των δεδομένων που λαμβάνονται από τα πειράματα προσομοίωσης αυτού του φυσικού φαινομένου [6], [3] όπως και την επίδραση που

έχει το laser μορφολογικά, πάνω στην επιφάνεια των χρησιμοποιούμενων δειγμάτων των μετεωριτών.

Με την παρούσα μελέτη θα εξεταστεί περαιτέρω η επίδραση των laser στα δείγματα μετεωριτών. Στόχος της είναι η διερεύνηση της τροποποίησης της χημείας του δείγματος, εφαρμόζοντας την μέθοδο του laser ablation. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξαχθούν περαιτέρω πληροφορίες για την συμπεριφορά των χημικών στοιχείων στα δείγματα και κατ' επέκταση, στα μετέωρα σώματα.

Είδη και Κατηγορίες Μετεωριτών

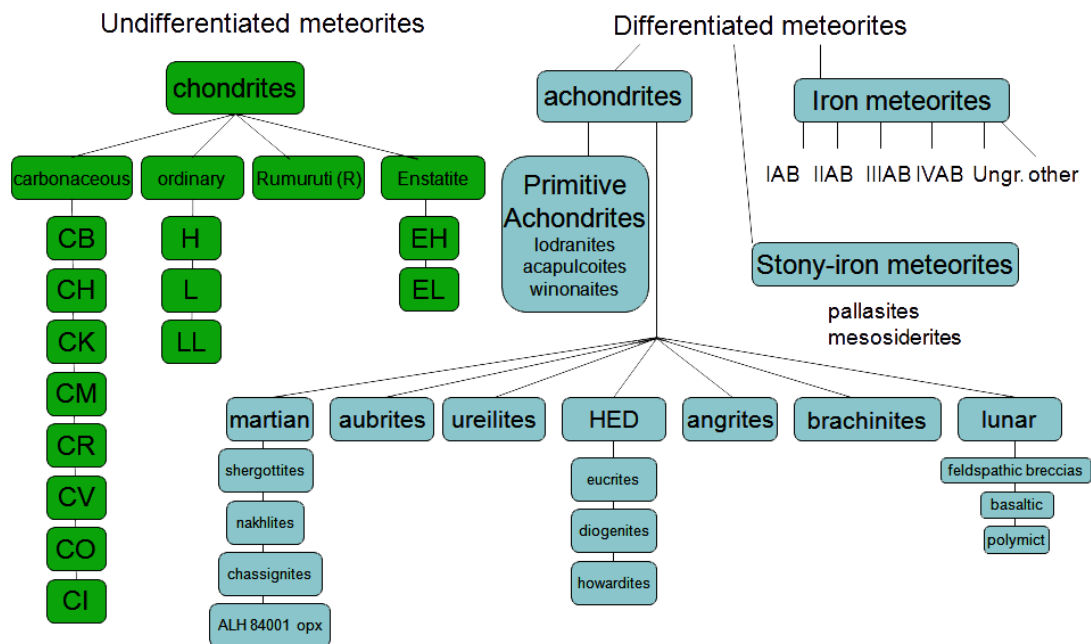
Οι μετεωρίτες είναι βραχώδη σώματα τα οποία εισβάλλουν στην ατμόσφαιρα της Γης και καταφέρνουν να καταλήξουν στην επιφάνειά της. Η σύσταση των σωμάτων αυτών ποικίλει, με αποτέλεσμα οι μετεωρίτες να κατηγοριοποιούνται σε λιθομετεωρίτες, σιδηρομετεωρίτες και σε μια τρίτη ομάδα που αποτελεί έναν συνδυασμό των δύο προηγούμενων (λιθοσιδηρομετεωρίτες) [8].

Οι λιθομετεωρίτες είναι μια ομάδα μετεωριτών που έχουν δυνατότητα να διαχωριστούν σε επιπλέον κατηγορίες, τους αχονδρίτες και τους χονδρίτες μετεωρίτες. Οι αχονδρίτες μετεωρίτες είναι σώματα που προέρχονται από μερική τήξη του μητρικού τους υλικού και με την ανακρυστάλλωση που πραγματοποιείται, παρουσιάζουν εμφανή διαφοροποίηση από αυτό [9]. Οι χονδρίτες μετεωρίτες, σε αντίθεση με τους αχονδρίτες, είναι σώματα που δεν έχουν υποστεί μεγάλη διαφοροποίηση από το μητρικό σώμα, παρέχοντας έτσι πιο άμεσες πληροφορίες για την χημική σύσταση και την ορυκτολογία του ηλιακού συστήματος [10].

Μια επιπλέον διάκριση στους μετεωρίτες γίνεται από τον Mason (1962) με βάση την σύστασή τους. Ο Mason χωρίζει τους χονδρίτες σε ενστατιτικούς, ολιβινικούς-μπρονζιτικούς, ολιβινικούς-υπερσθενικούς και ανθρακομετεωρίτες. Το 1964 οι Mason και Wiik κάνουν διάκριση μιας ακόμα ομάδας χονδριτών. Οι υπερσθενικοί χονδρίτες που εμφανίζουν μεγάλο βαθμό οξείδωσης και είναι φτωχότεροι σε μέταλλο, ονομάστηκαν αμφοτερικοί χονδρίτες. Οι ολιβινικοί μπρονζιτικοί και υπερσθενικοί μαζί με τους αμφοτερικούς, δομούν τους κοινούς χονδρίτες μετεωρίτες [10]. Ορυκτολογικά οι χονδρίτες χαρακτηρίζονται από ορυκτά όπως οι ολιβίνες,

ορθοπυρόξενοι, άστριοι αλβιτικής σύστασης, τροϊλίτης, πυρόξενοι πλούσιοι σε ασβέστιο και μεταλλικός σίδηρος-νικέλιο και χρωμίτη [10], [11]. Οι αχονδρίτες μετεωρίτες διακρίνονται αρχικά, σύμφωνα με τον Mason, σε πλούσιους σε ασβέστιο κι έπειτα σε φτωχούς σε ασβέστιο. Οι πλούσιοι σε ασβέστιο είναι οι αυγιτικοί, οι διοψιδίου-ολιβίνη και οι πυροξενικοί-πλαγιοκλαστικοί αχονδρίτες. Οι τελευταίοι μάλιστα χωρίζονται σε ακόμα δύο υποκατηγορίες, και ονομάζονται Ευκρίτες και Χοαρδίτες. Οι φτωχοί σε ασβέστιο αχονδρίτες περιλαμβάνουν τους ενστατιτικούς, τους υπερσθενικούς τους ολιβινικούς και τους αχονδρίτες ολιβίνη-περιστερίτη. Ορυκτολογικά, οι αρχέγονοι αχονδρίτες είναι αρκετά παρόμοιοι με τους χονδρίτες μετεωρίτες [11].

Μια σχηματική απεικόνιση της αυτής της ταξινόμησης των μετεωριτών δίδεται στο ακόλουθο διάγραμμα της Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Διάγραμμα κατηγοριοποίησης μετεωριτών. Πηγή εικόνας [12].

Σημασία των Μετεωριτών και των Μετεώρων Σωμάτων στην Αστρονομία

Ως εύρημα, οι μετεωρίτες έχουν μεγάλη σημασία καθώς αποτελούν μια άμεση πηγή πληροφοριών για την σύσταση, την εξέλιξη αλλά και τα σώματα του ηλιακού συστήματος [13]. Δυστυχώς, μόνο ένα μικρό ποσοστό μετεωριτών που εισέρχονται στην γήινη ατμόσφαιρα ανακαλύπτεται καθώς οι περισσότεροι είτε θα προσγειωθούν στις θάλασσες και τους ωκεανούς, είτε θα κατακερματιστούν και θα εξαχνωθούν πριν καν φτάσουν στην επιφάνεια της Γης [14]. Τέτοιες πληροφορίες είναι η χημική σύσταση των σωμάτων, η ορυκτολογία, διάφορες θερμοκρασίες, χρονολογίες κ.α. Λόγω του μικρού πλήθους των δειγμάτων των μετεωριτών, η αμέσως κοντινότερη πηγή πληροφοριών είναι τα μετέωρα. Τα μετέωρα θεωρητικά παρέχουν το ίδιο είδος πληροφοριών με τους μετεωρίτες. Το γεγονός όμως ότι δεν καταφθάνουν στην Γη, αναγκάζει την επιστημονική κοινότητα να χρησιμοποιήσει εναλλακτικές μεθόδους εκτίμησης της χημείας και της ορυκτολογίας τους.

Lasers και Εφαρμογές

Τα lasers είναι συσκευές παραγωγής ή ενίσχυσης ακτινοβολίας στις επιθυμητές συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η λειτουργία τους βασίζεται σε μια γενική αρχή η οποία ξεκίνησε από την ενίσχυση μικροκυμάτων και επεκτάθηκε σε μεγαλύτερες συχνότητες οι οποίες αντιστοιχούν στο οπτικό φάσμα, ενισχύοντας και πάλι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες [15]. Γρήγορα τα laser εντάχθηκαν σε ένα πλήθος συσκευών ενώ απέκτησαν και έναν τεράστιο όγκο εφαρμογών. Οι κατηγορίες laser που συναντώνται είναι τα Gas lasers, τα Liquid lasers τα Solid state lasers [16], αργότερα δημιουργήθηκε η κατηγορία Semiconductor lasers [17] η οποία υπαγόταν στα Solid state lasers και τέλος είναι τα laser που κατηγοριοποιούνται σε μια ευρύτερη ομάδα και πιο γενική, τα Other lasers. Πιο αναλυτικά οι κατηγορίες των laser με τις υποκατηγορίες τους φαίνονται στον Πίνακα 1.

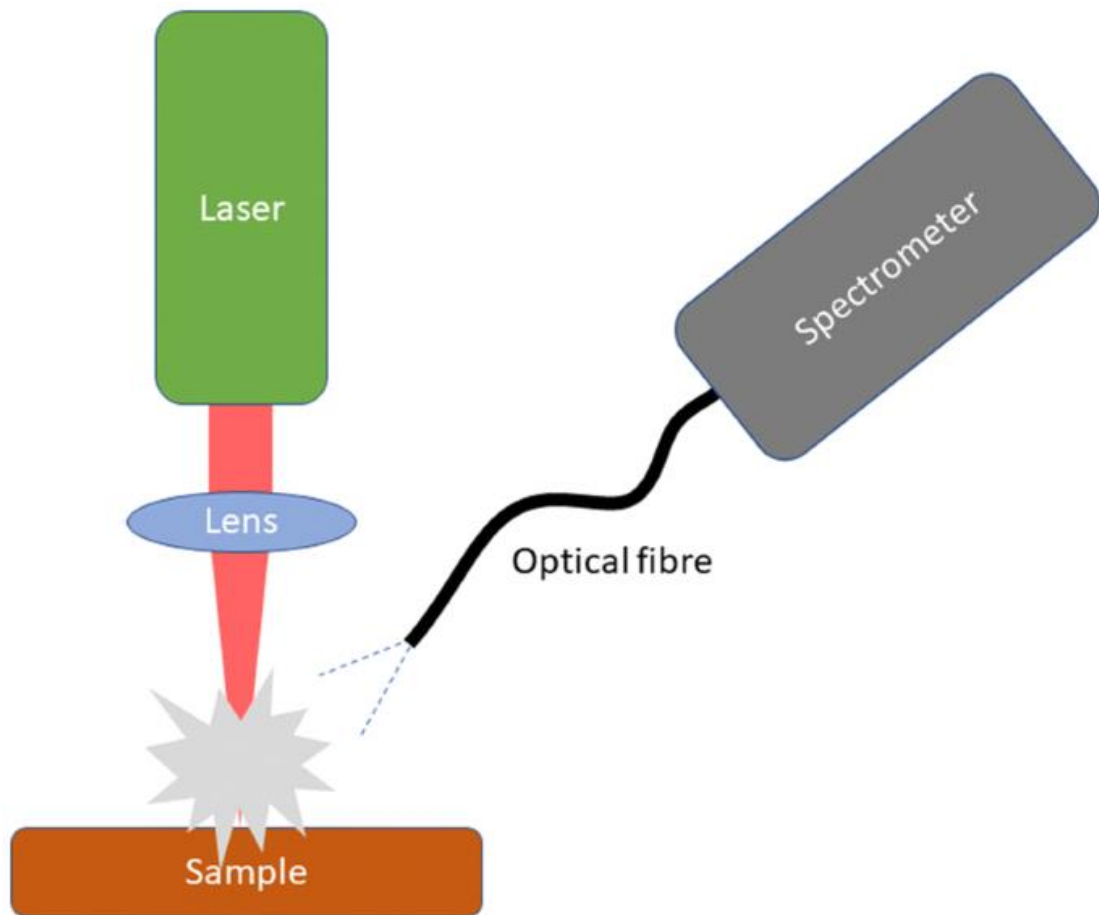
Πίνακας 1: Είδη και κατηγορίες Laser [16]

Κατηγορίες και Είδη Laser	
Gas Lasers	Neutral Atom Gas Lasers, Ionized Gas Lasers, Molecular Gas Lasers, Far Infrared and Millimeter Wave Gas Lasers
Liquid Lasers	Liquid Organic Dye Lasers, Rare Earth Liquid Lasers, Liquid Polymer Lasers, Liquid Excimer Lasers
Solid State Lasers	Crystalline Paramagnetic Ion Lasers, Glass Lasers, Solid State Dye Lasers, Color Center Lasers, Polymer Lasers, Solid State Excimer Lasers, Raman, Brillouin and Soliton Lasers
Semiconductor Lasers	
Other Lasers	Extreme Ultraviolet and Soft X-Ray Lasers, Free Electron Lasers, Nuclear Pumped Lasers, Natural Lasers, Inversionless Lasers, Amplification of Core-Valence Luminescence

Οι εφαρμογές τους έχουν επεκταθεί σχεδόν σε όλους τους τομείς των επιστημών και σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας. Χρησιμοποιούνται ευρέως στις επιστήμες της χημείας, της φυσικής, της ιατρικής, της γεωλογίας, σε βιομηχανίες συγκόλλησης, παραγωγής, επεξεργασίας και αφαίρεσης υλικών, σε βιομηχανίες γεωτρήσεων, στις τηλεπικοινωνίες και αμέτρητα άλλα πεδία.

Μέθοδος του Laser Ablation

Με τον όρο ablation περιγράφεται μια διαδικασία αποκοπής ενός τμήματος από μια κύρια μάζα μετά από την προσφορά ενέργειας από κάποια πηγή. Ως φυσικό φαινόμενο απαντάται καθώς εισέρχονται τα μετεωροειδή σώματα στην ατμόσφαιρα των πλανητών. Όταν συμβαίνει αυτό, οι τριβές από την αλληλεπίδραση αερίων και σωμάτων και κατ' επέκταση οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι εξαιρετικά μεγάλες οδηγώντας στην τήξη ή στον κατακερματισμό ενός μέρους ή ολόκληρου του μετεώρου. Παράλληλα δημιουργούνται αέρια που ιονίζονται και σχηματίζουν πλάσμα [18]. Όταν η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται εργαστηριακά και ως πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται η ακτινοβολία από laser, τότε η μέθοδος αυτή ονομάζεται "Laser Ablation". Με την εφαρμογή της, τα τεμάχια μπορούν να αποσπαστούν από την κύρια μάζα με τήξη, εξάχνωση, ιονισμό, διάβρωση ή και έκρηξη [19].



Εικόνα 2: Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας laser ablation σε συνδυασμό με χρήση φασματομέτρου για προσδιορισμό της χημικής σύστασης του δείγματος. Στο σημείο ακτινοβολήσης του δείγματος δημιουργείται πλάσμα και σωματίδια από τον παλμό. Πηγή εικόνας: [20]

Laser Ablation – Εφαρμογή σε μετεωρίτες

Η αλληλεπίδραση των laser υψηλής ισχύος με στερεά υλικά ξεκίνησε σχεδόν ταυτόχρονα με την εμφάνιση των laser. Ένας από τους όρους που χρησιμοποιείται για να γίνει η περιγραφή του γεγονότος αυτού, είναι αυτός του laser ablation. Το laser ablation ξεκίνησε να αποκτά σημασία για την επιστημονική κοινότητα με την πάροδο των χρόνων, καθώς άρχισε να αποκτά ολοένα και αυξανόμενες εφαρμογές. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε για στοιχειακές αναλύσεις στα πεδία της γεωλογίας και της βιολογίας και της μεταλλουργίας [21]. Εν συνεχεία, αποδείχτηκε ότι η μέθοδος αυτή είναι ικανή για σύνθεση νανοκρυστάλλων και νανοσωματιδίων από υγρές φάσεις [22], [23], νανοσωλήνων άνθρακα [24], την συγκόλληση μεταλλικών υλικών [25], την προσομοίωση ορισμένων φυσικών διεργασιών [3] κ.α.

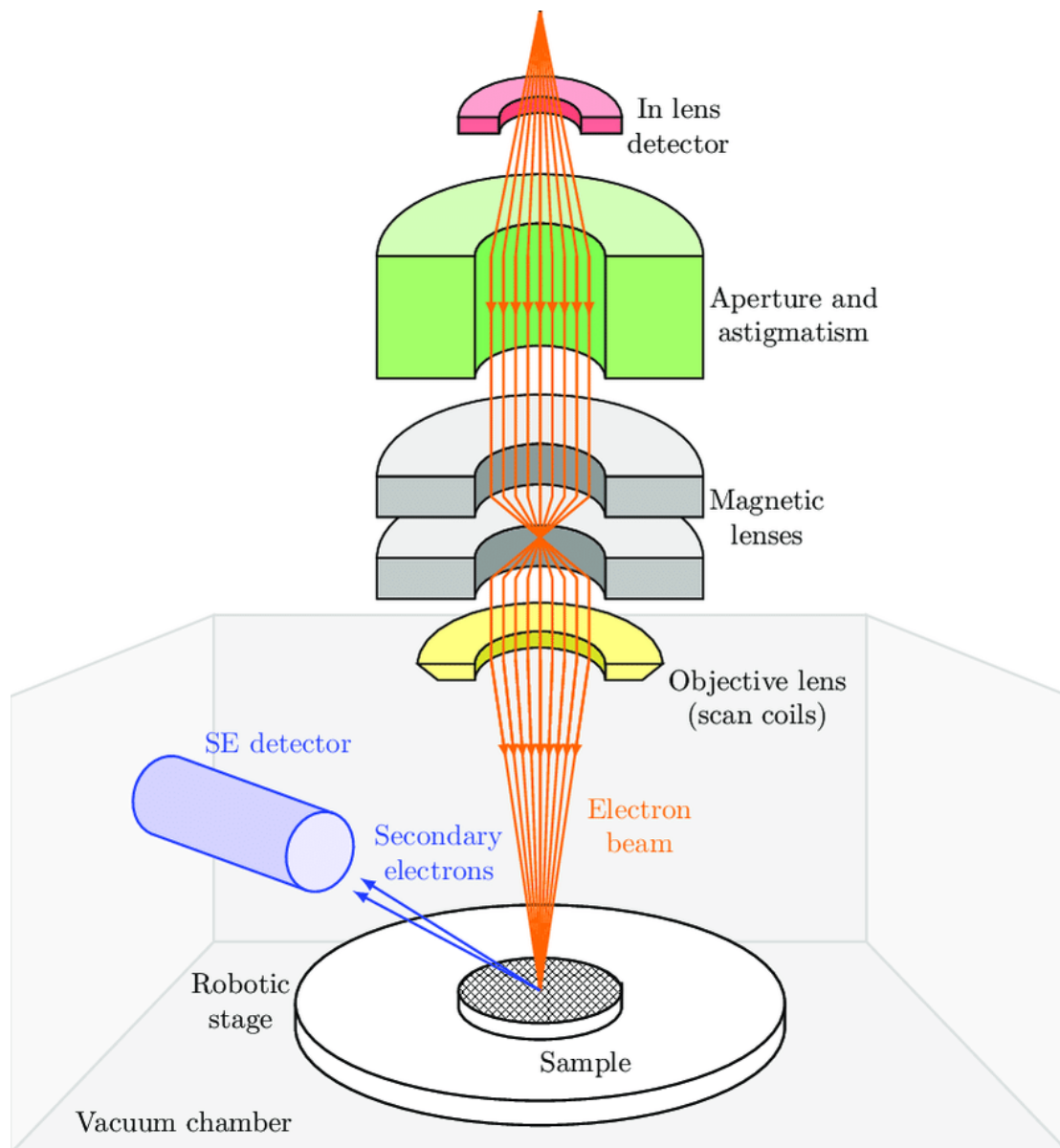
Η ανάγκη προσομοίωσης των συνθηκών που δημιουργούνται όταν τα μετεωροειδή φτάνουν στην μεσόσφαιρα, οδήγησε την επιστημονική κοινότητα να βρει την κατάλληλη πηγή ενέργειας ώστε να εφαρμόσει εργαστηριακά τη διαδικασία του ablation. Αποδείχθηκε ότι η χρήση laser για τον σκοπό αυτό δίνει αποτελέσματα τα οποία προσεγγίζουν κατά πολύ τις πρότυπες συνθήκες καθώς έχουν την δυνατότητα να αναπτύξουν αρκετά υψηλές θερμοκρασίες όταν η ακτινοβολία που εκπέμπουν προσπέσει στην επιφάνεια ενός δείγματος.

Ηλεκτρονική Μικροσκοπία

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscopy – SEM) είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για ερευνητές και επιστήμονες, το οποίο παρέχει εικόνα και δίνει την δυνατότητα εξερεύνησης της μορφολογίας (μικροδομές και ορισμένες φορές, νανοδομές) των υλικών. Για την λήψη των εικόνων σαρώνεται η επιφάνεια του υλικού ενδιαφέροντος με μια δέσμη ηλεκτρονίων η οποία προσπίπτει πάνω στην επιφάνειά του και αλληλοεπιδρά μαζί του. Η δέσμη αυτή προέρχεται από μια πηγή ηλεκτρονίων (συνήθως νήμα βολφραμίου), προσπίπτει στο δείγμα, σκεδάζεται και διεισδύει μερικώς και τελικά η αλληλεπίδραση αυτή παράγει διάφορα σήματα, συμπεριλαμβανομένων των δευτερογενών ηλεκτρονίων, των οπισθοσκεδασμένων ηλεκτρονίων και των χαρακτηριστικών ακτίνων X τα οποία καταγράφονται από ειδικούς ανιχνευτές. Όλη η διαδικασία συμβαίνει κάτω από συνθήκες κενού.

Συνήθως τα υπό μελέτη δείγματα αλλά και τα επιμέρους εξαρτήματα που θα μπουν στο μικροσκόπιο είναι αγωγίμα ή επικαλύπτονται με ένα λεπτό στρώμα αγωγίμου υλικού (όπως για παράδειγμα χρυσός ή άνθρακας) για να ενισχυθεί η παραγωγή σήματος αποκλείοντας συνήθως τελείως την φόρτιση του υλικού.

Η διάταξη του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και τα επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται, φαίνεται στην Εικόνα 3 που ακολουθεί.

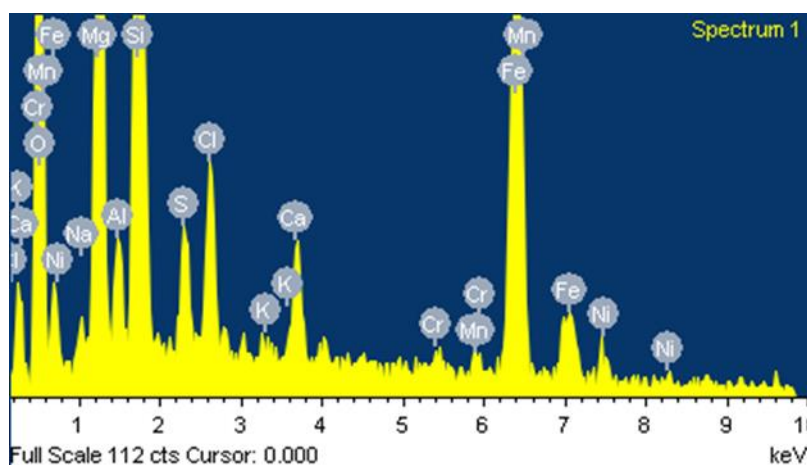


Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση των επιμέρους τμημάτων του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Πηγή εικόνας: [26]

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο σε διάφορους επιστημονικούς και βιομηχανικούς τομείς. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή, ημιαγωγούς, βιολογικά δείγματα και γεωλογικά δείγματα. Το SEM βρίσκει εφαρμογές σε τομείς όπως είναι η επιστήμη υλικών, η νανοτεχνολογία, η βιολογία, η γεωλογία και πολλά ακόμα πεδία.

Αναλύσεις EDX

Οι αναλύσεις EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) ή αλλιώς EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της στοιχειακής ανάλυσης ενός δείγματος και επιτυγχάνεται συνδυαστικά με το όργανο της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM) ή το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης ηλεκτρονίων (TEM). Βασίζεται στη διέγερση του δείγματος μέσω μιας δέσμης ηλεκτρονίων και χρησιμοποιείται ευρέως για τον χαρακτηρισμό στερεών υλικών σε επίπεδο μικρομετρικής κλίμακας. Η ακτινοβολία που δέχεται το δείγμα απορροφάται από τα στοιχεία και εκπέμπεται ένα χαρακτηριστικό φάσμα που ανιχνεύεται και αναλύεται από ένα φασματόμετρο. Το προκύπτον φάσμα δίδεται μέσω μιας γραφικής αναπαράσταση της έντασης των ακτίνων X που ανιχνεύονται σε διαφορετικά επίπεδα ενέργειας. Το πλήθος των στοιχείων που υπάρχουν στα δείγματα απεικονίζεται μέσω συγκεκριμένων κορυφών όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα στοιχειακής ανάλυσης (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Διάγραμμα από στοιχειακή ανάλυση EDX

Η ενέργεια κάθε κορυφής αντιστοιχεί στο εκάστοτε στοιχείο και η έντασή της είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του στοιχείου. Το φάσμα των ακτίνων-X συγκρίνεται με πρότυπα φάσματα γνωστών στοιχείων για να πραγματοποιηθεί ο εντοπισμός των στοιχείων που υπάρχουν στο δείγμα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται προγράμματα που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη αναγνώριση στοιχείων με βάση τις χαρακτηριστικές κορυφές τους.

Για την πιστοποίηση της εγκυρότητας των μετρήσεων που δίνει το όργανο χρησιμοποιούνται καθαρά δείγματα, γνωστής σύστασης, τα οποία μετρούνται και αναλόγως με το αποτέλεσμα που δίνουν, κρίνεται αν το όργανο χρειάζεται επαναπροσδιορισμό των ρυθμίσεών του.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι αρκετά καθώς πρόκειται συνήθως για μια μη καταστρεπτική μέθοδο, εξαιρετικά άμεση αφού τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων δίδονται σε πραγματικό χρόνο και ευέλικτη καθώς μπορεί να αναλυθεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος υλικών. Επιπλέον δίνει την δυνατότητα ανάλυσης τόσο ενός πολύ συγκεκριμένου σημείου όσο και μιας πιο ευρείας περιοχής, αλλά και την χημική χαρτογράφηση του δείγματος. Αυτές οι δυνατότητες παρέχουν διαφορετικές πληροφορίες η κάθε μια με αποτέλεσμα το δείγμα να μπορεί να μελετηθεί ποικιλοτρόπως. Ωστόσο, με τις αναλύσεις EDX υπάρχουν και περιορισμοί καθώς δεν είναι δυνατή η διερεύνηση της χημείας στο εσωτερικό του δείγματος, παρά μόνο επιφανειακά ενώ υπάρχει και δυσκολία διάκρισης στοιχείων με παρόμοιο ατομικό αριθμό ή η μέτρηση στοιχείων με μικρό ατομικό αριθμό.

Πειραματικό Μέρος

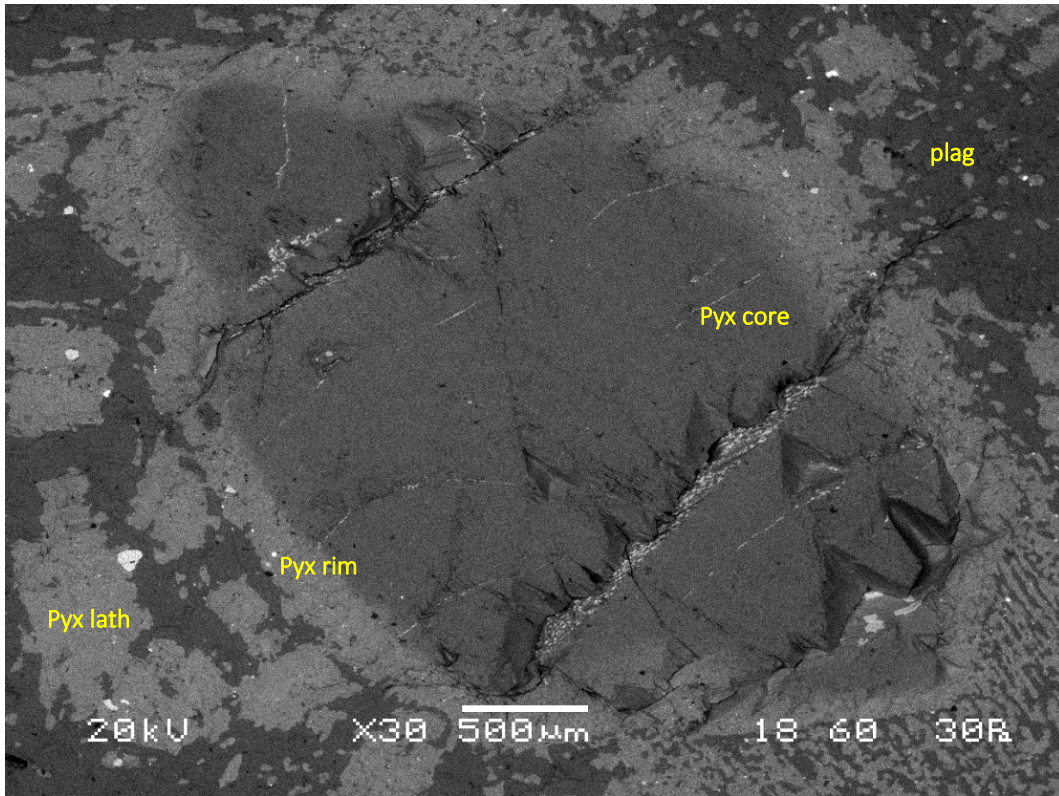
Δείγματα

Για την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν δύο δείγματα από διαφορετικές κατηγορίες μετεωριτών αλλά και καθαρές φάσεις ορυκτών (πλαγιόκλαστα και Καλιούχοι άστριοι). Ο πρώτος μετεωρίτης που μελετήθηκε ήταν ο Erg Chech 002, ένας αχονδρίτης ο οποίος έχει υπάρξει αντικείμενο έρευνας στο παρελθόν [27], [28], [29], [30], [31] και θεωρείται ότι προέρχεται από την καταστροφή ενός πλανητοειδούς που υπήρξε πριν τον σχηματισμό της Γης. Ο δεύτερος μετεωρίτης ονομάστηκε Ramlat as Sahmah 445 και πρόκειται για έναν κοινό χονδρίτη που δεν έχει μελετηθεί αρκετά καθώς παρουσιάζεται αρκετά καταπονημένος και εξαλλοιωμένος.

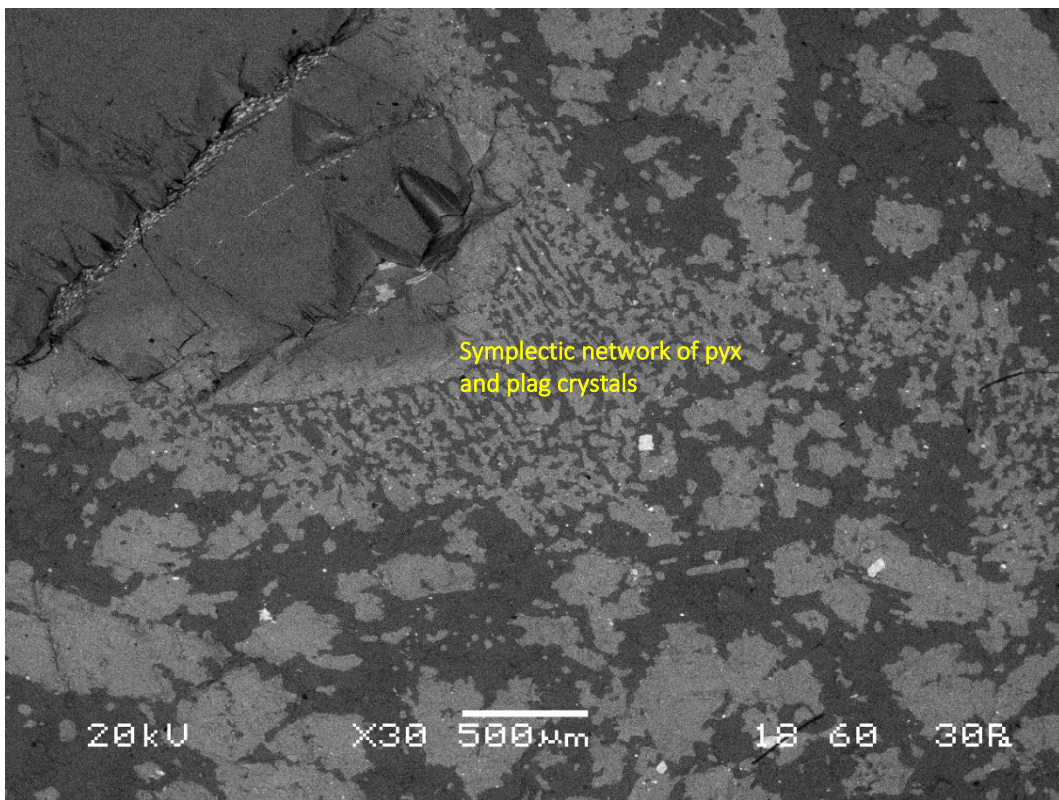
ERG CHECH 002 (EC 002)

Ο Erg Chech 002 είναι ένας αχονδρίτης μετεωρίτης ο οποίος βρέθηκε τον Μάιο του 2020 κοντά στο Bir Ben Takoul, στην νότια Αλγερία, μέσα στην αμμοθάλασσα Erg Chech.

Ορυκτολογικά, ο συγκεκριμένος μετεωρίτης αποτελείται από ζωνώδεις κλινοπυροξένους και ομογενείς κρυστάλλους πυρήνων (cores). Γύρω από τους πυρήνες αυτούς παρατηρούνται να αναπτύσσονται πυροξενικοί μικροκρυσταλλικοί δακτύλιοι (rims) ενώ η κύρια μάζα του μετεωρίτη απαρτίζεται από ασβεστούχους πυροξένους και πλακώδεις κρυστάλλους νατρούχου πλαγιοκλάστου [32], [33], [34]. Εικόνες της επιφάνειας του μετεωρίτη με τους κρυστάλλους πυροξένου, πλαγιοκλάστου και των δομών που σχηματίζουν φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνα 5 και Εικόνα 6).



Εικόνα 5: Μορφή κρυστάλλων πυροξένου και αστρίου στο δείγμα του μετεωρίτη Erg Chech 002



Εικόνα 6: Συμπλεκτική δομή κρυστάλλων πυροξένου και αστρίου στο δείγμα του μετεωρίτη Erg Chech 002.

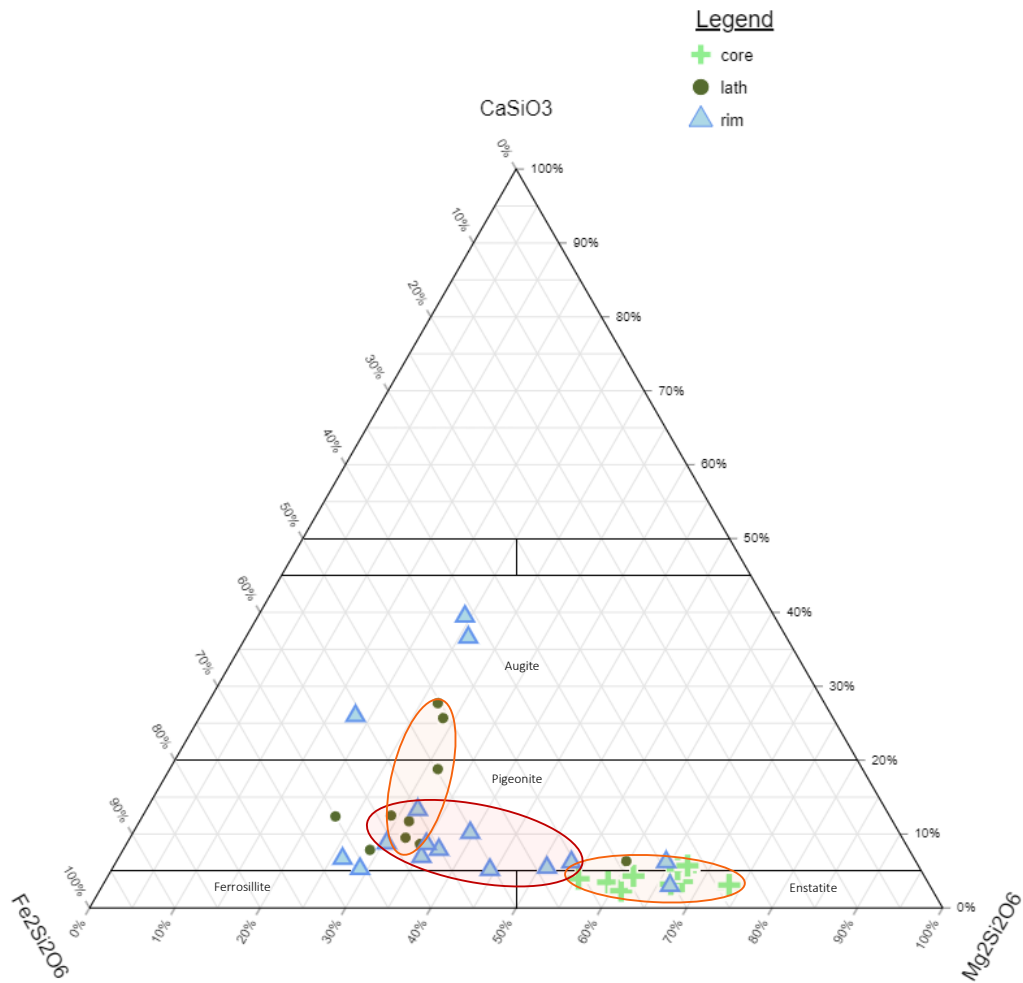
Επιπλέον φάσεις που παρατηρήθηκαν είναι μερικοί κρύσταλλοι χρωμιούχου και αργιλούχου σπινελίου με στοιχεία τιτανίου.

Χημικά, η εικόνα του συγκεκριμένου μετεωρίτη αποδίδεται μέσω των ακολούθων διαγραμμάτων και πινάκων.

Pyroxenes

Πίνακας 2: Δεδομένα χημικής σύστασης των πυροξένων του μετεωρίτη EC 002

ROCK VALUES															
	CORES					RIMS					LATHS				
	Mean	Standar Deviation	Min Value	Max Value	Value Range	Mean	Standar Deviation	Min Value	Max Value	Value Range	Mean	Standar Deviation	Min Value	Max Value	Value Range
SiO ₂	54.92	1.73	51.75	56.95	5.20	51.28	3.39	43.38	56.01	12.63	52.64	2.27	48.20	55.22	7.02
Al ₂ O ₃	2.07	3.45	0.00	10.04	10.04	1.75	0.74	0.72	3.42	2.70	2.70	0.94	0.94	3.85	2.91
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.64	0.00	1.59	1.59	1.13	0.70	0.00	1.85	1.85
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	1.67	0.48	1.02	2.41	1.38	5.45	4.72	1.27	17.28	16.01	6.11	3.22	2.70	11.40	8.70
FeO	13.29	2.69	10.01	17.92	7.91	22.57	6.37	12.54	33.15	20.61	22.38	4.82	14.45	29.07	14.63
MnO	0.20	0.37	0.00	0.94	0.94	0.60	0.70	0.00	1.73	1.73	0.70	0.60	0.00	1.41	1.41
MgO	27.95	2.72	23.77	31.72	7.95	17.11	5.65	9.19	28.09	18.90	14.39	5.10	10.12	25.45	15.34
Cr ₂ O ₃	0.93	0.28	0.56	1.48	0.92	0.58	0.52	0.00	1.42	1.42	0.44	0.49	0.00	1.23	1.23
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.30	0.00	1.17	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	101.02					99.93					100.49				



Εικόνα 7: Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης αρχικής σύστασης πυροξένων του μετεωρίτη EC 002.

Cores

Οι κρυσταλλικοί πυρήνες (cores) του μετεωρίτη παρουσιάζουν μια πυροξενική σύσταση με υψηλές τιμές μαγνησίου και χαμηλές ασβεστίου. Μέσω του διαγράμματος της Εικόνα 7, φαίνεται πως οι πυρήνες αυτοί προβάλλονται στο πεδίο του ενστατίτη, ενός μαγνησιούχου πυροξένου με τιμές σιδήρου (Fe₂Si₂O₆) κάτω από 50% ενώ το ασβέστιο δεν ξεπερνά το 5% σε CaSiO₃ (μέση τιμή στο οξείδιο του ασβεστίου ~1.7% CaO). Το γεγονός αυτής της μαγνησιούχου σύστασης δίνει στοιχεία και για τον χρόνο που κρυσταλλώθηκε το ορυκτό καθώς είναι ορυκτό υψηλών θερμοκρασιών και σχηματίζεται στα αρχικά στάδια κλασματικής κρυστάλλωσης. Ως προς το άθροισμα του πυριτίου και του αργιλίου, οι τιμές μεταξύ τους δεν έχουν πολύ μεγάλη απόκλιση προσεγγίζοντας μια μέση τιμή κοντά στο 57%. Το συστατικό

εκείνο που φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο το άθροισμα και να θέτει κάποιες τιμές ελαφρώς εκτός του ορίου είναι το αργίλιο που μπορεί να πάρει από μηδενικές τιμές αλλά και τιμές έως ~10% Al₂O₃.

Laths

Οι πλακώδεις κρύσταλλοι πυροξένου (laths) προβάλλονται στα πεδία του περιστερίτη και του αυγίτη. Αυτό σημαίνει για το ορυκτό ότι έχει μεγαλύτερες ποσότητες ασβεστίου (πάνω από 5% σε CaSiO₃) ενώ μέσω του διαγράμματος φαίνεται ότι και οι τιμές σιδήρου είναι πιο αυξημένες από τους κρυσταλλικούς πυρήνες. Οι τιμές σιδήρου-μαγνησίου στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται να έχουν μικρότερη διαφορά από εκείνη που εμφάνιζαν οι πυρήνες. Οι κρύσταλλοι του πλαγκιοκλάστου στην κύρια μάζα δημιουργούν μια συμπλεκτική δομή, με την συγκεκριμένη μορφολογία που προκύπτει να παραπέμπει σε φαινόμενα ταχείας ψύξης του συστήματος.

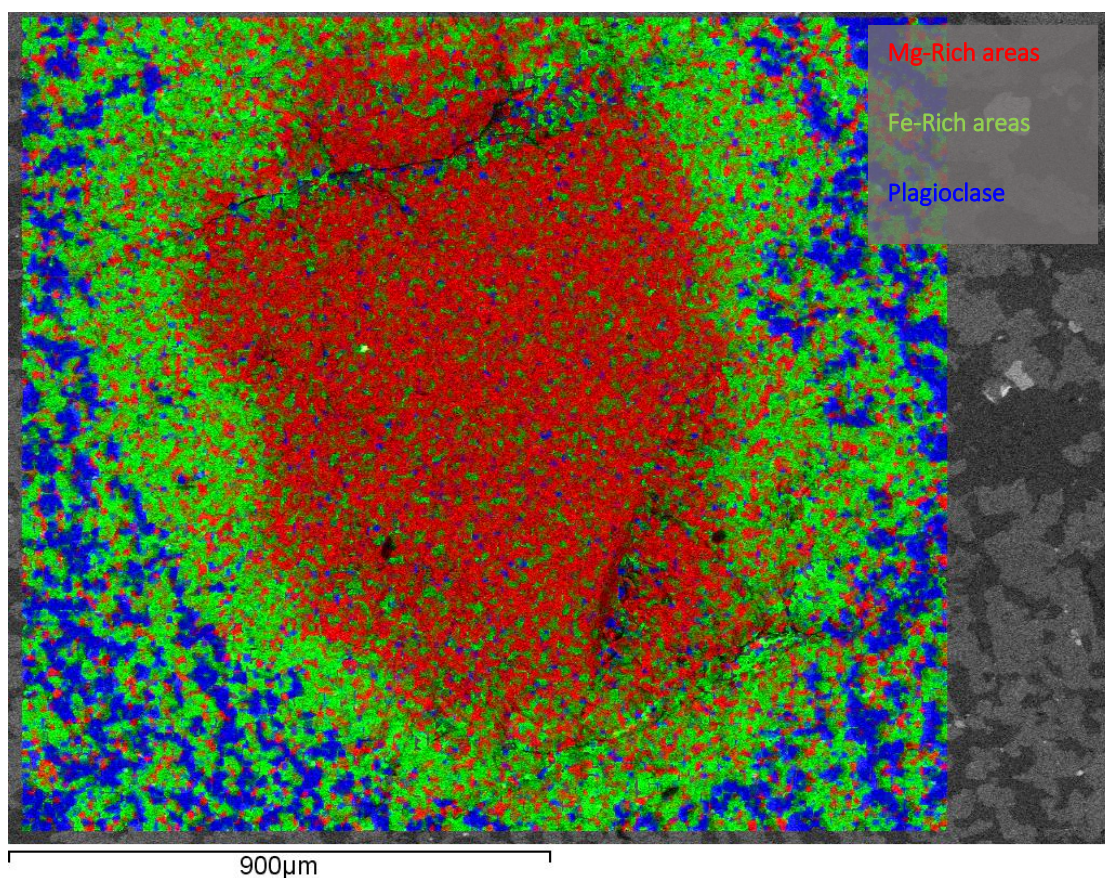
Rims

Τέλος, οι δακτύλιοι γύρω από τους πυρήνες προβάλλονται κυρίως στο πεδίο του περιστερίτη και ανάμεσα στους πυρήνες και τους πλακώδεις κρυστάλλους της κύριας μάζας. Έτσι οι τιμές του μαγνησίου που εμφανίζουν και του σιδήρου, κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές αυτών των δύο κρυστάλλων πυροξένου. Αυτό οφείλεται σε χημικές αντιδράσεις της κύριας μάζας κατά την κρυστάλλωση, με τους πυρήνες. Η μαγνησιούχος σύσταση των πυρήνων αντιδρά με την πιο εμπλουτισμένη σε αλκάλια (Na₂O) κύρια μάζα και στο σημείο επαφής τους παρατηρείται διάχυση ιόντων μεταξύ αυτών των δύο κρυστάλλων, σχηματίζοντας νέους πυροξένους που έχουν την μορφή δακτυλίου (χημική ζώνωση). Επιπλέον, λόγω της ύπαρξης ασβεστίου στην κύρια μάζα του μετεωρίτη οι άκρες των πυρήνων στις οποίες σχηματίζονται οι δακτύλιοι, εμπλουτίζονται ελαφρώς και σε ασβέστιο, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα να εντοπίζεται μια μικρή διακύμανση του στοιχείου αυτού στους κρυστάλλους.

Οι τιμές του πυριτίου και του αργιλίου παρουσιάζουν, σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις σχετικά μεγάλη διακύμανση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί μέσω της ταχείας κρυστάλλωσης που αναφέρθηκε πριν καθώς το σύστημα δεν κατάφερε να έρθει τελικώς σε ισορροπία. Έτσι μπορούν να εξηγηθούν και κάποιες

επιπλέον περιπτώσεις όπου κάποιες τιμές διαφοροποιούνται αρκετά από το γενικό σύνολο των υπολοίπων τιμών.

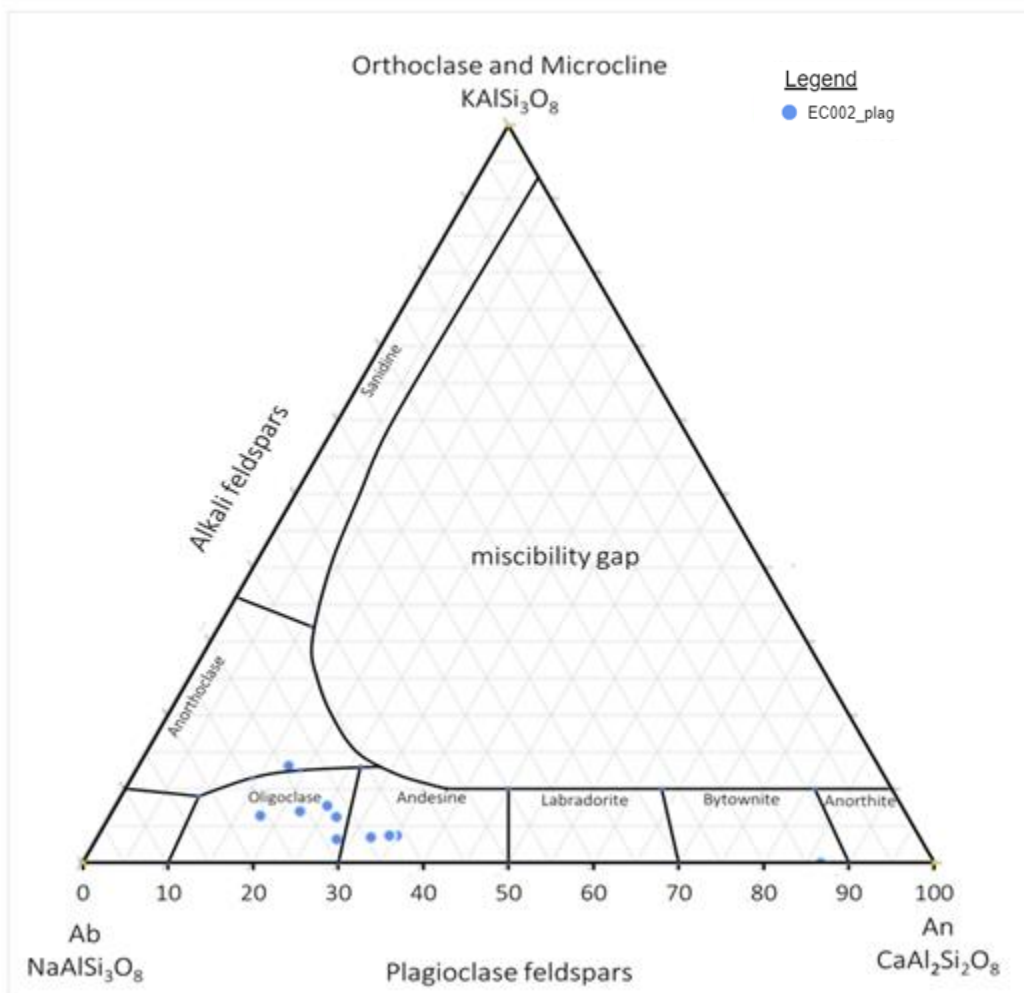
Όλα όσα ειπώθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους μπορούν να συνοψισθούν στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 8). Πρόκειται για μια χαρτογράφηση των στοιχείων Mg και Fe στην επιφάνεια του μετεωρίτη. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο SEM με την χρήση EDX αναλυτικού συστήματος και απεικονίζει με διαφορετικά χρώματα τις συγκεντρώσεις αυτών των δύο στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται ένας κρυσταλλικός πυρήνας που έχει χρωματιστεί κόκκινος εσωτερικά και εξωτερικά, όσο μεγαλώνει η απόσταση από το κέντρο του, αποκτά ένα πράσινο χρώμα ενώ σε μεγάλη απόσταση, εμφανίζεται και μπλε χρώμα. Το κόκκινο απεικονίζει την συγκέντρωση του μαγνησίου που βρίσκεται κυρίως εντός αυτού του κρυστάλλου ενώ το πράσινο του σιδήρου που εντοπίζεται κατά κύριο λόγο γύρω από τον πυρήνα, στον δακτύλιο αλλά και την κύρια μάζα. Το μπλε χρώμα είναι κι αυτό της κύριας μάζας και με αυτό χρωματίζονται κυρίως τα πλαγιόκλαστα του μετεωρίτη.



Εικόνα 8: Χαρτογράφηση στοιχείων Mg και Fe στην επιφάνεια του EC 002.

Plagioclases

Τα πλαγιόκλαστα που παρατηρούνται στον μετεωρίτη αναλύθηκαν και η σύστασή τους αποδίδεται μέσω του διαγράμματος της Εικόνα 9 και του Πίνακας 3.



Εικόνα 9: Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης της σύστασης των πλαγιοκλάστων του μετεωρίτη EC 002.

Πίνακας 3: Σύσταση πλαγιόκλαστων του μετεωρίτη EC 002.

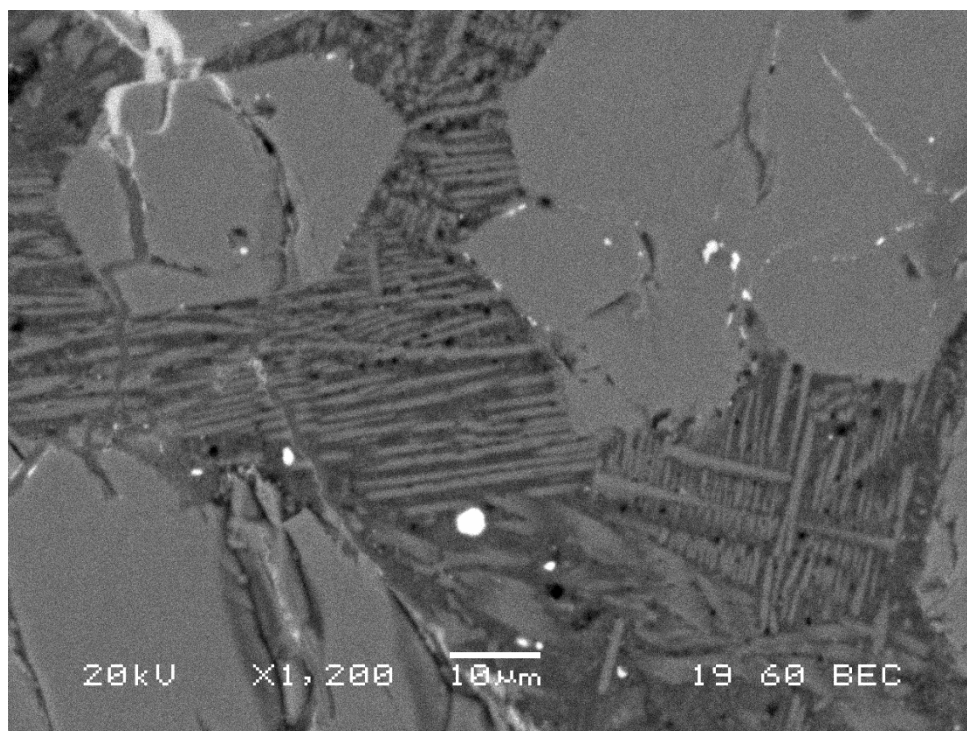
	Rock Values – Feldspars				
	Mean	Standard deviation	Minimum value	Maximum value	Value Range
SiO ₂	62.57	4.33	50.49	67.98	17.49
Al ₂ O ₃	19.14	0.80	17.89	20.58	2.68
Na ₂ O	7.71	2.00	1.83	10.46	8.63
K ₂ O	0.65	0.39	0.00	1.58	1.58
CaO	4.17	2.55	2.13	11.86	9.73
FeO	4.34	3.49	1.84	14.72	12.89
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	2.05	2.47	0.00	9.55	9.55
Cr ₂ O ₃	0.15	0.34	0.00	1.02	1.02
TiO ₂	0.05	0.16	0.00	0.55	0.55
Total	100.83				

Τα πλαγιόκλαστα μαζί με τους πλακώδεις κρυστάλλους πυροξένου συνθέτουν την κύρια μάζα του μετεωρίτη. Η σύστασή τους προσεγγίζει αυτή του ολιγοκλάστου παρουσιάζοντας μια σχετικά μεγάλη διακύμανση στις φάσεις του διοξειδίου του πυριτίου, του νατρίου αλλά και του ασβεστίου. Γι' αυτόν τον λόγο, στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 9) τα πλαγιόκλαστα δεν προβάλλονται αποκλειστικά στο πεδίο του ολιγοκλάστου αλλά εισέρχονται και στο πεδίο του ανδεσίνη (πιο ασβεστούχο πλαγιόκλαστο από το ολιγόκλαστο). Διακρίνονται επιπλέον, μικρές ποσότητες καλίου στο δείγμα οι οποίες φτάνουν μέχρι περίπου 1,5% σε K₂O.

Οι καλιούχοι άστριοι και τα πλαγιόκλαστα εμπεριέχουν στη σύστασή τους μικρές ποσότητες σιδήρου (μέχρι 1.5% κατά βάρος) και ίχνη μαγνησίου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως, σημειώνεται μια ποσότητα μαγνησίου και σιδήρου στις αναλύσεις. Οι αναλύσεις αυτές ωστόσο, μπορεί να είναι επηρεασμένες από τον περιβάλλοντα χώρο λόγω τις λεπτής διασποράς των ορυκτών φάσεων.

RAMLAT AS SAHMAH 445 (RAS 445)

Ο μετεωρίτης Ramlat as Sahmah 445 (RAS 445) ανακαλύφθηκε τον Ιανουάριο του 2013 στην νοτιοδυτική Ασία, στην τοποθεσία Αλ Γούτα. Πρόκειται για έναν κοινό χονδρίτη μετεωρίτη με ορυκτολογία που περιλαμβάνει κυρίως κρυστάλλους ολιβίνη, πλαγιοκλάστου ενώ έχουν παρατηρηθεί και κάποια δευτερεύοντα και επουσιώδη ορυκτά όπως πυρόξενοι, σουλφίδια σιδήρου (κυρίως πυροτίτης), χρωμιούχοι σπινέλιοι, ιλμενίτες και απατίτης. Οι κρύσταλλοι ολιβίνη καλύπτουν την μεγαλύτερη επιφάνεια του πετρώματος μαζί με τους κρυστάλλους πλαγιοκλάστου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10, που προέκυψαν από την απότομη ψύξη του μάγματος. Η σύστασή τους είναι περισσότερο φορστεριτική και λιγότερο φαϋαλιτικής ενώ τα πλαγιόκλαστα που συναντώνται έχουν ποικίλη σύσταση. Εμφανίζονται κυρίως νατρούχα και ασβεστούχα με συστάσεις που κυμαίνονται από αλβιτικές έως ολιγοκλαστικές και έπειτα, σύσταση λαβραδορίτη.

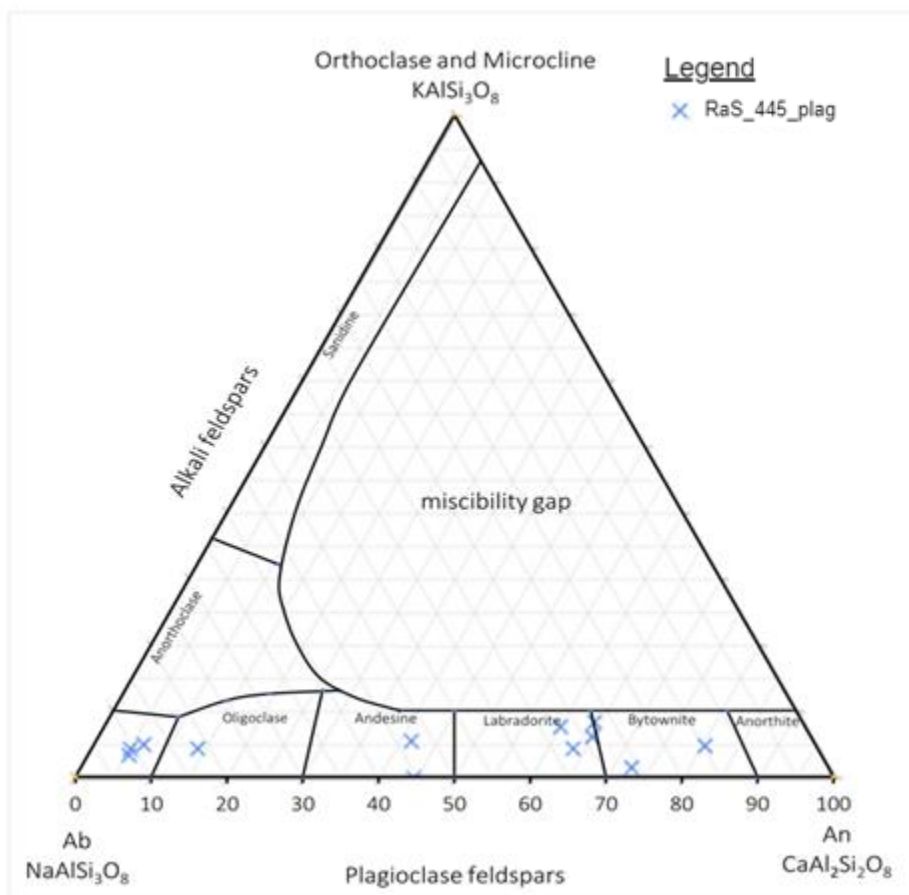


Εικόνα 10: Επιφάνεια μετεωρίτη RaS 445. Κρύσταλλοι ολιβίνη μεγάλου μεγέθους και πλαγιοκλάστων.

Πιο αναλυτικά, η χημική σύσταση των κυρίων ορυκτών του μετεωρίτη RaS 445, δίδεται από τον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4) ενώ ορυκτολογικά η εικόνα του φαίνεται μέσω του ακόλουθου διαγράμματος (Εικόνα 11).

Πίνακας 4: Χημική σύσταση ορυκτών μετεωρίτη RaS 445.

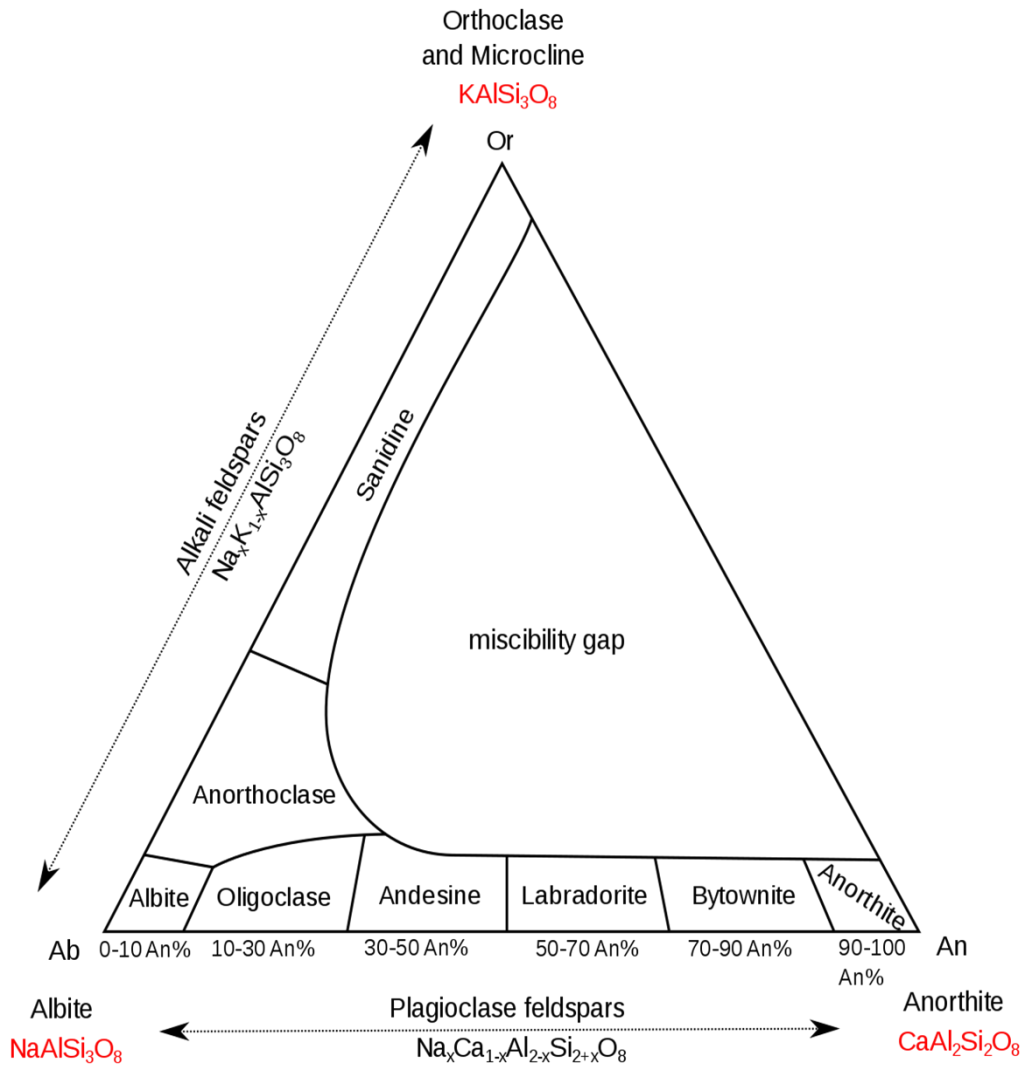
ROCK VALUES															
	OLIVINES					PYROXENES					PLAGIOCLASES				
	Mean	Standar Deviation	Min Value	Max Value	Value Range	Mean	Standar Deviation	Min Value	Max Value	Value Range	Mean	Standar Deviation	Min Value	Max Value	Value Range
SiO ₂	38.33	1.32	34.55	39.69	5.14	55.89	3.59	51.17	59.88	8.71	60.79	2.84	56.05	65.08	9.03
Al ₂ O ₃	0.06	0.20	0.00	0.79	0.79	1.69	1.71	0.00	4.02	4.02	12.36	4.53	4.80	20.33	15.54
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.27	0.00	0.57	0.57	5.24	2.35	0.00	8.83	8.83
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	0.86	0.00	3.64	3.64
CaO	0.03	0.11	0.00	0.43	0.43	6.22	6.76	1.04	15.77	14.73	6.66	4.77	0.45	15.13	14.68
FeO	23.49	2.12	21.65	30.36	8.71	11.98	1.74	9.61	13.74	4.13	5.07	2.19	2.26	11.36	9.10
MnO	0.36	0.23	0.00	0.59	0.59	0.14	0.20	0.00	0.43	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	36.30	1.30	32.42	37.66	5.24	22.50	3.06	19.25	26.60	7.35	6.60	3.39	1.18	12.82	11.63
Cr ₂ O ₃	0.07	0.26	0.00	0.99	0.99	0.43	0.61	0.00	1.30	1.30	0.26	0.49	0.00	1.72	1.72
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.27	0.00	0.82	0.82
Total	98.64					99.05					97.96				



Εικόνα 11: Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης αρχικής σύστασης πλαγιόκλαστων του μετεωρίτη RaS 445.

Καθαρές Φάσεις Ορυκτών (Άστριοι Και Πλαγιόκλαστα)

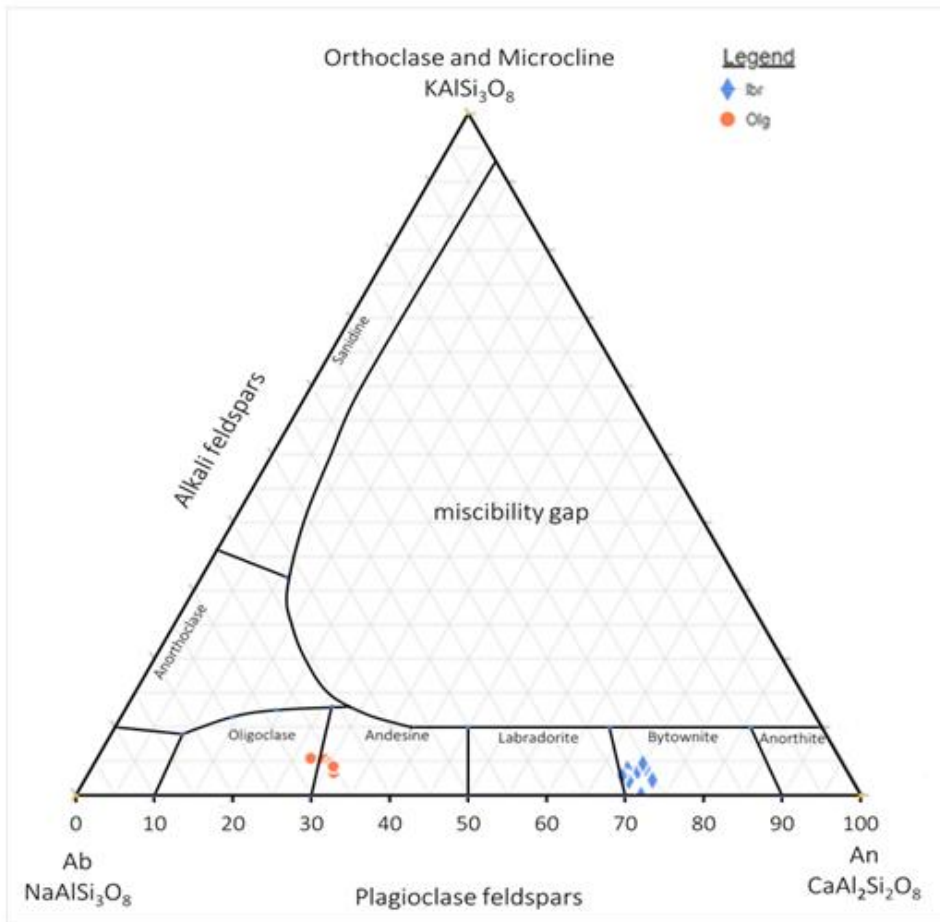
Τα ορυκτά που επιλέχθηκαν να μελετηθούν ήταν δύο πλαγιόκλαστα, ένα δείγμα λαβραδορίτη με χημικό τύπο $(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$ και ένα ολιγοκλάστου, χημικού τύπου $(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$. Το τρίτο είναι ένας καλιούχος άστρος (ορθόκλαστο) ο οποίος έχει χημικό τύπο $KAlSi_3O_8$ το οποίο όμως δεν θα συμπεριληφθεί στην παρούσα μελέτη λόγω ελλιών στοιχείων. Επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα δείγματα καθώς περιέχουν το καθένα διαφορετικά ποσοστά αλκαλίων (Na, K) και αλκαλικών γαιών (Ca), στοιχεία εξαιρετικά σημαντικά για την μελέτη. Συγκρίνοντας τους χημικούς τύπους του ολιγοκλάστου και του λαβραδορίτη, παρατηρείται μια ομοιότητα. Αυτά τα δύο ορυκτά διαφοροποιούνται στα ποσοστά νατρίου και ασβεστίου που έχει το καθένα όπως φαίνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης των συστάσεων των πλαγιοκλάστων και των αστρίων.

Το ολιγόκλαστο έχει μεγαλύτερα ποσοστά νατρίου με το ασβέστιο να φτάνει μέχρι περίπου 4% σε CaO (30 An%). Αντίστοιχα ο λαβραδορίτης παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά ασβεστίου με το νάτριο να αγγίζει προσεγγιστικά, τιμές κοντά στο 4,5% σε Na₂O (70 An%).

Στο παρακάτω τριγωνικό διάγραμμα απεικονίζονται τα δύο πλαγιόκλαστα που χρησιμοποιήθηκαν με τις μέσες συστάσεις τους να δίδονται από τον Πίνακα 5.



Εικόνα 13: Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης της αρχικής ορυκτολογικής σύστασης του λαυραδορίτη και του ολιγοκλάστου.

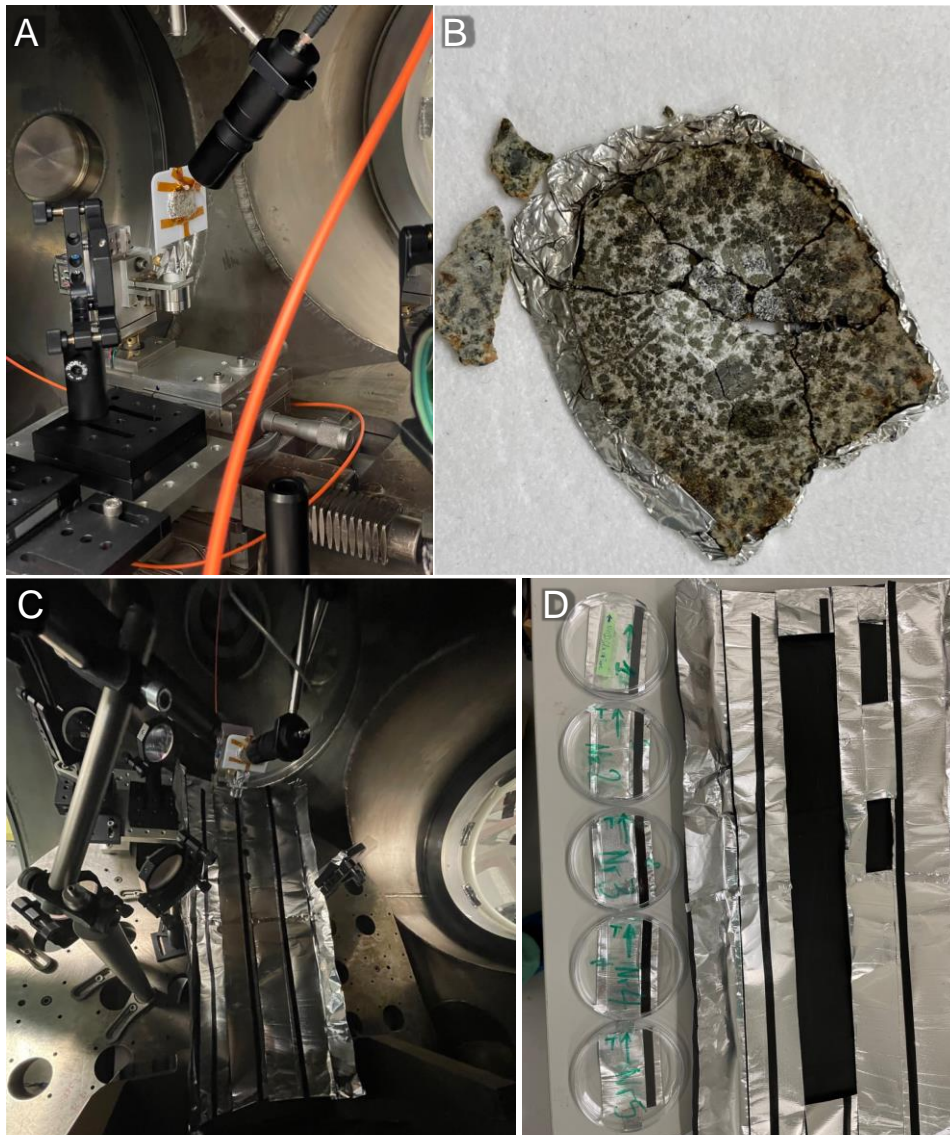
Πίνακας 5: Μέσες συστάσεις πλαγιοκλάστων και καλιούχου αστρίου.

Δείγμα	Na ₂ O (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	Σύνολο
Λαβραδορίτης	4,33	29,81	54,19	0,47	11,20	100,00
Ολιγόκλαστο	8,56	23,70	63,29	0,60	3,86	100,00

Laser Ablation

Με την συγκεκριμένη μέθοδο ακτινοβολήθηκαν όλα τα δείγματα ενώ τα κατακερματισμένα μέρη τους που προέκυψαν, συλλέχθηκαν για περεταίρω ανάλυση.

Τα πειράματα ξεκίνησαν στην Ακαδημία Επιστημών Πράγας με την ακτινοβόληση του μετεωρίτη EC 002. Για τον μετεωρίτη χρησιμοποιήθηκε το υπερπαλμικό laser ιωδίου, υψηλής ισχύος, ASTERIX PALS Terawatt (Prague Asterix Laser System). Το συγκεκριμένο laser είναι ικανό για εκπομπή ενέργειας άνω των 650J ανά παλμό, με διάρκεια μεταξύ παλμών 350ps, μήκους κύματος 1.315nm [35], [7]. Η διεργασία πραγματοποιήθηκε σε μια λεία επιφάνεια ενός μεγάλου τμήματος του συγκεκριμένου μετεωρίτη. Το δείγμα τοποθετήθηκε σε έναν υποδοχέα σε περιβάλλον κενού αέρος και στο σημείο εστίασης του laser εγκαταστάθηκε μια οπτική ίνα, συνδεδεμένη με έναν οπτικό φασματόμετρο ECHELLE υψηλής ανάλυσης για την λήψη φασμάτων.



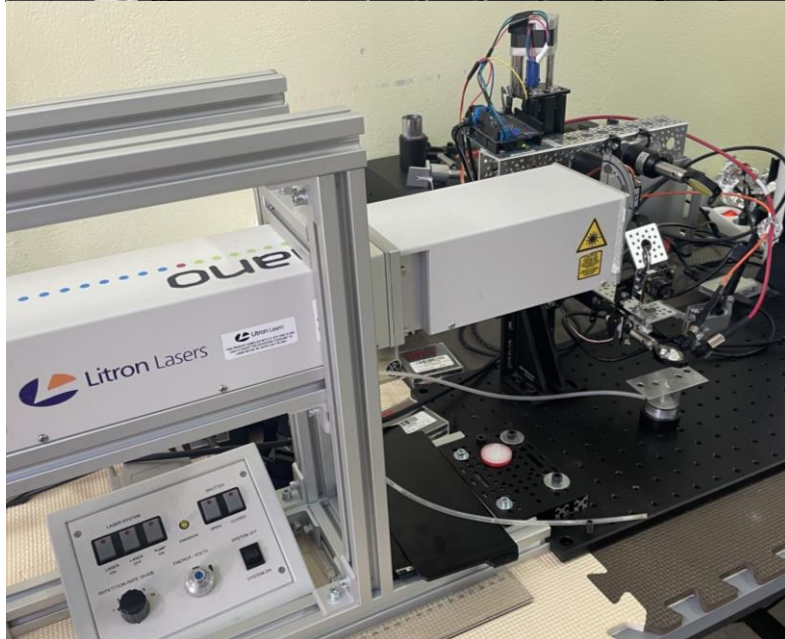
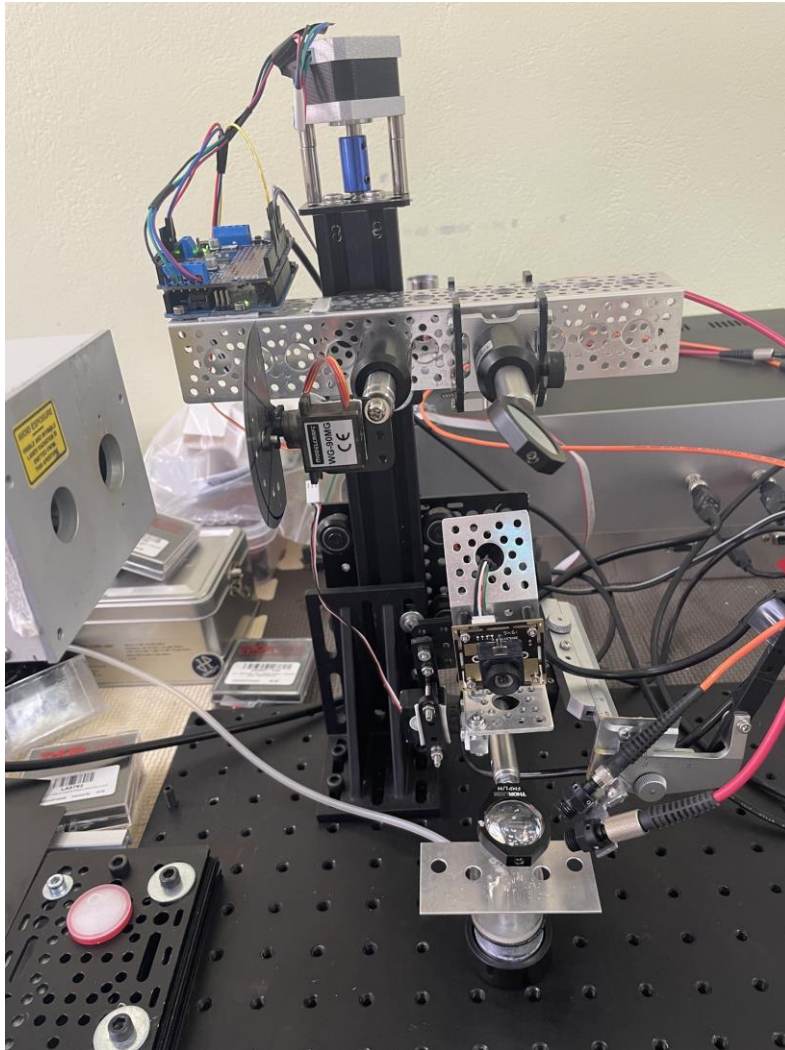
Εικόνα 14: Η οργανολογία έπειτα από την πειραματική διαδικασία του laser ablation.

Κάτω από το δείγμα τοποθετήθηκε αλουμινόχαρτο ως παγίδα για το υλικό του μετεωρίτη που θα κατακερματιζόταν. Στο αλουμινόχαρτο, για τη συλλογή του υλικού αυτού, τοποθετήθηκαν ταινίες και δίσκοι άνθρακα όπως φαίνονται και στην Εικόνα 14, (D). Οι ταινίες και οι δίσκοι αυτοί θα χρησιμεύσουν τόσο στην συγκράτηση του υλικού αλλά και έπειτα, κατά την μελέτη του στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, όπου το περιβάλλον πρέπει να είναι αγωγίμο.

Ανάλογη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την επεξεργασία του μετεωρίτη RaS 445. Για την ακτινοβόληση του μετεωρίτη χρησιμοποιήθηκε το laser υψηλής ενέργειας Nano-LG-250-20 Q-switched Nd:YAG. Το συγκεκριμένο laser έχει την δυνατότητα για

εκπομπή μέγιστης ενέργειας εξόδου 450 mJ στην μέγιστη συχνότητα παλμών 20 Hz. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του, η διάρκεια των παλμών του στα 1064 nm είναι 4–6 ns. Το δείγμα προσαρμόστηκε σε υποδοχέα και ακτινοβολήθηκε. Τα προϊόντα του laser ablation επίσης συλλέχθηκαν με ταινίες άνθρακα οι οποίες τοποθετήθηκαν κάτω από το δείγμα μετεωρίτη.

Τέλος, τα δείγματα αστρίου και πλαγιοκλάστων ακτινοβολήθηκαν επίσης στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο της Αθήνας, επίσης με τη χρήση του laser Nd:YAG. Τα ορυκτά τοποθετήθηκαν σε ένα κλειστό, τετραγωνικό και διαφανές δοχείο, στο οποίο υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας κενού αέρος. Η διαδικασία του laser ablation πραγματοποιήθηκε σε ατμόσφαιρα περιβάλλοντος και σε αδρανή ατμόσφαιρα ηλίου (He). Το δείγμα του λαβραδορίτη ακτινοβολήθηκε σε ατμόσφαιρα περιβάλλοντος ενώ τα υπόλοιπα δύο, σε ατμόσφαιρα ηλίου. Ομοίως και σε αυτήν την περίπτωση, το υλικό συλλέχθηκε πάνω σε δίσκους άνθρακα.

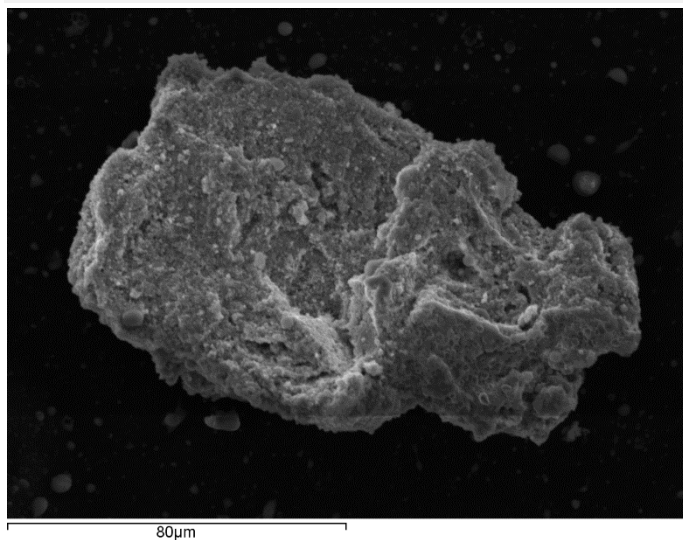


Εικόνα 15: Laser υψηλής ενέργειας Nano-LG-250-20 Q-switched Nd:YAG.

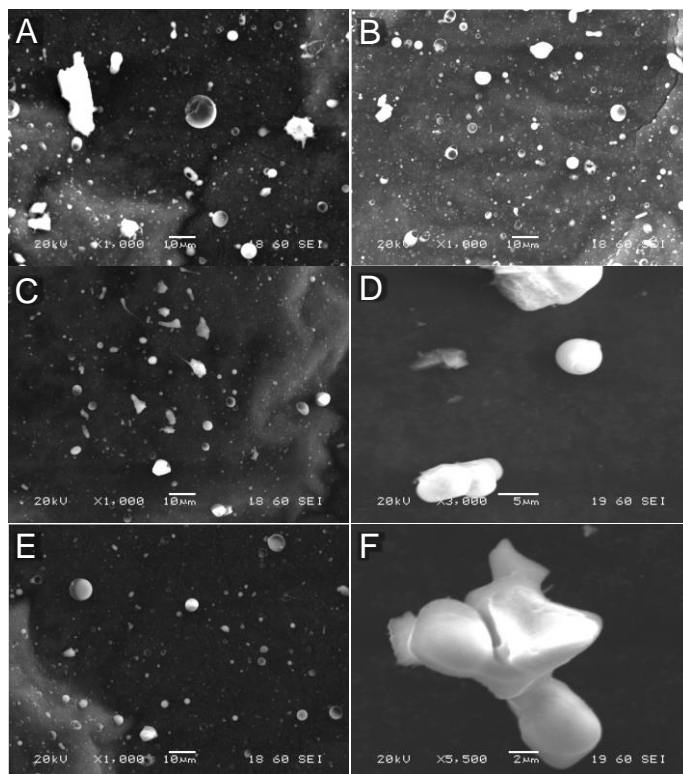
Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο

Το υλικό που συλλέχθηκε έπειτα από την επεξεργασία των δειγμάτων, παρατηρήθηκε και αναλύθηκε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η χημεία του εξετάστηκε μέσω EDX αναλύσεων. Λόγω του μικρού μεγέθους των σωματιδίων που προέκυψαν από την ακτινοβολήση του δείγματος, η ποσοτική ανάλυση δεν ήταν εφικτή. Ωστόσο, οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν στοιχειομετρικές καθώς μέσω αυτών προέκυψε και η ορυκτολογία των δειγμάτων. Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Jeol 6380LV electron microscope τόσο για τον αχονδρίτη EC 002, με το EDX αναλυτικό σύστημα από το Oxford Instruments Ltd όσο και για τον χονδρίτη μετεωρίτη RaS 445 αλλά και τα 3 επιπλέον ορυκτά (λαβραδορίτη, ολιγόκλαστο, ορθόκλαστο). Για κάθε χημική ανάλυση ορίστηκε χρόνος 60 δευτερολέπτων στον οποίο θα ολοκληρωνόταν η μέτρηση ενώ για την ακτινοβολήση του δείγματος, η τάση που χρησιμοποιήθηκε ήταν 20kV. Σε κάθε περίπτωση, μια λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων στο μέγεθος περίπου ενός μικρού, εστιάζοταν πάνω στην περιοχή ενδιαφέροντος. Τέλος, το κάθε σημείο συνοδεύει μια φωτογραφία από την περιοχή που πραγματοποιήθηκε.

Αποτελέσματα – Συζήτηση



Εικόνα 16: Θραύσμα του μετεωρίτη RaS 445. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



Εικόνα 17: Εικόνες σφαιριδίων από τηγμένο υλικό του μετεωρίτη EC 002. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Ειδικά στις τηγμένες φάσεις, τα σφαιρίδια όταν είναι μεμονομένα δεν έχει παρατηρηθεί να ξεπερνούν την κλίμακα των 10 μικρομέτρων. Τα συσσωματώματα αντιθέτως μπορούν να παρατηρηθούν σε μια ποικιλία μεγεθών.

Το υπό μελέτη υλικό παρατηρείται σε δύο μορφές όπως φαίνεται στις δύο εικόνες (Εικόνα 16 & Εικόνα 17). Η μια μορφή είναι σε θραύσματα, από το εκάστοτε δείγμα, ακαθόριστης μορφής, τα οποία αποκόπτονται από το κύριο υλικό μόλις προσπέσει στην επιφάνειά του η δέσμη του laser.

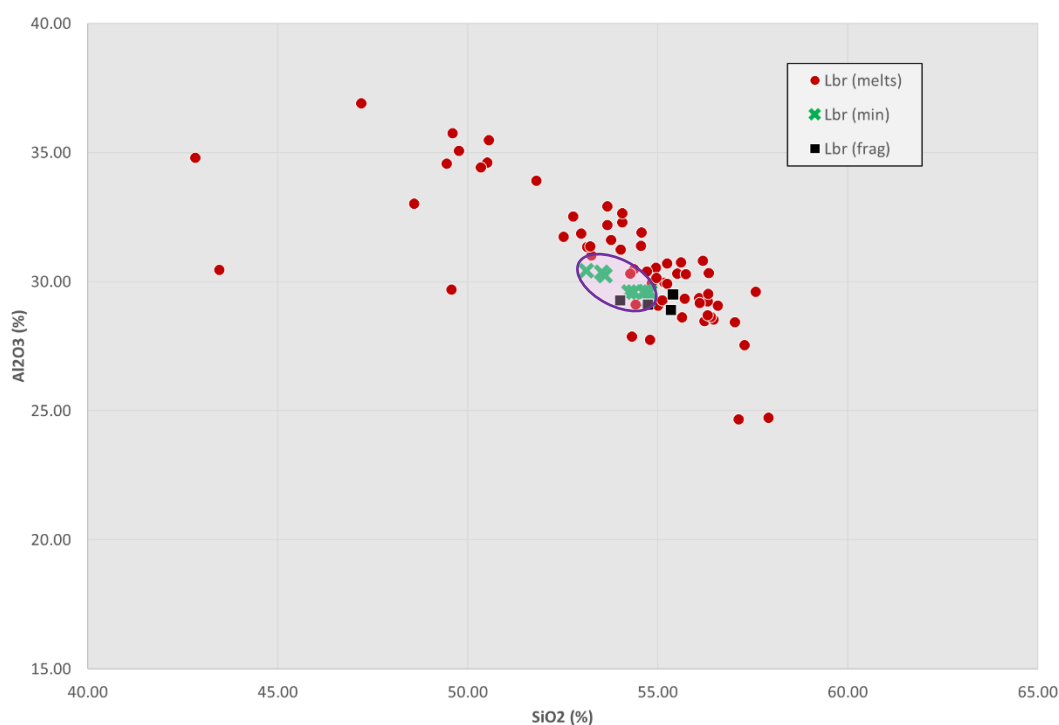
Η άλλη μορφή του υλικού είναι τηγμένες φάσεις οι οποίες έχουν ένα πιο σφαιρικό σχήμα και μπορούν να δημιουργήσουν διάφορους, πιο σύνθετους σχηματισμούς όπως για παράδειγμα κάποια συσσωματώματα σφαιρών.

Το εύρος του μεγέθους των φάσεων αυτών (θραύσματα και τηγμένο υλικό), κυμαίνεται από τάξεις μικρότερες του μικρόμετρου (μm) μέχρι μερικές δεκάδες μικρόμετρα.

Καθαρές Φάσεις Ορυκτών (Πλαγιόκλαστα)

$SiO_2 - Al_2O_3$

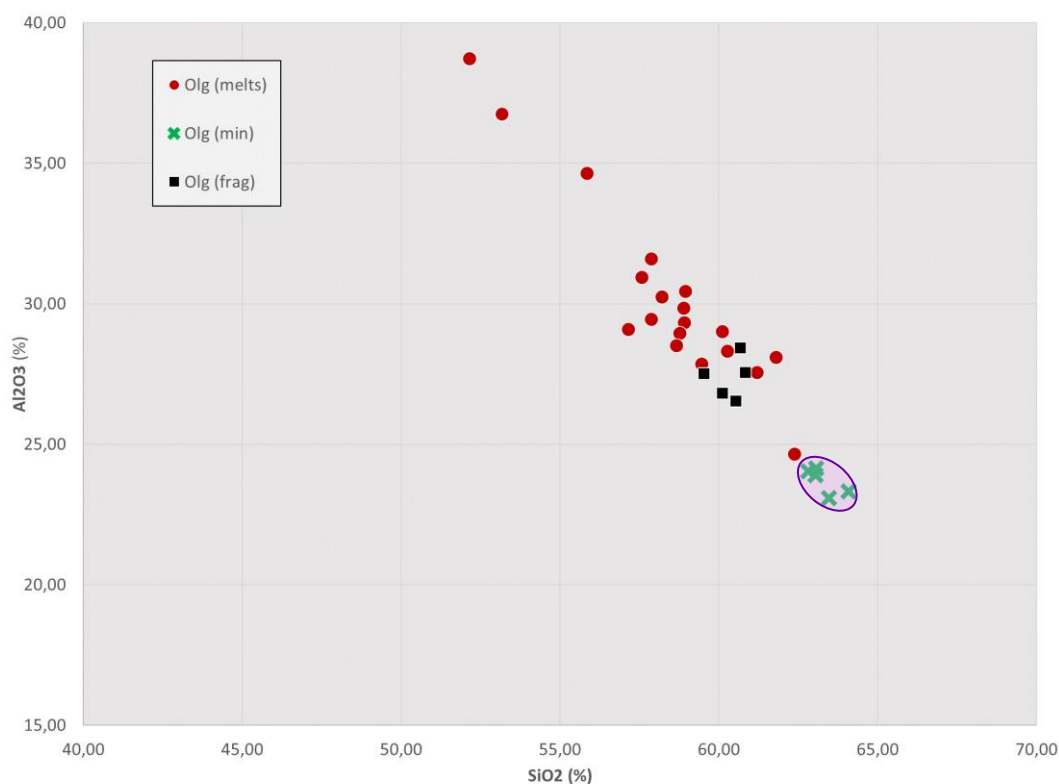
Μελετώντας την συμπεριφορά αυτών των δύο οξειδίων στα δείγματα, παρατηρούνται αντίστροφες συμπεριφορές καθώς το οξείδιο του αργιλίου έχει μια τάση αυξητική στα σφαιρίδια, ενώ το διοξείδιο του πυριτίου, πτωτική.



Εικόνα 18: Διάγραμμα κατανομής διοξειδίου του πυριτίου - οξειδίου του αργιλίου στις φάσεις του συμπαγούς λαβραδορίτη (*min*), σφαιριδίων (*melts*) και θραυσμάτων (*frag*).

Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 18, οι μετρήσεις του ορυκτού λαβραδορίτη εντοπίζονται σε μια περιορισμένη περιοχή με μέσες τιμές να κυμαίνονται κοντά στο 30% το Al_2O_3 και 54% το SiO_2 . Οι τιμές των οξειδίων αυτών στα θραύσματα σχεδόν ταυτίζονται με εκείνες του ορυκτού. Η συμπεριφορά τους αυτή είναι σχετικά αναμενόμενη καθώς λόγω της ισχύος του laser, τα τμήματα αυτά απλώς αποσπάστηκαν από το ορυκτό χωρίς να τηχθούν. Οι τιμές στα σφαιρίδια, δείχνουν μια πιο έντονη διασπορά. Το Al_2O_3 έχει μια τάση να αυξάνεται στις περισσότερες περιπτώσεις ενώ το SiO_2 σε ένα μεγάλο ποσοστό, μένει σχεδόν ανεπηρέαστο. Γενικά παρατηρείται μια ελαφριά γραμμικότητα των μετρήσεων στα σφαιρίδια καθώς με

την αύξηση του Al_2O_3 υπάρχει και μια ταυτόχρονη μείωση κάποιων τιμών του SiO_2 και αντίστροφα.

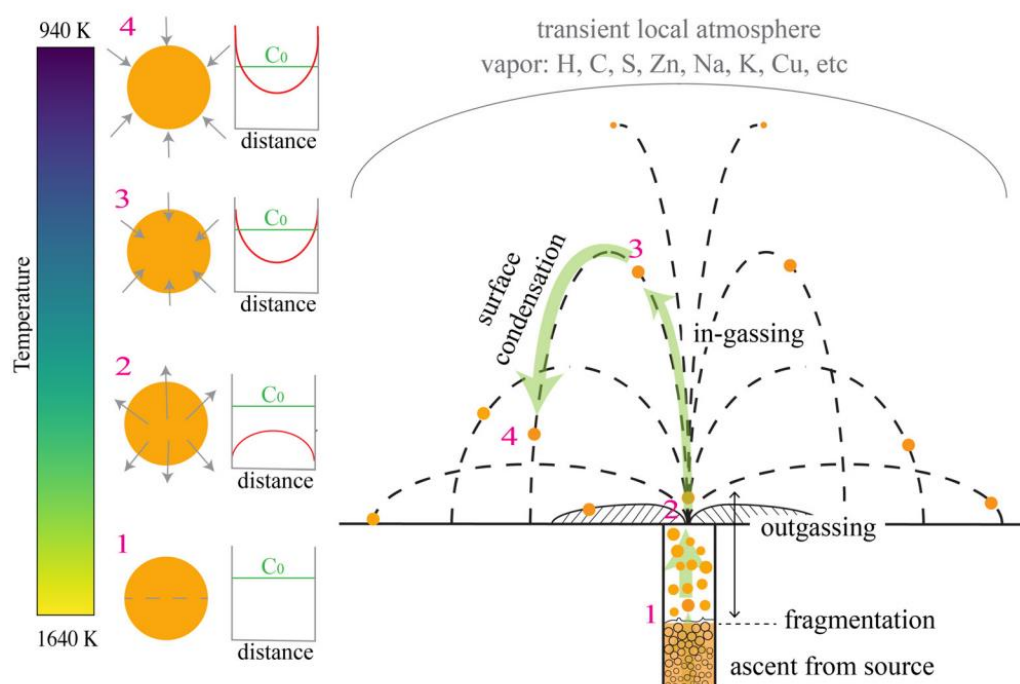


Εικόνα 19: Διάγραμμα κατανομής διοξειδίου του πυριτίου - οξειδίου του αργιλίου στις φάσεις του συμπαγούς ολιγοκλάστου, σφαιριδίων και θραυσμάτων.

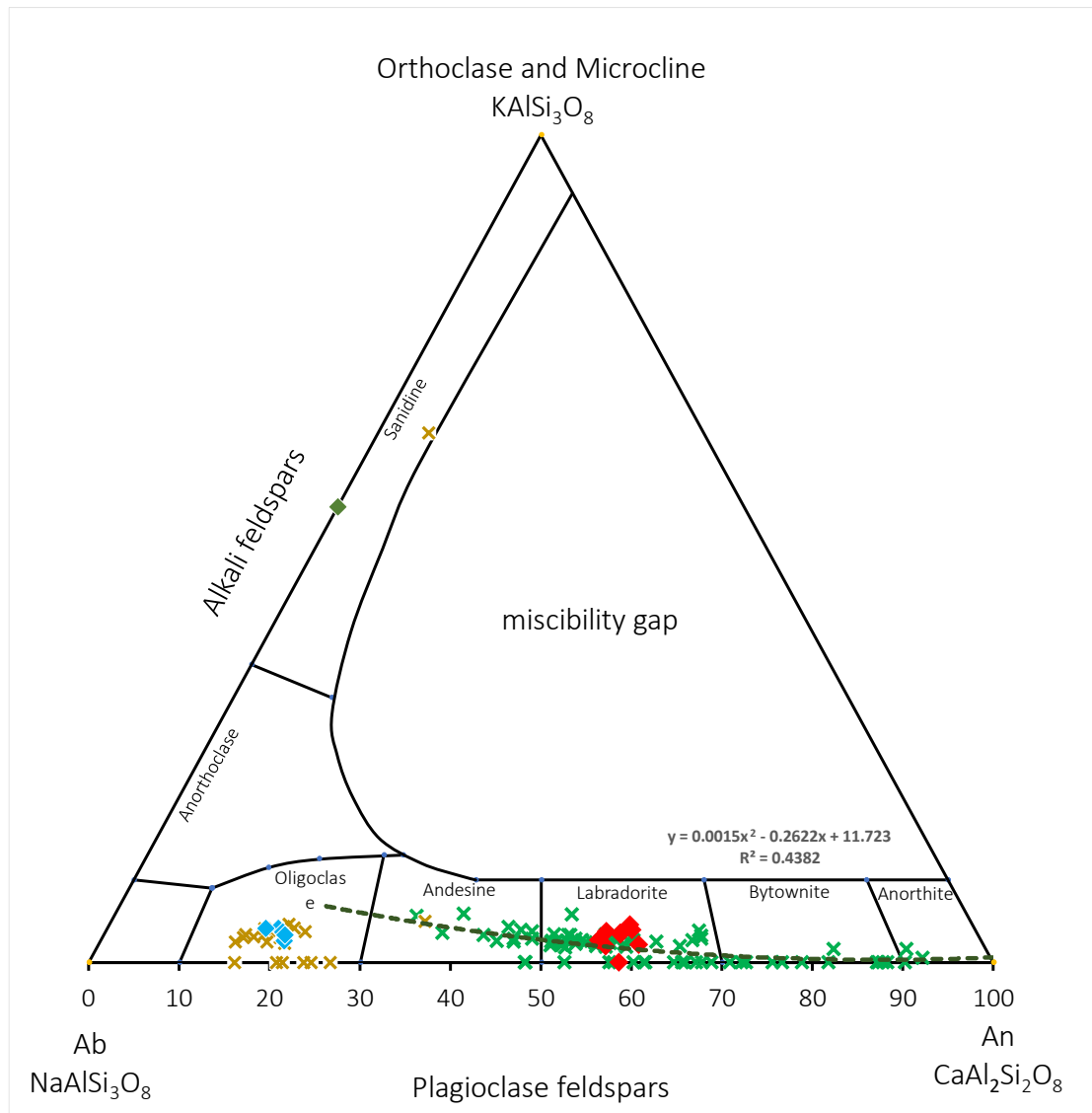
Οι μετρήσεις στο δείγμα ολιγοκλάστου έχουν μια πολύ ξεκάθαρη συμπεριφορά. Οι τιμές στο διάγραμμα εμφανίζουν μια ξεκάθαρη γραμμικότητα. Οι αρχικές τιμές του ορυκτού είναι κοντά στο 20% Al_2O_3 και 64% SiO_2 . Έπειτα από την επεξεργασία που δέχτηκε, τα θραύσματα που προέκυψαν εμφάνισαν λιγότερο SiO_2 ενώ αυξήθηκε το Al_2O_3 . Όμοια συμπεριφορά αλλά με πολύ πιο έντονη διαφοροποίηση των Al_2O_3 - SiO_2 , εμφάνισαν και οι τιμές των σφαιριδίων, οι οποίες εμφανίζονται στο διάγραμμα της Εικόνα 19. Η συμπεριφορά αυτή των στοιχείων οφείλεται στην απώλεια του συστατικού SiO_2 από τα μικροσφαιρίδια η οποία κατά συνέπεια τροποποιεί την αναλογία του Al_2O_3 στο δείγμα με αποτέλεσμα να διακρίνεται μια εικονική αύξηση αυτού. Αντίστοιχα μπορεί να συμβαίνει το ίδιο και με την περίπτωση της μείωσης του Al_2O_3 . Υπάρχει βέβαια και το ενδεχόμενο να εξαχνώνεται το SiO_2 από το δείγμα

και έπειτα να επικάθεται στην επιφάνεια ορισμένων σφαιριδίων. Με αυτόν τον τρόπο διαφοροποιείται η σύσταση και οι αναλογίες στις τιμές.

Το φαινόμενο αυτό, της εκ νέου πρόσληψης στοιχείων που βρίσκονται σε αέρια μορφή, έχει παρατηρηθεί και κατά τη διάρκεια της ηφαιστειακής δραστηριότητας της σελήνης, όταν συμπυκνώνονται τα παραγόμενα αέρια πάνω στην επιφάνεια κόκκων υέλου (orange glass beads) [36]. Ο μηχανισμός αυτός εξηγείται καλύτερα και στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας «κατακερματισμός μάγματος, εξάτμιση, εισροή αερίων και συμπύκνωση στην επιφάνεια» που πραγματοποιείται στους δημιουργούμενους κόκκους υέλου, κατά τα εκρηκτικά φαινόμενα της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Πηγή εικόνας: [36]



Εικόνα 21: Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης σύστασης του λαβραδορίτη και του ολιγοκλάστου πριν και μετά την ακτινοβόληση με laser.

Πίνακας 6: Μέσες συστάσεις Na₂O, K₂O και CaO στα δείγματα.

	Na ₂ O (Average) (%)	K ₂ O (Average) (%)	CaO (Average) (%)
Λαβραδορίτης	4.33	0.47	11.20
Σφαιρίδια (Λ)	4.16	0.30	11.88
Θραύσματα (Λ)	4.85	0.35	24.57
Ολιγόκλαστο	8.56	0.60	3.86
Σφαιρίδια (Ο)	6.97	0.87	3.28
Θραύσματα (Ο)	8.40	0.30	3.59

Na₂O

Συμπεράσματα για τις τροποποιήσεις που συνέβησαν στο Na₂O των δειγμάτων θα εξαχθούν κυρίως από το ολιγόκλαστο κι έπειτα από τον λαβραδορίτη. Το ολιγόκλαστο είναι το ορυκτό με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Na₂O από τα δύο. Έτσι, μέσω του διαγράμματος της Εικόνα 21, το νάτριο στο σύνολο έχει την τάση να μειώνεται έπειτα από το laser ablation, στις φάσεις των σφαιριδίων. Λίγες είναι οι περιπτώσεις που οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες από τις τιμές στα πρότυπα δείγματα και είναι εκείνες που προβάλλονται ελαφρώς κοντύτερα στην κορυφή του αλβίτη (NaAlSi₃O₈). Ο εμπλουτισμός αυτός υποδηλώνει μερική δέσμευση του εξαχνωμένου, πλέον, νατρίου που αποβάλλεται από το δείγμα όταν η δέσμη του laser προσπίπτει στην επιφάνειά του. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα στο δείγμα του λαβραδορίτη καθώς υπάρχει ένα υψηλό ποσοστό τιμών που υπερβαίνουν τις τιμές του ορυκτού. Και στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως παρατηρείται η μείωση των τιμών νατρίου, γεγονός που υποδηλώνει διαφυγή ως αέριο.

K₂O

Στα διαγράμματα του λαβραδορίτη και του ολιγοκλάστου, τα ποσοστά καλίου στα δείγματα ήταν χαμηλά. Μια τόσο μικρή συγκέντρωση δεν είναι ικανή από μόνη της για να παρατηρηθεί η τροποποίηση της σύστασης των ορυκτών. Παρ' όλα αυτά, κρίνοντας και από την συμπεριφορά του νατρίου, φαίνεται πως και το κάλιο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα ως αέριο. Μάλιστα το κάλιο σχηματίζει τους αστρίους

των χαμηλότερων θερμοκρασιών οπότε κι αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει σε ένα βαθμό όσα παρατηρούνται.

Στο πείραμα που διεξήχθη με το ορθόκλαστο επίσης επιβεβαιωνόντουσαν τα παραπάνω λεγόμενα καθώς υπήρχε κατακόρυφη πτώση των τιμών του καλίου.

CaO

Το ασβέστιο στα δείγματα έχει σύνθετη συμπεριφορά. Ο λαβραδορίτης έχει αυξημένα ποσοστά ασβεστίου. Παρ' όλα αυτά, ένα μεγάλο ποσοστό μετρήσεων στις τιμές των σφαιριδίων δεν τροποποιούνται ιδιαίτερα και παραμένουν κοντά σε εκείνες του ορυκτού. Οι υπόλοιπες τιμές δείχνουν μείωση αλλά και παράλληλη αύξηση του ασβεστίου στα σφαιρίδια. Μείωση των τιμών του ασβεστίου, κατά πάσα πιθανότητα, ισοδυναμεί με εξαχνωση του στοιχείου ενώ ο φαινομενικός εμπλουτισμός οφείλεται σε μια επιφανειακή επικάλυψη των σφαιριδίων μέσω της επικρατούσας ατμόσφαιρας που δημιουργείται με το laser ablation.

Σε αντίθεση με τον λαβραδορίτη, το ολιγόκλαστο που έχει μικρότερα ποσοστά ασβεστίου, σαν γενική εικόνα δημιουργεί σφαιρίδια με χαμηλότερες τιμές ασβεστίου από τις πρότυπες. Το ασβέστιο και σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να διαφεύγει ως αέριο.

Το φαινόμενο της δημιουργίας ατμόσφαιρας εμπλουτισμένης σε ασβέστιο υφίσταται και αξιοποιείται συχνά από τις βιομηχανίες των συγκολλήσεων οι οποίες χρησιμοποιούν οξειδία του ασβεστίου ή και πετρώματα με υψηλά ποσοστά σε ασβέστιο όπως οι ασβεστόλιθοι για την προφύλαξη της συγκόλλησης καθώς δημιουργεί μια προστατευτική ατμόσφαιρα γύρω της [37].

Δείγματα Μετεωριτών

Στα δείγματα των μετεωριτών, οι αναλύσεις τόσο οι πρότυπες όσο και εκείνες των θραυσμάτων και των σφαιριδίων εμπεριέχουν σφάλματα. Το γεγονός αυτό εξαρτάται και επηρεάζεται από παράγοντες όπως είναι ο βαθμός καταπόνησης των δειγμάτων, το μέγεθος των κρυστάλλων και η αδυναμία του laser να εστιάσει σε πολύ συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος πάνω στο δείγμα. Η τελευταία συνθήκη καθιστά δυσκολότερο τον προσδιορισμό της προέλευσης των σφαιριδίων.

Επιπλέον, σε κάποια διαγράμματα που ακολουθούν, πέραν των πειραματικών τιμών συμπεριλαμβάνονται και μετρήσεις από ορυκτά μετεωριτών διαφόρων κατηγοριών ώστε να μπορέσει να γίνει μια πιθανή πρόβλεψη της συμπεριφοράς ομοίων μετεώρων κατά την πτώση τους.

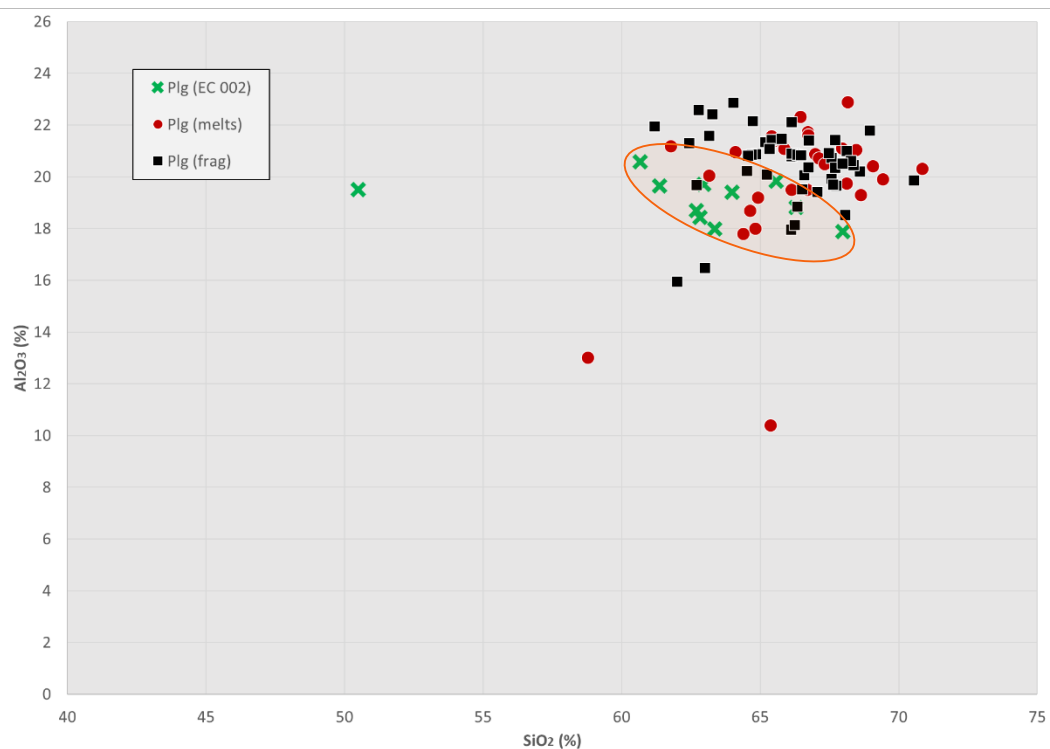
Πλαγιόκλαστα

Πίνακας 7: Συστάσεις πλαγιόκλαστων στους μετεωρίτες EC 002 και RaS 445.

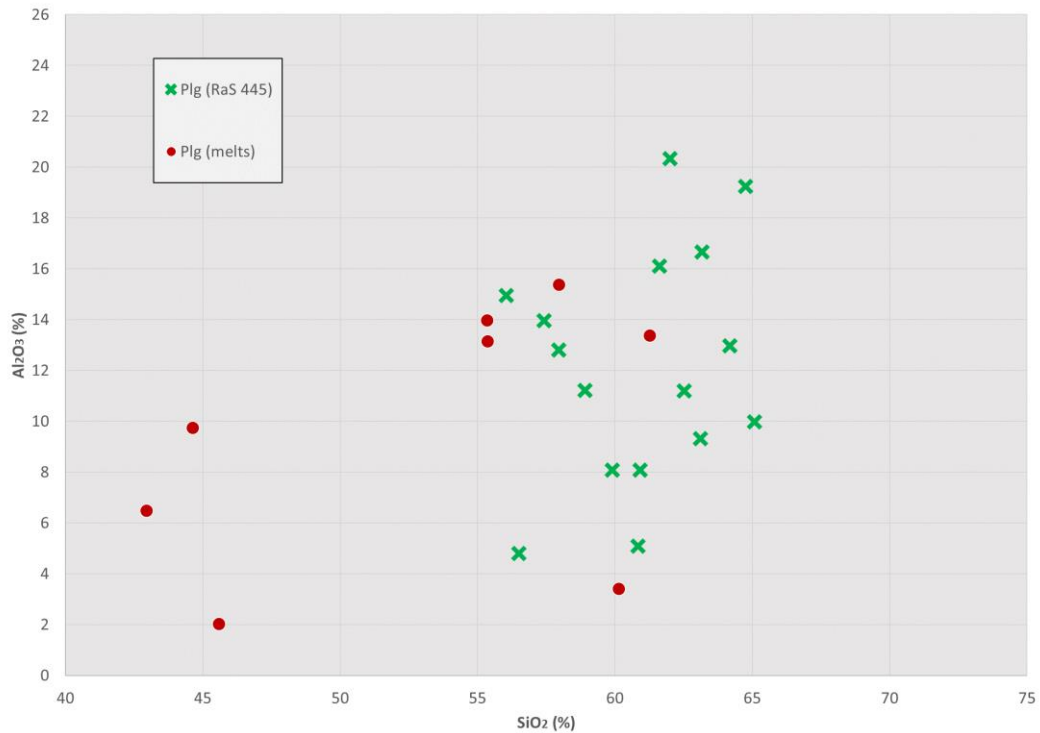
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
EC 002										
Min	50,49	17,89	1,83	0,00	2,13	1,84	0,00	0,00	0,00	0,00
max	67,98	20,58	10,46	1,58	11,86	14,72	0,00	9,55	1,02	0,55
Avg	62,57	19,14	7,71	0,65	4,17	4,34	0,00	2,05	0,15	0,05
Std	4,33	0,80	2,00	0,39	2,55	3,49	0,00	2,47	0,34	0,16
Melts EC 002										
Min	58,79	10,37	2,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	70,85	22,86	11,82	1,55	6,65	11,51	0,65	11,31	0,00	0,00
Avg	66,12	19,80	7,66	0,68	2,25	2,27	0,02	1,12	0,00	0,00
Std	2,84	2,56	2,34	0,38	1,12	3,12	0,12	2,30	0,00	0,00
Fragments EC 002										
Min	61,18	15,97	1,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	70,53	22,88	11,85	11,67	3,76	6,28	0,00	4,54	0,00	0,00
Avg	65,97	20,44	9,21	1,43	2,00	0,85	0,00	0,33	0,00	0,00
Std	2,18	1,53	2,26	2,47	0,83	1,54	0,00	0,95	0,00	0,00

	SiO2	Al2O	Na2O	K2O	CaO	FeO	MnO	MgO	Cr2O	TiO2
		3							3	
RaS 445										
Min	56,05	4,80	0,00	0,00	0,45	2,26	0,00	1,18	0,00	0,00
max	65,08	20,33	8,83	3,64	15,13	11,36	0,00	12,82	1,72	0,82
Avg	60,93	12,17	5,17	0,90	6,50	5,12	0,00	6,70	0,24	0,12
Std	2,81	4,45	2,29	0,87	4,67	2,13	0,00	3,31	0,48	0,26
Melts RaS 445										
Min	42,95	2,00	0,00	0,00	0,77	5,25	0,00	9,14	0,00	0,00
max	61,28	15,36	8,21	1,10	12,66	25,35	0,00	20,90	1,43	0,93
Avg	52,91	9,68	3,11	0,14	4,97	12,54	0,00	14,32	0,47	0,12
Std	6,90	4,81	3,03	0,36	4,03	7,23	0,00	4,10	0,52	0,31

Al₂O₃ (%) – SiO₂ (%)



Εικόνα 22: Διάγραμμα κατανομής διοξειδίου του πυριτίου - οξειδίου του αργιλίου στα πλαγιόκλαστα του EC 002, τα σφαιρίδια και τα θραύσματα.

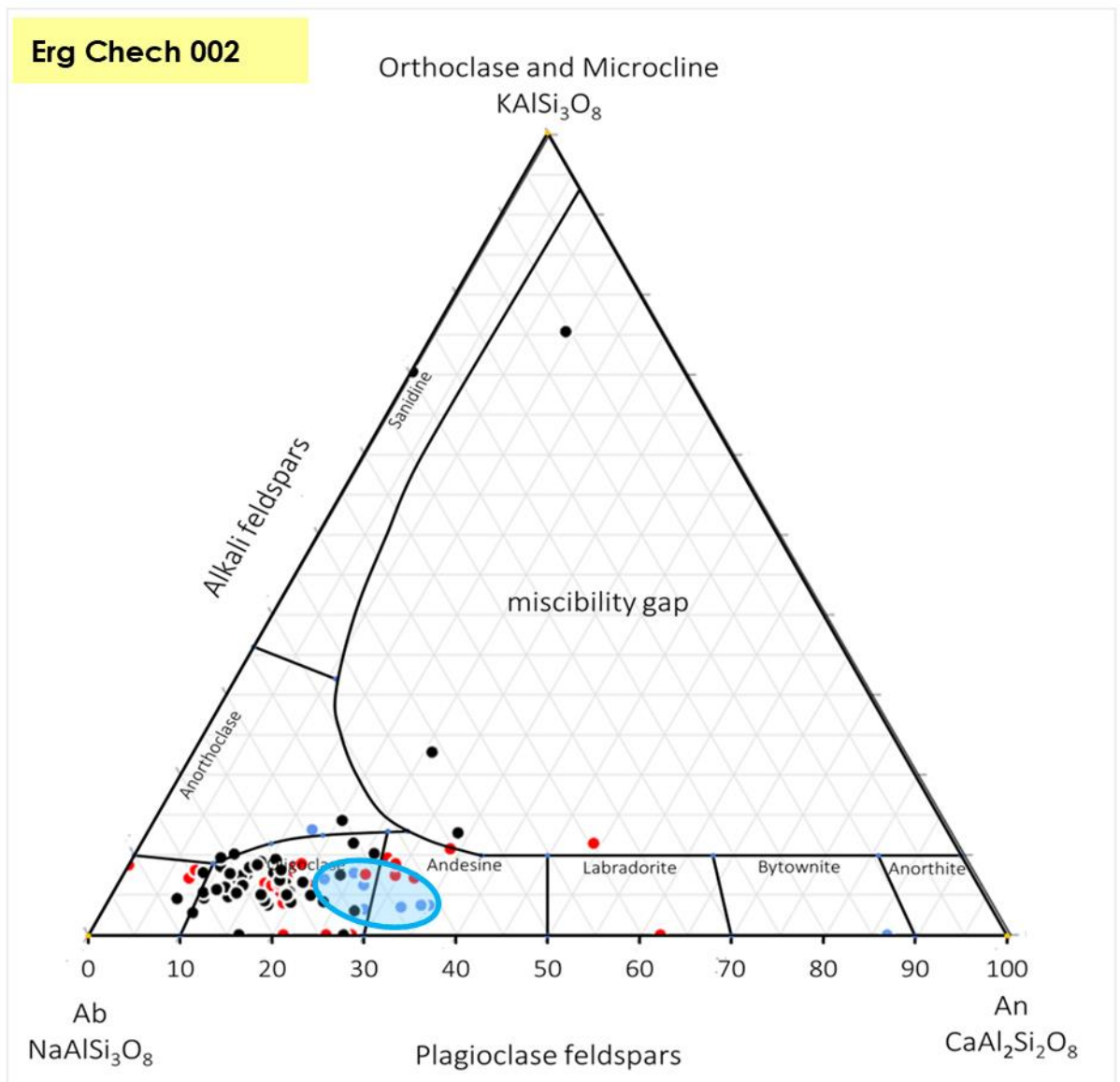


Εικόνα 23: Διάγραμμα κατανομής διοξειδίου του πυριτίου - οξειδίου του αργιλίου στα πλαγιόκλαστα του RaS 445, τα σφαιρίδια και τα θραύσματα.

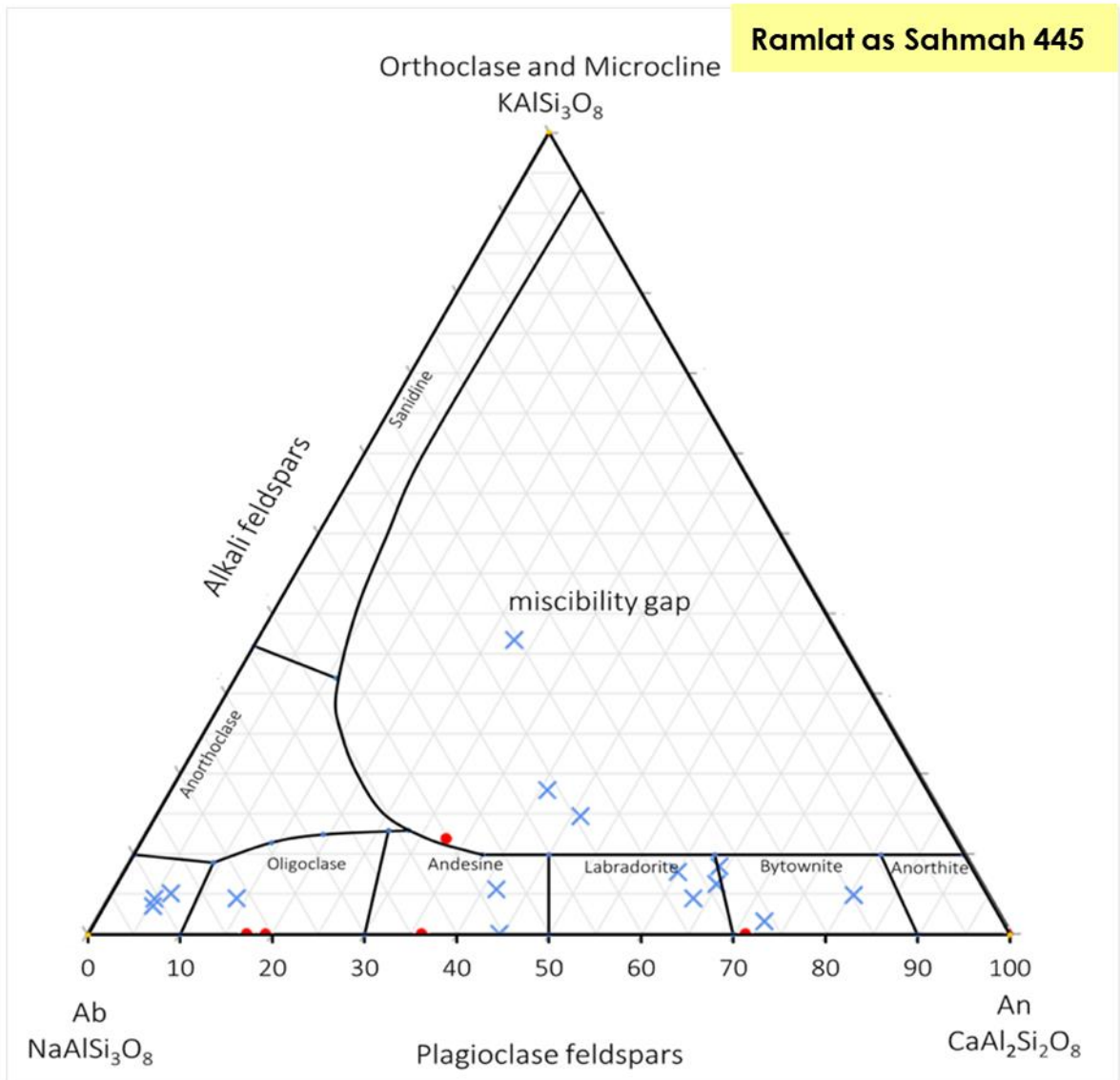
Η συμπεριφορά του συστήματος Al₂O₃ (%) – SiO₂ (%) διαφοροποιείται μεταξύ των δύο μετεωριτών.

Αρχικά στον EC 002 (Εικόνα 22) και τα δύο αυτά συστατικά έχουν πιο αυξημένες τιμές από τις πρότυπες που έχουν μετρηθεί. Η ταυτόχρονη αύξηση αυτήν τη φορά, μπορεί να ερμηνευθεί ως τροποποίηση της αναλογίας τους στο δείγμα λόγω απώλειας άλλων συστατικών όπως πχ τα αλκάλια. Επίσης θα μπορούσε να σημαίνει και εξάχνωση αυτών των στοιχείων από άλλες φάσεις και επικάλυψη στην επιφάνεια των παρόντων μέσω της ατμόσφαιρας.

Ο RaS 445 από την άλλη δείχνει να χάνει ποσότητες και από τα δύο στοιχεία. Αν ισχύει αυτό, τότε περισσότερο πιθανός είναι να ισχύει ο δεύτερος μηχανισμός που περιεγράφηκε στην περίπτωση του EC 002.



Εικόνα 24: Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης σύστασης στα πλαγιόκλαστα του μετεωρίτη EC 002, σε πρότυπο δείγμα, σφαιρίδια και θραύσματα.



Εικόνα 25: Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης σύστασης στα πλαγιόκλαστα του μετεωρίτη RaS 445, σε πρότυπο δείγμα, σφαιρίδια και θραύσματα.

Μέσω των δύο τριγωνικών διαγραμμάτων, μπορεί να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του συστήματος $K_2O - Na_2O - CaO$.

Στον EC 002 παρατηρείται εξάχνωση αλκαλίων και ασβεστίου από το δείγμα. Οι τιμές ελαττώνονται στις περιπτώσεις του νατρίου και του ασβεστίου ενώ το κάλιο αυξάνει, πράγμα που φαίνεται και μέσω του Πίνακα 7. Η συγκεκριμένη αύξηση έχει εξηγηθεί και σε προηγούμενη ενότητα, όταν μελετήθηκαν οι καθαρές φάσεις ορυκτών. Τα

στοιχεία επαναποτίθενται πάνω στην επιφάνεια του κατακερματισμένου υλικού μέσω δημιουργούμενης ατμόσφαιρας.

Η όψη των πλαγιοκλάστων στην περίπτωση του RaS 445 δεν είναι βοηθητική στην διεξαγωγή συμπερασμάτων καθώς η σύστασή τους έχει μεγάλη ποικιλία. Μέσω όμως του Πίνακα 7 μπορεί να σημειωθεί μια πτώση των τιμών της μέσης σύστασης και των τριών συστατικών. Οπότε αυτό για ακόμη μια φορά δηλώνει εξάχνωση των στοιχείων.

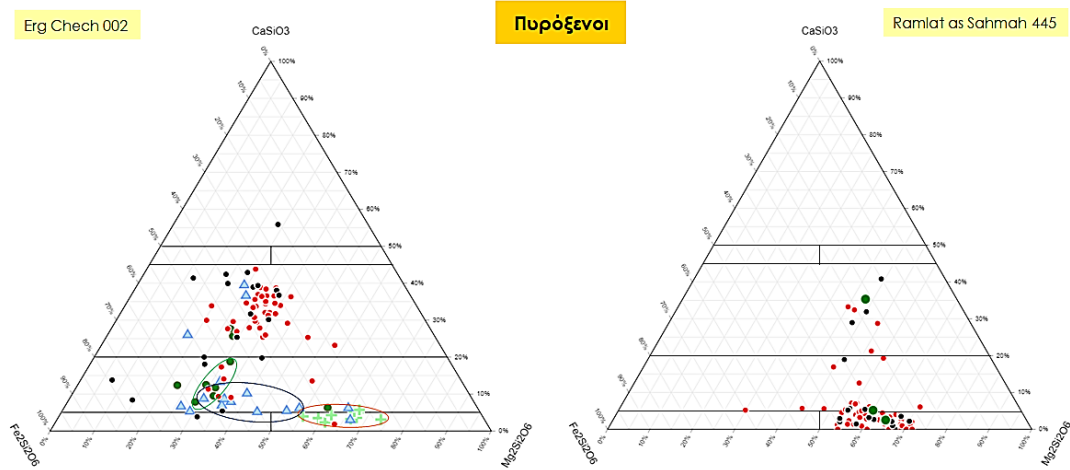
Πυρόξενοι

Οι πυρόξενοι είναι λιγότερο ευπαθή ορυκτά απ' ό τι είναι οι καλιούχοι άστριοι και τα πλαγιόκλαστα. Αυτό συμβαίνει λόγω των θερμοκρασιών που κρυσταλλώνεται το κάθε ορυκτό καθώς όσο πιο νωρίς κρυσταλλωθεί, σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, τόσο πιο ανθεκτικό είναι στην τήξη του. Στα αποτελέσματα λοιπόν των αναλύσεων, δεν αναμένεται τόσο έντονη διαφοροποίηση μετά από την επεξεργασία.

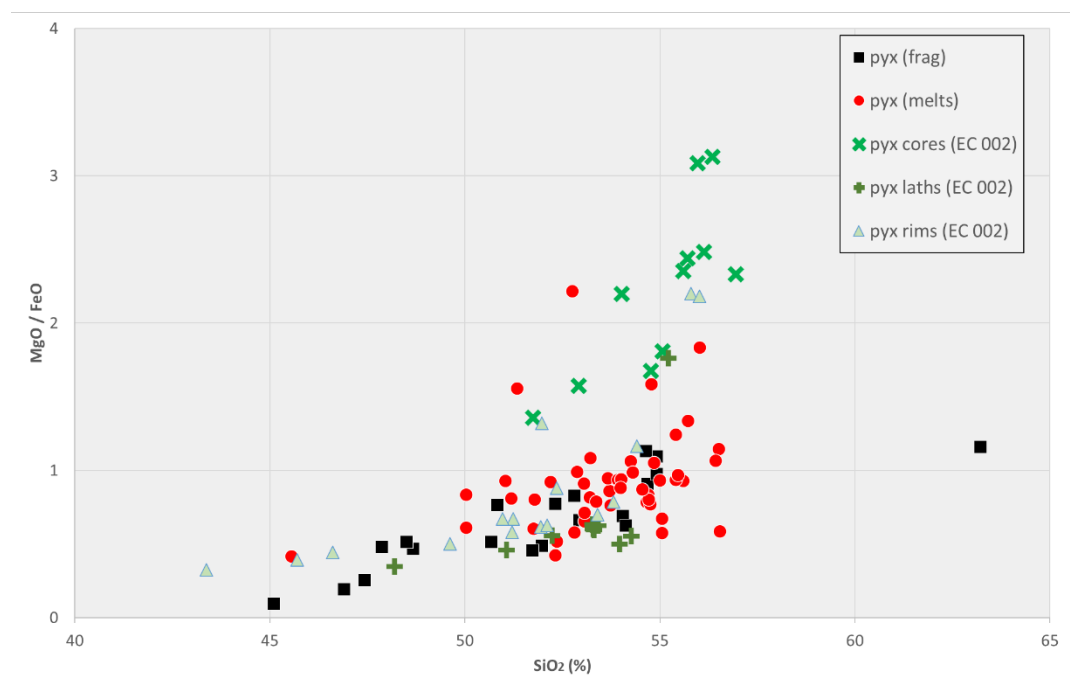
Εξετάζοντας αρχικά τον μετεωρίτη EC 002 μέσω της Εικόνα 26 και σε συνδυασμό με τον Πίνακα 8, φαίνεται πως τόσο τα θραύσματα όσο και οι σφαίρες, μετά το laser ablation, έχουν μεγαλύτερα ποσοστά σιδήρου απ' ό τι μαγνησίου και βρίσκονται αρκετά κοντά στις πρότυπες τιμές των δακτυλίων (rims) και των πλακωδών κρυστάλλων (laths). Η παρατήρηση αυτή ήταν αναμενόμενη καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό πυροξένων (laths και ακολούθως rims) του συγκεκριμένου μετεωρίτη έχουν μεγαλύτερα ποσοστά σιδήρου. Παρ' όλ' αυτά ο λόγος MgO/FeO (Εικόνα 27) στις σφαίρες είναι ελαφρώς πιο αυξημένος από εκείνον των δακτυλίων και των πλακωδών πυροξένων. Η άνοδος αυτή οφείλεται στην ελάττωση των τιμών σιδήρου με το μαγνήσιο να κυμαίνεται γύρω από τις αντίστοιχες πρότυπες τιμές. Τα θραύσματα ταυτίζονται σε μεγαλύτερο βαθμό με τις πρότυπες τιμές των δακτυλίων και των πλακωδών πυροξένων.

Το πυρίτιο φαίνεται ανεπηρέαστο από την συγκεκριμένη διαδικασία.

Αισθητή είναι η αύξηση του ασβεστίου στο συγκεκριμένο δείγμα όμως κατά πάσα πιθανότητα εντοπίζεται επιφανειακά στα σφαιρίδια και τα θραύσματα και προέρχεται από άλλες φάσεις που το αποβάλλουν.



Εικόνα 26: Τριγωνικά διαγράμματα απεικόνισης σύστασης πυροξένων των μετεωριτών EC 002 και RaS 445, σε πρότυπο δείγμα, σφαιρίδια και θραύσματα.

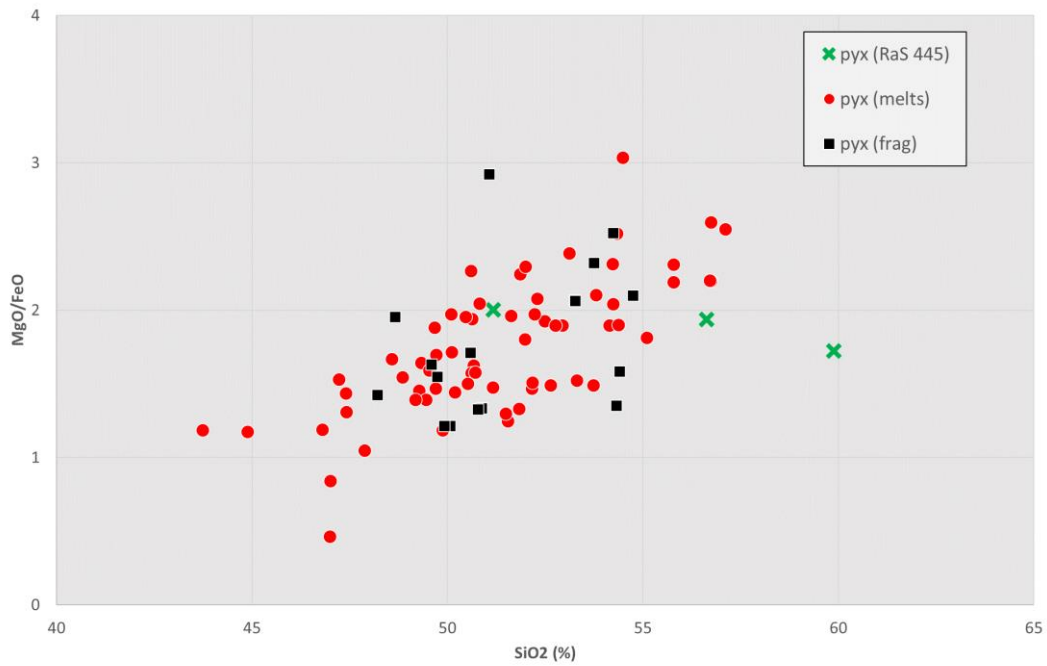


Εικόνα 27: Διάγραμμα κατανομής του λόγου MgO/FeO σε σχέση με το SiO₂ στους κρυστάλλους πυροξένου του μετεωριτή EC 002.

Ο μετεωρίτης RaS 445, στην τομή που μελετήθηκε, παρουσίασε ολιγάριθμους πυροξένους. Ως επι τοπλείστον, οι μετρήσεις περιελάμβαναν ολιβίνες και πλαγιόκλαστα. Σε αντίθεση με αυτό, έρχεται το γεγονός της παρουσίας πολλών μετρήσεων πυροξενικής σύστασης στα σφαιρίδια και στα θραύσματα, κατόπιν στοιχειομετρικής κατάταξης. Επιπλέον σε αρκετές περιπτώσεις εντοπίζονται ποσά αργιλίου και αλκαλίων που μπορεί να φτάσουν και πάνω από το 3%. Δεδομένων αυτών των αποτελεσμάτων, πολλές από τις πυροξενικές αναλύσεις στα σφαιρίδια και στα θραύσματα είναι πιθανό να προέρχονται από κάποια ανάμιξη ολιβινών και πλαγιοκλάστων. Έτσι, παρατηρείται ένα μεγάλο εύρος τιμών οξειδίων στις μετρήσεις αυτές και η εξαγωγή συμπερασμάτων από το δείγμα αυτό δεν ενδείκνυται.

Πίνακας 8: Σύνθεση πυροξένων, σφαιριδίων και θραυσμάτων του του μετεωρίτη Erg Chech 002.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
Cores EC 002										
Min	51,75	0,00	0,00	0,00	1,02	10,01	0,00	23,77	0,56	0,00
Max	56,95	10,04	0,00	0,00	2,41	17,92	0,94	31,72	1,48	0,00
Avg	54,92	2,07	0,00	0,00	1,67	13,29	0,20	27,95	0,93	0,00
Std	1,73	3,45	0,00	0,00	0,48	2,69	0,37	2,72	0,28	0,00
Rims EC 002										
Min	43,38	0,72	0,00	0,00	1,27	12,54	0,00	9,19	0,00	0,00
Max	56,01	3,42	1,59	0,00	17,28	33,15	1,73	28,09	1,42	1,17
Avg	51,28	1,75	0,48	0,00	5,45	22,57	0,60	17,11	0,58	0,11
Std	3,39	0,74	0,64	0,00	4,72	6,37	0,70	5,65	0,52	0,30
Laths EC 002										
Min	48,20	0,94	0,00	0,00	2,70	14,45	0,00	10,12	0,00	0,00
Max	55,22	3,85	1,85	0,00	11,40	29,07	1,41	25,45	1,23	0,00
Avg	52,64	2,70	1,13	0,00	6,11	22,38	0,70	14,39	0,44	0,00
Std	2,27	0,94	0,70	0,00	3,22	4,82	0,60	5,10	0,49	0,00
Melts										
Min	45,57	0,00	0,00	0,00	0,81	10,07	0,00	8,69	0,00	0,00
Max	56,54	7,10	2,33	0,45	17,69	26,42	1,72	27,93	4,62	2,29
Avg	53,51	1,29	0,24	0,02	12,72	16,60	0,40	14,51	0,48	0,22
Std	2,29	1,89	0,62	0,09	4,23	3,90	0,55	3,69	0,99	0,58
Fragments										
Min	45,12	0,00	0,00	0,00	1,79	0,87	0,00	1,01	0,00	0,00
Max	63,24	20,61	11,27	0,63	21,45	31,88	2,60	17,26	1,71	1,13
Avg	52,14	3,19	1,25	0,08	12,53	19,77	0,68	11,00	0,26	0,24
Std	4,67	6,33	3,28	0,21	7,09	8,53	0,85	4,73	0,53	0,44



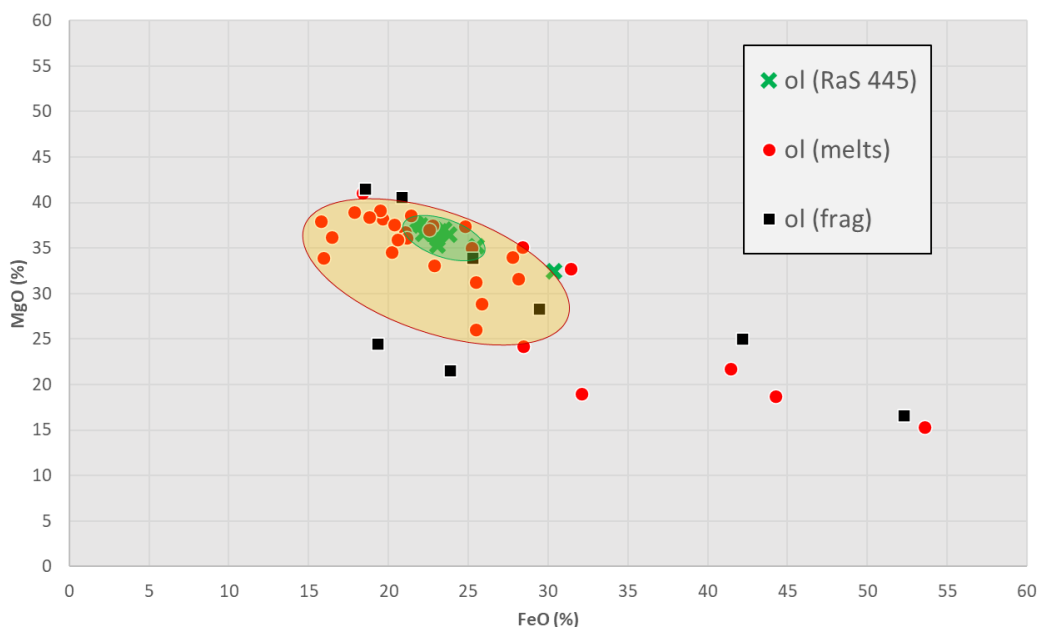
Εικόνα 28: Διάγραμμα κατανομής του λόγου MgO/FeO σε σχέση με το SiO₂ στους κρυστάλλους πυροξένου του μετεωρίτη RaS 445.

Πίνακας 9: Σύνθεση πυροξένων, σφαιριδίων και θραυσμάτων του μετεωρίτη Ramlat as Sahmah 445.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
RaS 445										
Min	51,17	0,00	0,00	0,00	1,04	9,61	0,00	19,25	0,00	0,00
max	59,88	4,02	0,57	0,00	15,77	13,74	0,43	26,60	1,30	0,00
Avg	55,89	1,69	0,19	0,00	6,22	11,98	0,14	22,50	0,43	0,00
Std	3,59	1,71	0,27	0,00	6,76	1,74	0,20	3,06	0,61	0,00
Melts										
Min	43,74	0,00	0,00	0,00	0,00	8,14	0,00	15,36	0,00	0,00
max	57,12	6,33	3,38	1,22	16,89	33,38	0,84	33,02	2,76	0,00
Avg	51,34	1,50	0,26	0,03	2,64	16,37	0,01	26,95	0,25	0,00
Std	2,87	1,50	0,69	0,17	3,69	4,05	0,10	3,81	0,52	0,00
Fragments										
Min	48,20	0,00	0,00	0,00	0,00	6,26	0,00	17,49	0,00	0,00
max	54,75	6,35	3,19	0,87	16,95	21,79	0,74	32,07	1,40	0,00
Avg	51,61	2,03	0,69	0,05	3,97	14,99	0,09	25,33	0,39	0,00
Std	2,14	2,26	0,97	0,20	5,23	3,83	0,24	4,76	0,50	0,00

Ολιβίνης

Η παρουσία του ολιβίνης ήταν αισθητά έντονη στο δεύτερο δείγμα μετεωρίτη (Ramlat as Sahmah) ενώ σχεδόν απουσίαζε από το δείγμα του EC 002. Το συγκεκριμένο ορυκτό κάλυπτε ένα πολύ μεγάλο τμήμα του μετεωρίτη και εμφάνιζε τους πιο καλά διατηρημένους κρυστάλλους και τους πιο μεγάλους σε μέγεθος. Από την μελέτη των ολιβινών μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα μόνο για τη συμπεριφορά του μαγνησίου και του σιδήρου. Στο διάγραμμα της Εικόνα 29 παρατηρείται, κατόπιν της επεξεργασίας του μετεωρίτη, μια διασπορά των τιμών στις περιπτώσεις των σφαιριδίων και των θραυσμάτων. Κυρίως φαίνεται μια πτωτική πορεία των τιμών του μαγνησίου όταν υπάρχει ταυτόχρονα ανοδική πορεία σιδήρου. Πτώση των ποσοστών σιδήρου εμφανίζουν μόνο περιπτώσεις που το μαγνήσιο έχει διατηρήσει τις πρότυπες τιμές του στα σφαιρίδια. Οι παρατηρήσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα της μερικής εξάχνωσης σιδήρου. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την φύση του ορυκτού καθώς ο φαυαλίτης (FeSiO_4) είναι ορυκτό χαμηλότερης θερμοκρασίας από τον φορστερίτη (MgSiO_4), γεγονός που τον καθιστά πιο ευπαθή σε θερμικά σοκ.



Εικόνα 29: Διάγραμμα κατανομής του MgO σε σχέση με το FeO στους κρυστάλλους, τα σφαιρίδια και τα θραύσματα ολιβίνης του μετεωρίτη Ramlat as Sahmah 445.

Συμπεράσματα

Τα πειράματα με εξάχνωση και απομάκρυνση υλικού από μετεωρίτες με την χρήση ισχυρών παλμικών λέιζερς έδειξε ότι η υπόθεση για φαινόμενα κλασμάτωσης της αρχικής χημείας των ορυκτών που περιλαμβάνονται σε μετεωρίτες είναι σωστή και απαιτείται συστηματική μελέτη αυτών. Στην εργασία αυτή πειραματιστήκαμε με μετεωρίτες αλλά και με καθαρές ορυκτολογικές φάσεις. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι μια συστηματική μελέτη πρώτα με την χρήση καθαρών φάσεων ελεγχόμενης χημείας και κρυσταλλικής δομής είναι απαραίτητη πριν προχωρήσουμε σε υλικά μικτών φάσεων, όπως είναι οι πολύ-ορυκτολογικοί μετεωρίτες, και γενικότερα τα πετρολογικά δείγματα. Συνοπτικά, τα συμπεράσματα αυτής της ερευνητικής εργασίας είναι:

1. Εξάχνωση και διαφυγή των πιο ευκίνητων στοιχείων που είναι τα αλκάλια (K, Na). Τα αλκάλια εξαχνώνονται στον μεγαλύτερο βαθμό, και αυτό είναι εμφανές τόσο στα δείγματα μονοφασικών ορυκτών όσο και στους μετεωρίτες. Η ευπάθεια του νατρίου επισημαίνεται και σε δημοσίευση των J. M. Trigo-Rodriguez et al. [13] όπου αναφέρεται ως το πιο πτητικό από όλα τα υπόλοιπα στοιχεία που μελετήθηκαν. Μέρος των αλκαλίων φαίνεται να επιστρέφει και να επικάθεται στο δείγμα σαν υπεροξειδία αλκαλίων, όπως έδειξαν πειράματα που έγιναν με το όργανο OxR που αναπτύχθηκε στο εργαστήριό μας (εσωτερική πληροφορία μετά από συζήτηση με τον Η. Χατζηθεοδωρίδη).
2. Το ασβέστιο (Ca) παρουσιάζει επίσης μια κινητικότητα, και είναι γνωστό ήδη το φαινόμενο της δημιουργίας ατμόσφαιρας εμπλουτισμένης σε ασβέστιο κατά τις συγκολλήσεις μετάλλων, τεχνική που αξιοποιείται συχνά στις βιομηχανίες συγκολλήσεων οι οποίες χρησιμοποιούν οξειδία του ασβεστίου ή και πετρώματα με υψηλά ποσοστά σε ασβέστιο όπως οι ασβεστόλιθοι για την προφύλαξη της συγκόλλησης καθώς δημιουργεί μια προστατευτική ατμόσφαιρα. Πιο ανθεκτικά βρέθηκαν να είναι το αργίλιο και σε κάποιον βαθμό το πυρίτιο. Οι διαφοροποιήσεις που σημειώθηκαν έδειξαν ως επί το πλείστον μικρές αλλαγές με το πυρίτιο να εξαχνώνεται σε μικρό ποσοστό. Αυτά τα στοιχεία, και κυρίως το αργίλιο, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν

σαν το μέγεθος σύγκρισης με τα αλκάλια για την δημιουργία μιας βάσης δεδομένων αναλογιών που υποβοηθούν στην διάκριση των διαφορετικών μετεώρων. Αυτό απαιτεί βεβαίως συστηματική μελέτη, και μπορεί να έχει και χρήσεις στην βιομηχανία. Μικρές μεταβολές παρατηρήθηκαν και στα ποσοστά σιδήρου ο οποίος φαίνεται πως επίσης εξαχνώνεται σε κάποιο βαθμό, ωστόσο από τα συγκεκριμένα δείγματα δεν είναι δυνατόν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα. Τα πειράματα αυτά μπορούν να επαναληφθούν με την χρήση και πάλι καθαρών ορυκτών φάσεων, πχ. ολιβίνη.

Συνοψίζοντας, τα προαναφερθέντα οδηγούν στο συνολικό συμπέρασμα ότι η περιβάλλουσα ατμόσφαιρα που δημιουργείται από την «καύση» του μετεωρίτη κατά την τριβή του με τα ατμοσφαιρικά αέρια την γης, μπορεί να έχει χαρακτηριστική σύσταση που εξαρτάται από την αναλογία των διαφορετικών ορυκτών φάσεων που περιέχονται σε αυτό. Αναλόγως λοιπόν της σύστασης του μετεώρου, μπορεί να γίνει μια πρώτη εκτίμηση του είδους του. Η καταγραφή π.χ. αυξημένης περιεκτικότητας αλκαλίων και ειδικά νατρίου δηλώνει πιθανότατα την πτώση κάποιου κοινού χονδρίτη μετεωρίτη ενώ η πλήρης απουσία αλκαλίων ενδέχεται να δηλώνει πτώση κάποιου σιδηρομετεωρίτη. Ομοίως, παραπάνω πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανόηση της δημιουργίας της εξώσφαιρας της Σελήνης, η οποία είναι εμπλουτισμένη σε αλκάλια.

Η συγκεκριμένη έρευνα προσφέρει την βάση πάνω στην οποία μια συστηματική μελέτη μπορεί να γίνει σε καθαρές ορυκτές φάσεις αρχικά, και σε μίξεις αυτών σε επόμενο στάδιο, πριν δημιουργηθεί μια μεθοδολογία αναγνώρισης, και τελικά ταξινόμησης, των μετεώρων την στιγμή που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα της γης. Αυτό μπορεί να βοηθήσει και στην αναγνώριση της χημείας μετεώρων αλλά και των περιβαλλουσών ατμοσφαιρών άλλων πλανητών, και στο μέλλον ίσως και εξωπλανητών εάν τα τηλεσκόπιά μας μπορούν να αναγνωρίσουν μεγάλα γεγονότα πτώσεων αστεροειδών σε αυτούς τους πλανήτες.

Βιβλιογραφία

- [1] E. Silber, M. Boslough, W. Hocking, M. Gritsevich και R. Whitaker, «Physics of meteor generated shock waves in the Earth's atmosphere – A review,» *Advances in Space Research*, 2018.
- [2] L. P. Dyrud, K. Denney, S. Close, M. Oppenheim, J. Chau και L. Ray, «Meteor velocity determination with plasma physics,» *Atmospheric Chemistry and Physics*, p. 817–824, 2004.
- [3] A. Křivková, L. Petera, V. Laitl, P. Kubelík, E. Chatzitheodoridis, L. Lenža, J. Koukal, A. Knížek, R. Dudžák, D. Páclík, M. Civiš και M. Ferus, «Application of a dielectric breakdown induced by high-power lasers for a laboratory simulation of meteor plasma,» *Experimental Astronomy*, p. 425–451, 2021.
- [4] M. Ferus, J. Koukal, L. Lenža, J. Srba, P. Kubelík, V. Laitl, E. Zanozina, P. Vána, T. Kaiserová, A. Knížek, P. Rimmer, E. Chatzitheodoridis και S. Civiš, «Calibration-free quantitative elemental analysis of meteor plasma using reference laser-induced breakdown spectroscopy of meteorite samples,» *Astronomy and Astrophysics*, pp. 1-12, 2018.
- [5] J. Borovička και H. Betlem, «Spectral analysis of two Perseid meteors,» *Planetary and space science*, pp. 563-575, 1997.
- [6] M. Ferus, P. Kubelík, L. Petera, L. Lenža, J. Koukal, A. Krivková, V. Laitl, A. Knížek, H. Saeidfirozeh, A. Pastorek, T. Kalvoda, L. Juha, R. Dudžák, S. Civiš, E. Chatzitheodoridis και M. Krus, «Main spectral features of meteors studied using a terawatt-class high-power laser,» *Astronomy and Astrophysics*, pp. 1-20, 2019.
- [7] A. Křivková, V. Laitl, E. Chatzitheodoridis και M. ... Ferus, «Morphology of Meteorite Surfaces Ablated by High-Power Lasers: Review and Applications,» *Applied Science*, 2022.
- [8] J. T. Wasson, «Meteorites: Classification and Properties,» Springer, 1974.

- [9] R. J. Macke, D. T. Britt και G. J. Consolmagno, «Density, porosity, and magnetic susceptibility of achondritic meteorites,» *Meteoritics & Planetary Science*, p. 311–326, 2011.
- [10] W. R. VAN SCHMUS , «The mineralogy and petrology of chondritic meteorites,» *Earth-Science Reviews*, pp. 145-184 , 1969.
- [11] A. E. Rubin, «Mineralogy of meteorite groups,» *Meteoritics and Planetary Science*, pp. 231-247, 1997.
- [12] «NASA,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://curator.jsc.nasa.gov/education/classification.cfm>. [Πρόσβαση 20 May 2023].
- [13] J. M. TRIGO-RODRIGUEZ, J. LLORCA, J. BOROVIČKA και J. FABREGAT, «Chemical abundances determined from meteor spectra: I. Ratios of the main chemical elements,» *Meteoritics & Planetary Science*, p. 1283–1294, 2003.
- [14] S. G. LOVE και D. E. BROWNLEE, «Heating and Thermal Transformation of Micrometeoroids Entering the Earth's Atmosphere,» *ICARUS*, pp. 26-43, 1991.
- [15] A. E. Siegman, *Lasers*, University science books, 1986.
- [16] M. J. Weber, *Handbook of lasers*, CRC press, 2000.
- [17] R. Powell, *Types of Lasers*, Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2006.
- [18] N. G. Rudraswami, M. Shyam Prasad, S. Dey, J. M. C. Plane, W. Feng, J. D. Carrillo-Sánchez και D. Fernandes, «ABLATION AND CHEMICAL ALTERATION OF COSMIC DUST PARTICLES DURING ENTRY INTO THE EARTH'S ATMOSPHERE,» *The Astrophysical Journal Supplement Series*, pp. 1-14, December 2016.
- [19] R. E. Russo, X. L. Mao, J. Yoo και J. Gonzalez, «Laser ablation,» *Laser-induced breakdown spectroscopy*, pp. 41-70, 2007.

- [20] V. Palleschi, «Laser-induced breakdown spectroscopy: principles of the technique and future trends,» *ChemTexts*, pp. 1-16, 2020.
- [21] J. C. Miller, *Laser ablation: principles and applications*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [22] G. Yang, «Laser ablation in liquids: Applications in the synthesis of nanocrystals,» *Progress in Materials Science*, p. 648–698, 2007.
- [23] E. Fazio, B. Gökce, A. De Giacomo, M. Meneghetti, G. Compagnini, M. Tommasini, F. Waag, A. Lucotti, C. G. Zanchi, P. M. Ossi, M. Dell’Aglio, L. D’Urso, M. Condorelli, V. Scardaci, F. Biscaglia, L. Litti, M. Gobbo, G. Gallo, M. Santoro, S. Trusso και F. Neri, «Nanoparticles Engineering by Pulsed Laser Ablation in Liquids: Concepts and Applications,» *nanomaterials*, pp. 1-50, 2020.
- [24] Y. Zhang, H. Gu και S. Iijima, «Single-wall carbon nanotubes synthesized by laser ablation in a nitrogen atmosphere,» *APPLIED PHYSICS LETTERS*, pp. 3827-3829, 28 DECEMBER 1998.
- [25] J. Min, H. Wan, B. E. Carlson, J. Lin και C. Sun, «Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review,» *Optics and Laser Technology*, pp. 1-23, 2020.
- [26] A. V. Kudryavtsev, *3D Reconstruction in Scanning Electron Microscope : from image acquisition to dense point cloud (Doctoral dissertation)*, Bourgogne Franche-Comté: Université de Franche - Comte, 2017.
- [27] T. Mikouchi και M. E. Zolensky, «Mineralogy and cooling history of ungrouped achondrite Erg Chech 002,» σε *52nd Lunar and Planetary Science Conference*, 2021.
- [28] V. H. Hoffmann, M. Kaliwoda, M. Junge, F. Hentschel και W. W. Schmahl, «Erg Chech 002 Ungrouped Achondrite - Systematic Raman Spectroscopy on a Unique Meteorite,» σε *85th Annual Meeting of The Meteoritical Society*, Glasgow, 2022.

- [29] C. Maurel, J. Gattacceca και J. A. Barrat , «Paleomagnetic Investigation of the Oldest-Known Andesite Erg Chech 002,» σε *85th Annual Meeting of The Meteoritical Society*, Glasgow, 2022.
- [30] A. Anand, P. M. Kruttasch και K. Mezger, « ^{53}Mn - ^{53}Cr chronology and $\epsilon^{54}\text{Cr}$ - $\Delta^{17}\text{O}$ genealogy of Erg Chech 002: The oldest andesite in the solar system,» *Meteoritics & Planetary Science*, pp. 2003-2016, 2022.
- [31] P. M. Reger, Y. Roebbert, W. Neumann, A. Gannoun, M. Regelous, W. H. Schwarz, T. Ludwig, M. Trieloff, S. Weyer και A. Bouvier, «Al-Mg and U-Pb chronological records of Erg Chech 002 ungrouped achondrite meteorite,» *Geochimica et Cosmochimica Acta*, pp. 33-48, 2023.
- [32] «"Meteoritical Bulletin Database" The Meteoritical Society,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>. [Πρόσβαση 23 10 2022].
- [33] R. W. Nicklas, J. M. D. Day, K. G. Gardner-Vandy και . A. Udry, «52nd Lunar and Planetary Science Conference,» σε *MULTI-STAGE DIFFERENTIATION HISTORY OF ANDESITIC ACHONDRITE ERG CHECH 002*, 2021.
- [34] J.-A. Barrat, M. Chaussidon, A. Yamaguchi, P. Beck, . J. Villeneuve, D. J. Byrne, M. W. Broadley και . B. Marty, «A 4,565-My-old andesite from an extinct chondritic protoplanet,» pp. 1-7, 2021.
- [35] K. Rohlena, B. Rus, L. Juha, J. Skala, B. Kralikova, K. Jungwirth, J. Ullschmied, K. J. Witte και H. Baumhacker, «Prague Asterix Laser System (PALS) and its upgrade,» σε *XIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference*, 2001.
- [36] X. Su, Y. Zhang, Y. Liu και R. M. Holder, «Outgassing and in-gassing of Na, K and Cu in lunar 74220 orange glass beads,» *Earth and Planetary Science Letters*, pp. 1-10, 2022.
- [37] L. Sharma και R. Chhibber, «Design & development of SAW fluxes using CaO–SiO₂–CaF₂ and CaO–SiO₂–Al₂O₃ flux systems,» *Ceramics International*, pp. 1-14,

2019.

- [38] «NASA,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/>. [Πρόσβαση 14 01 2023].
- [39] G. B. Nair και S. Dhoble, «Phosphor-converted LEDs,» *The Fundamentals and Applications of Light-Emitting Diodes*, pp. 87-126, 2021.
- [40] C. E. Lyman, D. E. Newbury, J. Goldstein, A. D. Romig Jr, J. Armstrong, P. Echlin, C. Fiori, D. C. Joy, E. Lifshin και K. Peters , *Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis and Analytical Electron Microscopy*, Plenum Press, 1990.
- [41] C. Hamann, M. Collinet, S. Schwinger, F. E. D. Kaufmann, E. Bonato, A. Greshake, A. Maturilli, J. Helbert και L. Hecht, «PETROGRAPHY OF FINE-GRAINED DOMAINS IN UNGROUPED ACHONDRITE ERG CHECH 002: EVIDENCE FOR DIFFERENT COOLING HISTORIES?,» σε *84th Annual Meeting of The Meteoritical Society*, Chicago, 2021.
- [42] W. VAN SCHMUS και P. RIBBE, «The composition and structural state of feldspar from chondritic meteorites,» *Geochimica et Cosmochimica Acta*, pp. 1327-1342, 1968.
- [43] H. Takeda, T. Huston και M. Lipschutz, «On the chondrite—achondrite transition: mineralogy and chemistry of Yamato 74160 (LL7),» *Earth and Planetary Science Letters*, p. 329–339, 1984.
- [44] M. E. VARELA, G. KURAT, M. BONNIN-MOSBAH, R. CLOCCHIATTI και D. MASSARE, «Glass-bearing inclusions in olivine of the Chassigny achondrite: Heterogeneous trapping at sub-igneous temperatures,» *Meteoritics & Planetary Science*, pp. 39-52, 2000.
- [45] H. NAGAHARA , «Matrices of type 3 ordinary chondrites-primitive nebular records,» *Geochimica et Cosmochimica Acta*, pp. 2581-2595 , 1984.
- [46] S. G. McKinley, E. Scott, J. Taylor και K. Keli, «A unique type 3 ordinary chondrite containing graphite-magnetite aggregates-Allan Hills A77011,» σε *Lunar and*

Planetary Science Conference Proceedings, 1982.

- [47] T. Noguchi, «Texture and chemical composition of pyroxenes in chondrules in carbonaceous and unequilibrated ordinary chondrites,» σε *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites*, 1989.
- [48] M. Kimura, A. Tsuchiyama, T. Fukuoka και Y. Imura, «Antarctic primitive achondrites Yamato-74025, -75300, and -75305: Their mineralogy, thermal history and the relevance to winonaite,» σε *Sixteenth Symposium on Antarctic Meteorites. Proceedings of the NIPR Symposium*, 1991.
- [49] H. Takeda, M. Miyamoto, T. Ishii και A. Reid, «Characterization of crust formation on a parent body of achondrites and the moon by pyroxene crystallography and chemistry,» σε *Lunar Science Conference, 7th*, Houston Tex., 1976.