



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ
ΠΟΡΩΝ

Ορυκτολογική εξέταση και ποιοτική αναβάθμιση με μαγνητικό
διαχωρισμό του σιδηρομεταλλεύματος της περιοχής Κακόπετρος
(Ν. Χανίων)

Διπλωματική Εργασία

ΕΛΕΝΗ ΒΑΓΕΝΑ

Εξεταστική Επιτροπή:

Αλεβίζος Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής (Επιβλέπων)
Κομνίτσας Κων/νος, Καθηγητής
Δρ. Στρατάκης Αντώνιος, ΕΔΙΠ

ΧΑΝΙΑ 2019

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γ. Αλεβίζου. Η εργασία αυτή έχει στόχο την ορυκτολογική έρευνα και τον εμπλουτισμό σιδηρομεταλλεύματος από την περιοχή του Κακόπετρου της Δυτικής Κρήτης.

Ο λόγος που οδήγησε στην επιλογή του θέματος είναι η διερεύνηση της δυνατότητας εμπλουτισμού του σιδηρομεταλλεύματος της περιοχής, γνωρίζοντας ότι ο σίδηρος είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέταλλο που έχει πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή. Ο σίδηρος αποτελεί ένα εμπορικό μέταλλο του οποίου η βιομηχανία έχει σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια βιομηχανική ανάπτυξη.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Αλεβίζο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κορνίτσα για τις διορθώσεις που μου παρείχε στη διπλωματική μου εργασία.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Αντώνη Στρατάκη για την πολύτιμη βοήθεια του στις ορυκτολογικές αναλύσεις με τη χρήση της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ (XRD).

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Βαγγέλη Πετράκη για τη σημαντική βοήθειά του στη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών εμπλουτισμού και στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια, την κ. Πάολα Ροτόντο για τη βοήθειά της στις χημικές αναλύσεις με τη μέθοδο της φασματομετρίας ακτίνων-Χ (XRF) και τον κ. Γεώργιο Αποστολάκη για την παρασκευή των στιλπνών τομών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μικροσκοπική εξέταση.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη και την αγάπη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ορυκτολογική μελέτη και η δυνατότητα εμπλουτισμού με μαγνητικό διαχωρισμό του σιδηρομεταλλεύματος της περιοχής Κακόπετρος (Νομός Χανίων).

Το σιδηρομετάλλευμα της περιοχής Κακόπετρου είναι λειμωνιτικού τύπου και βρίσκεται επάνω σε στρώμα φυλλιτών-χαλαζιτών το οποίο καλύπτεται από ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή ηλικίας Μειόκαινου. Η δομή του μεταλλεύματος χαρακτηρίζεται γενικά ως εμπλεκτική διακοκκώδης. Τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του σιδηρομεταλλεύματος είναι γκαιτίτης, χαλαζίας και δευτερευόντως, κρυπτομέλανας και αιματίτης. Η χημική ανάλυση των αρχικών δειγμάτων έδειξε, ότι η περιεκτικότητα του Fe_2O_3 κυμαίνεται από 52,75% έως 78,04%, ενώ του SiO_2 κυμάνθηκε από 3,81% έως 33,10%. Σημαντικές συγκεντρώσεις MnO εντοπίζονται στο μέταλλευμα με περιεκτικότητα από 0,23% έως 15,84%.

Ο εμπλουτισμός του μεταλλεύματος διεξήχθη σε 3 φάσεις μαγνητικού διαχωρισμού. Ο πρώτος μαγνητικός διαχωρισμός πραγματοποιήθηκε στα κοκκομετρικά κλάσματα, που προέκυψαν από τη θραύση και την κοσκίνιση του αρχικού υλικού, τα οποία είναι -8+4 mm, -4+1 mm, -1+0,250 mm, -0,250+0,010 mm και -0,010 mm. Στη συνέχεια ακολούθησε ο δεύτερος μαγνητικός διαχωρισμός όπου χρησιμοποιήθηκαν τα πλουσιότερα μαγνητικά προϊόντα του πρώτου μαγνητικού διαχωρισμού. Τέλος, ο τρίτος μαγνητικός διαχωρισμός εφαρμόστηκε στο αρχικό υλικό έπειτα από λειοτρίβηση στο ραβδόμυλο με στόχο να φτάσει στην κοκκομετρία -0,250 mm.

Τα αποτελέσματα δοκιμής του μαγνητικού διαχωρισμού του σιδηρομεταλλεύματος έδειξαν ότι ο καλύτερος εμπλουτισμός επιτεύχθηκε στο κλάσμα -0,250+0,010 mm στα μονά περάσματα με ένταση 6A με ανάλυση σε σίδηρο 61,31% και κατανομή 92,48% αντίστοιχα, ενώ το πυρίτιο βρίσκεται στο μη μαγνητικό με ανάλυση 58,77% και κατανομή 58,56% αντίστοιχα. Σημαντικές αναβαθμίσεις σημείωσε και το μαγγάνιο σε αρκετά κλάσματα, με καλύτερη αυτή του -0,250+0,010 mm στην ένταση 6A στα μονά περάσματα, όπου αυξήθηκε κατά 24,21% με κατανομή βάρους 93,73%.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
1. Μετάλλευμα σιδήρου	7
1.1 Γενικές πληροφορίες και ιδιότητες σιδήρου	7
1.2 Κοιτάσματα σιδήρου	7
1.3 Κοιτάσματα σιδήρου στην Ελλάδα	8
1.4 Κράματα σιδήρου και χάλυβες	9
1.5 Προϊόντα σιδήρου – εφαρμογές	11
2. Γεωλογία και κοιτασματολογία	12
2.1 Γεωλογία Κρήτης	12
2.2 Σιδηρομεταλλεύματα δυτικής Κρήτης	15
2.3 Κοιτασματολογία της περιοχής Κακόπετρου	16
3. Πειραματική διαδικασία	18
3.1 Ορυκτολογική ανάλυση	18
3.2 Χημική ανάλυση	19
3.3 Το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο	20
3.4 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)	21
3.5 Θεωρητικό υπόβαθρο μαγνητικού διαχωρισμού	22
4. Ορυκτολογία και Χημικές αναλύσεις αρχικών δειγμάτων	24
4.1 Δειγματοληψία	24
4.2 Ορυκτολογία αρχικών δειγμάτων	25
4.3 Χημικές αναλύσεις αρχικών δειγμάτων	30
5. Αποτελέσματα εμπλουτισμού	31
5.1 Δοκιμή εμπλουτισμού με τη μέθοδο του μαγνητικού διαχωρισμού (Α φάση)	34
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΧΟΛΙΑ ΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ	50
5.2 Δοκιμή εμπλουτισμού των πλουσιότερων σε σίδηρο μαγνητικών προϊόντων (περιεκτικότητα σε Fe>60%).	52
5.3 Δοκιμή εμπλουτισμού του αρχικού δείγματος μέσω υδροκυκλώνα.	55
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ	58
5.4 Περιεκτικότητα των κοκκομετρικών κλασμάτων σε Fe ₂ O ₃ και SiO ₂	59
5.5 Μικροσκοπική εξέταση προϊόντων της δοκιμής του μαγνητικού εμπλουτισμού	62
6. Συμπεράσματα και προτάσεις	68
6.1 Συμπεράσματα ορυκτολογικής και μικροσκοπικής εξέτασης σιδηρομεταλλεύματος.	68
6.2 Συμπεράσματα εμπλουτισμού	68
6.3 Προτάσεις	69
Βιβλιογραφία	70

Διαδικτυακές πηγές.....	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	72

1. Μετάλλευμα σιδήρου

1.1 Γενικές πληροφορίες και ιδιότητες σιδήρου

Ο καθαρός σίδηρος είναι ένα λευκό, ελατό μέταλλο που μεταφέρει θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια. Βρίσκεται στην τέταρτη θέση της κατάταξης των στοιχείων που υπάρχουν σε αφθονία στην κρούστα της γης και είναι το κύριο συστατικό του πυρήνα της γης. Ένα από τα χαρακτηριστικά αναγνώρισης του σιδήρου είναι ότι είναι έντονα μαγνητικό. Εκθέτοντας σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, οποιοδήποτε κομμάτι σιδήρου μπορεί να μαγνητιστεί.

Ο καθαρός (στοιχειακός) σίδηρος είναι σπάνιος στο φλοιό της Γης και συνήθως υπάρχει σε ενώσεις με άλλα στοιχεία, δημιουργώντας σιδηρούχα ορυκτά όπως αιματίτης, μαγνητίτης, γκαϊτίτης/λειμωνίτης, σιδηρίτης, κ.α. (The balance, 2019).

Ο σίδηρος (Fe) έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ατομικό αριθμό : 26
- Ατομικό βάρος : 55,845
- Σημείο τήξης : 1538 °C
- Σημείο πήξης : 2862 °C
- Πυκνότητα : 7,874 g/cm³

1.2 Κοιτάσματα σιδήρου

Κοιτάσματα σιδήρου εμφανίζονται ως:

- **Μαγματικά που βρίσκονται σε:**
Ηφαιστειακά πετρώματα: Τα κοιτάσματα αυτά είναι τύπου συμπαγών θειούχων, όπου αποτελούνται από 90% από θειούχα ορυκτά του σιδήρου (σιδηροπυρίτη με/ή χωρίς μαγνησίτη).
Πλουτώνια πετρώματα: Είναι η κύρια πηγή κοιτασμάτων σιδήρου μέσα στα οποία υπάγεται και ο αυτοφυής σίδηρος.
- **Επιγενή που βρίσκονται σε:**
Φλέβες: Οπου δεν έχουν οικονομική αξία.
Κοίτασμα αντικατάστασης ασβεστολίθων
- **Ιζηματογενή:** τα κοιτάσματα αυτά αποτελούν τμήματα ιζηματογενούς ακολουθίας και είναι οι ταινιωτοί σιδηρούχοι σχηματισμοί (BIF). Τα σημαντικότερα διακρίνονται σε :
Θαλάσσια, Λιμναία και ηπειρωτικά (Φιλιππίδης κ.α., 2013; Χρηστίδης, 2015).

1.3 Κοιτάσματα σιδήρου στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα μέχρι το 1965 υπήρχαν αρκετά ορυχεία εκμετάλλευσης σιδήρου. Τα σιδηρομεταλλεύματα της Ελλάδας αποτελούνται κυρίως από μαγνητίτη, αιματίτη και λειμωνίτη και βρίσκονται κυρίως μέσα σε μάρμαρα ή επαφές με σχιστόλιθους. Με το ρυθμό που επικρατούσε όσο καιρό λειτουργούσαν τα μεταλλεία υπολογίζεται ότι σε 20 χρόνια είχαν εξασθεί πάνω από 10 εκατ. Τόνοι σιδηρομετάλλευμα.

Σήμερα, χώρες όπως η Αυστραλία, Βραζιλία, Ινδίες κ.α. με τα τεράστια σε όγκο, πλούσια σε περιεκτικότητα επιφανειακά κοιτάσματα και με τις σύγχρονες εκμεταλλεύσεις τους έχουν μειώσει το κόστος παραγωγής του σιδηρομεταλλεύματος. Τα σχετικά μικρά μεταλλεία της Ελλάδας δεν μπορούσαν να ανταγωνιστούν στην Ευρώπη. Όταν τα Ελληνικά μεταλλεία λειτουργούσαν οι κυρίως αγοραστές ήταν η Ευρώπη και κυρίως η Γερμανία.

Τα σιδηρομεταλλεύματα που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην Ελλάδα είναι αυτά της Θάσου και της Σερίφου. Τα αποθέματα της Ελλάδας σε σιδηρομετάλλευμα παρ' ότι έχουμε πολυάριθμες εμφανίσεις δεν είναι γνωστά με ακρίβεια, διότι μόνο σε περιορισμένες περιπτώσεις/ περιοχές έχουν διενεργηθεί συστηματικές έρευνες.

Τα σιδηρομεταλλεύματα της Ελλάδας κατατάσσονται σε δύο ομάδες:

- Σκληρά σιδηρομεταλλεύματα, τα οποία είναι κυρίως λατεριτικής προέλευσης, είναι χρωμιούχα και περιέχουν πάντοτε νικέλιο, για αυτό χαρακτηρίζονται ως σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα.
- Μαλακά σιδηρομεταλλεύματα, τα οποία συνδέονται γενετικά με τη μαγματική δράση, κυρίως είναι υδροθερμικά ή μετασωματικά και συνδυάζονται σχεδόν πάντοτε με φαινόμενα αντικατάστασης. Υπάρχουν επίσης ιζηματογενή και αυτά που υπέστησαν μεταμόρφωση.

Οι ποσοτικές εμφανίσεις σιδηρομεταλλευμάτων ανά την Ελλάδα είναι οι εξής:

Στη Θάσο 50 κοιτάσματα υπέστησαν εκμετάλλευση. Σε διάφορα σημεία της νήσου και κατά κανόνα μέσα σε μάρμαρα βρίσκονται φλεβικά κοιτάσματα σιδήρου, αλλά κυρίως εξ αντικαταστάσεως.

Στη νήσο Σέριφο ορισμένες περιοχές υπέστησαν έντονη εκμετάλλευση, υπολογίζεται ότι έχουν εξασθεί τουλάχιστον 6 εκ. τόνοι σιδηρομεταλλεύματος. Σε περισσότερες από 25 θέσεις έχουν εντοπιστεί κοιτάσματα στη Σέριφο. Αποτελούνται είτε από μαγνητίτη είτε από λειμωνίτη και αιματίτη.

Στην Καβάλα γύρω από το γρανίτη συναντώνται σιδηρομαγνανιούχα μεταλλεύματα της ίδιας μορφής και γένεσης με αυτά της Θάσου. Τα μεταλλεύματα αποτελούνται από λειμωνίτη, πυρολουσίτη, σιδηροπυρίτη με συνοδεία σφαλερίτη, γαληνίτη, χαλαζία, και ασβεσίτη.

Στο Γραμματικό Αττικής έχει εξορυχθεί μετάλλευμα με 50-52% Fe, 2-3% Mn, 3,5% SiO₂ και 4% CaO. Τα μεταλλεύματα αυτά αποτελούνται από λειμωνίτη, αιματίτη

και πυρολουσίτη καθώς συνοδεύονται από ασβεστίτη και χαλαζία. Στην Αττική απαντούν περίπου 25 εμφανίσεις σιδηρομαγγανιούχων μεταλλευμάτων.

Στην Θράκη 10 περίπου εμφανίσεις, στο Νομό Δράμας εμφανίσεις. Στο Νομό Σερρών απαντούν 35 περίπου εμφανίσεις, όπου οι 20 από αυτές βρίσκονται στο Άγκιστρο, αποτελούνται κυρίως από λειμωνίτη και απαντούν σε μάρμαρο και σχιστόλιθους.

Στο Νομό Κιλκίς αναφέρονται 10 περίπου εμφανίσεις. Στη Χαλκιδική έχουμε εμφανίσεις με σημαντικότερη αυτή μεταξύ Στρατώνι και Στρατωνίκης (μεταλλεία Σεβαλιέ). Είναι υδροθερμικά αποτελούνται κυρίως από λειμωνίτη, σιδηροπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη, χαλαζία και αστρίους.

Στην υπόλοιπη Μακεδονία αναφέρονται άλλες 22 περίπου εμφανίσεις, στη Θεσσαλία περίπου 8 εμφανίσεις και στην Εύβοια περίπου 14. Στην Πελοπόννησο περίπου 40 εμφανίσεις με σημαντικότερες αυτές στο Άγιο Ελισαίο (Λακωνίας) χαμηλής περιεκτικότητας.

Στην Κρήτη αναφέρονται 23 περίπου εμφανίσεις με σημαντικότερες τις 6 εμφανίσεις στο Σκινέ (Χανίων). Τα κύρια ορυκτά που εμφανίζονται είναι λειμωνίτης και αιματίτης. Έγινε ήδη εκμετάλλευση 200.000 τόνων μεταλλεύματος περιεκτικότητας 48% σιδήρου, 2% μαγγανίου και ίχνη φωσφόρου. Τα απομείναντα αποθέματα υπολογίζονται σε 1 εκ. τόνους περίπου. Στα υπόλοιπα νησιά του Αιγαίου αναφέρονται περίπου 80 εμφανίσεις με σημαντικότερες αυτές στη Σέριφο και στη νήσο Ικαρία. Τα μεταλλεύματα της Ικαρίας αποτελούνται από λειμωνίτη, συνοδεύονται από ασβεστίτη και χαλαζία. Τα συνολικά αποθέματα μπορεί να ξεπερνούν τους 100.000 τόνους. Η ποιότητα κυμαίνεται 27-55% Fe, 2-32% SiO₂, 0,0-0,09% P και 1-27,5% CaO (Φιλιππίδης κ.α., 2013).

1.4 Κράματα σιδήρου και χάλυβες

Κράματα σιδήρου είναι:

- Χάλυβας
- Χυτοσίδηρος
- Ανοξείδωτος χάλυβας
- Σιδηροκράματα (wikipedia, 2018)

Πιο αναλυτικά:

Χάλυβας

Ο χάλυβας (κοινώς ατσάλι) είναι κράμα σιδήρου - άνθρακα που περιέχει έως και 2,06% κατά βάρος άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων τέτοιοι είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο.

Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων.

Το ατσάλι είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις βαριές βιομηχανίες. Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. Μια από τις τρεις Ευρωπαϊκές Κοινότητες που ιδρύθηκαν το 1957 ήταν και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα.

Η παραγωγή χάλυβα γίνεται με τρεις βασικές μεθόδους:

1. Μέσω αναγωγής σιδηρομεταλλεύματος σε υψικάμινο όπου παράγεται χυτοσίδηρος και έπειτα μετατρέπεται σε χάλυβα με εμφύσηση οξυγόνου μέσα σε μεταλλάκτη.
2. Σε φρεατώδη κάμινο ανάγεται άμεσα το σιδηρομετάλλευμα σε σπογγώδη σίδηρο και έπειτα μετατρέπεται μέσω καμίνου ηλεκτρικού τόξου σε χάλυβα.
3. Με την ανάτξη παλαιοσιδήρου (σκραπ) σε κάμινο ηλεκτρικού τόξου.

Η Ελληνική παραγωγή χάλυβα, που είναι περίπου ένα εκατ. τόνοι ετησίως, προκύπτει από την ανάτξη παλαιοσιδήρου (wikipedia, 2018; Eurofer, 2018).

Χυτοσίδηρος

Ο χυτοσίδηρος (κοινώς μαντέμι) είναι κράμα σιδήρου με άνθρακα σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 2-4% κατά βάρος, αλλά υπάρχει πιθανότητα να πάρει τιμές μέχρι και 6,67%. Εκτός από άνθρακα, οι κοινοί χυτοσίδηροι περιέχουν πυρίτιο (1-3%) και μαγγάνιο (~0,5%), ενώ υπάρχουν και ισχυρά κραματωμένοι χυτοσίδηροι με υψηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο (4-20%) και χρώμιο (~3%).

Συγκριτικά με το χάλυβα είναι εύθραυστοι, αλλά παρουσιάζουν πιο καλή αντίσταση στην τριβή και τη διάβρωση.

Ο πρωτογενής χυτοσίδηρος παράγεται με αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων σε υψικάμινο και χύνεται στη μορφή μικρών πλινθωμάτων. Με την ανάτξη πρωτογενούς χυτοσιδήρου και την προσθήκη κραματικών στοιχείων παράγονται διάφορες ποιότητες χυτοσιδήρου που προορίζονται για διαφορετικές χρήσεις. Οι δευτερογενείς χυτοσίδηροι ανάλογα με τον άνθρακα που περιέχουν και τα χρώματα που εμφανίζουν οι επιφάνειες θράυσης, διακρίνονται συνήθως σε φαιούς (γκρίζους) και λευκούς.

Οι χυτοσίδηροι παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- χαμηλό κόστος παραγωγής,
- χαμηλό σημείο τήξης (1140–1200°C),
- ευκολία χύτευσης σε συγκεκριμένες διαστάσεις,
- ευκολία μηχανουργικής κατεργασίας,
- σχετικά καλή αντίσταση στη μηχανική φθορά και τη διάβρωση,
- υψηλή ικανότητα απορρόφησης κραδασμών, και
- σχετικά καλή μηχανική αντοχή (108–340 MPa) (wikipedia, 2018; University of Cambridge, 2018).

Ανοξείδωτος χάλυβας

Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα-χρωμίου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 10,5% κατά βάρος. Το μεταλλικό υπόστρωμα προστατεύεται από την οξείδωση και τη διάβρωση λόγω του τριοξειδίου του χρωμίου, (Cr_2O_3), που δημιουργεί ένα στρώμα πάχους 10-100 nm στην επιφάνεια του.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες διαφέρουν αρκετά από τους κοινούς χάλυβες διότι είναι πιο σκληροί και διαθέτουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Μεγάλη αντοχή παρουσιάζουν και στη διάβρωση, αλλά έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Ο ανοξείδωτος χάλυβας παράγεται σε κάμινο ηλεκτρικού τόξου με πρώτες ύλες να είναι ο παλαιοσίδηρος και τα σιδηροκράματα, όπως σιδηροχρώμιο και σιδηρονικέλιο. Αναλόγως από την τελική ποιότητα του ανοξείδωτου χάλυβα που έχει ζητηθεί, η αναλογία των πρώτων υλών αλλάζει. Σε γενικές γραμμές περίπου το 60% του φορτίου της καμίνου αποτελεί ο ανακυκλωμένος παλαιοσίδηρος - κυρίως ανοξείδωτος, αλλά και κοινός (wikipedia, 2018; Encyclopedia, 2018).

Σιδηροκράματα

Τα σιδηροκράματα αποτελούν κράματα στοιχείων με το σίδηρο που προστίθενται κατά τη χαλυβοποίηση συνήθως. Η προσθήκη αυτή αποσκοπεί στο να προσδοθούν κάποιες ιδιότητες στο χάλυβα και το χυτοσίδηρο, συχνά διαθέτουν άνθρακα έως και 8%. Χρησιμοποιούνται στην παραγωγή κραματωμένων χαλύβων, στην κάθαρση και τη ρύθμιση σε βιομηχανικές εφαρμογές (wikipedia, 2018).

1.5 Προϊόντα σιδήρου – εφαρμογές

Ο σίδηρος ήταν κάποτε το κύριο δομικό υλικό, αλλά αντικαταστάθηκε από χάλυβα στις περισσότερες εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά, ο χυτοσίδηρος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε σωλήνες και για την κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτων, όπως κεφαλές κυλίνδρων, κυλινδρικά κιβώτια και κιβώτια ταχυτήτων. Ο σφυρήλατος σίδηρος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για την παραγωγή ειδών οικιακής διακόσμησης, όπως ράφια κρασιού, κερί και κουρτινόξυλα (The balance, 2019).

2. Γεωλογία και κοιτασματολογία

2.1 Γεωλογία Κρήτης

Η γεωλογία της Κρήτης χαρακτηρίζεται από τα αλληπάλληλα επωθημένα τεκτονικά καλύμματα των Ελληνίδων ζωνών τα οποία συνωθούνται στο μικρό σχετικά γεωγραφικό χώρο του νησιού, με γενική κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο.

Γενικά η Κρήτη συγκροτείται από ένα αυτόχθονο (ή σχετικά αυτόχθονο) σύστημα που είναι η ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων (Plattenkalk), η οποία θεωρείται ότι ανήκει στην Ιόνιο ζώνη, πάνω στο οποίο τοποθετούνται με λεπιοειδή τεκτονική τα καλύμματα των άλλων ζωνών και ενοτήτων (Μουντράκης, 2010).

Η σειρά με το νεοπαλαιοζωικό υπόβαθρο της, από κάτω προς τα πάνω έχει όπως παρακάτω:

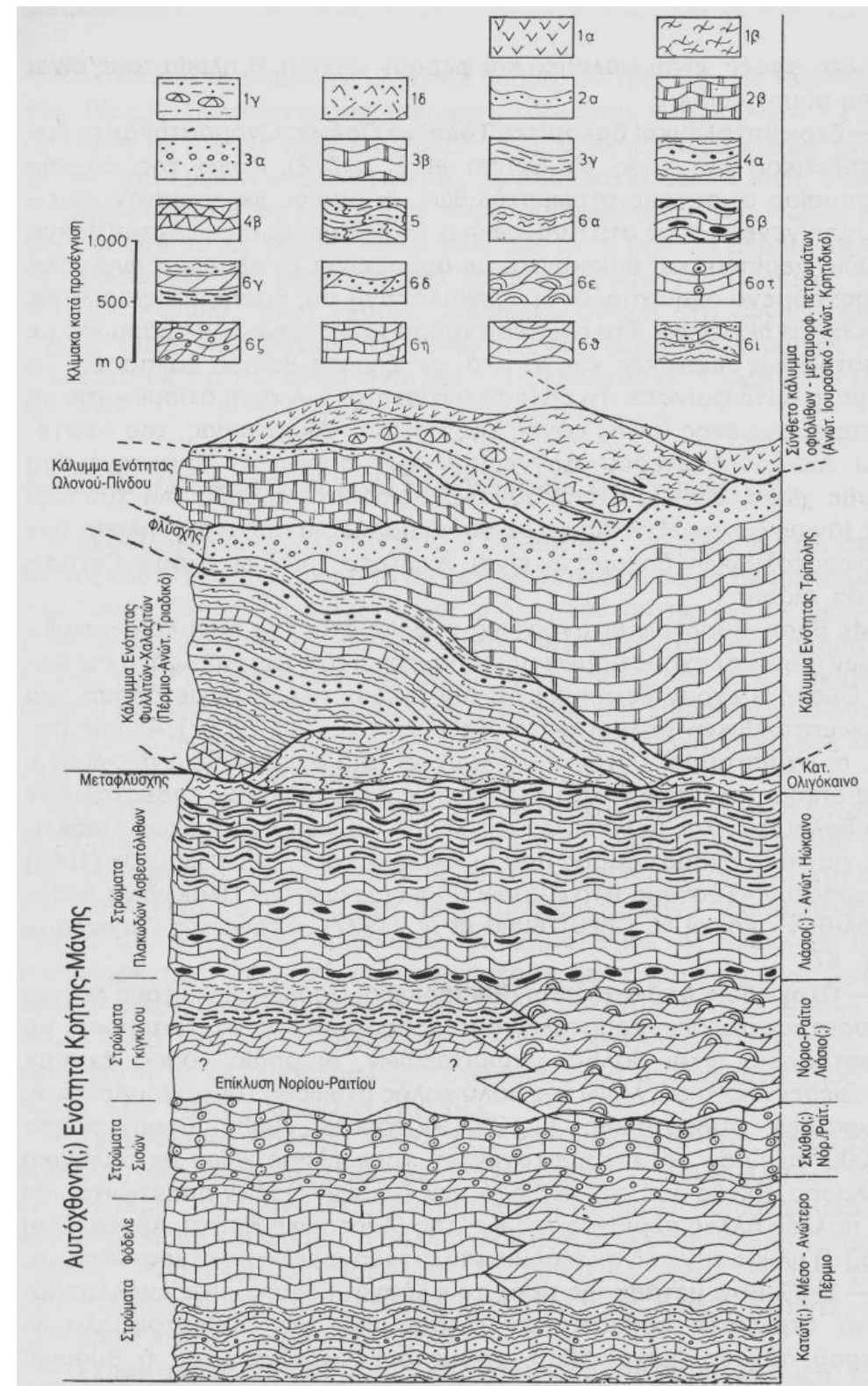
- Σχηματισμός Φόδελε
- Σχηματισμός Σισσών
- Στρωματολιθικοί δολομίτες Ταλαίων Ορέων
- Στρώματα Γκιγκίλου
- Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι
- Στρώματα μετάβασης προς φλύσχη (εικόνα 1)

Η ενότητα των Πλακωδών ασβεστολίθων περιλαμβάνει κυρίως τυπικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους με κερατολιθικές ενστρώσεις και κονδύλους, αλλά επίσης και μαζώδεις ασβεστόλιθους, δολομίτες, ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή και φυλλιτικές παρεμβολές. Η ενότητα αυτή έχει ηλικία από το Τριαδικό μέχρι το Ηώκαινο, είναι η μεταμορφωμένη σε συνθήκες HP/LT και πιστεύεται ότι ανήκει στην Αδριατικοϊόνιο ζώνη. Αποτελεί το σχετικά αυτόχθονο υπόβαθρο της Κρήτης και αποκαλύπτεται σε πολλές περιοχές του νησιού υπό την μορφή πολλαπλού τεκτονικού παραθύρου κάτω από τα αλληπάλληλα επωθημένα καλύμματα.

Πάνω στην ενότητα των Πλακωδών Ασβεστολίθων βρίσκεται μια σειρά κροκαλοπαγών-λατυποπαγών ασβεστόλιθων που ονομάζεται «Σειρά Τρυπαλίου». Η ηλικία της θεωρήθηκε Άνω Τριαδική- Κάτω Ιουρασική αν και δεν αποκλείεται και πολύ νεότερη ηλικία. Από γεωτεκτονική άποψη η σειρά Τρυπαλίου θεωρείται από άλλους μεν ως ανεξάρτητη ενότητα, ενώ από άλλους θεωρείται ως επικλυσιογενής σειρά πάνω στους πλακώδεις σβεστόλιθους και επομένως αποτελεί λιθοφασική πλευρική διαφοροποίηση της ίδιας της ενότητας Πλακωδών Ασβεστολίθων (Μουντράκης, 2010).

Οι σχηματισμοί της Ενότητας Τρυπαλίου παρουσιάζουν, γενικά, πολλές ομοιότητες με τους τριαδικούς - λιάσιους σχηματισμούς της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων, δηλαδή με τους τριαδικούς δολομίτες και τους Ασβεστόλιθους του Παντοκράτορα της Ιόνιας ζώνης (Μανούτσογλου, 2008).

Εικόνα 1: Στρωματογραφικές - τεκτονικές Ενότητες της νήσου Κρήτης. (Μανούτσου, 2008)



Επωθημένη πάνω στην Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστολίθων και στην Ενότητα Τρυπαλίου βρίσκεται η Φυλλιτική - Χαλαζιτική Σειρά ηλικίας Περμίου - Τριαδικού, που αποτελείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, μετά - κροκαλοπαγή, μετά - ψαμμίτες, μάρμαρα, μεταβασίτες (μεταμορφωμένα ηφαιστειακά βασικά πετρώματα) και μετά - ανδεσίτες. Η μεταμόρφωση της σειράς έγινε σε συνθήκες υψηλής πίεσης (γλαυκοφανιτική). Η γεωτεκτονική θέση της παραμένει άγνωστη. Άλλοι τη θεωρούν υπόβαθρο της Γαβρόβου - Τριπόλεως και άλλοι ανεξάρτητη ενότητα προερχόμενη με επώθηση από πιο εσωτερικά (Μανούτσογλου, 2008).

Πάνω στην ενότητα «Φυλλιτών – Χαλαζιτών» τοποθετείται η ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης με τους γνωστούς νηριτικούς ασβεστόλιθους, και σε ανώτερη τεκτονική θέση βρίσκεται επωθημένο το τεκτονικό κάλυμμα της ζώνης της Πίνδου.

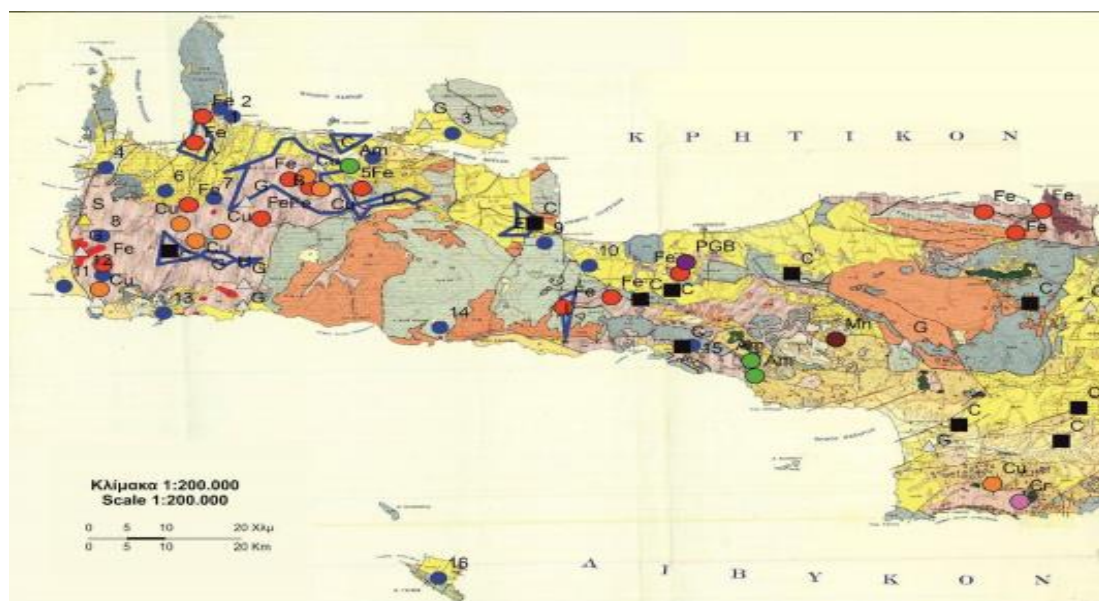
Εκτός από τα παραπάνω τεκτονικά καλύμματα των Εξωτερικών Ελληνίδων, στον χώρο της Κρήτης βρίσκονται ακόμα σε ανώτερη τεκτονική θέση και τα αλλόχθονα τεκτονικά λείπια των Εσωτερικών ζωνών. Τέτοια είναι η «Ενότητα Άρβης» με οφειολιθικά πετρώματα καθώς και άλλες διάσπαρτες οφειολιθικές εμφανίσεις, όπως επίσης και κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα γενεύσιοι, σχιστόλιθοι και αμφιβολίτες της «Ενότητας Αστερούσια».

Όλα τα παραπάνω τεκτονικά καλύμματα, που επωθούνται το ένα πάνω στο άλλο με κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο, συγκροτούν το ορογενές της Κρήτης (Μουντράκης, 2010).

2.2 Σιδηρομεταλλεύματα δυτικής Κρήτης

Στη Κρήτη έχει καταγραφεί μεγάλος αριθμός εμφανίσεων σιδηρομεταλλευμάτων. Οι εμφανίσεις αυτές βρίσκονται εντός της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς της Κρήτης. Οι πιο αξιόλογες εντοπίζονται στις περιοχές της δυτικής Κρήτης (DORNSIEPEN U. F., MANUTSOGLU E, 1994).

Πιο συγκεκριμένα στους Νομούς Χανίων και Ρεθύμνου έχουν καταγραφεί σημαντικά κοιτάσματα σιδηρομεταλλευμάτων. Οι περιοχές του Νομού Χανίων είναι στα Ραβδούχα, που βρίσκονται στο 2^ο χλμ από το ομώνυμο χωριό του ακρωτηρίου Ροδοπού, όπου τα κοιτάσματα εκεί διαθέτουν λειμωνίτη καλής ποιότητας, στον Κακόπετρο που διαθέτει κοιτάσματα με ελαφρώς μαγγανιούχο λειμωνίτη καλής ποιότητας και στις Μουρινές που έχουν την πιο εκτεταμένη εκμετάλλευση σιδήρου του νομού. Ακόμα υπάρχουν στα χωριά Δράκωνα, Σκλαβοπούλα, Σκινέ και Σκορδαλού, καθώς και το μεταλλείο Αβέρωφ κοντά στο χωριό Καράνου. Οι περιοχές του Νομού Ρεθύμνου όπου εντοπίζονται τέτοια κοιτάσματα είναι το Αρολίθι, Άνω Βαλσαμόνερο, Δαμάστα, Καλλικράτη, Σίσσες και Φόδελε, αλλά δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως.



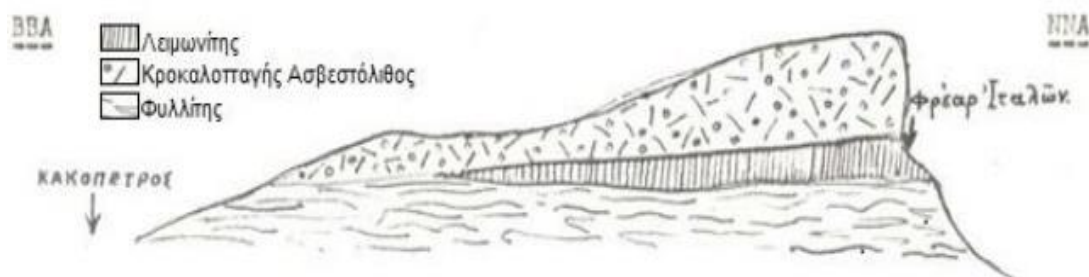
Εικόνα 2: Γεωλογικός Χάρτης δυτικής Κρήτης (Ε. ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ, Ι. ΣΠΑΝΑΚΗΣ, Ι. ΠΥΛΙΩΤΗΣ)

Am		Αμίαντος
C		Λιγνίτης
Cr		χρωμίτης
Cu		χαλκός
Fe		σίδηρος
G		γύψος
Mn		μαγγάνιο
S		θείο
PGB		μικτά θειούχα
Θέσεις νέων αιτήσεων		

Εικόνα 3: Χαρακτηρισμός των σημείων πάνω στο γεωλογικό χάρτη (Ε. ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ, Ι. ΣΠΑΝΑΚΗΣ, Ι. ΠΥΛΙΩΤΗΣ)

2.3 Κοιτασματολογία της περιοχής Κακόπετρου

Στο λόφο νοτιοδυτικά του χωριού Κακόπετρος απαντώνται εμφανίσεις λειμωνίτη και λειμωνιτικής ώχρας. Οι εμφανίσεις αυτές είναι σχεδόν συνεχείς. Το σιδηρομετάλλευμα υπέρκειται ενός στρώματος Φυλλιτών-Χαλαζιτών και καλύπτεται από ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή ηλικίας Μειόκαινου.



Εικόνα 4: Τομή του κοιτάσματος της περιοχής Κακόπετρος. (Παπασταματίου, 1952)

Το μέταλλευμα βρίσκεται στη ζώνη επαφής των προαναφερθέντων πετρωμάτων και το εύρος (πάχος) του κυμαίνεται μέχρι τα 50 m. Ο λειμωνίτης απαντάται με μορφή κοίτης εντός του κρυσταλλοσχιστώδους. Πάνω στη διαβρωσιγενή επιφάνεια της κοίτης του μεταλλεύματος και των φυλλιτών έχει αποτεθεί τριτογενής ασβεστόλιθος. Στην εικόνα 4 απεικονίζεται η γεωλογική τοποθέτηση του κοιτάσματος λειμωνίτη. Το σιδηρομέταλλευμα χαρακτηρίζεται καλής ποιότητας. Ο λειμωνίτης χαρακτηρίζεται ως ελαφρώς μαγγανιούχος. Η λειμωνιτική ώχρα η οποία απαντάται τοπικά στο κοίτασμα είναι καλής ποιότητας.

Τα αποθέματα του μεταλλεύματος δεν έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια, λόγω της φύσης του κοιτάσματος και των ελλιπών ερευνητικών στοιχείων στη περιοχή. Από τις προγενέστερες έρευνες δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία που να προσδιορίζουν την έκταση και το πάχος του κοιτάσματος που καλύπτεται από τους κροκαλοπαγής ασβεστόλιθους. Τα πιθανά αποθέματα εκτιμώνται από 500000 έως και 4000000 τόνους μεταλλεύματος (Παπασταματίου, 1952).

3. Πειραματική διαδικασία

3.1 Ορυκτολογική ανάλυση

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των δειγμάτων έγινε με περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ (XRD) και με το λογισμικό EVA. Με τη μέθοδο του περιθλασιμέτρου ακτίνων -Χ είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων -Χ που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως (Κωστάκης, 2005).

Το περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου D8-Advance της εταιρίας BrukerAXS του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Εικόνα 5: Περιθλασίμετρο ακτίνων -Χ του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης

Οι βασικές μονάδες που συνθέτουν ένα σύγχρονο περιθλασίμετρο ακτίνων –Χ είναι:

- Η μονάδα παραγωγής υψηλής τάσεως
- Η λυχνία ακτίνων –Χ
- Το γωνιόμετρο
- Ο απαριθμητής των ακτίνων–Χ, με την ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής κρούσεων
- Η μονάδα του μικροϋπολογιστή

Αρχή λειτουργίας μεθόδου

Η περίθλαση των ακτίνων-Χ στους κρυστάλλους συμβαίνει όταν ακτίνες-Χ προσπίπτουν υπό ορισμένη γωνία σε πλεγματικά επίπεδα του κρυστάλλου. Αν θεωρηθεί ότι το πλέγμα ενός κρυστάλλου αποτελείται από ομάδες πλεγματικών επιπέδων, τα οποία σε κάθε ομάδα είναι παράλληλα και διαδέχεται το ένα το άλλο πάντα στην ίδια απόσταση, την απόσταση d , τότε σύμφωνα με την εξίσωση του Bragg ισχύει:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{όπου:}$$

- ✓ λ : μήκος κύματος
- ✓ d : πλεγματική απόσταση των επιπέδων ανάκλασης του κρυστάλλου
- ✓ θ : γωνία πρόσπτωσης
- ✓ n : τάξη ανάκλασης

Προετοιμασία δειγμάτων

Τα δείγματα που εξετάσθηκαν στο περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ λειοτριβήθηκαν μέχρι να αποκτήσουν κοκκομετρία $<40 \mu\text{m}$, έπειτα τοποθετήθηκε περίπου 1g στο δειγματοφόρο.

3.2 Χημική ανάλυση

Η χημική ανάλυση των δειγμάτων έγινε με τη μέθοδο φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ φθορισμού (XRF). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια από τις πιο βασικές αναλυτικές μεθόδους γεωλογικού υλικού. Είναι μη καταστρεπτική μέθοδος εφόσον το δείγμα αναλύεται σε στερεά κατάσταση, συνήθως κονιοποιημένο, δίχως χημικές επεξεργασίες και διαλυτοποιήσεις (Πεντάρη, 2012).

Εδώ χρησιμοποιήθηκε το φασματοσκόπιο S2 Ranger τη εταιρίας BrukerAXS του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Εικόνα 6: Φασματοσκόπιο ακτίνων-Χ φθορισμού του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αρχή λειτουργίας μεθόδου

Εάν βομβαρδιστεί ένα άτομο με ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή του δεσμού των ηλεκτρονίων του, τότε εκδιώκονται ηλεκτρόνια από εσωτερικές σε εξωτερικές στοιβάδες. Οι κενές θέσεις των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται καλύπτονται από ηλεκτρόνια που πέφτουν στις θέσεις αυτές από εξωτερικές στοιβάδες. Η πλήρωση των θέσεων αυτών συνοδεύεται με εκπομπή ακτίνων $-X$, ενέργειας ίσης με την διαφορά ενέργειας της αντίστοιχης εξωτερικής από την εσωτερική στοιβάδα. Η διέγερση του δείγματος για εκπομπή ακτίνων $-X$ γίνεται με ειδικές λυχνίες ακτίνων $-X$, ενέργειας πολλαπλάσιας αυτής που θέλουμε να διεγείρουμε.

Προετοιμασία δειγμάτων

Τα δείγματα που εξετάσθηκαν στο φασματοσκόπιο ακτίνων-Χ φθορισμού λειοτριβήθηκαν μέχρι να αποκτήσουν κοκκομετρία $<60\mu m$ και έπειτα κατασκευάστηκαν ταμπλέτες (δισκία) πιέζοντας το υλικό σε ειδική μήτρα με πίεση 150 atm.

3.3 Το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο

Η μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου τύπου JENA LAB του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο διαθέτει τον ανακλαστήρα, ο οποίος έχει τοποθετηθεί μεταξύ του αντικειμενικού φακού και του προσοφθάλμιου φακού ώστε να κατευθύνει το προσπίπτον φως κάθετα στη στιλβωμένη επιφάνεια του παρασκευάσματος. Υπάρχουν δύο τύποι ανακλαστήρων, στα συνήθη μεταλλογραφικά μικροσκόπια, η γυάλινη πλάκα και το πρίσμα ολικής ανάκλασης, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιλεκτικά. Για την παρατήρηση μη καλυμμένων παρασκευασμάτων χρησιμοποιούνται ειδικοί φακοί. Τέλος, η

περιστρεφόμενη τράπεζα που διαθέτει, μπορεί να μετακινηθεί ελεύθερα προς τα πάνω και προς τα κάτω για να επιτυγχάνεται η εστίαση σε παρασκευάσματα διαφορετικού πάχους (Αλεβίζος, 2009).

Προετοιμασία δειγμάτων

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μελέτη του μεταλλεύματος είναι η παρασκευή μιας καλά στιλβωμένης τομής, της οποίας η επιφάνεια πρέπει να είναι απαλλαγμένη από χαραγές ή άλλες ανωμαλίες. Το προς στίλβωση υλικό πρέπει να εμποτιστεί σε ειδική τεχνητή ρητίνη και έπειτα τοποθετείται σε ειδικές φόρμες διαμέτρου μεταξύ 2 και 4 cm στις οποίες χύνεται ποσότητα του υγρού υλικού εγκλίσεως. Ακολουθεί η λείανση του παρασκευάσματος που εκτελείται σε τρία στάδια, χρησιμοποιώντας ως λειαντικό μέσο καρβίδιο του πυριτίου ή βολφραμίου σε διαφορετικές κοκκομετρίες. Το παρασκεύασμα λειανείται επάνω σε περιστρεφόμενο μεταλλικό δίσκο ή με το χέρι επάνω σε γυάλινη πλάκα με τις κοκκομετρίες των λειαντικών μέσων του πρώτου σταδίου. Η λείανση του παρασκευάσματος γίνονται πάντοτε παρουσία νερού. Τέλος, το στάδιο της στίλβωσης, όπου χρησιμοποιείται η συσκευή Rehwald, μπορεί να γίνει η επιλογή διάφορων μέσων στίλβωσης (π.χ. αλοιφές-Rehwald, αδαμανταλοιφές, καρβίδιο του βορίου κ.α.). Ως λιπαντικό μέσω χρησιμοποιείται ένα μίγμα από παραφινέλαιο, πετρέλαιο και εκχυλίσματα πίσσας. Η μέθοδος Rehwald είναι η μοναδική μέθοδος στίλβωσης, με την οποία παρασκευάζονται στιλπνές τομές ελεύθερες από ανάγλυφο και χαραγές (Αλεβίζος, 2009).

3.4 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Η μικροσκοπική εξέταση και μικροανάλυση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) τύπου JEOLJSM 5400, του Εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας, σε συνδυασμό με EDS-μικροαναλύσεις. Οι συνθήκες παρατήρησης είναι: $U=20\text{ kV}$, $I=5\text{ nA}$. Έγινε χρήση φυσικών και συνθετικών προτύπων, ενώ η επεξεργασία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα INCAENERGY 30.

3.5 Θεωρητικό υπόβαθρο μαγνητικού διαχωρισμού

Μαγνητικός διαχωρισμός είναι η μέθοδος εμπλουτισμού που εκμεταλλεύεται τη διαφορά στις μαγνητικές ιδιότητες των ορυκτών. Εφαρμόζεται για την ανάκτηση χρήσιμων μαγνητικών ορυκτών από μη μαγνητικά, στείρα ορυκτά, όπως, π.χ., ο διαχωρισμός μαγνητίτη από χαλαζία, αλλά και για την απομάκρυνση βλαβερών μαγνητικών ορυκτών από χρήσιμα μη μαγνητικά ορυκτά, όπως, π.χ., η απομάκρυνση σερπεντίνη από μαγνησίτη (λευκόλιθο). Όλα τα υλικά αντιδρούν με κάποιο τρόπο όταν βρεθούν σε ένα μαγνητικό πεδίο, μόνο που σε μερικά η αντίδραση αυτή είναι τόσο μικρή, που δε μπορεί πρακτικά να προσδιοριστεί. Τα υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα, εάν έλκονται ή απωθούνται από ένα μαγνητικό πεδίο:

- Διαμαγνητικά ονομάζονται τα υλικά που απωθούνται από τις γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου και οδεύουν προς τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου εξασθενεί. Οι ασκούμενες δυνάμεις είναι, κατά κανόνα, πολύ μικρές και τα διαμαγνητικά υλικά, πρακτικά, δεν επηρεάζονται από το μαγνητικό διαχωρισμό.
- Παραμαγνητικά ονομάζονται τα υλικά που έλκονται από τις γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου και οδεύουν προς τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου αυξάνει. Πολλά παραμαγνητικά υλικά μπορούν να εμπλουτιστούν με μαγνητικούς διαχωριστές υψηλής έντασης.

Παραδείγματα παραμαγνητικών ορυκτών που εμπλουτίζονται βιομηχανικά με μαγνητικό διαχωρισμό είναι ο ιλμενίτης (FeTiO_3), το ρουτίλιο (TiO_2), ο αιματίτης (Fe_2O_3), ο σιδερίτης (FeCO_3), ο χρωμίτης (FeCr_2O_4), κ.α. Πολλά ορυκτά, που στην καθαρή τους μορφή δεν έλκονται από το μαγνήτη, γίνονται πιο μαγνητικά, όταν κάποιο στοιχείο τους αντικαθίσταται με σίδηρο (Fe). Παράδειγμα αποτελεί ο σφαλερίτης (ZnS), στον οποίο ένα μέρος του Zn αντικαθίσταται με Fe, με αποτέλεσμα να γίνεται όλο και περισσότερο μαγνητικός.

- Σιδηρομαγνητικά υλικά είναι, τέλος, μια κατηγορία παραμαγνητικών υλικών, που η δύναμη έλξης τους από τα μαγνητικά πεδία είναι πολύ μεγάλη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα παραμαγνητικά υλικά.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι πολύ επιδεκτικά στις μαγνητικές δυνάμεις και πολλά από αυτά παραμένουν μαγνητισμένα, όταν απομακρύνονται από το μαγνητικό πεδίο. Τα υλικά αυτά μπορούν να εμπλουτισθούν εύκολα με μαγνητικούς διαχωριστές χαμηλής έντασης. Το κυριότερο σιδηρομαγνητικό ορυκτό είναι ο μαγνητίτης (Fe_3O_4).

Πολλές φορές είναι δυνατόν ορυκτά μη μαγνητικά ή ελάχιστα μαγνητικά να μετατραπούν σε ισχυρώς μαγνητικά μέσω κάποιας διαδικασίας, όπως είναι η φρύξη. Έτσι, τα παραμαγνητικά ορυκτά σιδερίτης (FeCO_3) και αιματίτης (Fe_2O_3) μπορούν να μετατραπούν σε μαγνητίτη μετά από μια οξειδωτική και αναγωγική φρύξη αντίστοιχα, ενώ ο σιδηροπυρίτης (FeS_2) να μετατραπεί σε μαγνητικό πυρροτίνη (FeS) μετά από οξειδωτική φρύξη (Σταμπολιάδης, 2008).

Στο μετάλλευμα που μελετήθηκε, ο σίδηρος ανήκει στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Επομένως μαγνητική συμπεριφορά στο μετάλλευμα εμφανίζουν τα ορυκτά που περιέχουν σίδηρο, δηλαδή ο αιματίτης (Fe_2O_3) και ο γκαιτίτης (FeO-OH). Στα μη μαγνητικά ανήκουν ο χαλαζίας (SiO_2) και ο ασβεστίτης (CaCO_3). Η ένταση του μαγνητικού πεδίου καθορίζει την καθαρότητα του συμπυκνώματος ή την ανάκτηση σε χρήσιμο μέταλλο. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στο μαγνητικό διαχωρισμό ονομάζονται μαγνητικοί διαχωριστές και υπάρχουν διάφοροι τύποι αυτών.

4. Ορυκτολογία και Χημικές αναλύσεις αρχικών δειγμάτων

4.1 Δειγματοληψία

Η περιοχή Κακόπετρου βρίσκεται σε απόσταση 38 χλμ. Νοτιοδυτικά των Χανίων. Στην ευρύτερη περιοχή απαντώνται Φυλλίτες-Χαλαζίτες του τριαδικού καθώς και πορώδεις ασβεστόλιθοι, ασβεστιτικοί ψαμμίτες και ασβεστολιθικά λατυποπαγή-κροκαλοπαγή του Μειόκαινου. Στην περιοχή Κακόπετρου υπάρχουν εμφανίσεις λειμωνίτη και λειμωνιτικής ώχρας στο λόφο νοτιοδυτικά του χωριού.

Το μεταλλοφόρο κοίτασμα βρίσκεται σε επαφή μεταξύ του υποκείμενου στρώματος Φυλλιτών-Χαλαζιτών και του υπερκείμενου κροκαλοπαγή ασβεστόλιθου. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στην παραπάνω περιοχή η οποία απέχει περίπου 650 m από το χωριό.

Τα ληφθέντα δείγματα από την τομή από το πάτωμα προς την οροφή, όπως φαίνεται στην εικόνα 7 ήταν τα εξής: K1, K2A, K2B, K3A, K4A, K5A, K5C και K6. Το συνολικό βάρος των δειγμάτων ήταν 7,31 Kg. Τα δείγματα αποτελούνταν από συμπαγή τεμάχια με διαμέτρους από 5 cm έως και 15 cm. Επίσης στα δείγματα υπήρχε και αρκετή λειμωνιτική ώχρα.

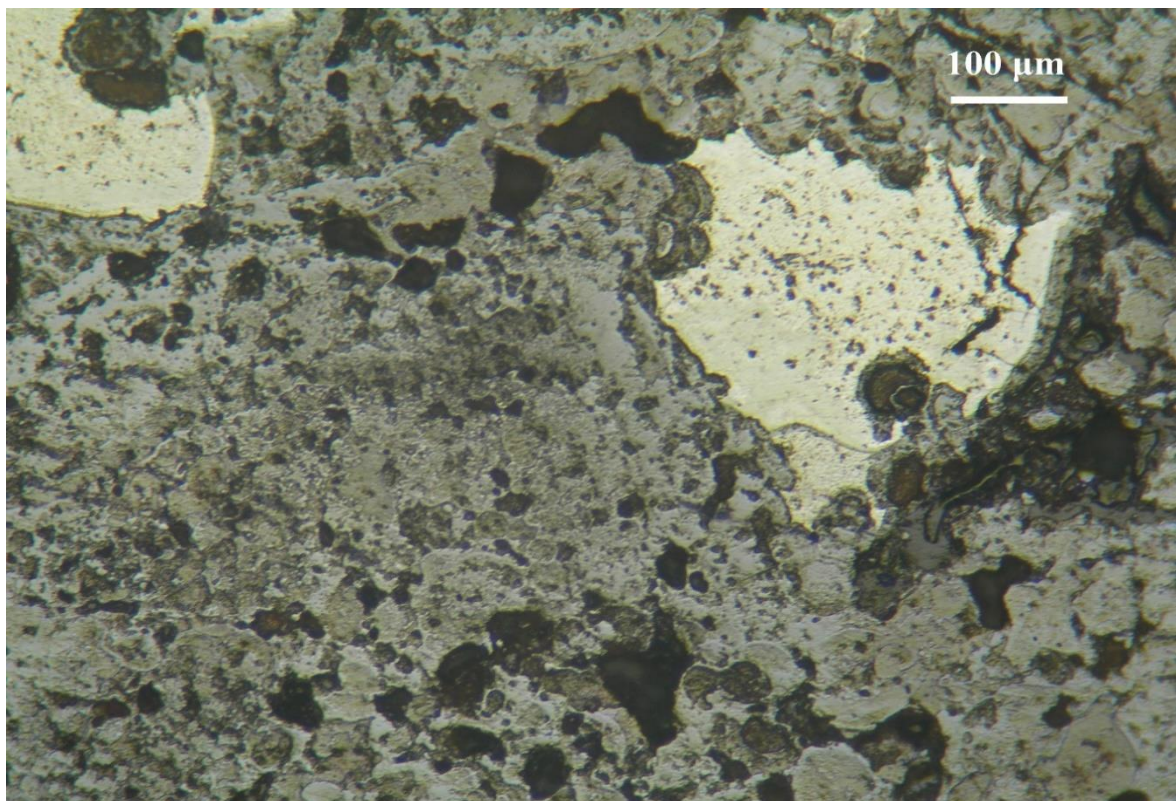


Εικόνα 7: Σημεία δειγματοληψίας, νοτιοδυτικά του χωριού Κακόπετρος.

4.2 Ορυκτολογία αρχικών δειγμάτων

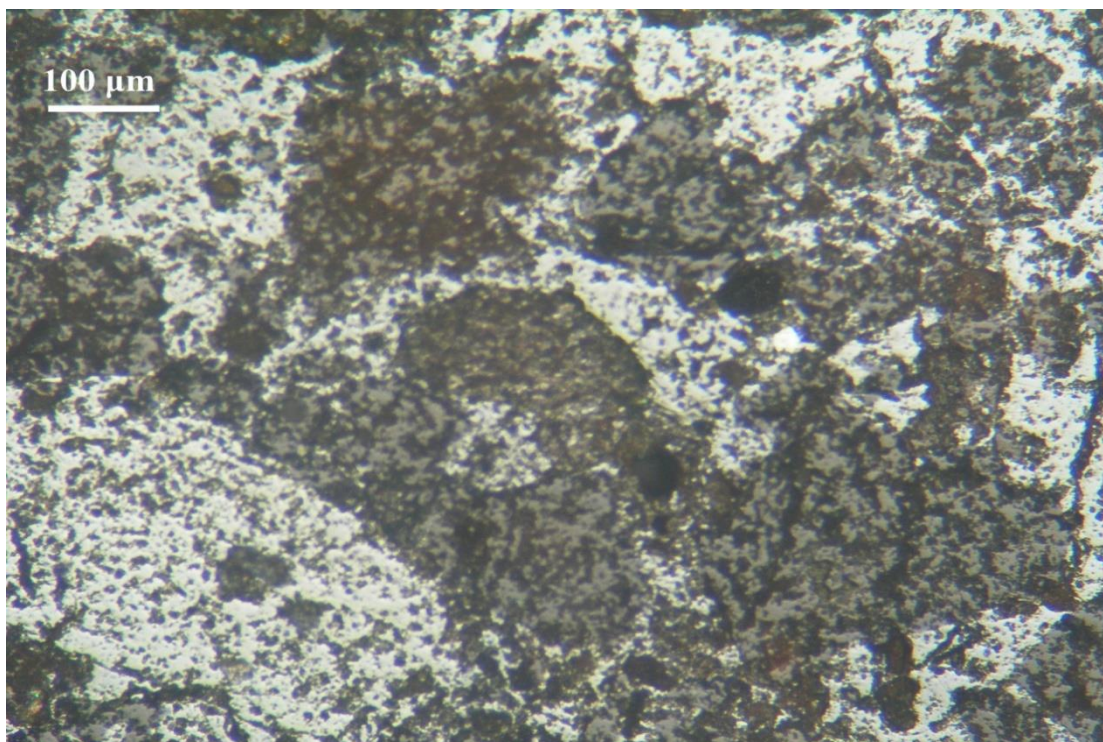
Από τη μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων που συλλέχθηκαν φαίνεται η ορυκτολογική σύνθεση και τα ιστολογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος.

Το δείγμα K1 συλλέχθηκε από το χαμηλότερο σημείο της τομής του κοιτάσματος. Η μικροσκοπική εξέταση έδειξε ότι το δείγμα αποτελείται κυρίως από συμπαγής μεταλλοφορία γκαιτίτη αλλά και μεγάλης έκτασης μεταλλοφορία μαγγανίου με μορφή κρυπτομέλανα. Οι δυο μεταλλοφορίες διακρίνονται στη εικόνα 8.



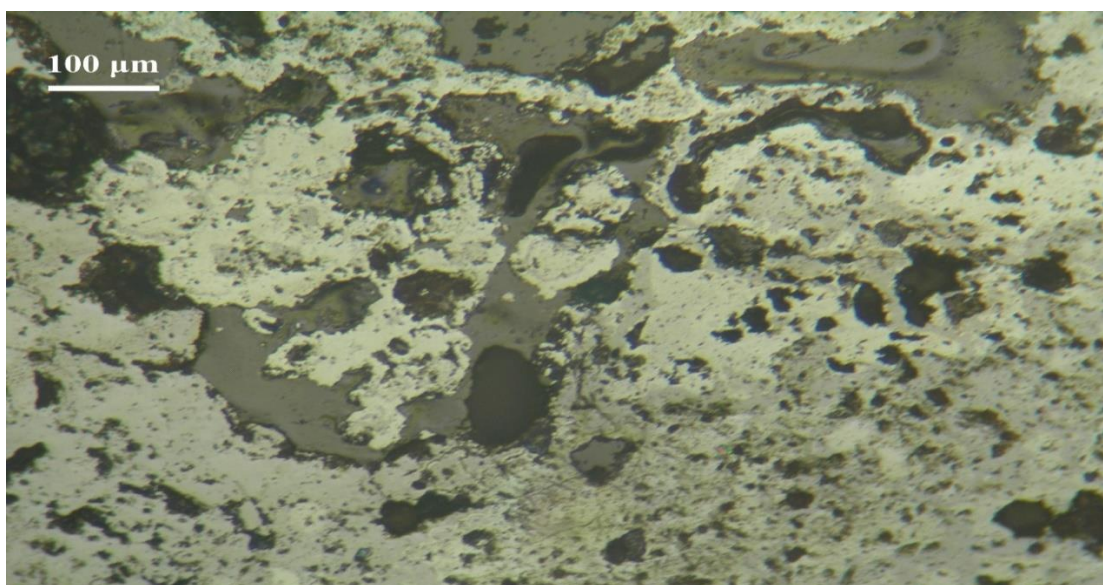
Εικόνα 8: Συμπαγής μεταλλοφορία γκαιτίτη και μεταλλοφορία κρυπτομέλανα. Δείγμα K1, ανακλώμενο φως // Nicols

Στο δείγμα K2A εντοπίστηκε η γκαιτιτική μάζα μεταξύ των χαλαζιακών κόκκων αντικαθιστώντας το συνδετικό υλικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 9.



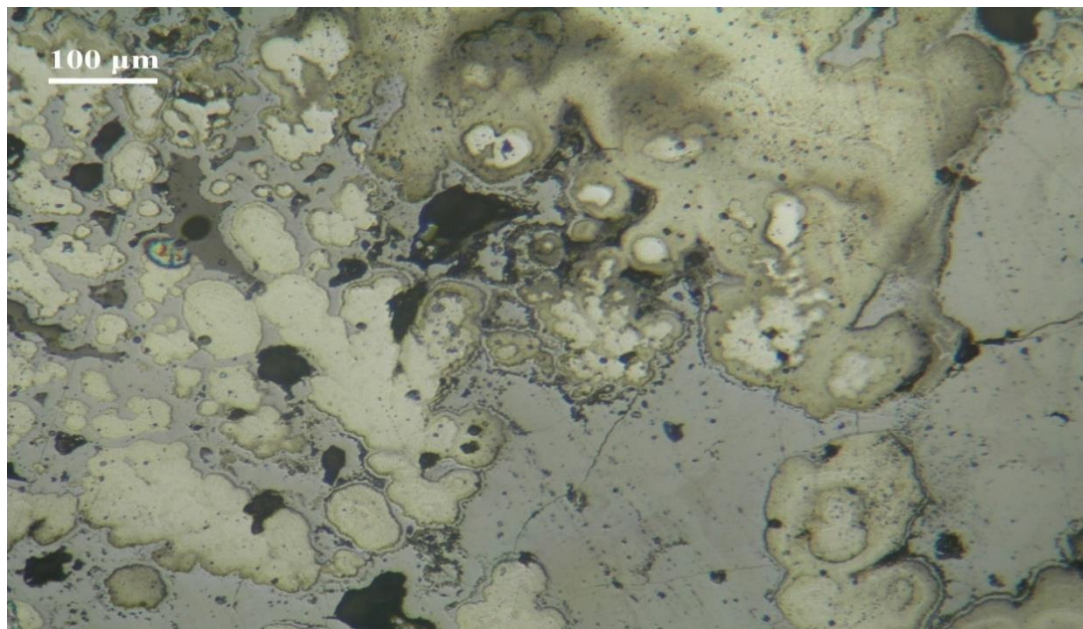
Εικόνα 9: Μεταλλοφορία γκαιτίτη αντικαθιστά σταδιακά το συνδετικό υλικό μεταξύ χαλαζιακών κόκκων. Δείγμα K2A ανακλώμενο φως // Nicols.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 10 ο κρυπτομέλανας καθώς και η συμπαγής γκαιτιτική μάζα εκτείνονται κατά μήκος των διάκενων του μητρικού πετρώματος.



Εικόνα 10: Μεταλλοφορία γκαιτίτη και κρυπτομέλανα κατά μήκος των διάκενων. Δείγμα K2B, ανακλώμενο φως // Nicols.

Στο δείγμα K3A διακρίνονται συμπαγείς γκαιτιτικές μάζες αλλά και η παρουσία κρυστάλλων κρυπτομέλανα που δικαιολογούν την αυξημένη ποσότητα MnO. Όπως φαίνεται στη εικόνα 11 σχηματίζουν συγκεντρικές επιφλοιώσεις κατά μήκος των ρωγμών και πληρώνοντας διάκενα μεταξύ των κόκκων του μητρικού πετρώματος.



Εικόνα 11: Γκαιτίτης και κρυπτομέλανας (με συγκεντρικές επιφλοιώσεις) αντικαθιστούν το συνδετικό υλικό μεταξύ των κόκκων. Δείγμα K3A, ανακλώμενο φως // Nicols.

Στο δείγμα K4A ο συμπαγής γκαιτίτης πληρεί το χώρο μεταξύ των χαλαζιακών κόκκων αντικαθιστώντας το συνδετικό υλικό όπως διακρίνεται στη εικόνα 12.



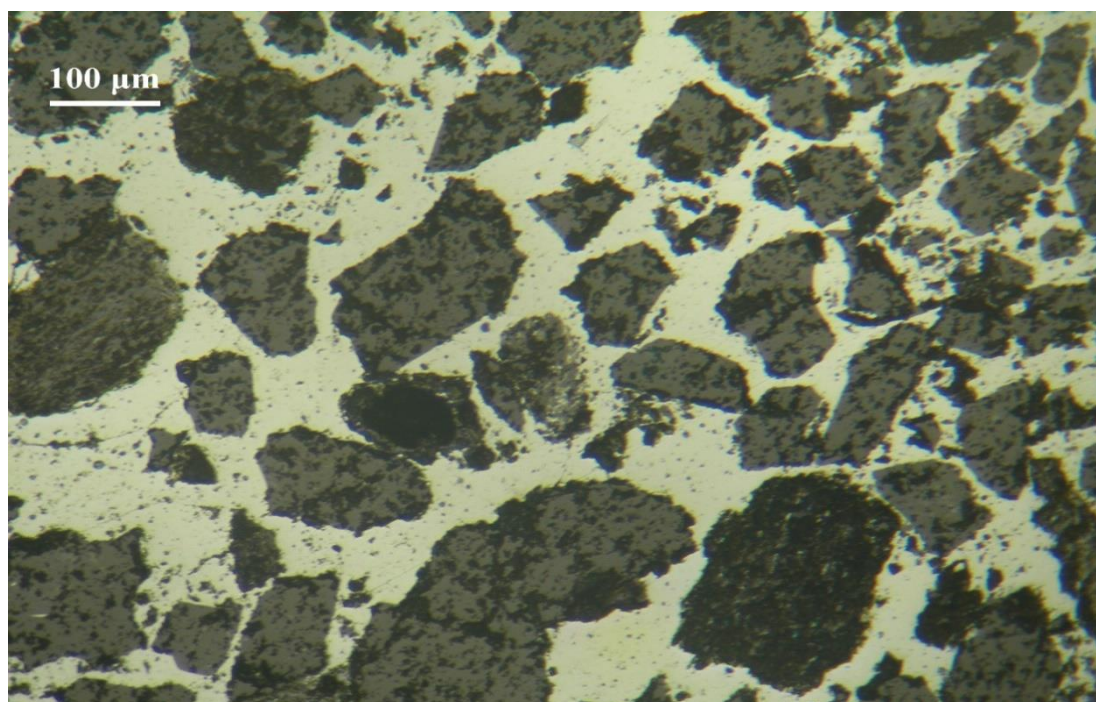
Εικόνα 12: Μεταλλοφορία γκαιτίτη αντικαθιστά το συνδετικό υλικό μεταξύ των χαλαζιακών κόκκων. Δείγμα K4A, ανακλώμενο φως // Nicols.

Στο δείγμα K5A όπως είναι ευδιάκριτο, από την εικόνα 13, οι χαλαζιακοί κόκκοι βρίσκονται μέσα στη γκαϊιτική μάζα που πληρεί την τομή.



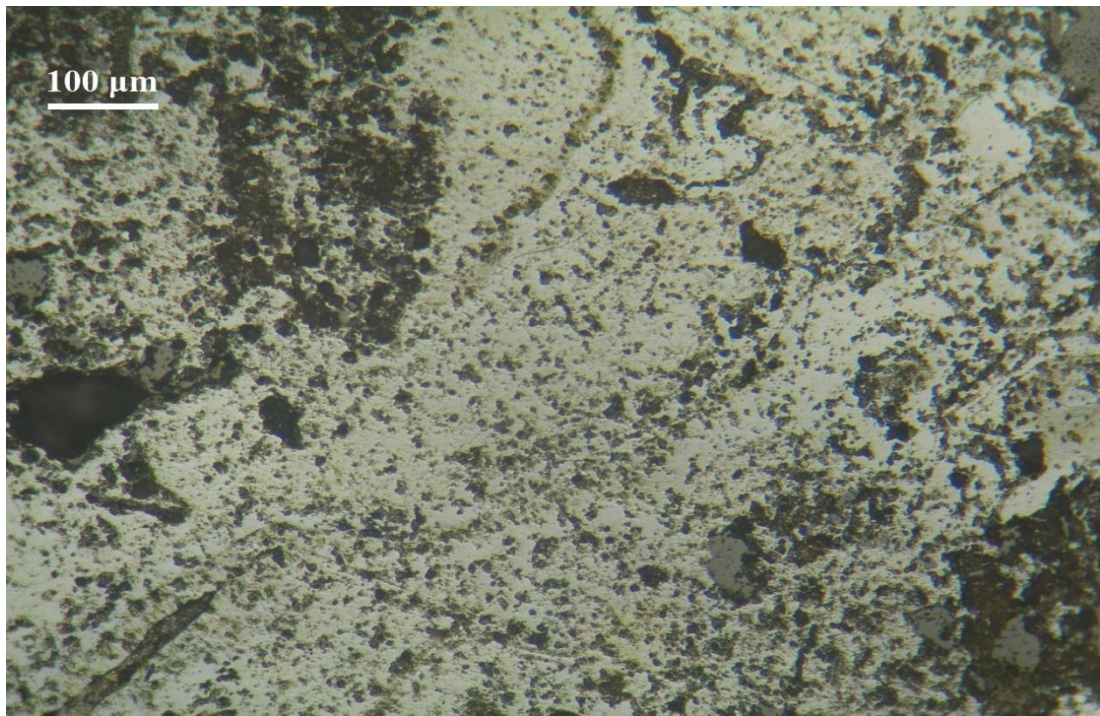
Εικόνα 13: Μεταλλοφορία γκαϊίτη) με κόκκους χαλαζία. Δείγμα K5A, ανακλώμενο φώς // Nicols.

Στο δείγμα K5C παρατηρήθηκε μεγάλη έκταση κυκλοφορίας μαγγανίου με μορφή κρυπτομέλανα αντικαθιστώντας έτσι το συνδετικό υλικό ανάμεσα στους κόκκους χαλαζία που διακρίνονται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14: Κρυπτομέλανας αντικαθιστά το συνδετικό υλικό μεταξύ των χαλαζιακών κόκκων. Δείγμα K5C, ανακλώμενο φώς //Nicols.

Το δείγμα K6 λήφθηκε από σημείο κοντά στην οροφή του κοιτάσματος και παρατηρήθηκε η συμπαγής μεταλλοφορία γκαϊτίτη σε μεγάλη έκταση όπως φαίνεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: Συμπαγής μεταλλοφορία γκαϊτίτη. Δείγμα K6, ανακλώμενο φως //Nicols.

Η δομή του μεταλλεύματος χαρακτηρίζεται γενικά ως εμπλεκτική διακοκκώδης.

4.3 Χημικές αναλύσεις αρχικών δειγμάτων

Από τις χημικές αναλύσεις των αρχικών δειγμάτων παρατηρήθηκε ότι το δείγμα K1 καταγράφει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε Fe_2O_3 με 78,04 %, ενώ η συγκέντρωσή του σε SiO_2 είναι 4,31% . Το δείγμα με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 είναι το K2A με 52,75 %, ενώ ταυτόχρονα διαθέτει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε SiO_2 με 33,10 %.

Πίνακας 1: Χημικές αναλύσεις αρχικών δειγμάτων.

Δείγματα	Fe_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	P_2O_5 (%)	MnO (%)	K_2O (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO_2 (%)	Na_2O (%)	ZnO (%)	Cr_2O_3 (%)	CoO (%)	LOI (%)	SUM
K1	78,04	4,31	1,11	0,85	0,35	0,31	0,30	0,06	0,12	0,02	0,08	0,25	0,14	13,66	99,60
K2A	52,75	33,10	2,41	0,95	0,25	0,56	0,20	0,21	0,26	0,02	0,05	0,16	0,08	9,40	100,40
K2B	58,48	21,89	2,45	0,16	5,12	0,69	0,15	0,06	0,27	0,02	0,06	0,13	0,14	10,60	100,22
K3A	62,88	3,81	1,68	0,24	15,84	0,86	0,17	0,05	0,06	0,19	0,08	0,05	0,18	14,10	100,19
K4A	67,91	8,41	1,20	0,30	3,32	0,53	3,63	0,02	0,17	0,03	0,09	0,16	0,12	13,80	99,69
K5A	63,30	20,32	2,62	0,68	0,23	0,46	0,32	0,12	0,35	0,03	0,09	0,19	0,13	11,30	100,14
K5C	55,09	11,59	2,75	0,74	15,01	0,96	0,16	0,06	0,17	0,16	0,04	0,05	0,16	12,70	99,64
K6	60,25	18,36	2,31	0,31	5,68	0,70	0,20	0,11	0,25	0,02	0,07	0,13	0,14	11,40	99,93

Υψηλές συγκεντρώσεις MnO διαθέτουν τα δείγματα K2B, K3A, K4A, K5C και K6 καθώς οι τιμές του κυμαίνονται από 3,32 % έως 15,84 %. Όσον αφορά το Al_2O_3 σε όλα τα δείγματα παρατηρήθηκε παραπλήσια συγκέντρωση που κυμάνθηκε μεταξύ 1,11 % και 2,75 %.

5. Αποτελέσματα εμπλουτισμού

Τα 8 αρχικά δείγματα ανακατεύτηκαν και πέρασαν από τη διαδικασία θραύσης μέσω του σιαγονωτού σπαστήρα μέχρι το υλικό να έχει μέγεθος -8mm. Το μετάλλευμα διαιρέθηκε μέσω του δειγματολήπτη Jones, σε πρώτο στάδιο σε δυο δείγματα (Δείγμα Α & Β) και στη συνέχεια το Δείγμα Β σε 2 δείγματα (Δείγμα Γ & Δ). Το Δείγμα Α (½ του αρχικού δείγματος) και το Δείγμα Γ (1/4 του αρχικού δείγματος) ενώθηκαν και αφού το υλικό πέρασε από κόσκινα ταξινομήθηκε βάση κοκκομετρίας στα εξής κοκκομετρικά κλάσματα:

- -8+4 mm
- -4 +1 mm
- -1 +0,250 mm
- -0,250 mm

Το -0,250 mm κλάσμα ταξινομήθηκε σε υδροκυκλώνα ($d_{50}=0,010$ mm) στα κλάσματα :

- -0,250 +0,010 mm
- -0,010 mm

Όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές εμπλουτισμού (μαγνητικός διαχωρισμός) εκτός από το τελευταίο κλάσμα (-0,010 mm).

Η κατανομή βάρους των κοκκομετρικών κλασμάτων του αρχικού δείγματος αναγράφονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2: Κατανομή βάρους των κοκκομετρικών κλασμάτων του αρχικού δείγματος.

Κοκκομετρικά κλάσματα	d(mm)	Βάρος (g)	Βάρος %
KL 1	-8+4	2576,2	52,16
KL 2	-4+1	1539,1	31,16
KL 3	-1+0.250	428,4	8,67
KL 4	-0,250+0,010	341,9	6,92
KL 5	-0,010	53,57	1,08
Σύνολο		4939,17	100

Στα 5 κοκκομετρικά κλάσματα πραγματοποιήθηκαν οι εξής διεργασίες:

- Χημική ανάλυση με φασματοσκοπία ακτίνων-Χ φθορισμού (XRF) και προσδιορισμός της απώλειας πύρωσης
- Προσδιορισμός ορυκτολογικής σύστασης με περιθλασιμετρία ακτίνων - Χ (XRD)
- Μικροσκοπική εξέταση

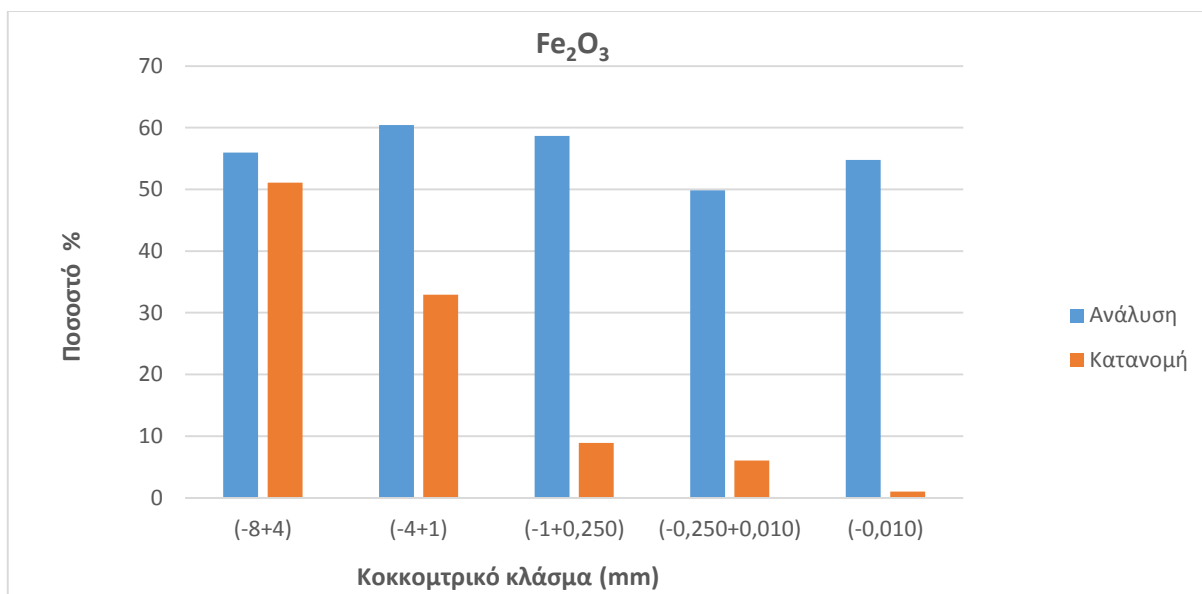
Ο πίνακας 3 παρουσιάζει τις χημικές αναλύσεις των αρχικών κοκκομετρικών κλασμάτων ενώ ο πίνακας 4 την κατανομή τους.

Πίνακας 3: Χημικές αναλύσεις αρχικών κοκκομετρικών κλασμάτων.

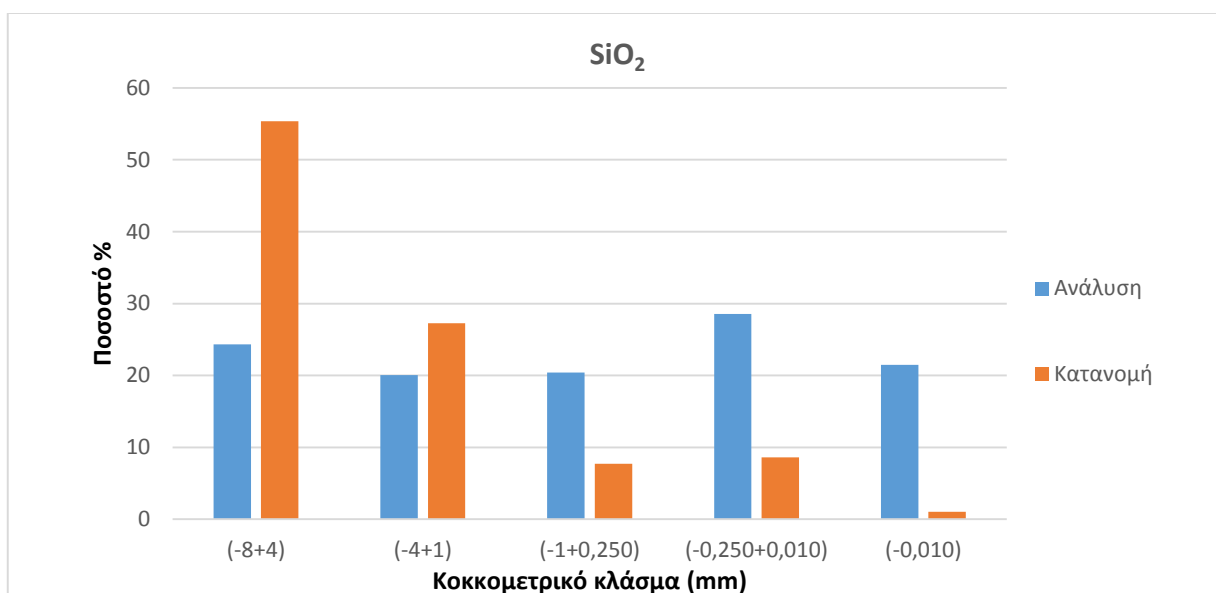
Κοκκομ. κλ.	d(mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	Na ₂ O (%)	ZnO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	CoO (%)	LOI
KL 1	-8+4	2576,2	52,16	55,98	24,34	6,46	0,61	1,02	0,42	0,54	0,15	0,27	0,02	0,05	0,16	0,10	10,09
KL 2	-4+1	1539,1	31,16	60,43	20,07	3,29	0,49	3,39	0,54	0,28	0,07	0,22	0,02	0,06	0,13	0,09	10,50
KL 3	-1+0,250	428,4	8,67	58,68	20,42	4,14	0,50	4,36	0,57	0,48	0,07	0,22	0,02	0,06	0,13	0,08	10,50
KL 4	-0,250+0,010	341,9	6,92	49,83	28,56	2,69	0,43	3,51	0,48	2,88	0,10	0,19	0,02	0,06	0,11	0,10	10,90
KL 5	-0,010	53,57	1,08	54,75	21,46	3,80	0,44	3,17	1,11	1,83	0,20	0,41	0,03	0,11	0,15	0,10	12,50
Σύνολο		4939,17	100	57,16	22,93	4,98	0,55	2,24	0,48	0,63	0,12	0,25	0,02	0,06	0,14	0,095	54,49

Πίνακας 4: Κατανομή αρχικών κοκκομετρικών κλασμάτων.

Κοκκομ. κλ.	d(mm)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	Na ₂ O (%)	ZnO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	CoO (%)
KL 1	-8+4	51,08	55,37	67,64	57,98	23,71	45,45	44,73	67,91	57,23	51,88	47,14	57,76	54,82
KL 2	-4+1	32,94	27,27	20,58	27,82	47,08	34,91	13,85	18,93	27,86	30,99	33,79	28,04	29,47
KL 3	-1+0,250	8,90	7,72	7,21	7,90	16,85	10,26	6,61	5,27	7,75	8,63	9,41	7,80	7,29
KL 4	-0,250+0,010	6,03	8,62	3,74	5,42	10,83	6,89	31,66	6,01	5,35	6,88	7,51	5,27	7,28
KL 5	-0,010	1,04	1,02	0,83	0,87	1,53	2,50	3,15	1,88	1,81	1,62	2,16	1,13	1,14



Διάγραμμα 1: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του Fe_2O_3 στα αρχικά κοκκομετρικά κλάσματα.



Διάγραμμα 2: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του SiO_2 στα αρχικά κοκκομετρικά κλάσματα.

Όπως φάνηκε στον πίνακα 3 και στα διαγράμματα 1, 2 το Fe_2O_3 αυξήθηκε σε 60,43% από το αρχικό υλικό που ήταν 57,16% (αύξηση 5,7%) στο 2^ο κοκκομετρικό κλάσμα (-4+1 mm). Το SiO_2 αντίθετα παρουσίασε στο ίδιο κοκκομετρικό κλάσμα τη μεγαλύτερη μείωση κατά 12,47%, φτάνοντας στο 20,07% από την αρχική τιμή 22,93%.

Από το πίνακα 4 και τα διαγράμματα 1, 2 όμως παρατηρείται πως τα μεγαλύτερα ποσοστά της κατανομής των Fe_2O_3 και SiO_2 συγκεντρώνονται στο 1^ο κοκκομετρικό κλάσμα (-8+4 mm).

5.1 Δοκιμή εμπλουτισμού με τη μέθοδο του μαγνητικού διαχωρισμού (Α φάση)

Σε αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω τα τέσσερα κοκκομετρικά κλάσματα :

- -8 +4 mm
- -4 +1 mm
- -1 +0,250 mm
- -0,250 +0,010 mm

Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικοί μαγνητικοί διαχωριστές ανάλογα με τη κοκκομετρία του δείγματος. Για τα μεγάλα κοκκομετρικά κλάσματα -8+4 mm και -4+1 mm χρησιμοποιήθηκε ο ταινιοφόρος μόνιμος μαγνήτης (PermRoll). Για το κλάσμα -1+0,250 mm χρησιμοποιήθηκε ο ταινιοφόρος ηλεκτρομαγνήτης (InducedRoll). Τέλος, το κλάσμα -0,250+0,010 mm οδηγήθηκε σε υγρό μαγνήτη υψηλής έντασης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε κλάσμα είναι η εξής:

Στον ταινιοφόρο μόνιμο μαγνήτη το υλικό υποβάλλεται σε διαδοχικά περάσματα με μειούμενη ταχύτητα περιστροφής.

➤ Κλάσμα -8+4mm

Για το πρώτο πέρασμα ο ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής ρυθμίστηκε στα 180 rpm (στροφές ανά λεπτό). Από το πρώτο πέρασμα συλλέχθηκε το προϊόν 'Μαγνητικό 1' το οποίο ζυγίστηκε και αποθηκεύτηκε. Το μη μαγνητικό προϊόν αποτελούσε την τροφοδοσία του επόμενου περάσματος με τη μειωμένη ταχύτητα, στα 140 rpm. Από το δεύτερο πέρασμα προέκυψαν τα προϊόντα 'Μαγνητικό 2' και το μη μαγνητικό, όπου πάλι χρησιμοποιήθηκε ως τροφοδοσία για το επόμενο πέρασμα στα 100 rpm. Από το τρίτο και τελευταίο πέρασμα λαμβάνουμε το 'Μαγνητικό 3' και το μη μαγνητικό.

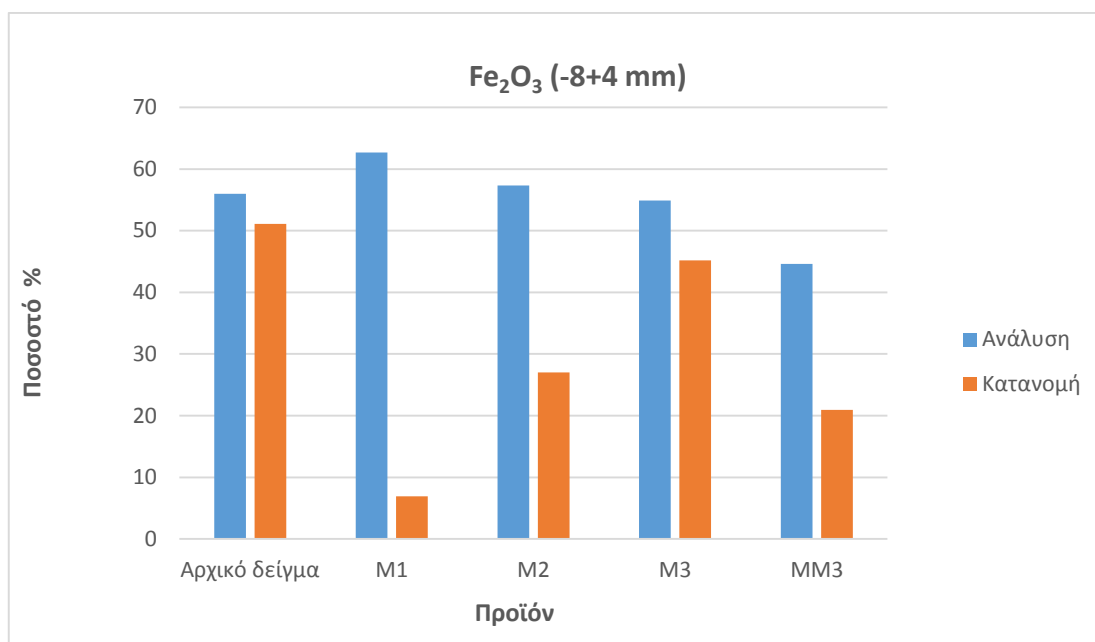
➤ Κλάσμα -4+1 mm

Για το πρώτο πέρασμα ο ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής ρυθμίστηκε στα 180 rpm. Από το πρώτο πέρασμα συλλέχθηκε το προϊόν 'Μαγνητικό 1' το οποίο ζυγίστηκε και αποθηκεύτηκε. Το μη μαγνητικό προϊόν αποτελούσε την τροφοδοσία του επόμενου περάσματος με τη μειωμένη ταχύτητα, στα 140 rpm. Από το δεύτερο πέρασμα προέκυψαν τα προϊόντα 'Μαγνητικό 2' και το μη μαγνητικό. Σε αυτό το κλάσμα έγινε δοκιμή για το τρίτο πέρασμα στα 100 rpm, αλλά παρατηρήθηκε ότι δεν ήταν καλός ο διαχωρισμός των μαγνητικών προϊόντων. Για αυτό το λόγο δεν πραγματοποιήθηκε το πέρασμα στα 100 rpm τελικά.

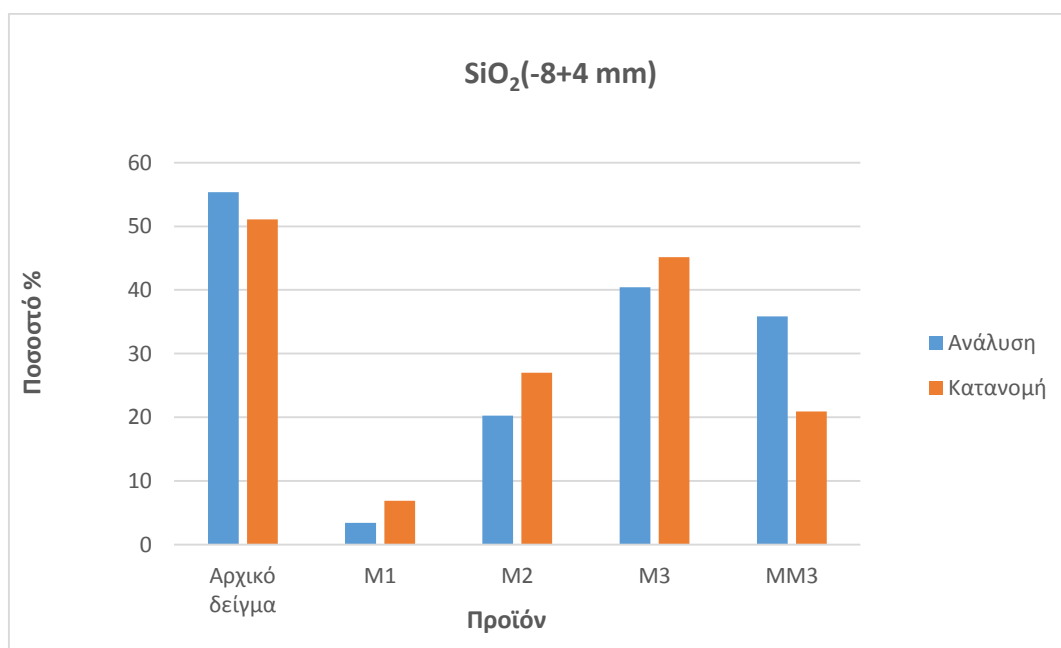
Πίνακας 3: Χημικές αναλύσεις και κατανομή βάρους μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -8+4mm.

Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος			Χημικές αναλύσεις					Κατανομή				
	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Βάρος % αρχικού	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)
Μαγνητικό 1	151,6	5,88	3,07	62,66	13,93	6,71	4,67	1,00	6,90	3,44	6,85	5,45	11,28
Μαγνητικό 2	648,9	25,16	13,12	57,31	19,15	7,77	3,14	0,57	27,02	20,26	33,95	15,68	27,52
Μαγνητικό 3	1133,1	43,94	22,92	54,88	21,9	2,76	8,29	0,35	45,17	40,45	21,06	72,31	29,51
Μαγνητικά (Σύνολο)	1933,6	74,98	39,11	56,3	20,4	4,8	6,3	0,5	79,09	64,15	61,86	93,44	68,31
Μη Μαγνητικό 3	645,2	25,02	13,05	44,61	34,09	8,78	1,32	0,66	20,91	35,85	38,14	6,56	31,69
Σύνολο	2578,8	100,00	52,16	53,38	23,79	5,76	5,04	0,52	100	100	100	100	100

Στον πίνακα 5 καθώς και στα διαγράμματα 3, 4 παρατηρείται ότι στο αρχικό κλάσμα -8+4 mm, η περιεκτικότητα σε Fe₂O₃ αυξήθηκε από 53,38% σε 62,66% (αύξηση 18%) στο Μαγνητικό 1 με κατανομή 6,90%, ενώ όσον αφορά το SiO₂, η περιεκτικότητα του μειώθηκε από 23,79% σε 13,93% (μείωση 41,44%) με κατανομή 3,44% στο ίδιο προϊόν. Από τον υπολογισμό των αθροιστικώς μαγνητικών, παρατηρήθηκε αύξηση του Fe₂O₃ σε 56,3%, η οποία δεν είναι υψηλή αλλά ανταποκρίνεται στο 79,09% του βάρους, ενώ η περιεκτικότητα σε SiO₂ φτάνει το 20,4% με κατανομή βάρους 64,15%. Σημαντική αύξηση σημειώνει το MnO στο Μαγνητικό 3 από 5,04% σε 8,29% (αύξηση 65%) και κατανομή 72,31%, στα αθροιστικώς μαγνητικά αυξήθηκε έως 6,3% με κατανομή βάρους 93,44%.



Διάγραμμα 3: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του Fe₂O₃ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -8+4 mm.

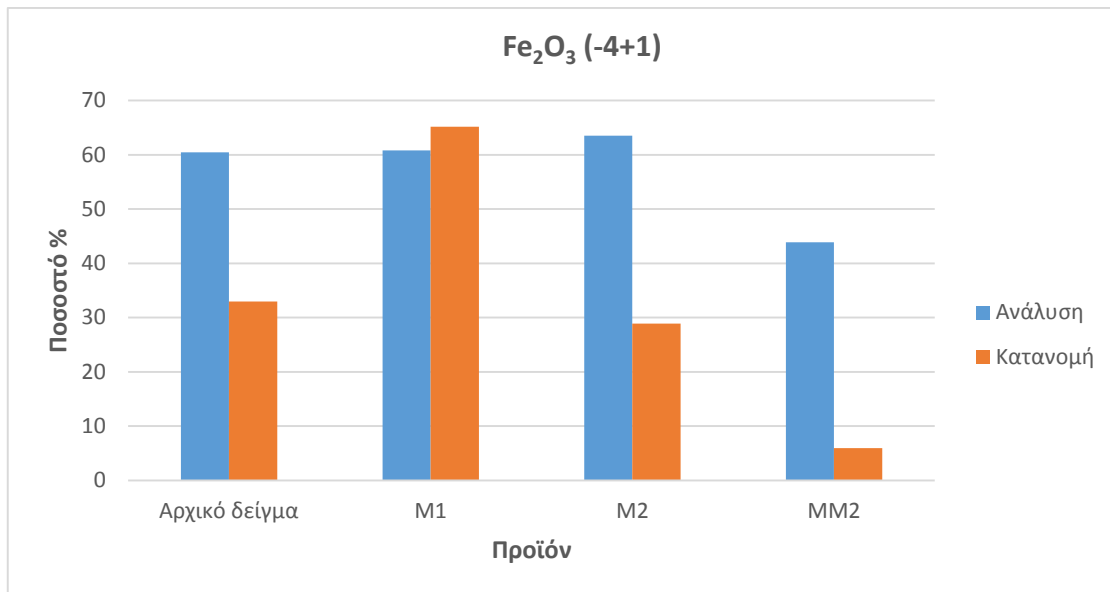


Διάγραμμα 4: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του SiO₂ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -8+4 mm.

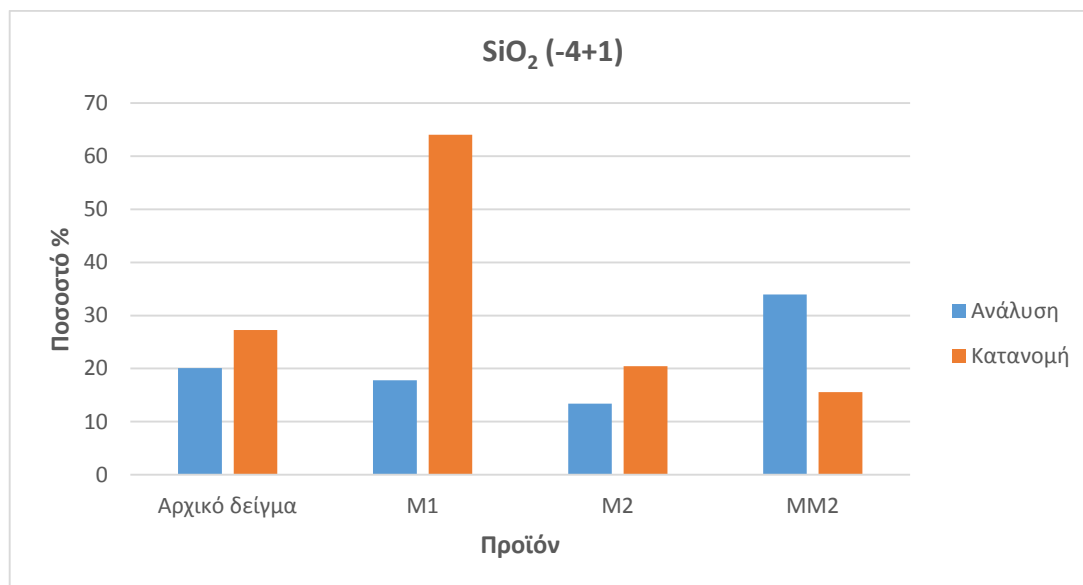
Πίνακας 6: Χημικές αναλύσεις και κατανομή βάρους μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -4+1mm.

Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος			Χημικές αναλύσεις					Κατανομή				
	Βάρος (g)	Βάρος %	Βάρος % αρχικού	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)
Μαγνητικό 1	991,5	64,48	20,09	60,81	17,78	6,74	3,2	0,66	65,17	64,04	66,30	57,76	66,74
Μαγνητικό 2	420,3	27,33	8,52	63,54	13,38	5,82	4,57	0,62	28,86	20,43	24,27	34,97	26,58
Μαγνητικά (Σύνολο)	1411,8	91,81	28,61	61,62	16,47	6,47	3,61	0,65	94,03	84,47	90,57	92,73	93,32
Μη Μαγνητικό 2	125,9	8,19	2,55	43,86	33,95	7,55	3,17	0,52	5,97	15,53	9,43	7,27	6,68
Σύνολο	1537,7	100	31,16	60,17	17,90	6,55	3,57	0,64	100	100	100	100	100

Στον πίνακα 6 καθώς και στα διαγράμματα 5, 6 παρατηρείται ότι στο αρχικό κλάσμα -4+1 mm, η περιεκτικότητα σε Fe₂O₃ αυξήθηκε από 60,17% σε 63,54% (αύξηση 5,6%) στο Μαγνητικό 2 με κατανομή 28,86%, ενώ όσον αφορά το SiO₂, η περιεκτικότητα του μειώθηκε από 17,90% σε 13,38% (μείωση 25,25%) με κατανομή 20,43% στο ίδιο προϊόν. Από τον υπολογισμό των αθροιστικώς μαγνητικών, παρατηρήθηκε αύξηση του Fe₂O₃ σε 61,62%, η οποία δεν είναι υψηλή αλλά ανταποκρίνεται στο 94,03% του βάρους, ενώ η περιεκτικότητα σε SiO₂ φτάνει το 16,47% με κατανομή βάρους 84,47%. Το MnO στο Μαγνητικό 2 αυξήθηκε από 3,57% σε 4,57% (αύξηση 28%) και κατανομή 34,97%, στα αθροιστικώς μαγνητικά δεν διακρίνεται μεγάλη αύξηση στα 3,61% αλλά η κατανομή βάρους είναι αρκετά υψηλή στα 92,73%.



Διάγραμμα 5: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του Fe₂O₃ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -4+1 mm.



Διάγραμμα 6: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του SiO₂ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -4+1 mm.



Εικόνα 16: Ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής (permgroll).

Στον ταινιοφόρο ηλεκτρομαγνήτη το υλικό υποβάλλεται σε διαδοχικά περάσματα με σταθερή ένταση πεδίου και μειούμενη ταχύτητα περιστροφής.

➤ Κλάσμα -1+0,250 mm

Στο πρώτο πέρασμα ο μαγνητικός διαχωριστής ρυθμίστηκε στις 140 στροφές με ένταση μαγνήτη 3,33A. Από το πρώτο πέρασμα συλλέχθηκε το 'Μαγνητικό 1' και το μη μαγνητικό, το οποίο αποτέλεσε την τροφοδοσία του επόμενου περάσματος. Για το δεύτερο πέρασμα ο μαγνητικός διαχωριστής ρυθμίστηκε στις 120 στροφές με ένταση μαγνήτη 2,98 A. Από το δεύτερο πέρασμα προέκυψαν το 'Μαγνητικό 2' και το μη μαγνητικό. Όλα τα προϊόντα ζυγίστηκαν και αποθηκεύτηκαν.

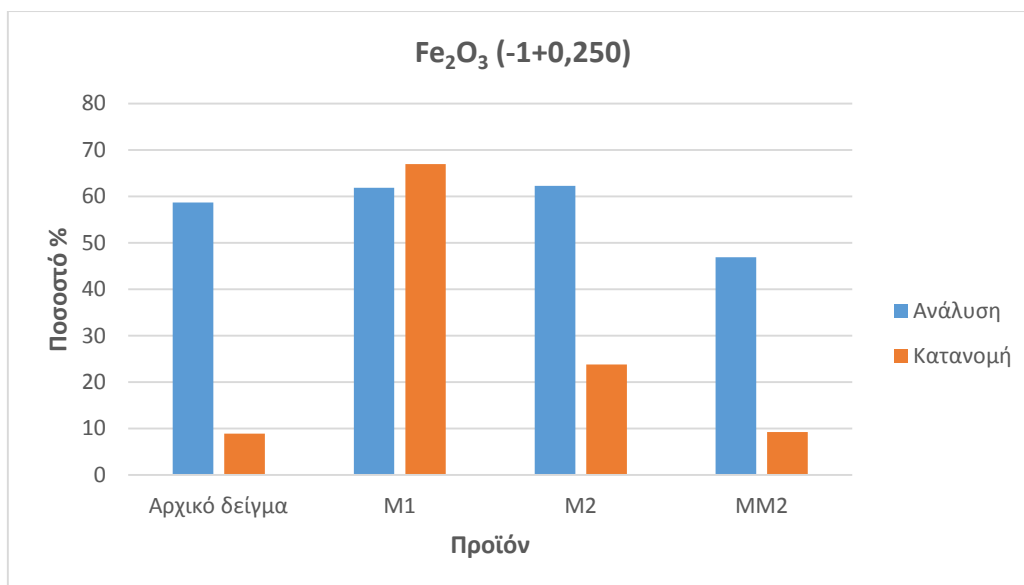


Εικόνα 17: Ξηρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης (high induced magnetic separator CarpcoMIH-111-5).

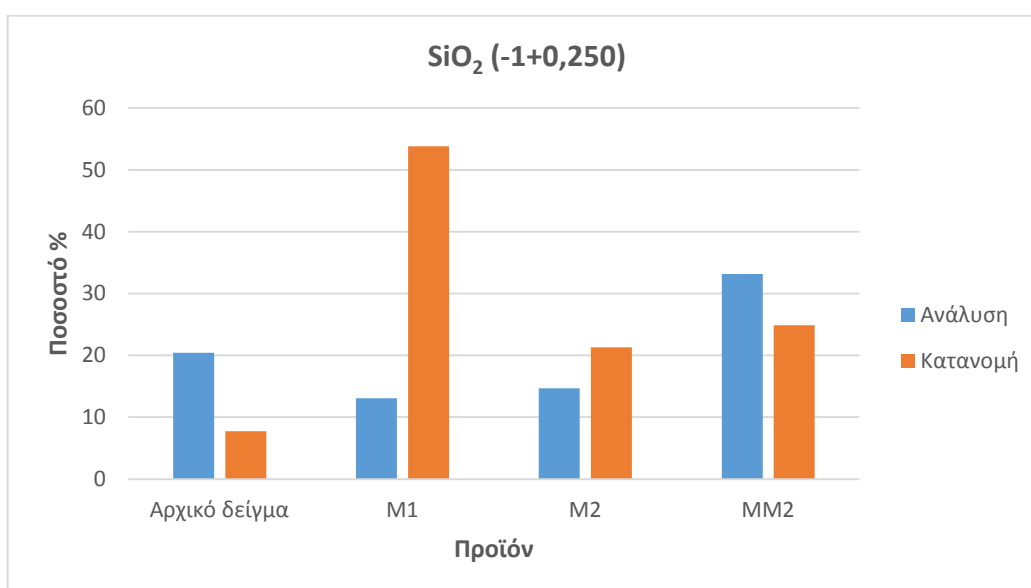
Πίνακας 7: Χημικές αναλύσεις και κατανομή βάρους μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1+0,250mm.

Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος			Χημικές αναλύσεις					Κατανομή				
	Βάρος (g)	Βάρος %	Βάρος % αρχικού	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)
Μαγνητικό 1	285,0	65,13	5,65	61,86	13,08	7,46	5,04	0,50	66,95	53,80	65,82	72,45	63,30
Μαγνητικό 2	100,6	22,99	1,99	62,27	14,68	5,97	4,66	0,48	23,79	21,32	18,59	23,64	21,45
Μαγνητικά (Σύνολο)	385,6	88,12	7,64	61,97	13,50	7,07	4,94	0,49	90,74	75,12	84,41	96,09	84,75
Μη Μαγνητικό 2	52,0	11,88	1,03	46,88	33,15	9,68	1,49	0,66	9,26	24,88	15,58	3,91	15,25
Σύνολο	437,6	100,00	8,67	60,17	15,83	7,38	4,53	0,51	100	100	100	100	100

Στον πίνακα 7 καθώς και στα διαγράμματα 7, 8 παρατηρείται ότι στο αρχικό κλάσμα -1+0,250 mm, η περιεκτικότητα σε Fe₂O₃ αυξήθηκε από 60,17% σε 62,27% (αύξηση 3,49%) στο Μαγνητικό 2 με κατανομή 23,79%, ενώ όσον αφορά το SiO₂, η περιεκτικότητά του μειώθηκε από 15,83% σε 13,08% (μείωση 17,37%) στο Μαγνητικό 1 με κατανομή 53,80%. Από τον υπολογισμό των αθροιστικώς μαγνητικών, παρατηρήθηκε αύξηση του Fe₂O₃ σε 61,97%, η οποία δεν είναι υψηλή αλλά ανταποκρίνεται στο 90,74% του βάρους, ενώ η περιεκτικότητά σε SiO₂ φτάνει το 13,50% με κατανομή βάρους 75,12%. Το MnO δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη αύξηση αφού η μεγαλύτερη περιεκτικότητά του έφτασε το 5,04% από 4,53% (αύξηση 11,26%) στο Μαγνητικό 1 με κατανομή 72,45%, στα αθροιστικώς μαγνητικά είχαμε ακόμα μικρότερη αύξηση στα 4,94% με υψηλότερη κατανομή βάρους που φτάνει τα 96,09%.



Διάγραμμα 7: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του Fe₂O₃ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1+0,250 mm.



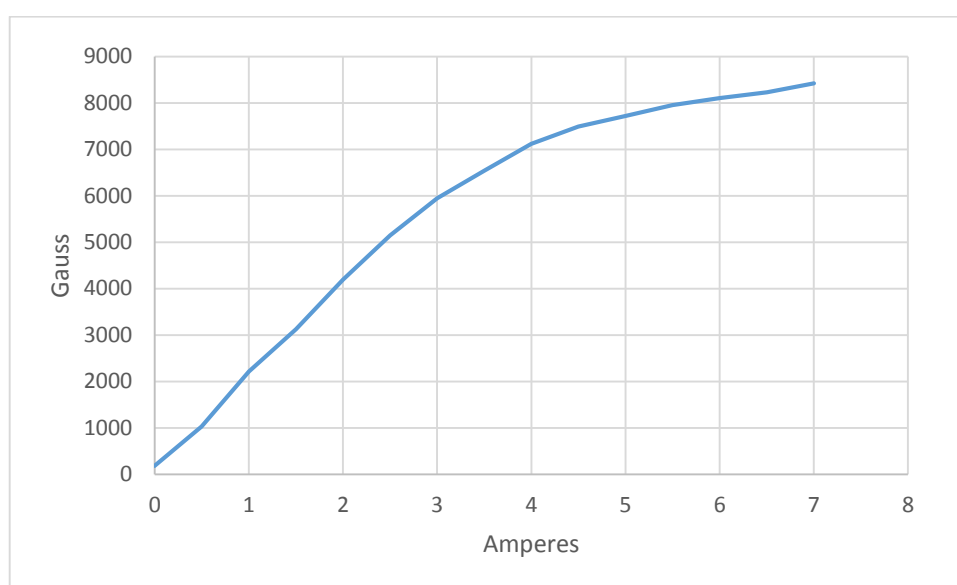
Διάγραμμα 8: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του SiO₂ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1+0,250 mm.

➤ Κλάσμα -0,250+0,010 mm

Αυτό το κλάσμα εμπλουτίστηκε με τη χρήση του υγρού μαγνήτη υψηλής έντασης στον οποίο πραγματοποιήθηκαν μονά και διαδοχικά περάσματα.

Στον υγρό μαγνήτη υψηλής έντασης έχουν γίνει δοκιμές για την αναλογία υγρών -στερεών στον πολφό που εισάγεται σε αυτόν, με σκοπό τον εντοπισμό της καλύτερης απόδοσής του. Αποδείχθηκε, λοιπόν, ότι η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται με 10% στερεά στον πολφό.

Στο μαγνήτη η ένταση του ρεύματος μετριέται σε Gauss αλλά σύμφωνα με το διάγραμμα που μας δίνεται το μετατρέπουμε σε Ampere.



Εικόνα 18: Διάγραμμα έντασης ρεύματος (Ampere) - Gauss.

Συνεπώς ακολουθούνται οι εντάσεις 1,5 A, 3 A και 6 A που αντιστοιχούν σε 3123, 5948 και 8108 Gauss, όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Το υλικό υποβάλλεται σε διαδοχικά περάσματα αλλά και σε μονά περάσματα.

- Μονά περάσματα

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν παρασκευάστηκαν 3 πολφοί με ίδιες ποσότητες και αναλογίες στερεού/νερού (30g /270 ml) για να περαστούν από το μαγνήτη στις 3 διαφορετικές εντάσεις ρεύματος, 1,5 A, 3 A και 6 A. Από κάθε πέραςμα προκύπτει ένα μαγνητικό και ένα μη μαγνητικό τα οποία ξηραίνονται, ζυγίζονται και φυλάσσονται.

- Διαδοχικά περάσματα

Σε αυτή τη διαδικασία παρασκευάζεται πολφός με ίδια σύσταση όπως στα μονά περάσματα αλλά σε μεγαλύτερη ποσότητα (100g /900 ml), διότι το μαγνητικό από κάθε ένταση γίνεται η τροφοδοσία για την επόμενη ένταση. Ξεκινώντας από τη μεγαλύτερη ένταση, 6 A, προκύπτουν δύο προϊόντα το μη μαγνητικό και το μαγνητικό, που όπως προαναφέρθηκε γίνεται τροφοδοσία για το πέρασμα στα 3 A. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται στις εντάσεις 3 A και 1,5 A. Συνεπώς προέκυψαν συνολικά 4 προϊόντα από τα διαδοχικά περάσματα τα οποία ξηραίνονται, ζυγίζονται και φυλάσσονται.

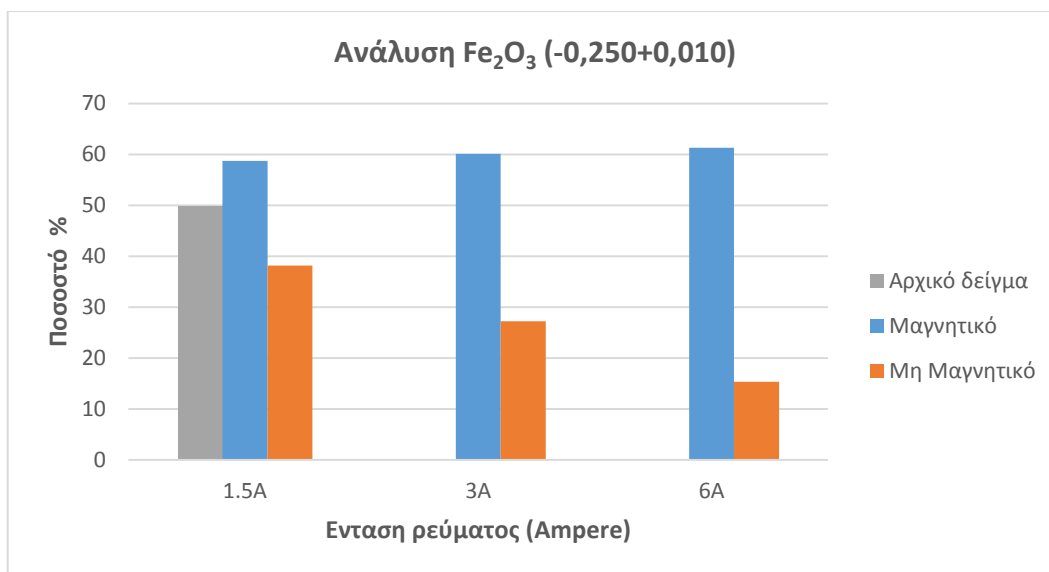


Εικόνα 19: Υγρός μαγνήτης υψηλής έντασης.

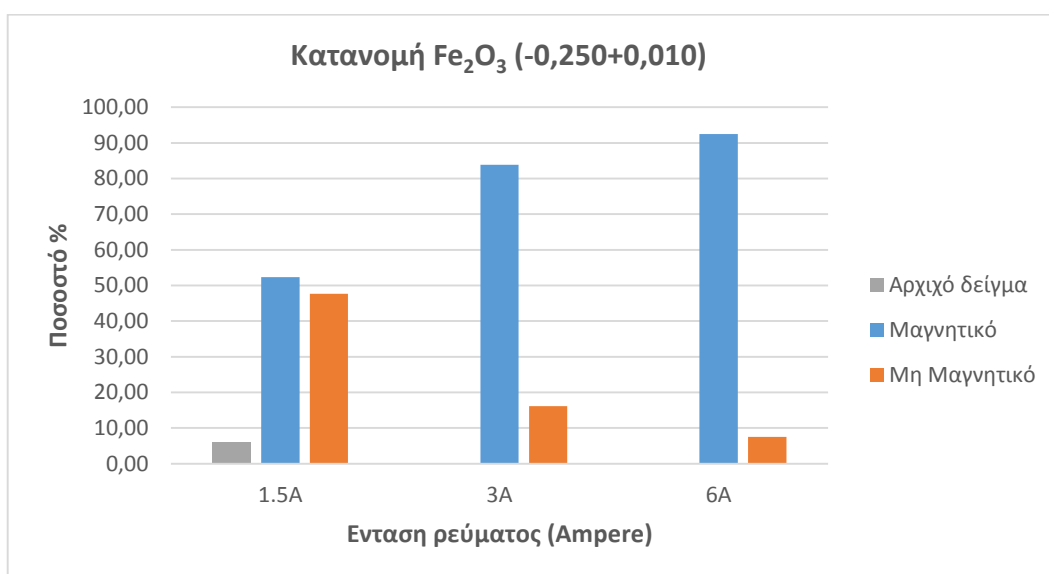
Πίνακας 8: Χημικές αναλύσεις και κατανομή βάρους στα μαγνητικά προϊόντα του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm σε μονά περάσματα.

Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος			Χημικές αναλύσεις					Κατανομή				
	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Βάρος % αρχικού	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)
Μαγνητικό 1,5A	24,6	41,69	2,89	58,73	16,08	7,54	4,06	0,84	52,37	23,33	46,24	52,19	11,78
Μη Μαγνητικό 1,5A	34,4	58,31	4,04	38,19	37,78	6,27	2,66	4,5	47,63	76,67	53,76	47,81	88,22
Σύνολο	59	100	6,92	46,75	28,73	6,80	3,24	2,97	100	100	100	100	100
Μαγνητικό 3A	41,7	70,20	4,86	60,14	14,06	8,32	4,18	1,19	83,87	41,11	63,41	82,84	45,63
Μη Μαγνητικό 3A	17,7	29,80	2,06	27,24	47,45	11,31	2,04	3,34	16,13	58,89	36,59	17,16	54,37
Σύνολο	59,4	100	6,92	50,34	24,01	9,21	3,54	1,83	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Μαγνητικό 6A	44,4	75,51	5,23	61,31	13,49	8,20	4,36	0,99	92,48	41,44	68,77	93,73	37,49
Μη Μαγνητικό 6A	14,4	24,49	1,70	15,38	58,77	11,48	0,90	5,09	7,52	58,56	31,23	6,27	62,51
Σύνολο	58,8	100,00	6,92	50,06	24,58	9,00	3,51	1,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

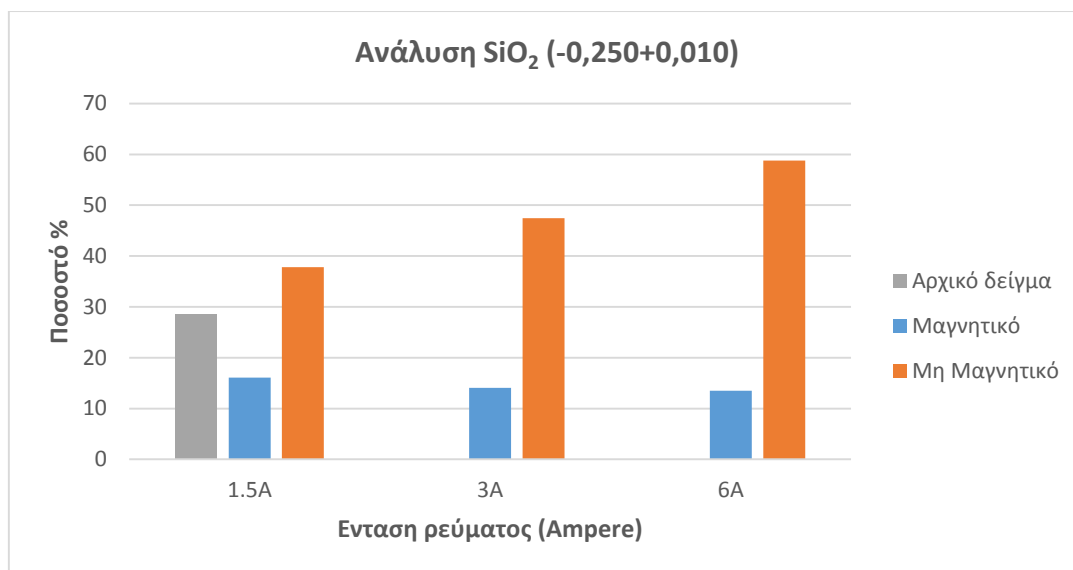
Ο πίνακας 8 παρουσιάζει τις χημικές αναλύσεις και κατανομή βάρους στα μαγνητικά προϊόντα του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010mm σε μονά περάσματα από διαφορετικές εντάσεις ρεύματος. Στην ένταση 6 A παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αύξηση του σιδήρου από 50,06% σε 61,31% (αύξηση 22,47%) με κατανομή 92,48%. Το πυρίτιο μειώθηκε από 24,58% σε 13,49 (μείωση 45,11%) με κατανομή 41,44%. Όσον αφορά τις υπόλοιπες ενώσεις το MnO αυξήθηκε κατά 24,21% ενώ το Al₂O₃ και το CaO μειώθηκαν κατά 8,89% και 50,25% αντίστοιχα. Στα διαγράμματα 9, 11 φαίνονται οι χημικές αναλύσεις και στα διαγράμματα 10,12 οι κατανομές του κλάσματος.



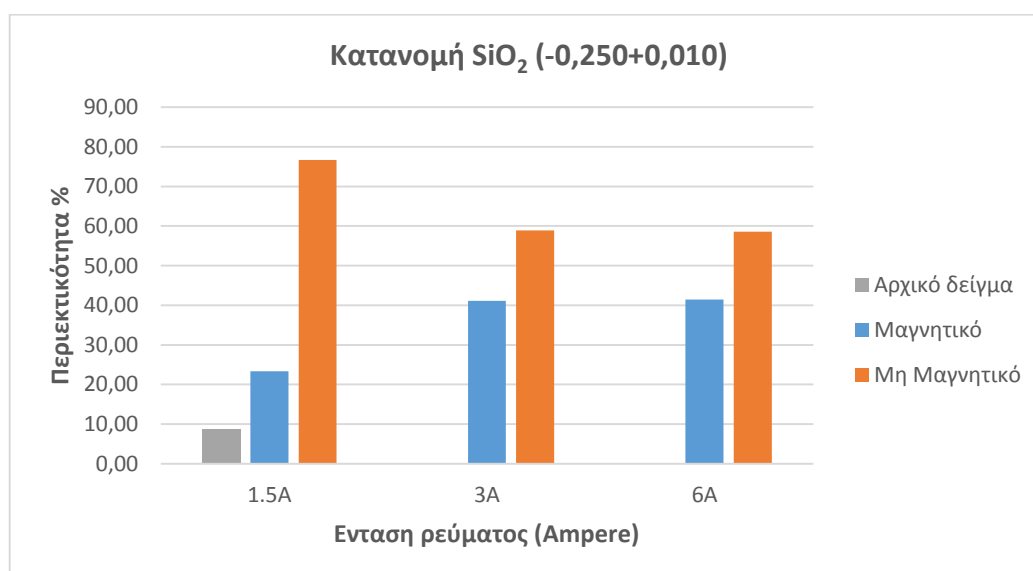
Διάγραμμα 9: Χημική ανάλυση % του Fe_2O_3 των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm (μονά περάσματα).



Διάγραμμα 10: Κατανομή % του Fe_2O_3 των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm (μονά περάσματα).



Διάγραμμα 11: Χημική ανάλυση % του SiO₂ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm (μονά περάσματα).



Διάγραμμα 12: Κατανομή % του SiO₂ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm (μονά περάσματα).

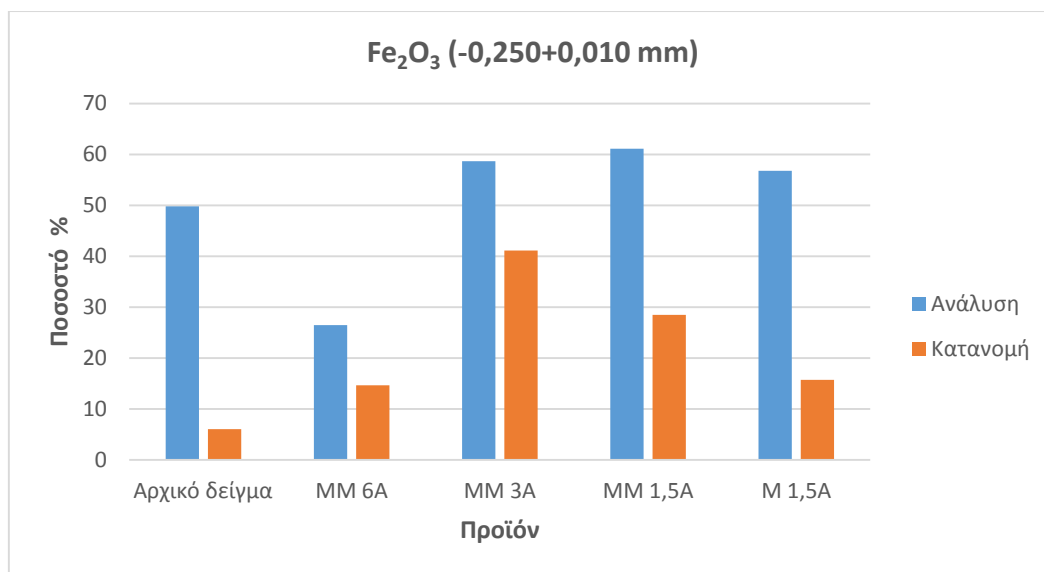
Πίνακας 9: Χημικές αναλύσεις και κατανομή μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010mm στα διαδοχικά περάσματα.

Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος			Χημικές αναλύσεις					Κατανομή				
	Βάρος (g)	Βάρος %	Βάρος % αρχικού	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)
Μη Μαγνητικό 6 A	24,7	27,69	1,92	26,47	49,63	8,33	2,03	4,02	14,64	53,00	33,61	15,57	51,22
Μη Μαγνητικό 3 A	31,3	35,09	2,43	58,66	17,91	5,78	4,17	1,72	41,12	24,24	29,55	40,52	27,77
Μη Μαγνητικό 1,5 A	20,8	23,32	1,61	61,12	13,99	5,82	4,59	1,54	28,47	12,58	19,77	29,64	16,52
Μαγνητικό 1,5 A	12,4	13,90	0,96	56,76	19	8,43	3,71	0,7	15,76	10,19	17,07	14,28	4,48
Σύνολο	89,2	100,00	6,92	50,06	25,93	6,86	3,61	2,17	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

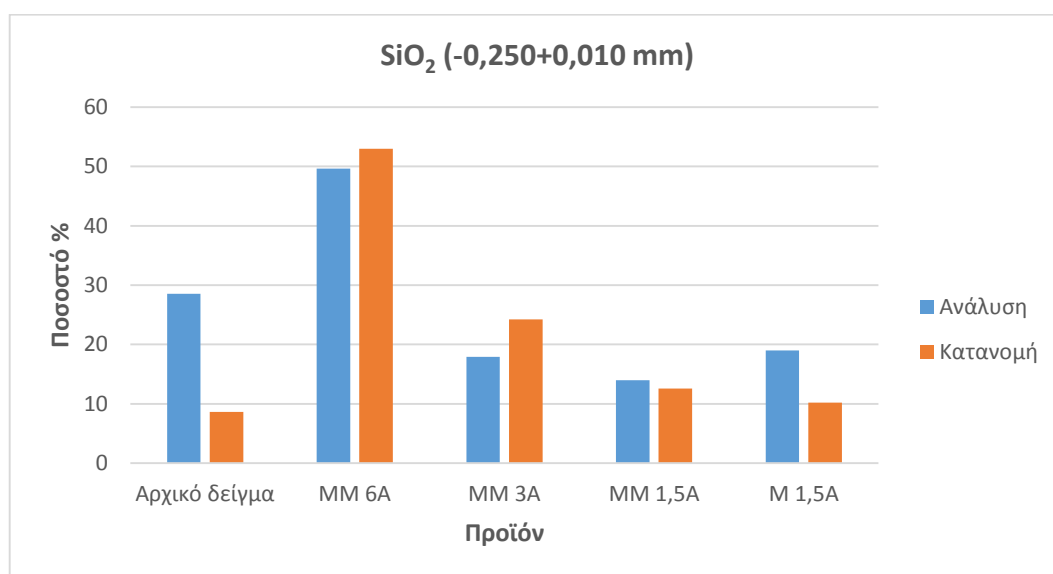
Πίνακας 10: Αθροιστικώς μη μαγνητικά του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010mm.

			Αθρ. Μη Μαγνητικά			
Αριθμός περασμάτων	Προϊόν	Βάρος%	Ανάλυση		Κατανομή	
			Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)
Πέρασμα 1ο	MM 6A	27,69	26,47	49,63	17,38	59,01
Πέρασμα 2ο	MM 3A	62,78	44,46	31,90	66,20	85,99
Πέρασμα 3ο	MM 1,5A	86,10	48,97	27,05	100	100

Στον πίνακα 9 καθώς και στα διαγράμματα 13, 14 παρατηρείται ότι στο αρχικό κλάσμα $-0,250 \pm 0,010$ mm, η περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 αυξήθηκε από 50,06% σε 61,12% (αύξηση 22,09%) με κατανομή 28,47%, ενώ όσον αφορά το SiO_2 , η περιεκτικότητα του μειώθηκε από 25,93% σε 13,99% (μείωση 46,05%) στο Μη μαγνητικού 1,5 A με κατανομή 12,58%. Από τον υπολογισμό των αθροιστικώς μη μαγνητικών του πίνακα 10, παρατηρείται η καλύτερη απόδοση του μαγνητικού διαχωρισμού στο μη μαγνητικό 3 A που φαίνεται η μικρή περιεκτικότητα του πυριτίου στα 31,90% αλλά έχει κατανομή κατά βάρος 85,99%. Το MnO αυξήθηκε στο μη μαγνητικό 1,5 A από 3,61% σε 4,59% (αύξηση 27,15%) με κατανομή βάρους 29,64%.



Διάγραμμα 13: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του Fe₂O₃ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm (διαδοχικά περάσματα).



Διάγραμμα 14: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του SiO₂ των μαγνητικών προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm (διαδοχικά περάσματα).

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΧΟΛΙΑ ΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Από το μαγνητικό διαχωρισμό του κλάσματος -8+4 mm παρατηρήθηκε η μέτρια αναβάθμιση του υλικού σε σίδηρο, κατά 5,47%, όσον αφορά το σύνολο των μαγνητικών προϊόντων, το οποίο όμως ανταποκρίνεται σε μεγάλο μέρος αυτού, με κατανομή 79,09%. Στον πίνακα 5 φαίνεται πως η μεγαλύτερη αναβάθμιση του Fe_2O_3 βρίσκεται στο Μαγνητικό 1 με περιεκτικότητα 62,66% από 53,38% (αύξηση 18%) και κατανομή 6,90%.

Τα επιμέρους μαγνητικά προϊόντα παίρνουν τιμές από 54,88% έως 62,66%. Η μέγιστη κατανομή σιδήρου εντοπίζεται στο 3^ο μαγνητικό προϊόν (45,17%). Σε αντίθεση με το σίδηρο, το πυρίτιο φαίνεται να μειώνεται από το αρχικό 23,79% στο 13,93% του 1^{ου} μαγνητικού προϊόντος κατά 41,44%, όπου παρουσιάζεται και η μικρότερη κατανομή SiO_2 . Τέλος παρατηρήθηκε για τις ενώσεις Al_2O_3 , MnO και CaO μια αύξηση κατά 52,43%, 64,48% και 92,31% αντίστοιχα.

Στο κλάσμα -4+1 mm συγκεντρώθηκε το πλουσιότερο υλικό σε σίδηρο. Διαπιστώθηκε ότι στα συνολικά μαγνητικά προϊόντα η αναβάθμιση του υλικού είναι μικρότερη από αυτή που προκύπτει στα επιμέρους μαγνητικά προϊόντα, δηλαδή παρουσιάζει αύξηση της τάξης 2,44% και μια καλή κατανομή στα 94,03% καθώς ανταποκρίνεται σε βάρος 1411,8 g. Επιπλέον όπως φαίνεται στον πίνακα 6 η μεγαλύτερη αναβάθμιση του Fe_2O_3 , που προέκυψε από το μαγνητικό διαχωρισμό, βρίσκεται στο Μαγνητικό 2 αλλά η κατανομή του σε συνδυασμό με το βάρος που καταλαμβάνει δεν μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Έχοντας καλύτερο διαχωρισμό από το προηγούμενο κλάσμα παρατηρείται πως ο σίδηρος εδώ αυξήθηκε στα μαγνητικά προϊόντα έως και 5,6% αφού το αρχικό ήταν 60,17% και έφτασε ως 63,54% στο 2^ο μαγνητικό προϊόν ενώ το πυρίτιο μειώθηκε από 17,90% σε 13,38% συνεπώς κατά 25,25%. Η μεγαλύτερη κατανομή σιδήρου εντοπίστηκε στο 1^ο μαγνητικό προϊόν και η μικρότερη κατανομή πυριτίου στο 3^ο μαγνητικό προϊόν. Τέλος υπόλοιπες ενώσεις Al_2O_3 , MnO και CaO αυξήθηκαν κατά 2,90%, 28,01% και 3,125% αντίστοιχα.

Παρόμοια αποτελέσματα με το κλάσμα -4+1 mm, όσον αφορά τόσο τη χημική ανάλυση όσο και τις κατανομές για το Fe_2O_3 , παρατηρήθηκαν και στο κλάσμα -1+0,250 mm.

Στο μαγνητικό διαχωρισμό του κλάσματος -1+0,250 mm παρατηρείται ότι η αναβάθμιση των συνολικών μαγνητικών σε σύγκριση με τα επιμέρους μαγνητικά προϊόντα δε διαφέρουν αισθητά. Αυτό διακρίνεται και στο βάρος τους αλλά και στην κατανομή τους.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 7 ο σίδηρος αυξήθηκε από 60,17%, που ήταν η αρχική τιμή, έως και 62,27%, περιεκτικότητα που ανήκει στο 2^ο μαγνητικό προϊόν (αύξηση 3,49%) και η μεγαλύτερη κατανομή είναι στο 1^ο μαγνητικό προϊόν. Από την άλλη το πυρίτιο μειώθηκε σημαντικά κατά 17,37% και η μικρότερη κατανομή του

εντοπίζεται το 2^ο μαγνητικό προϊόν. Τέλος οι υπόλοιπες ενώσεις Al_2O_3 και MnO αυξήθηκαν κατά 1,08% και 11,26% αντίστοιχα ενώ το CaO μειώθηκε κατά 5,88%.

Ο μαγνητικός διαχωρισμός του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm διεξήχθη με δύο τρόπους σε μονά και διαδοχικά περάσματα. Στον πίνακα 8 φαίνονται τα μονά περάσματα από διαφορετικές εντάσεις ρεύματος. Όταν πέρασε το δείγμα από τον υγρό μαγνήτη στην ένταση 1,5 A ο σίδηρος αυξήθηκε κατά 25,63% και το πυρίτιο μειώθηκε σημαντικά κατά 44,03%. Όσον αφορά τις υπόλοιπες ενώσεις παρατηρούμε αύξηση των Al_2O_3 και MnO κατά 10,88% και 25,30% αντίστοιχα ενώ το CaO μειώθηκε κατά 71,71%. Στην ένταση 3 A ο σίδηρος αυξάνεται κατά 19,46% και το πυρίτιο μειώνεται κατά 41,4%. Από τις άλλες ενώσεις το Al_2O_3 και το CaO μειώνονται κατά 9,66% και 34,97% αντίστοιχα ενώ στο MnO παρατηρείται αύξηση κατά 18,08%. Τέλος στην ένταση 6 A παρατηρείται αύξηση του σιδήρου κατά 22,47%, μείωση του πυριτίου κατά 45,11% και από τις υπόλοιπες ενώσεις το MnO αυξήθηκε κατά 24,21% ενώ το Al_2O_3 και το CaO μειώθηκαν κατά 8,89% και 50,25% αντίστοιχα.

Από τις τρεις εντάσεις φαίνεται πως ο καλύτερος εμπλουτισμός σημειώθηκε στην ένταση 6 A, με τη μεγαλύτερη αναβάθμιση του Fe_2O_3 καθώς και τη μεγαλύτερη κατανομή βάρους, 92,48%. Παρατηρώντας την πορεία του εμπλουτισμού του σιδηρομεταλλεύματος αποδείχθηκε πως στην ένταση 6A του -0,250+0,010 mm έχουμε τον καλύτερο διαχωρισμό από όλα τα κλάσματα, διότι συνδυάζει μεγάλη αναβάθμιση σε σίδηρο και μεγάλη κατανομή.

Στον πίνακα 9 φαίνονται τα διαδοχικά περάσματα του κοκκομετρικού κλάσματος -0,250+0,010 mm από τις εντάσεις 1,5 A, 3 A, 6 A. Η τροφοδοσία των διαδοχικών περασμάτων ήταν το μαγνητικό προϊόν. Στο τέλος της διαδικασίας λάβαμε το μαγνητικό 1,5 A που είχε τη μέγιστη αναβάθμιση του σιδήρου κατά 22,09% με κατανομή 28,47%. Το SiO_2 μειώθηκε κατά 46,05% και όσον αφορά τις υπόλοιπες ενώσεις παρατηρήθηκε αύξηση στο MnO και το Al_2O_3 , το CaO μειώθηκε αισθητά.

5.2 Δοκιμή εμπλουτισμού των πλουσιότερων σε σίδηρο μαγνητικών προϊόντων (περιεκτικότητα σε Fe>60%).

Σε αυτή τη φάση χρησιμοποιήθηκαν τα προϊόντα της Α φάσης, που είχαν πάνω από 60% Fe₂O₃. Αυτά ήταν:

- -8 +4 M1
- -4 +1 M1
- -4 +1 M2
- -1 +0,250 M1
- -1 +0,250 M2
- 3 A M
- 6A M
- 1,5 A MM Διαδοχικό

Αυτά τα προϊόντα ενοποιήθηκαν για να λειοτριβηθούν στο ραβδόμυλο εν υγρό για 30 λεπτά. Στο ραβδόμυλο η κοκκομετρία του υλικού έγινε μικρότερη από 250μm. Έπειτα ταξινομήθηκαν στον υδροκυκλώνα, όπου το -0,010mm ξηραίνεται, ζυγίζεται και φυλάσσεται. Το +0,010 mm οδηγείται σε μαγνήτη υψηλής έντασης και υποβάλλεται στη διαδικασία στην οποία παρατηρήθηκε ο καλύτερος διαχωρισμός. Ο καλύτερος διαχωρισμός επιτεύχθηκε στη διαδικασία με τα μονά περάσματα στην ένταση 6 A. Από αυτόν το διαχωρισμό προέκυψε ένα μαγνητικό και ένα μη μαγνητικό προϊόν τα οποία ξηράθηκαν, ζυγίστηκαν και φυλάχθηκαν.

Πίνακας 11: Βάρος, κατανομή βάρους και περιεκτικότητα σε Fe₂O₃ μαγνητικών προϊόντων.

Κοκκομ. Κλ. (mm)	Μαγνητικά Προϊόντα	Βάρος (g)	Βάρος %	Fe ₂ O ₃ (%)
-8+4	Μαγνητικό 1	151,6	7,37	62,66
-4+1	Μαγνητικό 1	991,5	48,23	60,81
	Μαγνητικό 2	420,3	20,44	63,54
-1+0,250	Μαγνητικό 1	285	13,86	61,86
	Μαγνητικό 2	100,6	4,89	62,27
-0,250+0,010	Μαγνητικό 3A	41,7	2,03	60,14
	Μαγνητικό 6A	44,4	2,16	61,31
	Μη Μαγνητικό Διαδοχικό 1,5A	20,8	1,01	61,12
	ΣΥΝΟΛΟ	2055,9	100	

Πίνακας 124: Κατανομή βάρους των ενοποιημένων μαγνητικών προϊόντων.

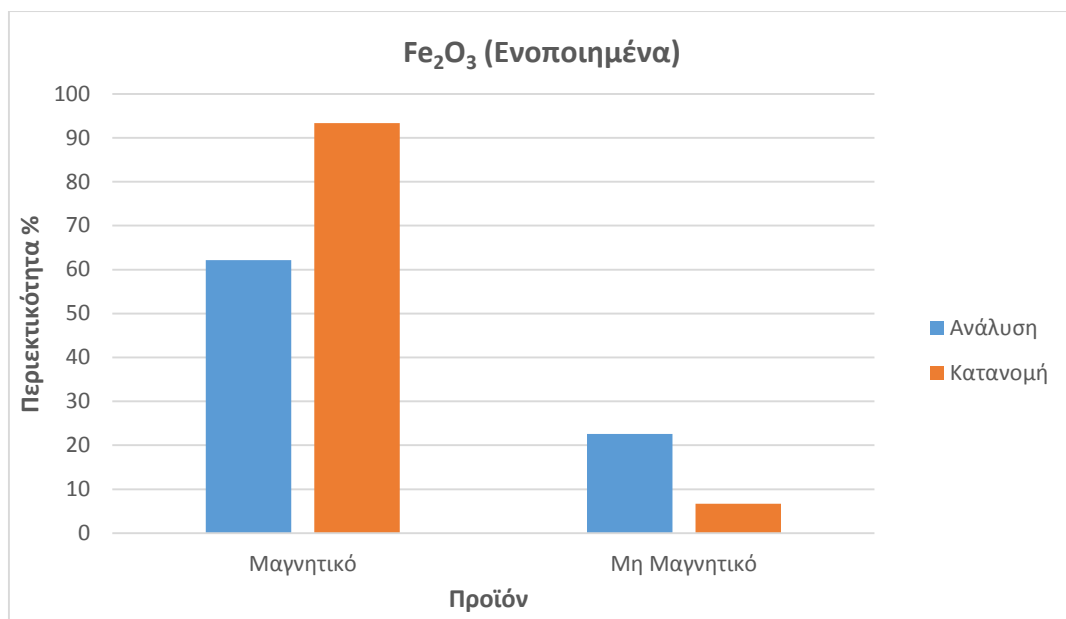
Προϊόντα εμπλουτισμού (mm)	Βάρος(g)	Βάρος %	Βάρος % αρχικού	Fe ₂ O ₃ (%)
+0,010	820,4	87,96	37,51	84,68
-0,010	112,3	12,04	5,14	56,58
Σύνολο	932,7	100		

Από το σύνολο των μαγνητικών προϊόντων πήραμε ένα μόνο μέρος για τον εμπλουτισμό του.

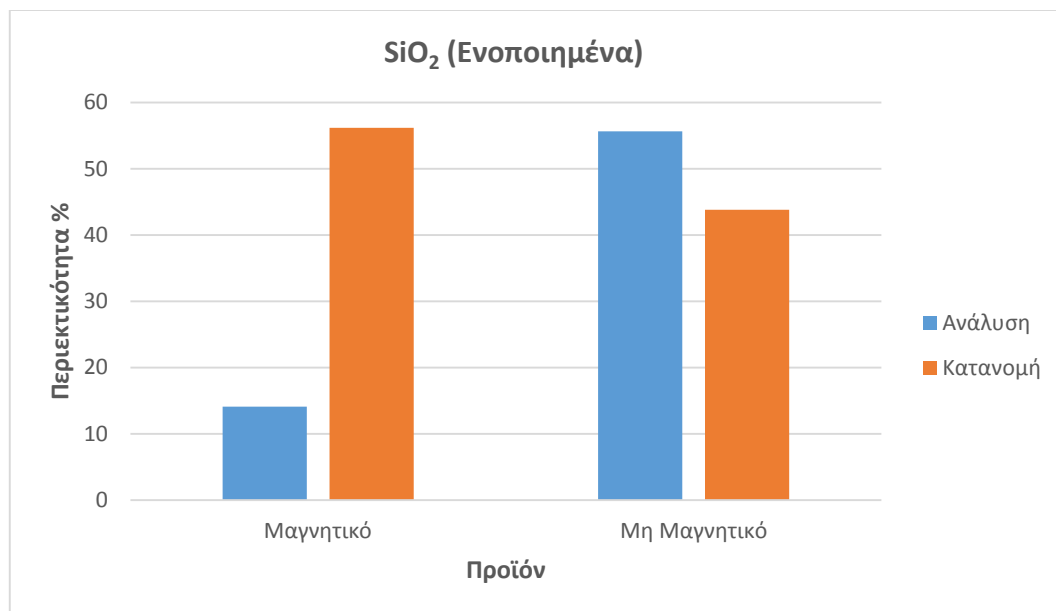
Πίνακας 13: Χημικές αναλύσεις και κατανομή μαγνητικών προϊόντων των ενοποιημένων μαγνητικών προϊόντων.

Προϊόντα εμπλουτισμού	Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος			Χημικές αναλύσεις					Κατανομή				
		Βάρος (g)	Βάρος (%)	Βάρος % αρχικού	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)
(+0,010)	Μαγνητικό 6A	52,30	83,55	31,34	62,13	14,07	1,77	5,67	0,38	93,33	56,20	83,39	94,36	67,24
	Μη Μαγνητικό 6A	10,30	16,45	6,17	22,55	55,67	1,79	1,72	0,94	6,67	43,80	16,61	5,64	32,76
	Σύνολο	62,60	100,00	37,51	55,62	20,91	1,77	5,02	0,47	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Στον πίνακα 13 όπως και στα διαγράμματα 15, 16 φαίνονται οι χημικές αναλύσεις και η κατανομή μαγνητικών προϊόντων των ενοποιημένων μαγνητικών προϊόντων. Παρατηρείται μικρή αύξηση του σιδήρου από 55,62% σε 62,13% (αύξηση 11,70%) με κατανομή 93,33%, ενώ το πυρίτιο μειώνεται σημαντικά, κατά 32,71%, από 20,91% σε 14,07% με κατανομή 56,20%. Ακόμη φαίνεται η αύξηση του MnO που είναι 12,95% με κατανομή 94,36% καθώς και τη μείωση του CaO κατά 19,15%.



Διάγραμμα 15: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του Fe₂O₃ των μαγνητικών προϊόντων των ενοποιημένων μαγνητικών.



Διάγραμμα 16: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του SiO₂ των μαγνητικών προϊόντων των ενοποιημένων μαγνητικών.

5.3 Δοκιμή εμπλουτισμού του αρχικού δείγματος μέσω υδροκυκλώνα.

Από την αρχική διαίρεση του υλικού έχουμε κρατήσει το Δείγμα Δ (1/4) στην άκρη. Από αυτό λήφθηκε ποσότητα ίση με αυτήν που προέκυψε από την ενοποίηση των μαγνητικών προϊόντων (B φάση) μέσω του δειγματολήπτη Jones. Το αρχικό δείγμα Δ λόγω μεγάλης κοκκομετρίας (-8mm) λειοτριβείται στο ραβδόμυλο εν υγρό για 30 λεπτά ώστε να προκύψει κοκκομετρία μικρότερη των 250 μm. Έπειτα ταξινομείται στον υδροκυκλώνα, όπου το -0,010mm ξηραίνεται, ζυγίζεται και φυλάσσεται, ενώ το +0,010 mm οδηγείται σε μαγνήτη υψηλής έντασης. Εκεί υποβάλλεται στη διαδικασία στην οποία φάνηκε ο καλύτερος διαχωρισμός, δηλαδή σε αυτήν με τα μονά περάσματα στην ένταση 6A. Από αυτόν το διαχωρισμό προέκυψε ένα μαγνητικό και ένα μη μαγνητικό προϊόν τα οποία ξηραθήκαν, ζυγίστηκαν και φυλάχθηκαν.

Στον πίνακα 14 φαίνονται οι ποσότητες των προϊόντων που προέκυψαν από την ταξινόμηση του αρχικού υλικού στον υδροκυκλώνα. Παρατηρούμε ότι από το ραβδόμυλο βγήκε το μεγαλύτερο ποσοστό του υλικού να έχει κοκκομετρία -0,250 + 0,010mm.

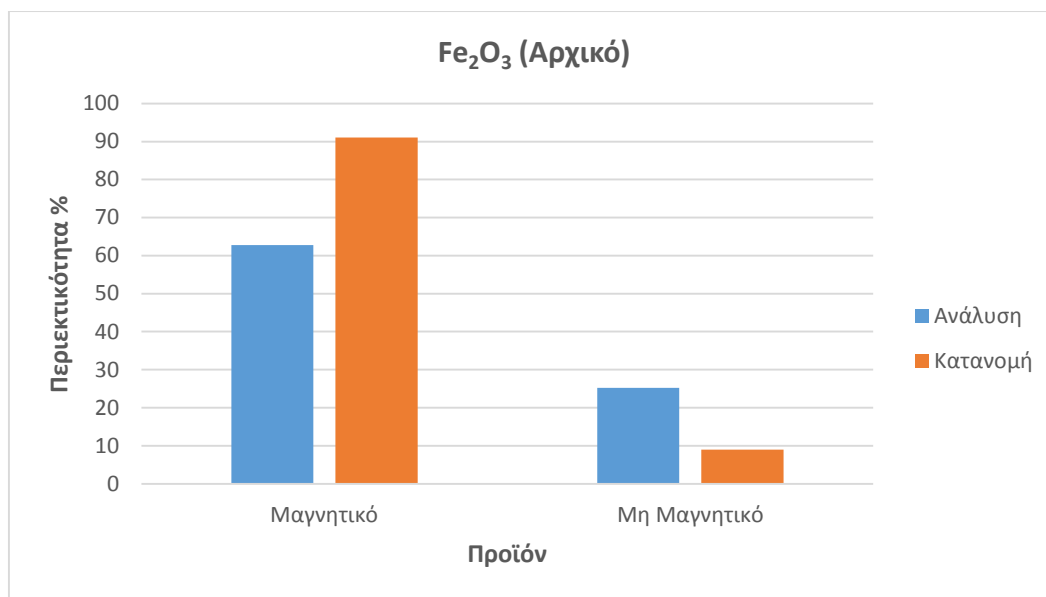
Πίνακας 14: Βάρος και κατανομή βάρους αρχικού υλικού Δ.

Προϊόντα υδροκυκλώνα (mm)	Βάρος (g)	Βάρος %	Fe ₂ O ₃ (%)
+0,010	812,7	86,5	87,95
-0,010	127,2	13,5	57,22
Σύνολο	939,9	100	

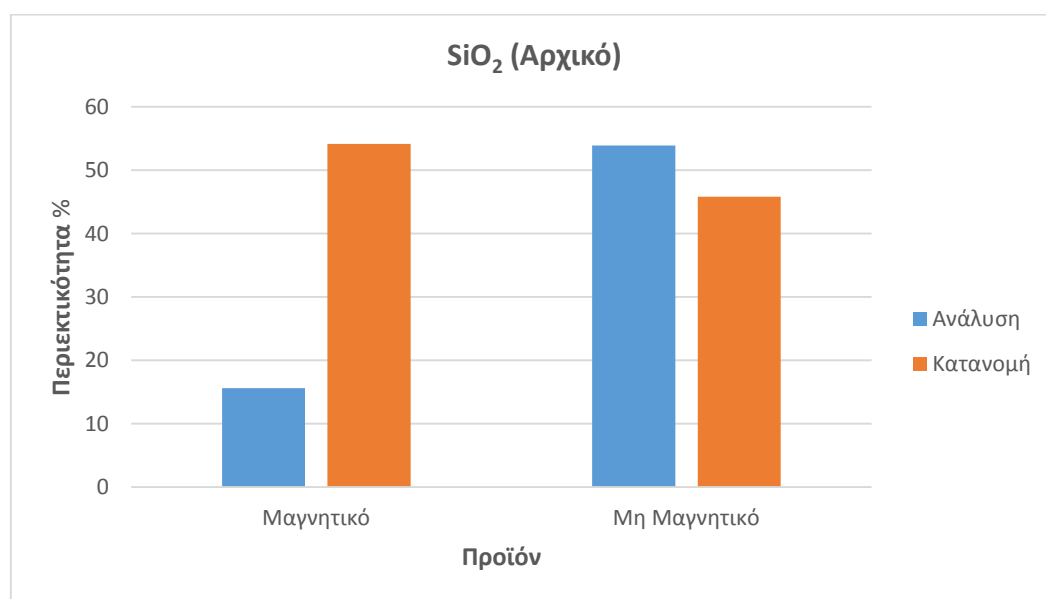
Πίνακας 15: Χημικές αναλύσεις και κατανομή των μαγνητικών προϊόντων του αρχικού δείγματος Δ.

Προϊόντα εμπλουτισμού	Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος			Χημικές αναλύσεις					Κατανομή				
		Βάρος (g)	Βάρος (%)	Βάρος % αρχικού	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)
(+0,010)	Μαγνητικό 6A	47,8	80,34	69,49	62,74	15,60	1,85	4,75	0,41	91,05	54,17	80,51	92,03	62,38
	Μη Μαγνητικό 6A	11,7	19,66	17,01	25,21	53,92	1,83	1,68	1,01	8,95	45,83	19,49	7,97	37,62
	Σύνολο	59,5	100,00		55,36	23,14	1,85	4,15	0,53	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Ο πίνακας 15 και τα διαγράμματα 17, 18 παρουσιάζουν τις χημικές αναλύσεις και την κατανομή των μαγνητικών προϊόντων του αρχικού δείγματος Δ. Παρατηρείται ότι ο σίδηρος αυξάνεται από 55,36% σε 62,74% (αύξηση 13,33%) με κατανομή 91,05%, ενώ το πυρίτιο μειώνεται από 23,14% σε 15,60% (μείωση 32,58%) με κατανομή 54,17%. Το MnO αυξήθηκε κατά 14,46% με κατανομή 92,03% καθώς σημαντική μείωση σημείωσε το CaO με 22,64%.



Διάγραμμα 17: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του Fe₂O₃ των μαγνητικών προϊόντων του αρχικού υλικού Δ.



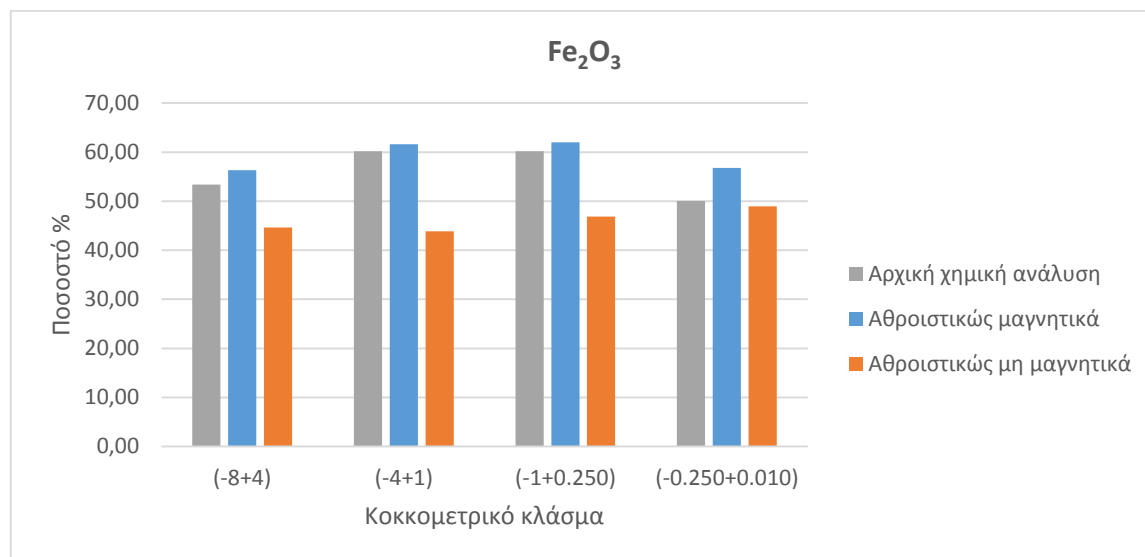
Διάγραμμα 18: Χημική ανάλυση % και κατανομή % του SiO₂ των μαγνητικών προϊόντων του αρχικού υλικού Δ.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

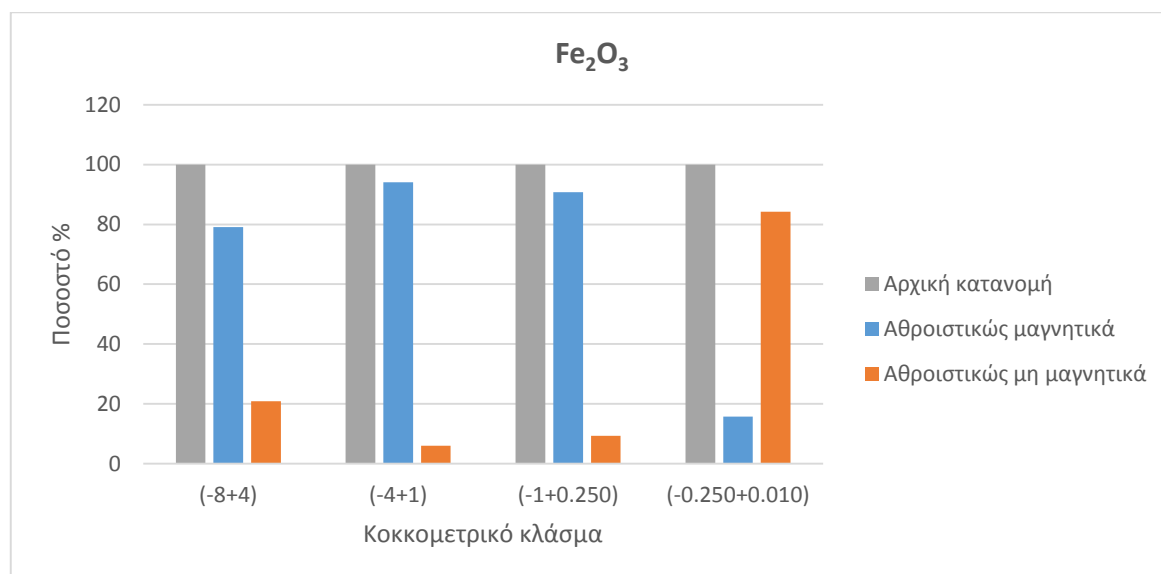
Όσον αφορά τη σύγκριση των 3 διαφορετικών φάσεων του εμπλουτισμού τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν παραπλήσια, λόγω του ότι το υλικό που επεξεργαστήκαμε ήταν ήδη αρκετά πλούσιο σε σίδηρο. Στη φάση Α τα καλύτερα αποτελέσματα φαίνονται στο μαγνητικό προϊόν του κλάσματος $-0,250+0,010$ mm με μονά περάσματα στην ενταση 6 A, με χημική ανάλυση 61,31% σε σίδηρο με κατανομή 92,48%. Στη φάση Β ο σίδηρος αναβαθμίστηκε στο 62,13% με κατανομή 93,33%, ενώ παραπλήσια ήταν και η αναβάθμιση στη φάση Γ με 62,74% με κατανομή 91,05%. Το μετάλλευμα δεν εμπλουτίστηκε ιδιαίτερα, όμως οι διεργασίες που ακολουθήσαμε σε κάθε φάση είχαν ένα ενεργειακό κόστος το οποίο διαφοροποιούνταν.

5.4 Περιεκτικότητα των κοκκομετρικών κλασμάτων σε Fe_2O_3 και SiO_2 .

Στα σχήματα παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις και οι κατανομές, των Fe_2O_3 και SiO_2 , των αθροιστικώς μαγνητικών και αθροιστικώς μη μαγνητικών στα κοκκομετρικά κλάσματα.

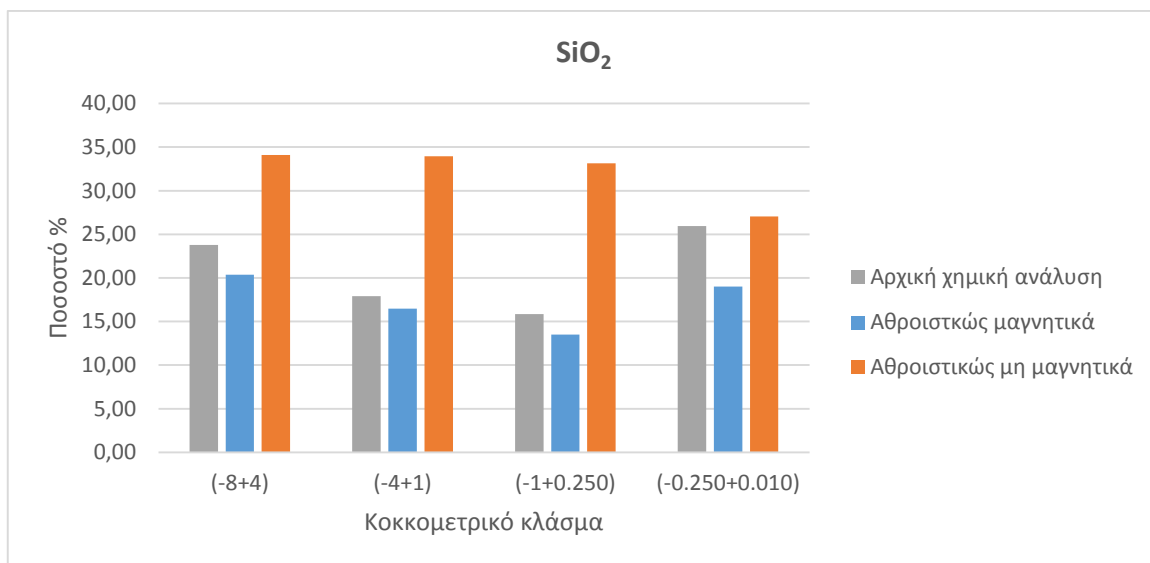


Διάγραμμα 19: Περιεκτικότητα Fe_2O_3 % στην αρχική χημική ανάλυση, στα αθροιστικώς μαγνητικά και μη μαγνητικά των κοκκομετρικών κλασμάτων.

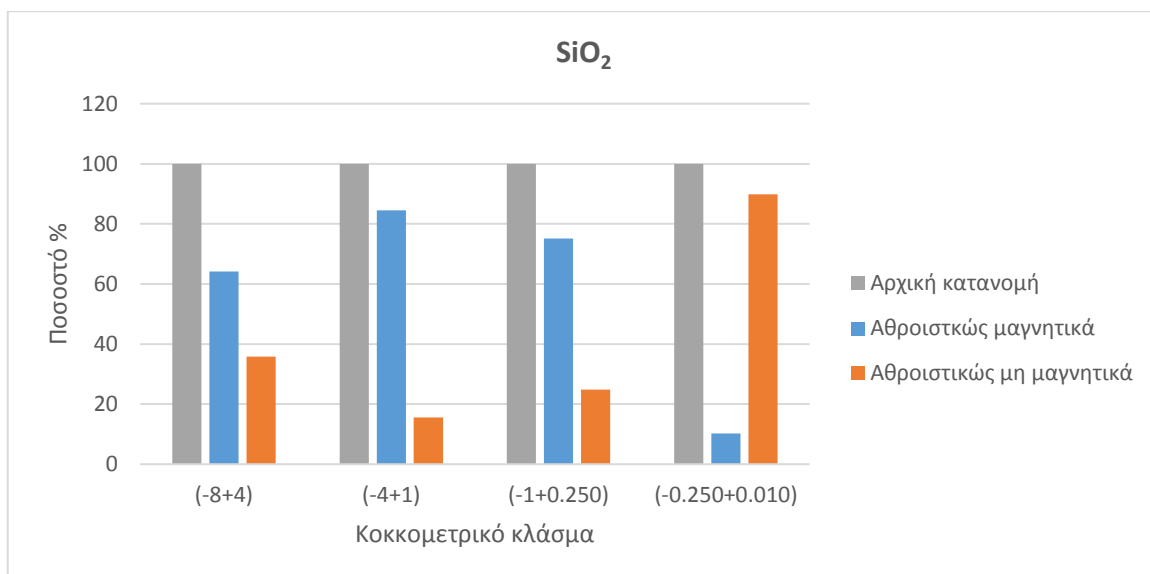


Διάγραμμα 20: Ποσοστό Fe_2O_3 % στην αρχική κατανομή, στα αθροιστικώς μαγνητικά και μη μαγνητικά των κοκκομετρικών κλασμάτων

Στα διαγράμματα 19, 20 φαίνεται πως ο σίδηρος συγκεντρώνεται στα αθροιστικώς μαγνητικά στα ενδιάμεσα κλάσματα, -4+1mm και -1+0,250mm. Τα κλάσματα αυτά έχουν χημική ανάλυση 61,62% και 61,97%, με πολύ καλές κατανομές που φτάνουν τα 94,03% και 90,74% αντιστοίχως. Στα τέσσερα κοκκομετρικά κλάσματα η περιεκτικότητά τους σε Fe_2O_3 στα αθροιστικώς μη μαγνητικά κυμαίνονται από 48,97% έως 43,86%.



Διάγραμμα 21: Περιεκτικότητα SiO₂ % στην αρχική χημική ανάλυση, στα αθροιστικώς μαγνητικά και μη μαγνητικά των κοκκομετρικών κλασμάτων.



Διάγραμμα 22: Ποσοστό SiO₂ % στην αρχική κατανομή, στα αθροιστικώς μαγνητικά και μη μαγνητικά των κοκκομετρικών κλασμάτων.

Όσον αφορά την περιεκτικότητα του SiO₂ και την κατανομή του στα κλάσματα παρατηρήθηκε πως στα διαγράμματα 21, 22 ότι οι τιμές που λαμβάνει είναι από 20,35% έως 13,50% στα αθροιστικώς μαγνητικά. Μεγαλύτερες τιμές αναμένονταν στα αθροιστικώς μη μαγνητικά όπως και είναι, καθώς κυμαίνονται από 34,09% έως 27,04%. Το πυρίτιο συγκεντρώνεται στα αθροιστικώς μη μαγνητικά στο μικρότερο κοκκομετρικό κλάσμα -0,250+0,010 mm με μικρή

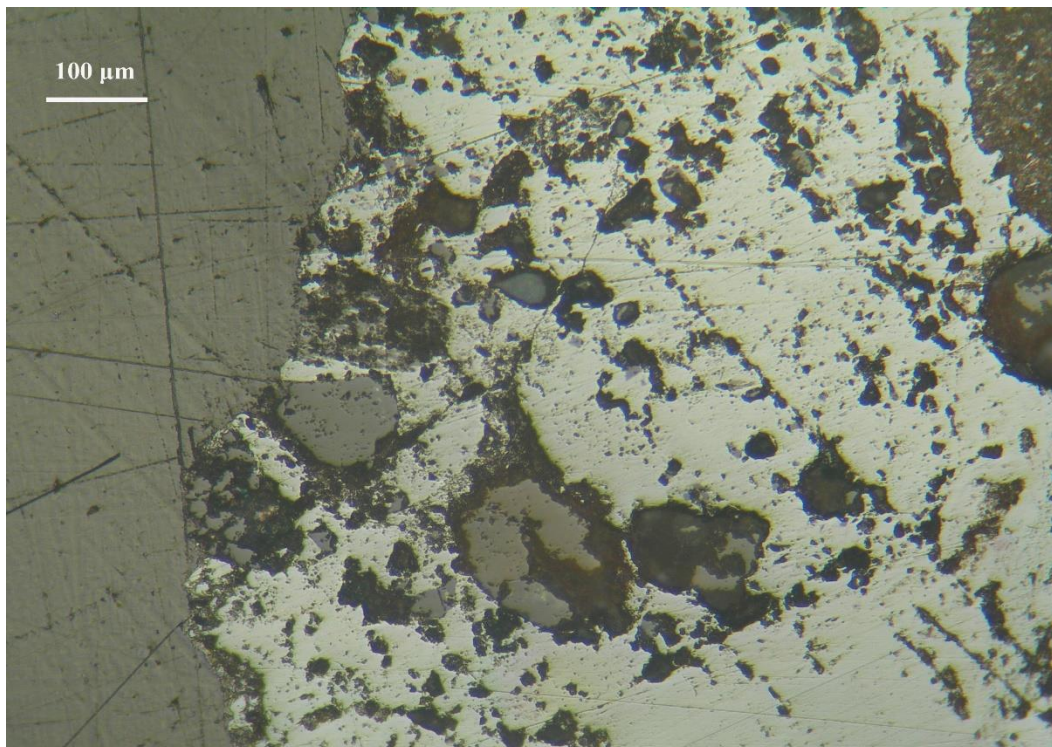
χημική ανάλυση συγκριτικά με τα υπόλοιπα κλάσματα, 27,04%, αλλά με τη μέγιστη κατανομή κατά βάρος που φτάνει στα 89,8%.

5.5 Μικροσκοπική εξέταση προϊόντων της δοκιμής του μαγνητικού εμπλουτισμού

- Κοκκομετρικό κλάσμα -8+4 mm:

Μαγνητικό προϊόν 2:

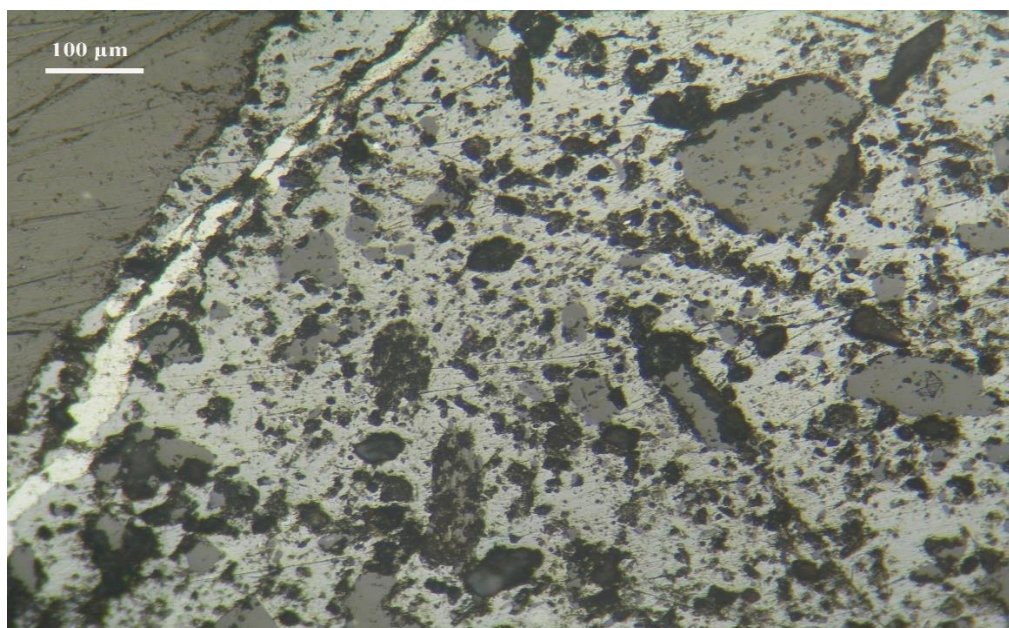
Παρατηρείται μεγάλη μάζα γκαιτίτη ενώ ευδιάκριτα είναι τα συσσωματώματα γκαιτίτη-χαλαζία.



Εικόνα 20: Μη αποδεσμευμένοι κόκκοι γκαιτίτη-χαλαζία. Κοκκομετρικό κλάσμα -8+4mm- 2^ο μαγνητικό προϊόν, ανακλώμενο φως // Nicols.

Μη μαγνητικό προϊόν :

Παρατηρούνται συσσωματώματα γκαϊτίτη με εγκλείσματα χαλαζία που συνυπάρχουν με κρυπτομέλανα.



Εικόνα 21: Μη αποδεσμευμένοι κόκκοι γκαϊτίτη- χαλαζία και κρυπτομέλανας. Κοκκομετρικό κλάσμα -8+4mm-μη μαγνητικό προϊόν, ανακλώμενο φως // Nicols.

- Κοκκομετρικό κλάσμα -4+1 mm:

Μη μαγνητικό προϊόν:

Παρατηρούνται κόκκοι χαλαζία με μη αποδεσμευμένο γκαϊτιτικό υλικό.



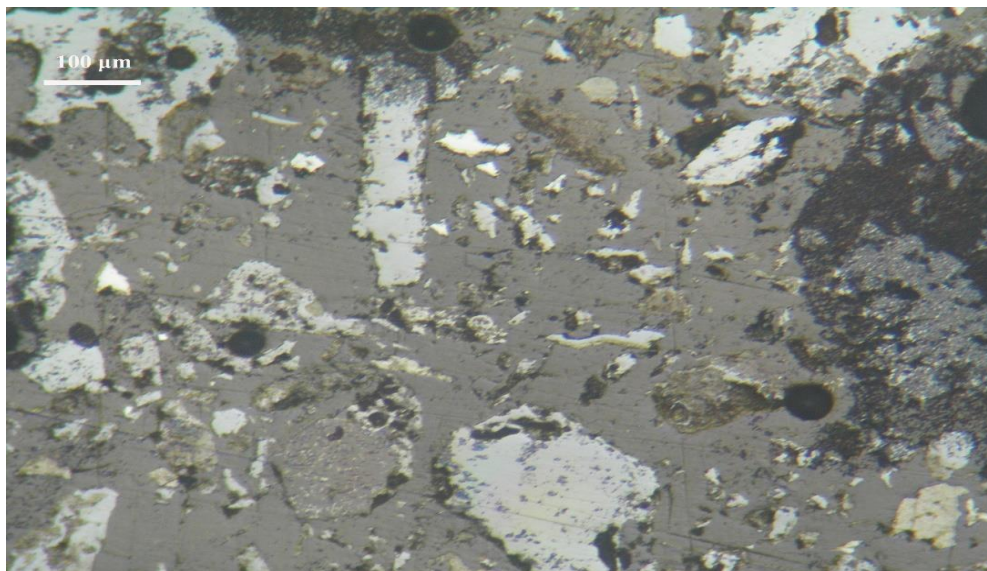
Εικόνα 22: Μη αποδεσμευμένος χαλαζίας με εγκλείσματα γκαϊτιτικού υλικού. Κοκκομετρικό κλάσμα -4+1mm-μη μαγνητικό προϊόν, ανακλώμενο φως // Nicols.

- Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250 + 0,010$ mm (Μονά περάσματα) :

Ένταση μαγνήτη 6 A

Μαγνητικό προϊόν:

Παρατηρούνται ευδιάκριτοι κόκκοι χαλαζία, κόκκοι γκαιτίτη και κρυπτομέλανα.



Εικόνα 23: Αποδεσμευμένοι κόκκοι χαλαζία- γκαιτίτη και κρυπτομέλανα. Κοκκομετρικό κλάσμα - $0,250 + 0,010$ mm-μαγνητικό προϊόν έντασης 6A, ανακλώμενο φως // Nicols.

Μη μαγνητικό προϊόν:

Παρατηρείται ως επί το πλείστον μη μαγνητικό χαλαζιακό υλικό αλλά υπάρχουν υπολείμματα γκαιτίτη.

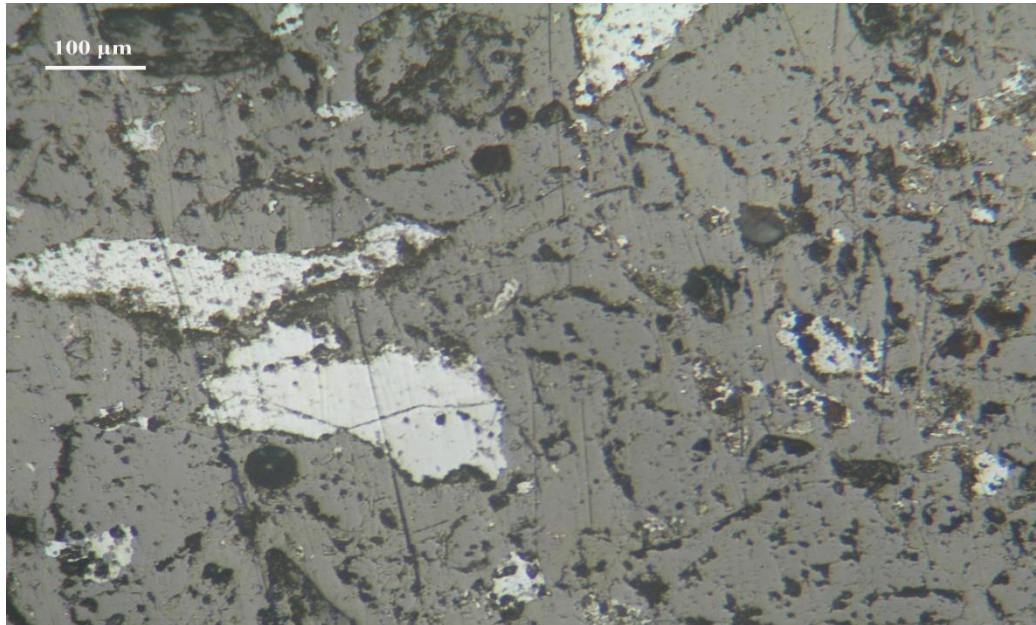


Εικόνα 24: Κόκκοι γκαιτίτη. Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250 + 0,010$ mm-μη μαγνητικό προϊόν έντασης 6A, ανακλώμενο φως // Nicols.

Ένταση μαγνήτη 3 A

Μη μαγνητικό προϊόν:

Παρατηρούνται κόκκοι χαλαζία και κόκκοι γκαιτίτη.

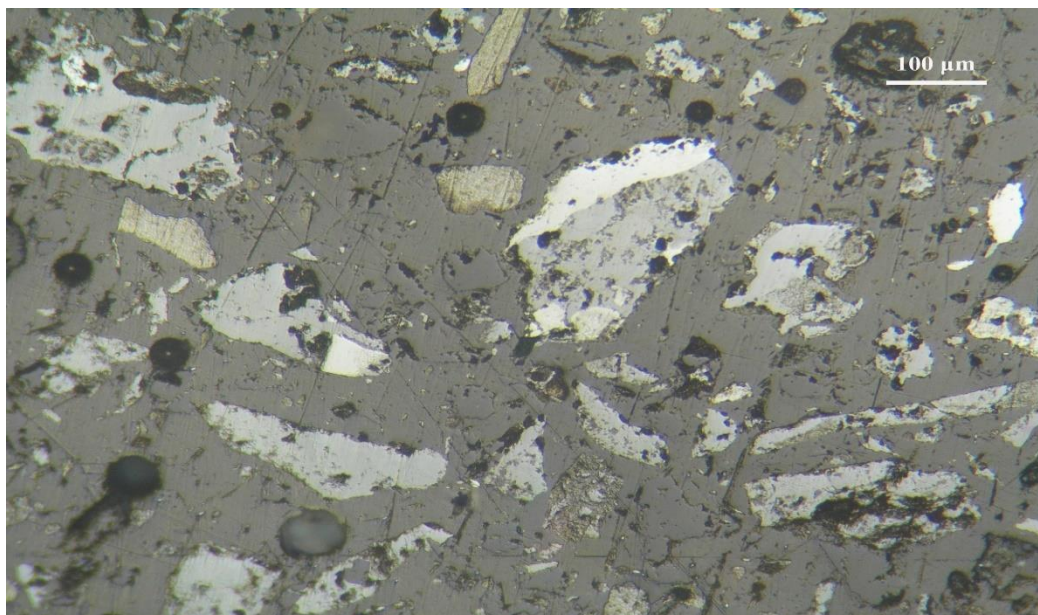


Εικόνα 25: Αποδεσμευμένοι κόκκοι χαλαζία- γκαιτίτη. Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250+0,010\text{mm}$ -μη μαγνητικό προϊόν έντασης 3A, ανακλώμενο φως // Nicols.

Ένταση μαγνήτη 1,5 A

Μη μαγνητικό προϊόν:

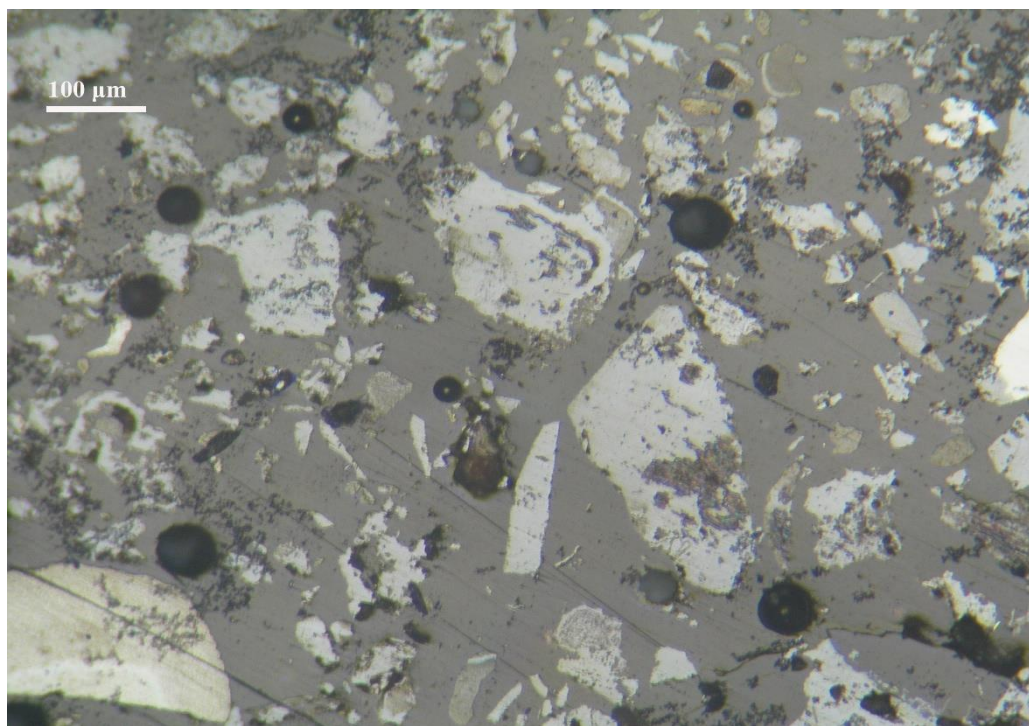
Παρατηρούνται ίχνη χαλαζία και συσσωματώματα γκαιτίτη - κρυπτομέλανα.



Εικόνα 26: Μερικώς αποδεσμευμένοι κόκκοι γκαιτίτη - κρυπτομέλανα και ίχνη χαλαζία. Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250+0,010\text{mm}$ -μη μαγνητικό προϊόν έντασης 1,5A, ανακλώμενο φως // Nicols.

- Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250 + 0,010$ mm (Διαδοχικά περάσματα) :

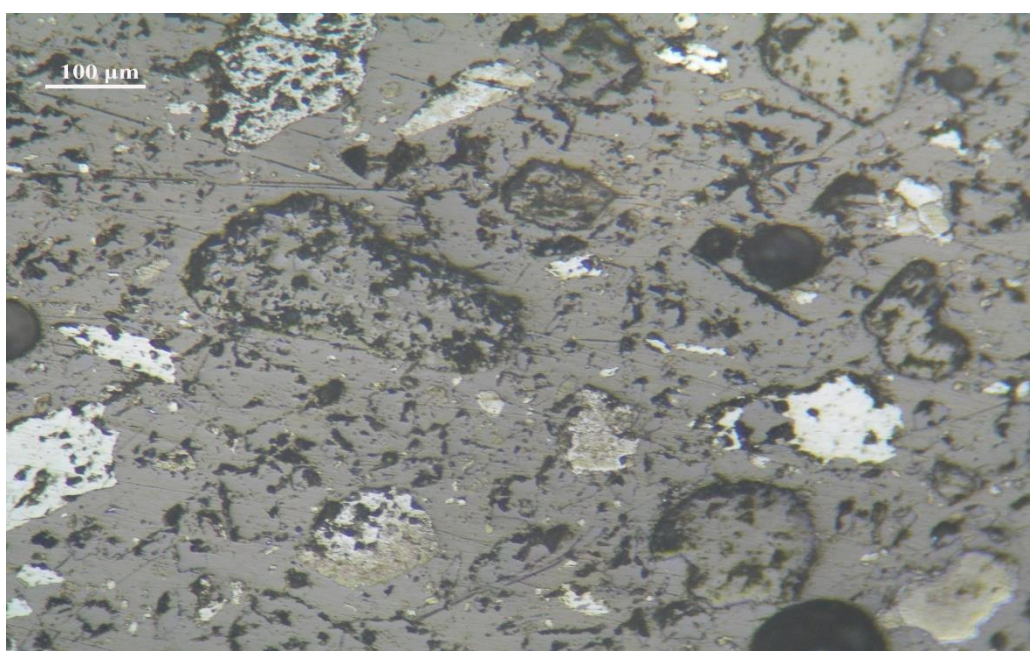
Μαγνητικό προϊόν:



Εικόνα 27: Αποδεσμευμένοι κόκκοι γκαϊτίτη - κρυπτομέλανα. Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250 + 0,010$ mm-μαγνητικό προϊόν διαδοχικών περασμάτων, ανακλώμενο φως // Nicols.

Μη μαγνητικό προϊόν 1 (6A):

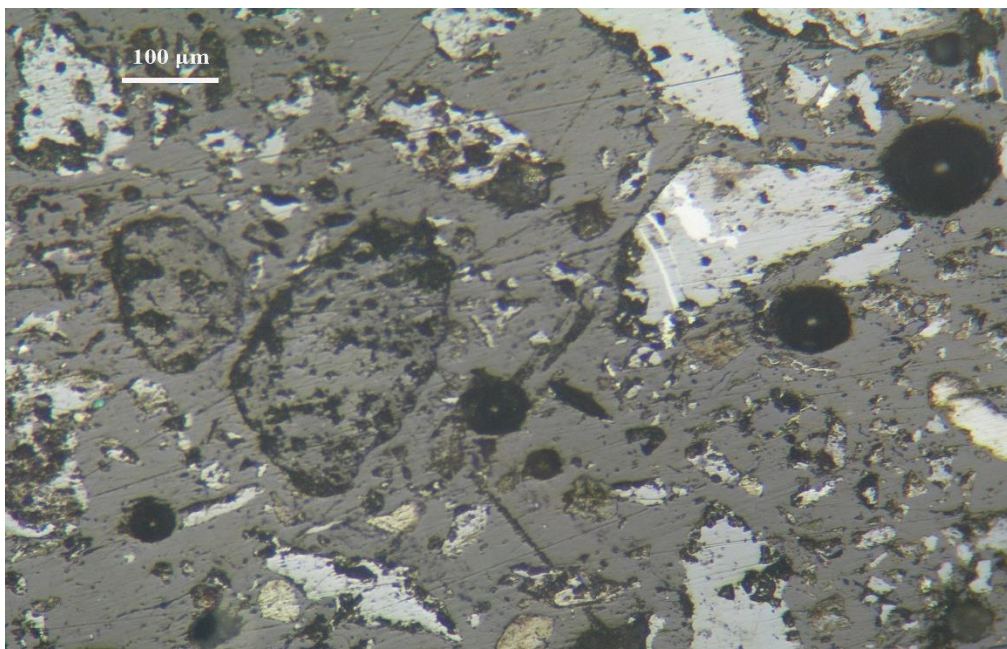
Παρατηρούνται κόκκοι γκαϊτίτη και χαλαζία που έχουν αποδεσμευθεί.



Εικόνα 28: Αποδεσμευμένοι κόκκοι χαλαζία και γκαϊτίτη. Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250 + 0,010$ mm-μη μαγνητικό προϊόν έντασης 6A διαδοχικών περασμάτων, ανακλώμενο φως // Nicols.

Μη μαγνητικό προϊόν 2 (3A):

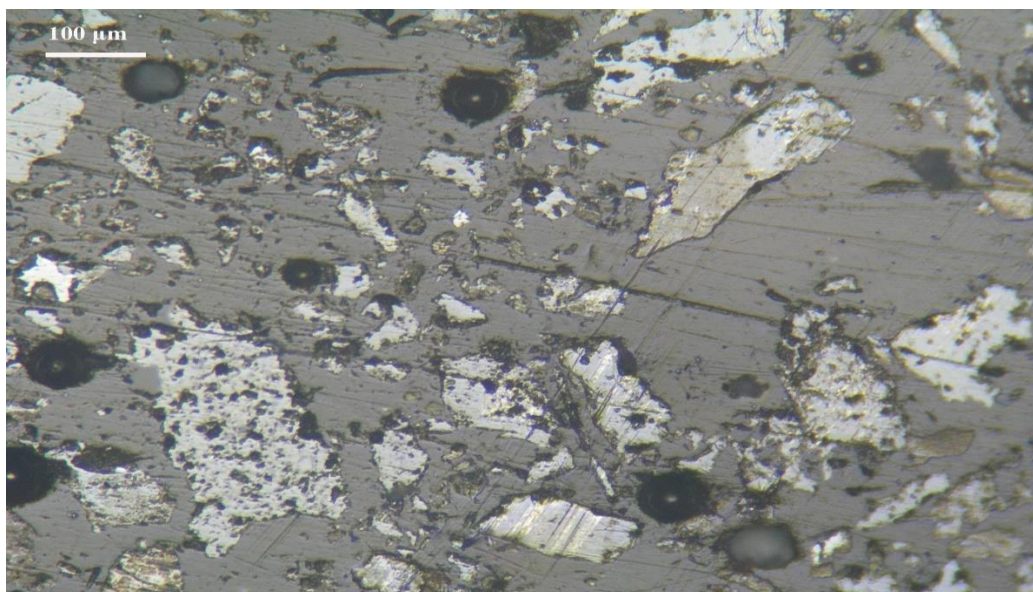
Παρατηρούνται οι δυο καταστάσεις που συνυπάρχουν, πρώτα οι αποδεσμευμένοι κόκκοι χαλαζία-γκαιίτη και έπειτα το μη αποδεσμευμένο υλικό γκαίιτη-κρυπτομέλανα.



Εικόνα 29: Μερικώς αποδεσμευμένοι κόκκοι χαλαζία και γκαίιτη με υπολείμματα κρυπτομέλανα. Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250+0,010\text{mm}$ -μη μαγνητικό προϊόν έντασης 3A διαδοχικών περασμάτων, ανακλώμενο φως // Nicols.

Μη μαγνητικό προϊόν 3 (1,5A):

Παρατηρούνται μερικώς αποδεσμευμένοι κόκκοι γκαίιτη-χαλαζία.



Εικόνα 30: Μερικώς αποδέσμευση γκαίιτη – χαλαζία. Κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250+0,010\text{mm}$ -μη μαγνητικό προϊόν έντασης 1,5A διαδοχικών περασμάτων, ανακλώμενο φως // Nicols.

6. Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα ορυκτολογικής και μικροσκοπικής εξέτασης σιδηρομεταλλεύματος.

- Το σιδηρομετάλλευμα της περιοχής Κακόπετρου στο Νομό Χανίων απαντάται επάνω σε στρώμα φυλλιτών-χαλαζιτών και καλύπτεται από ασβεστίτικα κροκαλοπαγή ηλικίας μειόκαινου. Η ανάπτυξη του λειμωνιτικού μεταλλεύματος, πάνω στα προαναφερόμενα πετρώματα, εμφανίζεται με τη μορφή κοίτης εύρους 50 μέτρων.
- Τα ορυκτολογικά συστατικά του σιδηρομεταλλεύματος είναι κυρίως γκαιτίτης, χαλαζίας και δευτερευόντως κρυπτομέλανας, αιματίτης και σε κάποιες περιπτώσεις ασβεστίτης.
- Όπως παρατηρήθηκε στη μικροσκοπική εξέταση η δομή του σιδηρομεταλλεύματος εμφανίζεται ως εμπλεκτική διακοκκώδης. Η μεταλλοφορία του γκαιτίτη και του κρυπτομέλανα τείνουν να αντικαταστήσουν το συνδετικό υλικό του μητρικού πετρώματος.
- Οι χημικές αναλύσεις των αρχικών δειγμάτων έδειξαν πως η περιεκτικότητα του μεταλλεύματος σε Fe_3O_2 κατά μέσο όρο είναι 62,34%, σε SiO_2 είναι 15,22% και για το MnO είναι 5,73% .

6.2 Συμπεράσματα εμπλουτισμού

Οι δοκιμές του μαγνητικού διαχωρισμού μας έδειξαν πως το σιδηρομετάλλευμα της περιοχής Κακόπετρου δεν έχει δυνατότητες να εμπλουτιστεί ιδιαίτερα, καθώς η περιεκτικότητα του Fe_3O_2 είναι ήδη αρκετά υψηλή. Αντιθέτως το SiO_2 απομακρύνεται σε ποσοστά έως και περίπου 50% στο απόρριμμα. Πιο συγκεκριμένα η καλύτερη απόδοση του μαγνητικού διαχωρισμού στην Α φάση φαίνεται σε ένα μαγνητικό προϊόν από τα λεπτόκοκκα κλάσματα, στο προϊόν του -0,250+0,010 mm στα μονά περάσματα με ένταση 6A, με χημική ανάλυση 61,31% και κατανομή 92,48 %. Στη Β φάση εμπλουτίζοντας το πιο πλούσια, σε σίδηρο, προϊόντα του προαναφερόμενου μαγνητικού διαχωρισμού, διαπιστώθηκε πως δεν υπήρξε ιδιαίτερη αναβάθμιση του υλικού . Ο σίδηρος έφτασε έως και 62,13% με κατανομή 93,33% κατά βάρος. Παραπλήσια αποτελέσματα εμφανίστηκαν και στη φάση Γ, εμπλουτίζοντας το αρχικό υλικό. Έπειτα από παρατήρηση όλων των αποτελεσμάτων των μαγνητικών διαχωρισμών φάνηκε ότι ο καλύτερος εμπλουτισμός του μεταλλεύματος επιτεύχθηκε στο κλάσμα -0,250+0,010 mm στα μονά περάσματα με ένταση 6A, όπου η συγκέντρωση του Fe_3O_2 στο μαγνητικό προϊόν ανέρχεται στα 61,31% με κατανομή βάρους 92,48% αντίστοιχα, ενώ η ανάλυση του SiO_2 στο μη μαγνητικό προϊόν είναι 58,77% και η κατανομή 58,56% αντίστοιχα. Ιδιαίτερη αύξηση σημείωσε και το MnO , με το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης να βρίσκεται στο μαγνητικό προϊόν του μονού περάσματος 6A στο κλάσμα -0,250+0,010 mm κατά 24,21% με κατανομή βάρους 93,73%.

6.3 Προτάσεις

Η διερεύνηση του ενεργειακού κόστους του εμπλουτισμού αυτού του σιδηρομεταλλεύματος.

Βιβλιογραφία

DORNSIEPEN U. F., MANUTSOGLU E. 1994. *Zur Gliederung der Phyllit-Decke Kretas und des Peloponnes.* s.l. : Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft Band, 1994..

Αλεβίζος, Γ. 2009. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ. ΧΑΝΙΑ : ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, 2009, σσ. 3-4, 49-52.

Ε. ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ, Ι. ΣΠΑΝΑΚΗΣ, Ι. ΠΥΛΙΩΤΗΣ. ΧΩΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΘΕΣΣΩ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΔΥΤΙΚΗ ΚΡΗΤΗ. ΧΑΝΙΑ : ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ.

Κωστάκης, Γ. 2005. *Γενική ορυκτολογία.* Χανιά : Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα μηχανικών ορυκτών πόρων, 2005.

Μανούτσου, Εμμ. 2008. *Εισαγωγή στη Γεωλογία Ελλάδος.* ΧΑΝΙΑ : ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, 2008.

Μουντράκης, Δ. 2010. *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας.* Θεσσαλονίκη : University Studio Press, 2010.

Παπασταματίου, Ι. 1952. *Ο ΟΡΥΚΤΟΣ ΠΛΟΥΤΟΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ.* Αθήνα : ΙΓΜΕ, Έκθεση αδημοσίευτη No 256, 1952, σσ. 7-8, 27-28.

Πεντάρη, Δ. 2012. "Εργαστηριακές ασκήσεις γεωχημείας, Εργαστηριακές σημειώσεις". ΧΑΝΙΑ : ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, 2012, σσ. 43-50.

Σταμπολιάδης, Η. 2008. *ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ.* ΧΑΝΙΑ : ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, 2008.

Χρηστίδης, Γ. 2015. *ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑ Ι.* Χανιά : s.n., 2015.

Φιλιππίδης Α., Μιχαηλίδης Κ., Βαβέλιδης Μ., 2013. Σημειώσεις κοιτασματολογίας ΙΙ. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Διαδικτυακές πηγές

Encyclopedia. 2018. [Ηλεκτρονικό] 22 4 2018. <https://www.encyclopedia.com/earth-and-environment/minerals-mining-and-metallurgy/metallurgy-and-mining-terms-and-concepts/stainless-steel>.

Eurofer. 2018. [Ηλεκτρονικό] 22 4 2018. <http://www.eurofer.org/>.

Orykta. 2018. orykta.gr. [Ηλεκτρονικό] 14 11 2018. <https://www.orykta.gr/>.

The balance. 2019. [Ηλεκτρονικό] 3 8 2019. <https://www.thebalance.com/metal-profile-iron-2340139>.

University of Cambridge. 2018. [Ηλεκτρονικό] 22 4 2018. <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2001/adi/cast.iron.html>.

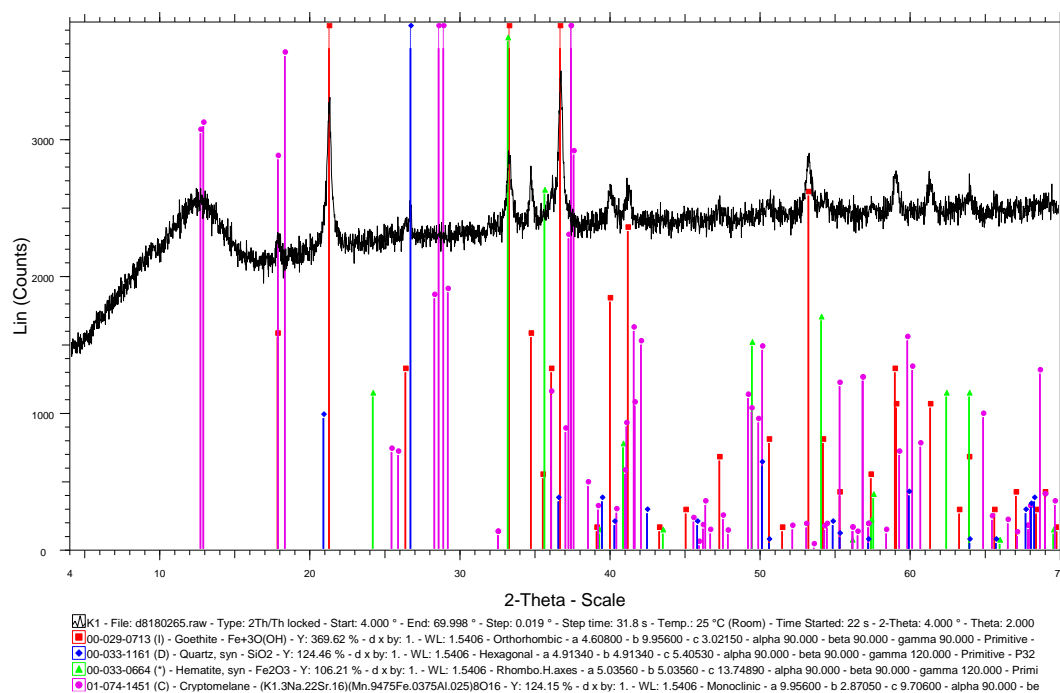
wikipedia. 2018. [Ηλεκτρονικό] 22 4 2018.

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%B9%CE%B4%CE%B7%CF%81%CE%BF%CE%BA%C>

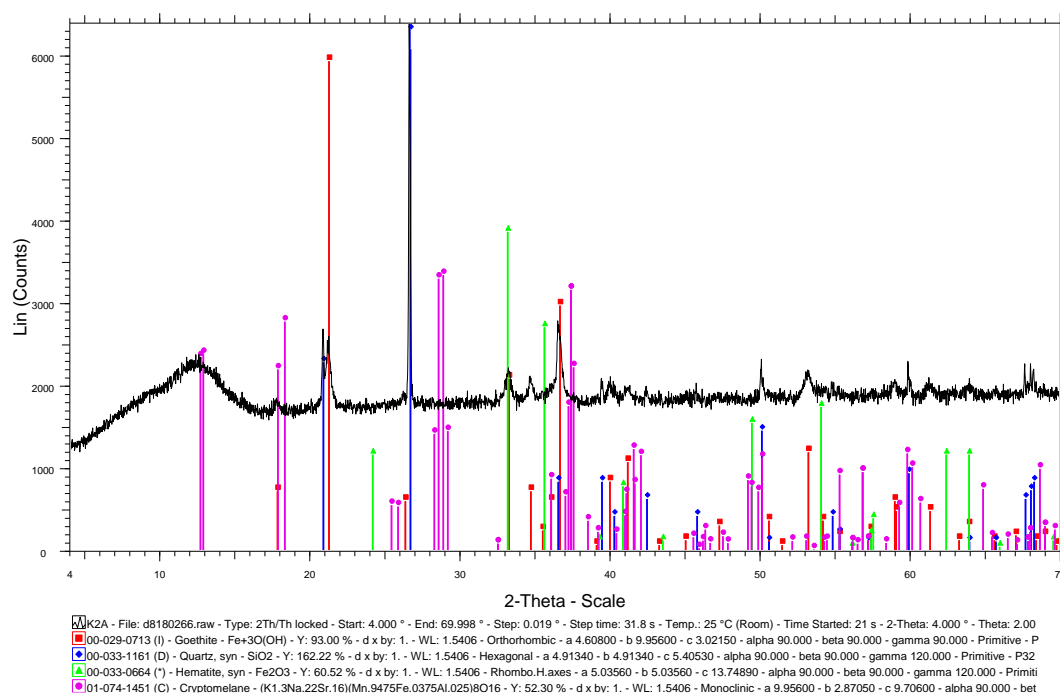
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Εικόνες ακτινοδιαγραμμάτων

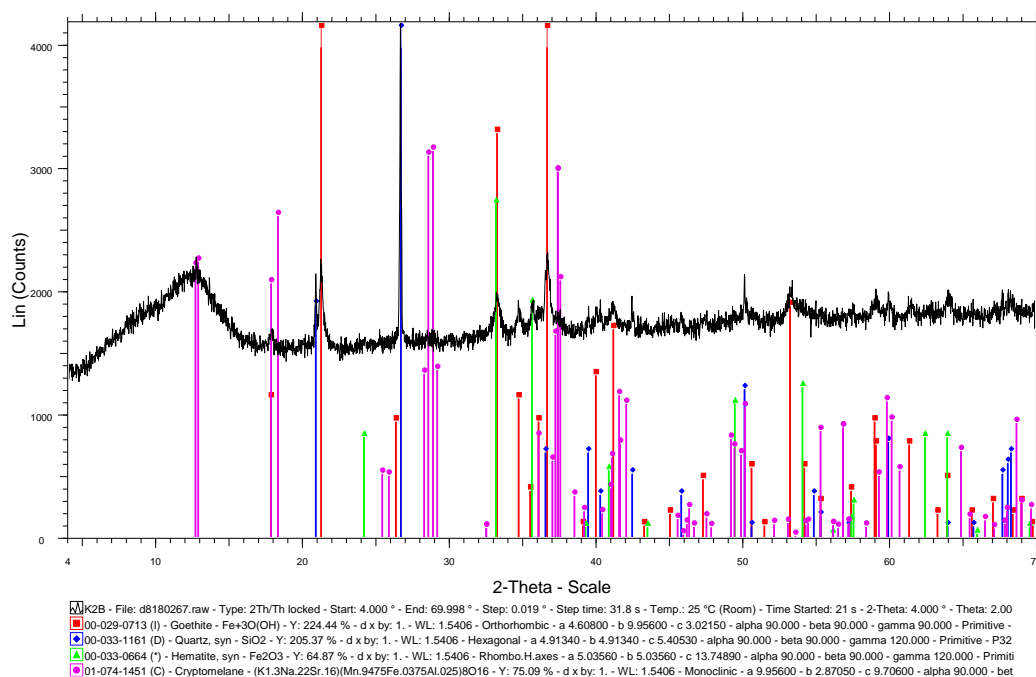
Δείγμα: K1



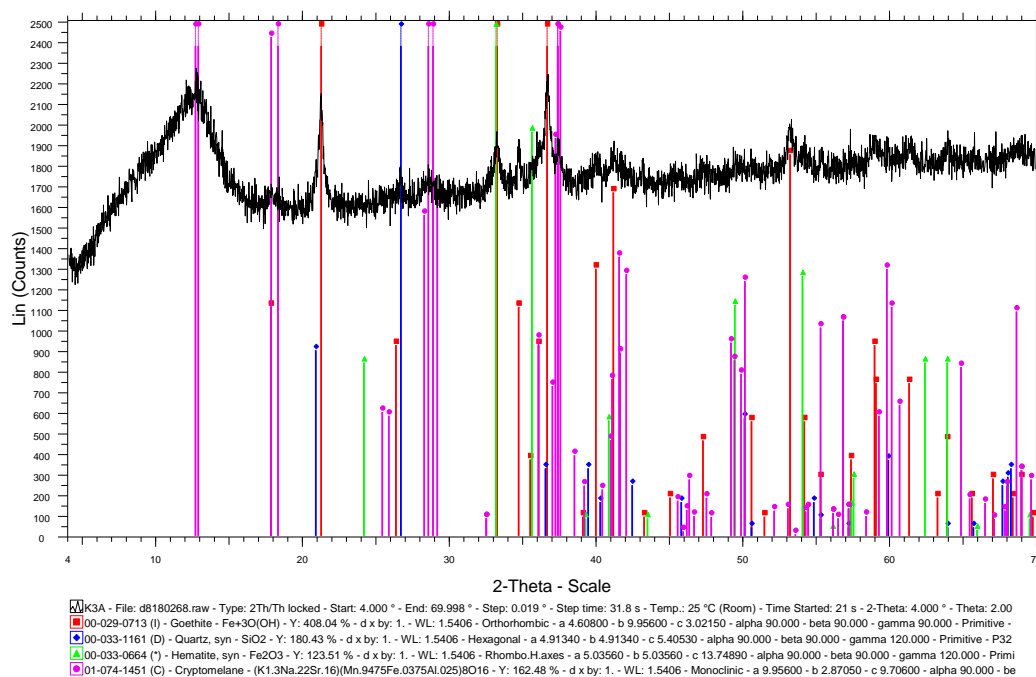
Δείγμα: K2A



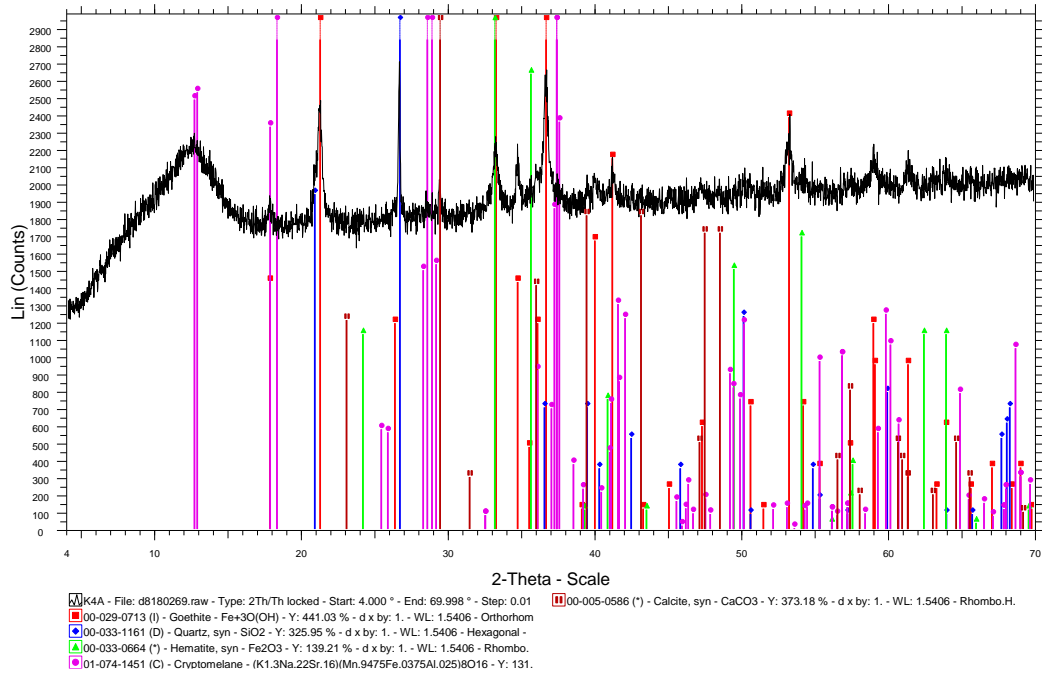
Δείγμα: K2B



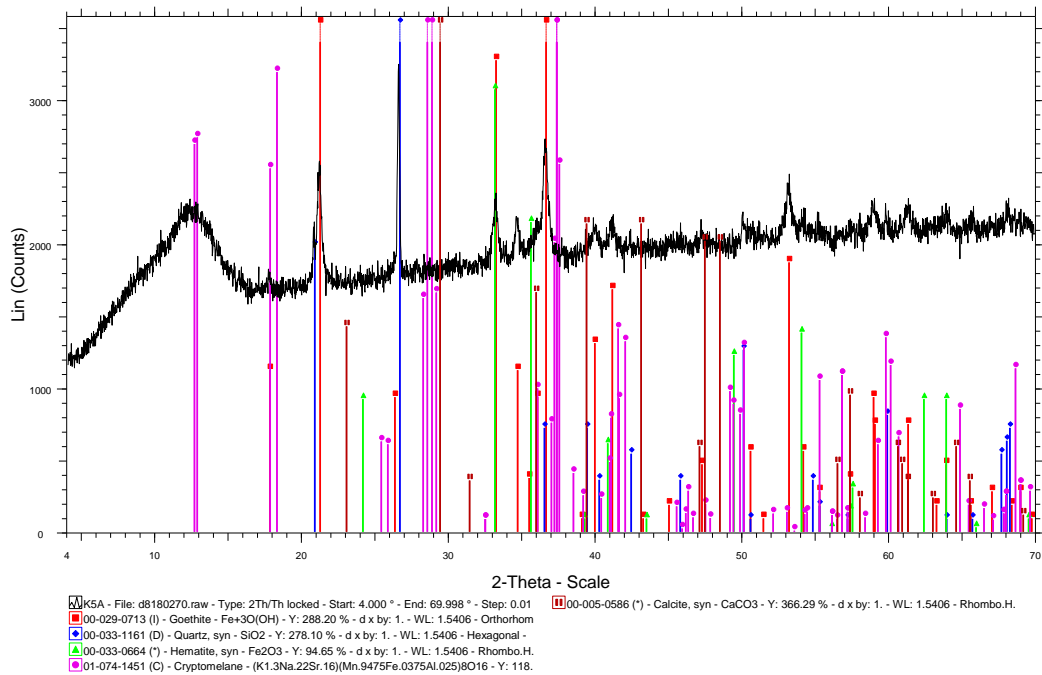
Δείγμα: K3A



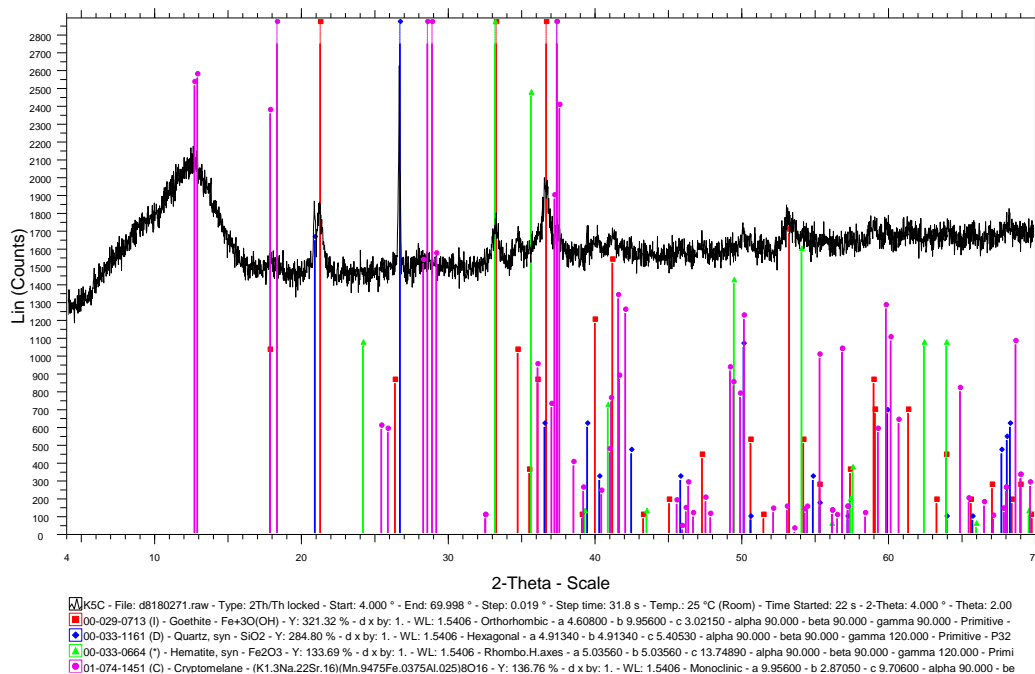
Δείγμα: K4A



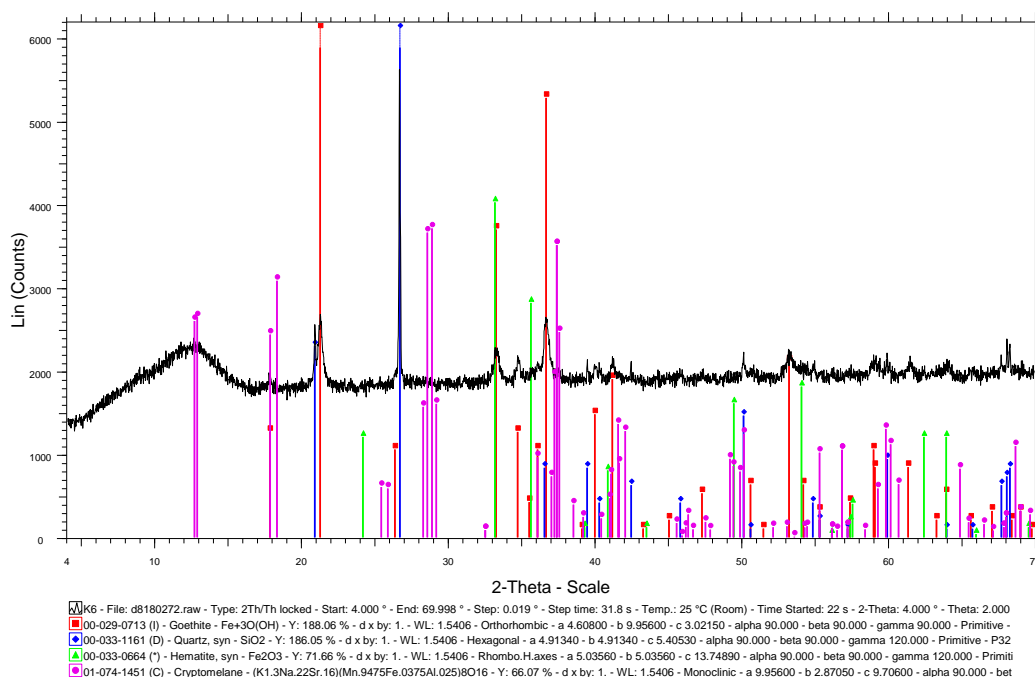
Δείγμα: K5A



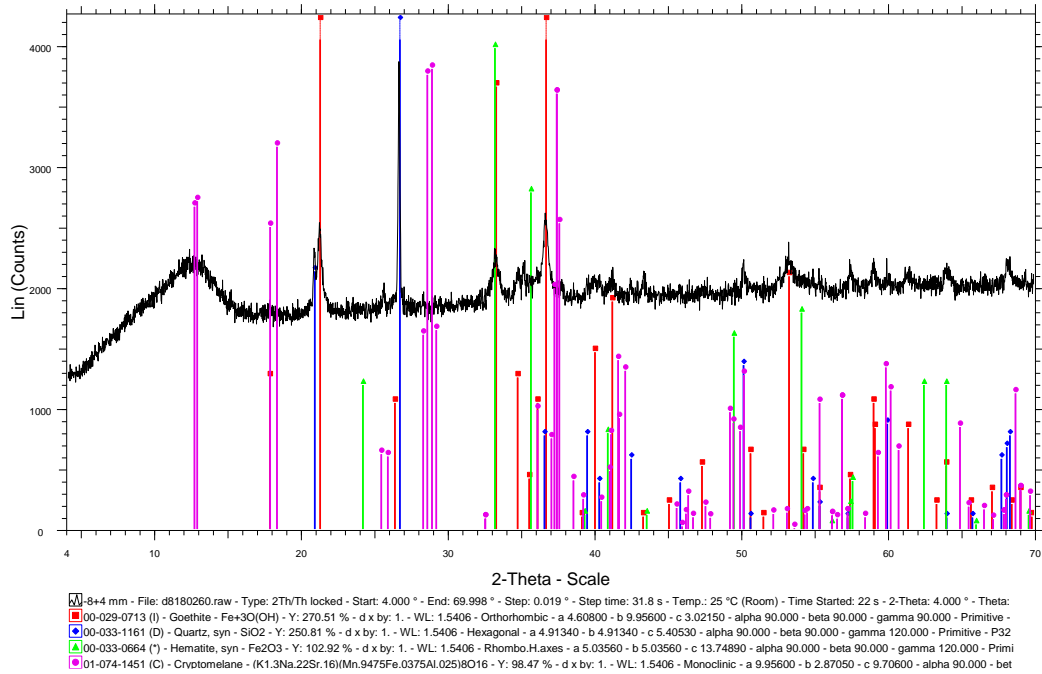
Δείγμα: K5C



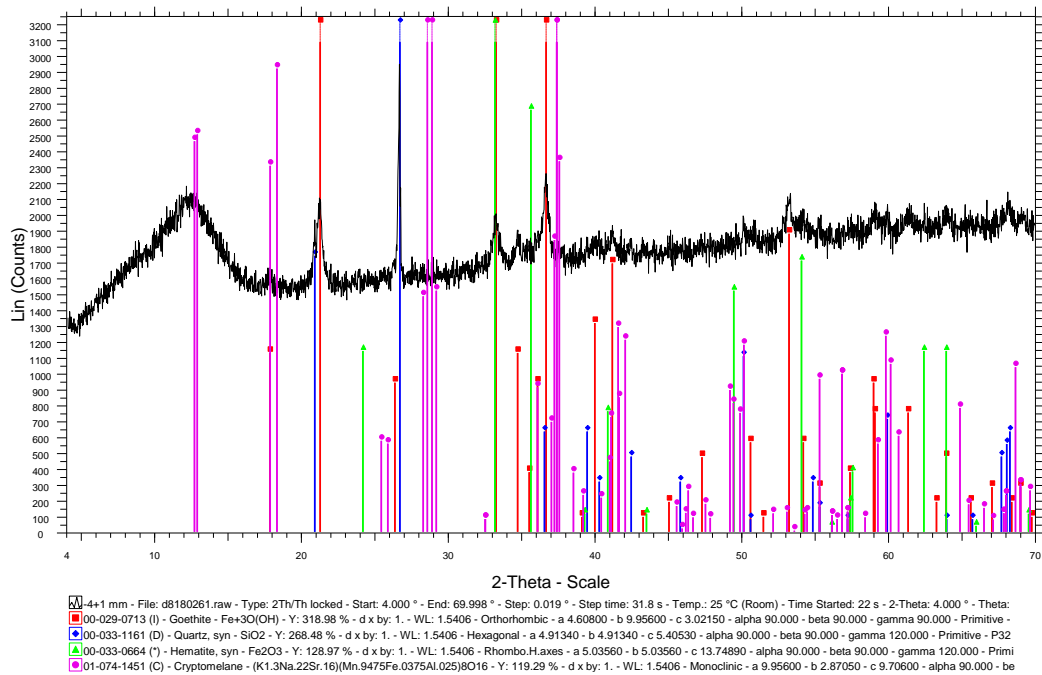
Δείγμα: K6



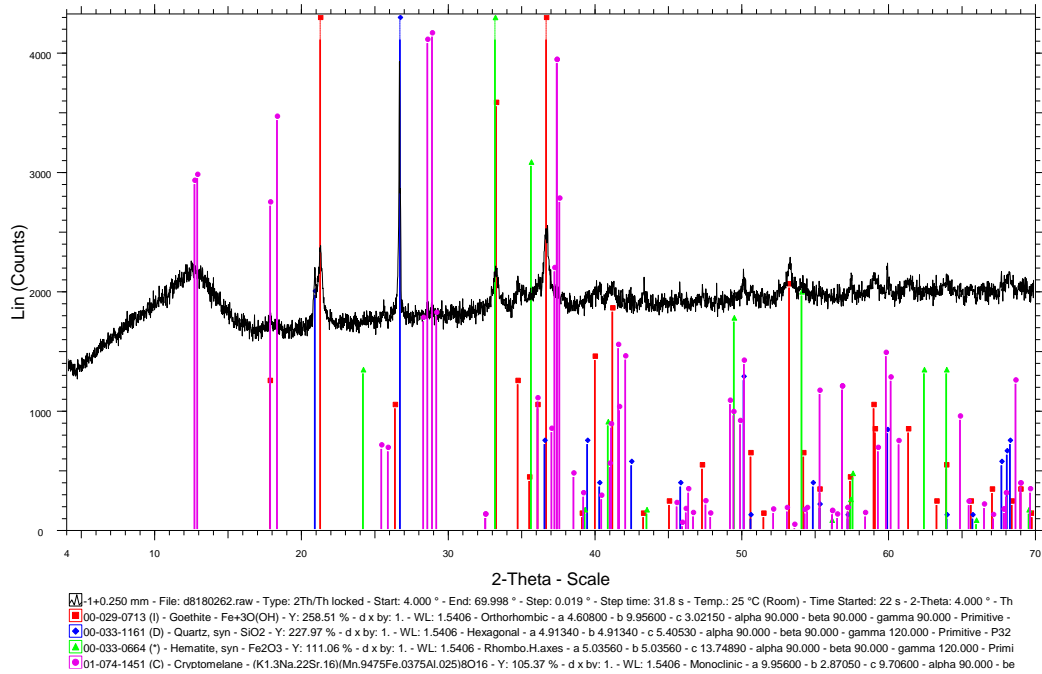
Δείγμα: Κλάσμα -8+4 mm



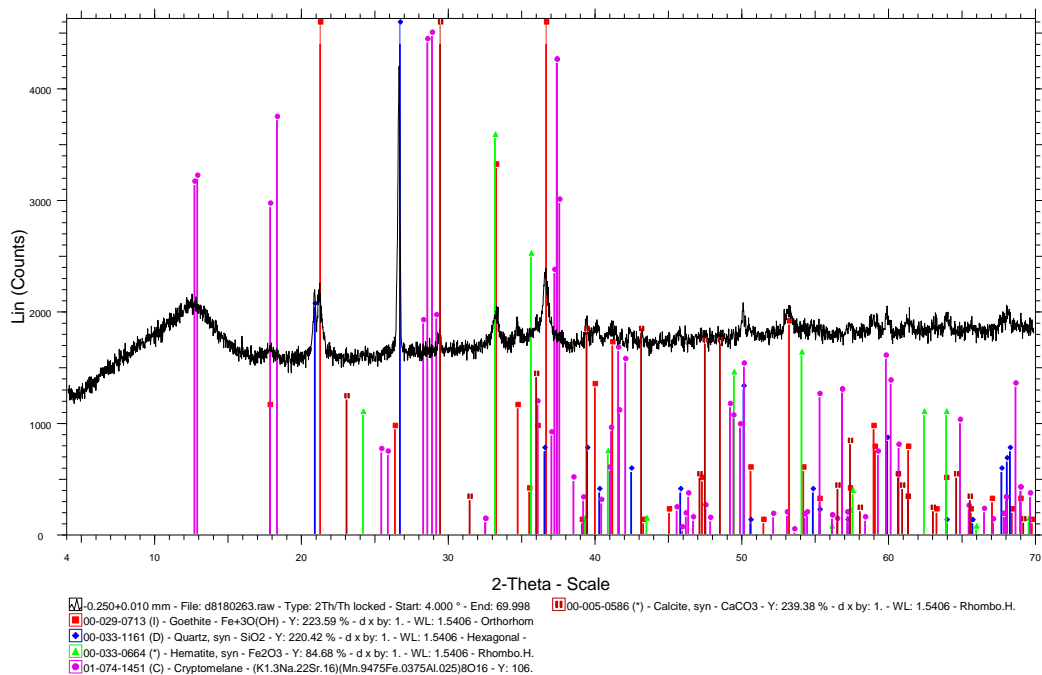
Δείγμα: Κλάσμα -4+1 mm



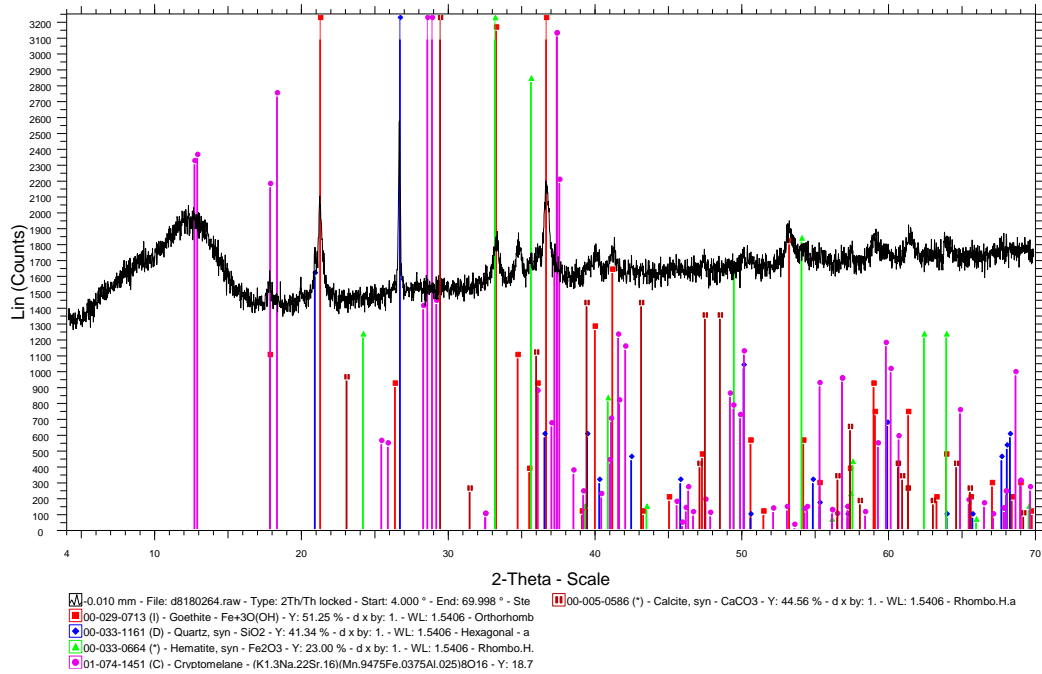
Δείγμα: Κλάσμα -1+0.250 mm



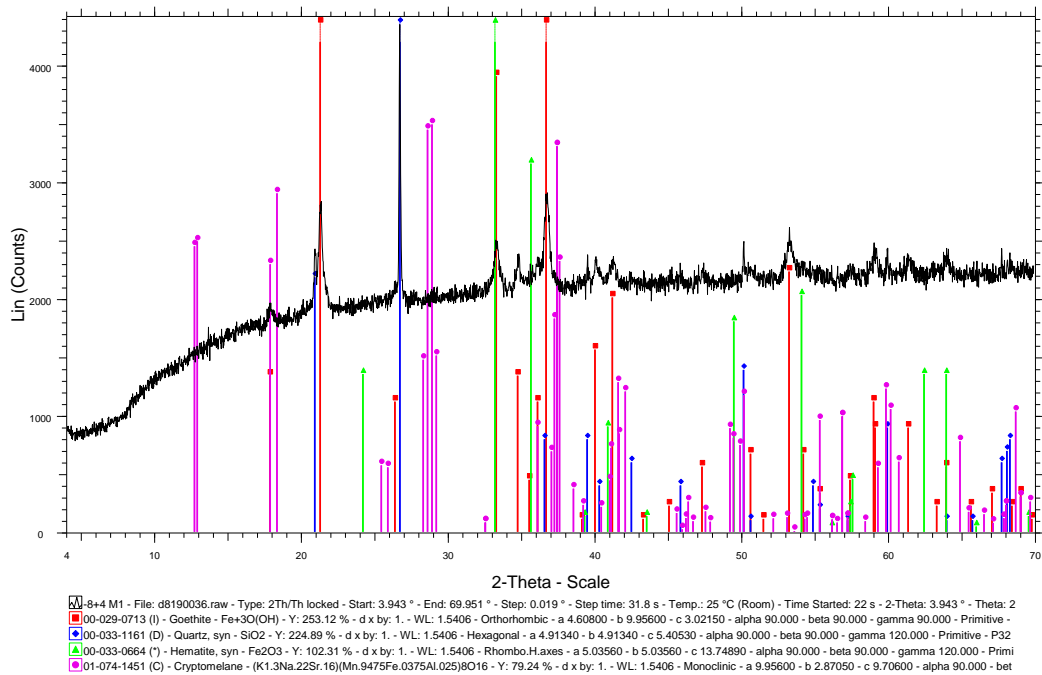
Δείγμα: Κλάσμα -0.250+0.010 mm



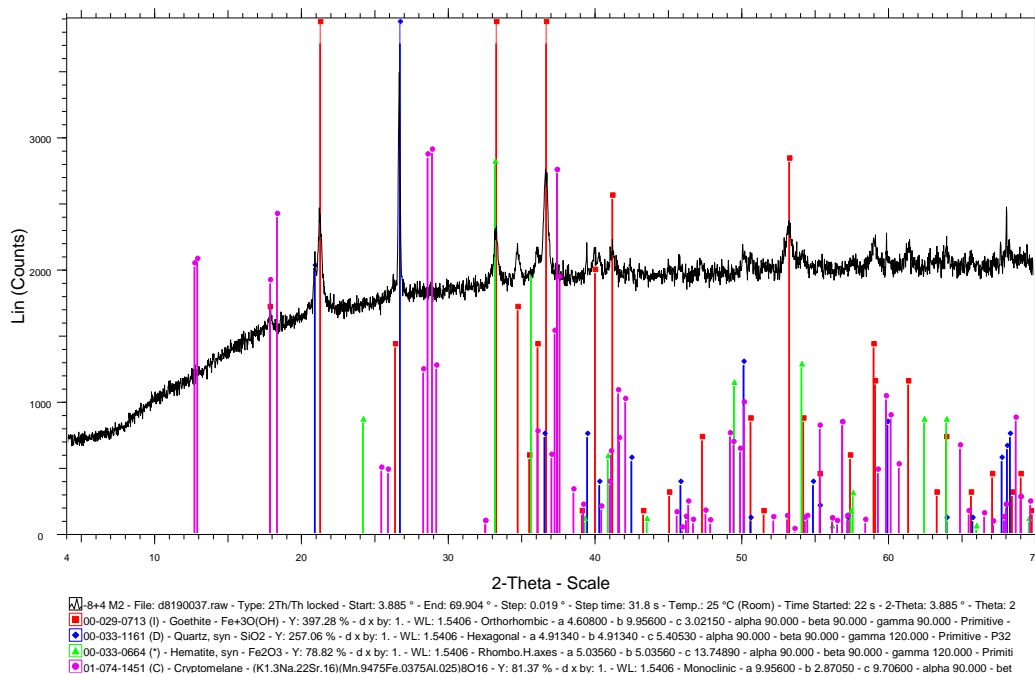
Δείγμα: Κλάσμα -0.010 mm



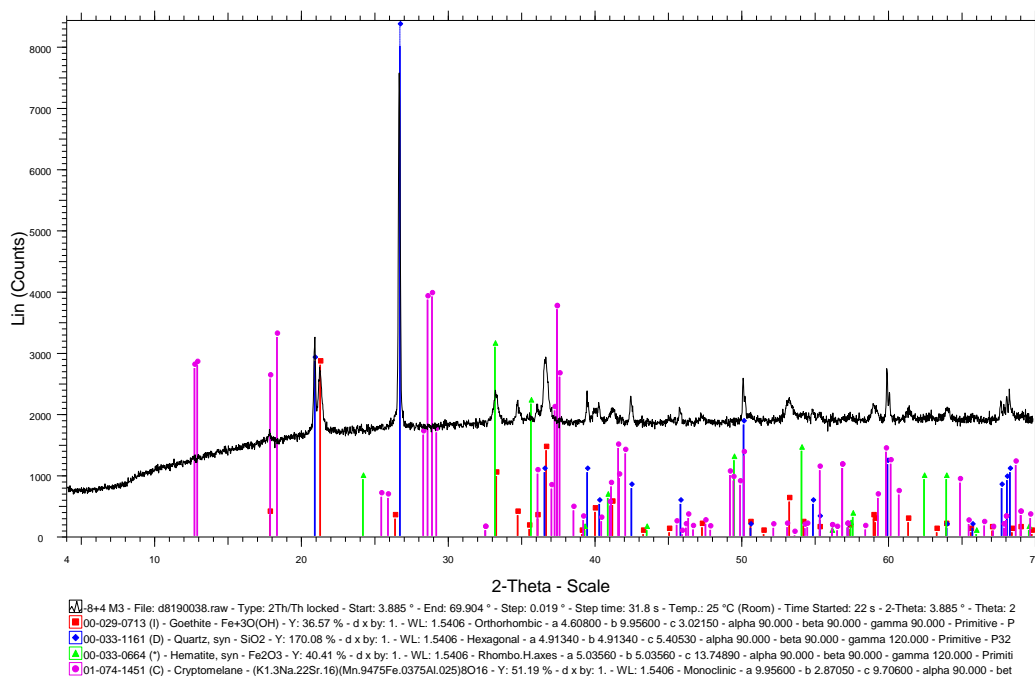
Δείγμα: Μαγνητικό 1 (κλάσμα -8+4 mm)



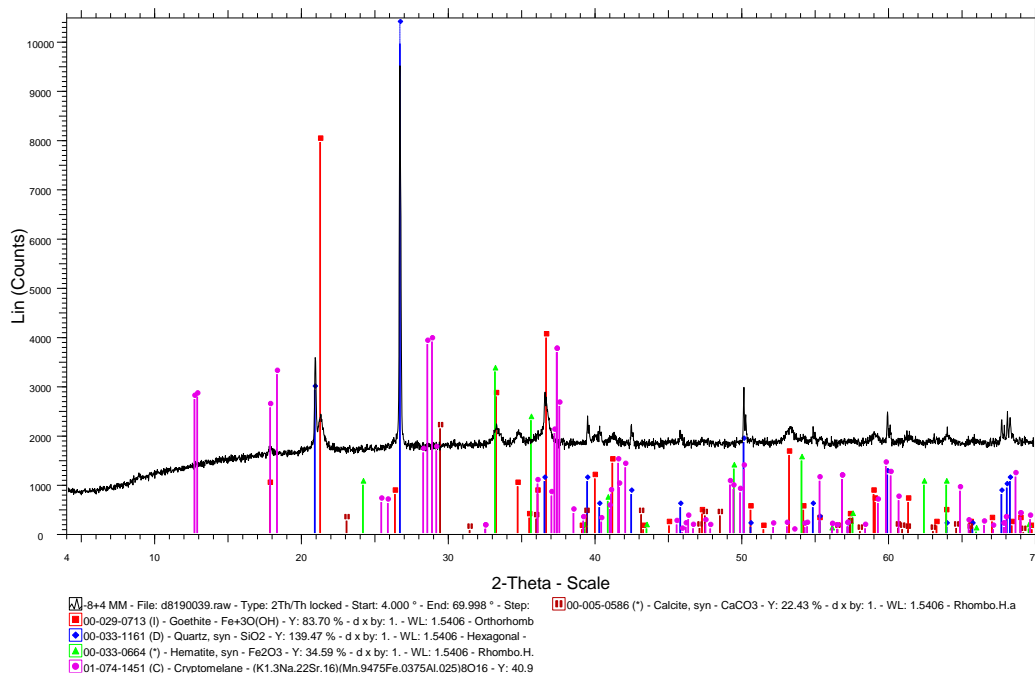
Δείγμα: Μαγνητικό 2 (κλάσμα -8+4 mm)



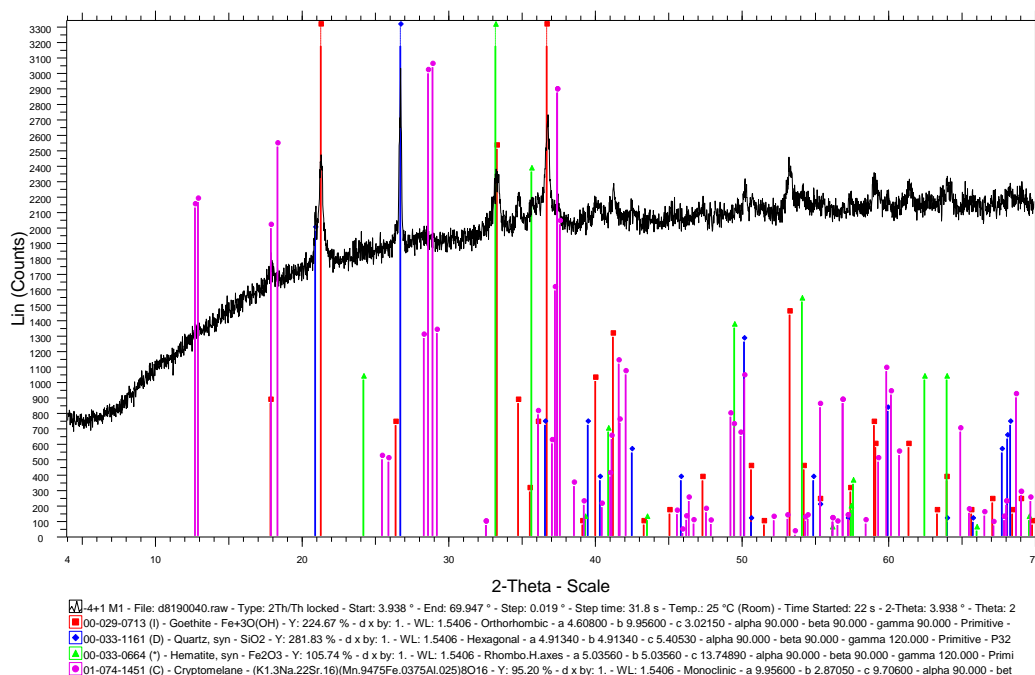
Δείγμα: Μαγνητικό 3 (κλάσμα -8+4 mm)



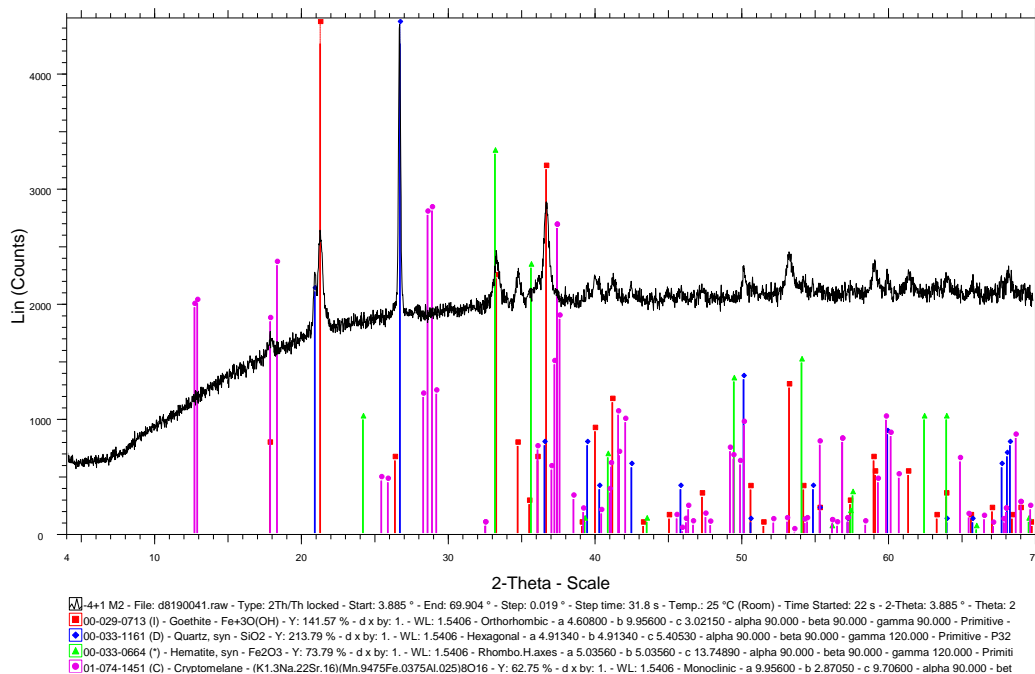
Δείγμα: Μη Μαγνητικό (κλάσμα -8+4 mm)



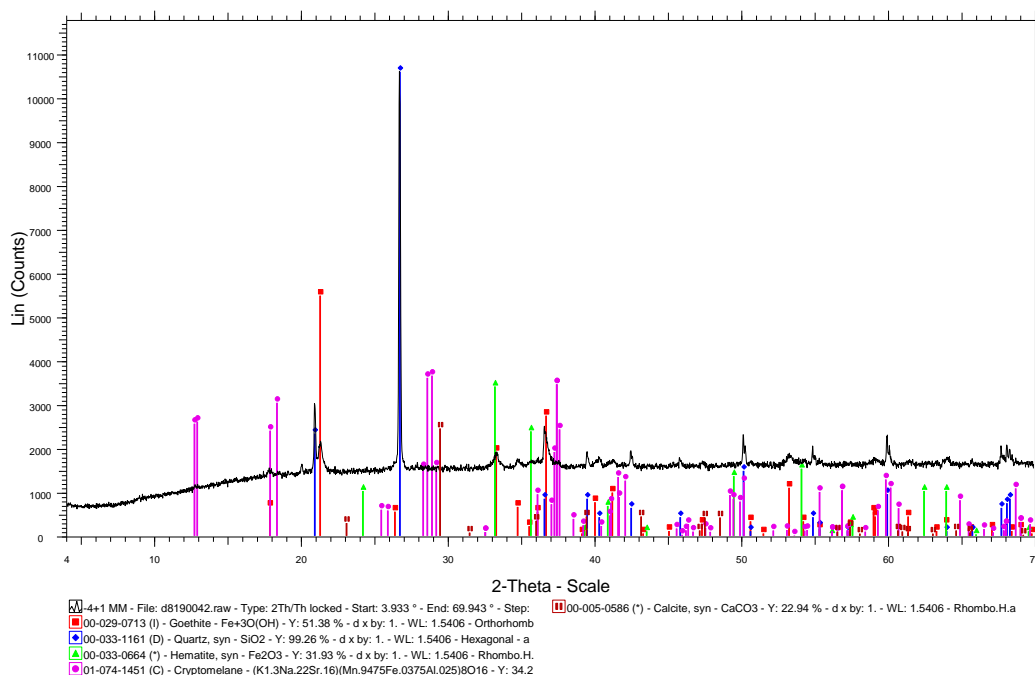
Δείγμα: Μαγνητικό 1 (κλάσμα -4+1 mm)



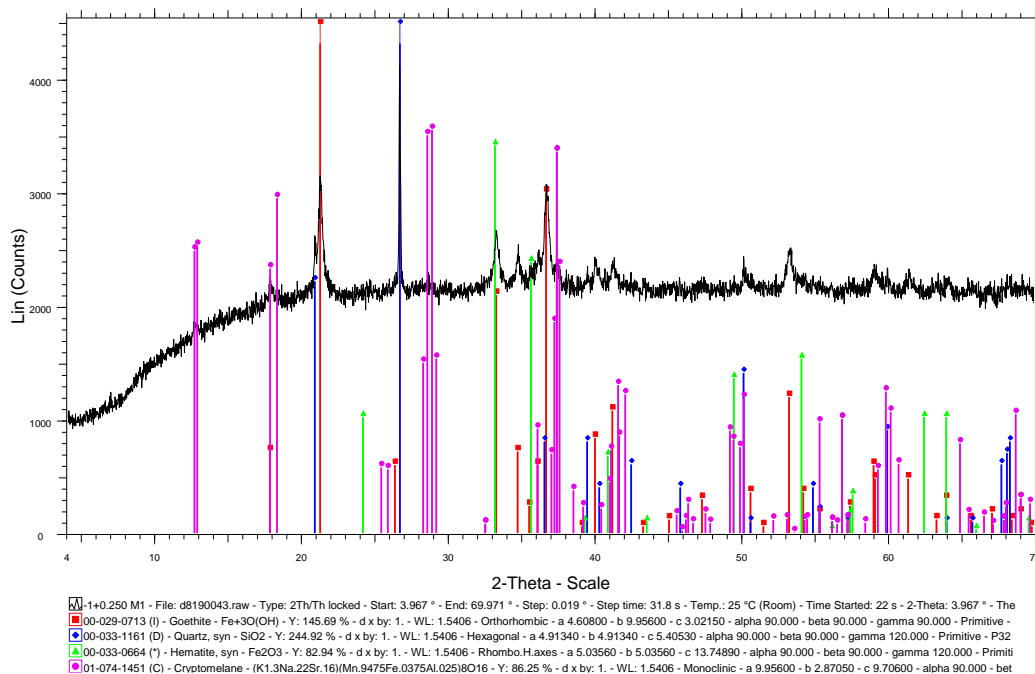
Δείγμα: Μαγνητικό 2 (κλάσμα -4+1 mm)



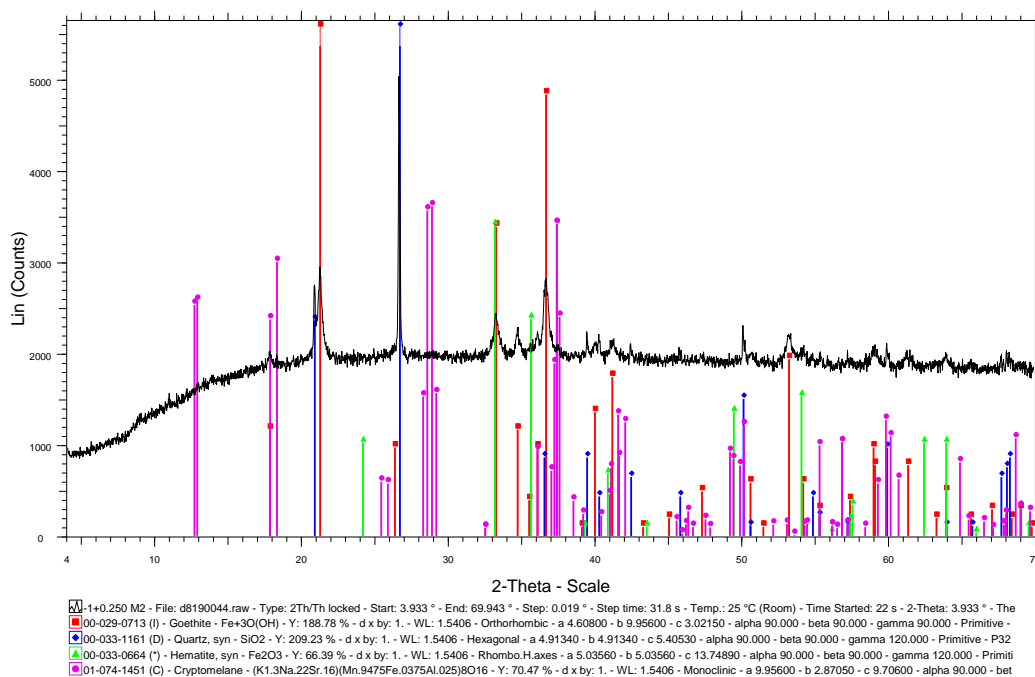
Δείγμα: Μη Μαγνητικό (κλάσμα -4+1 mm)



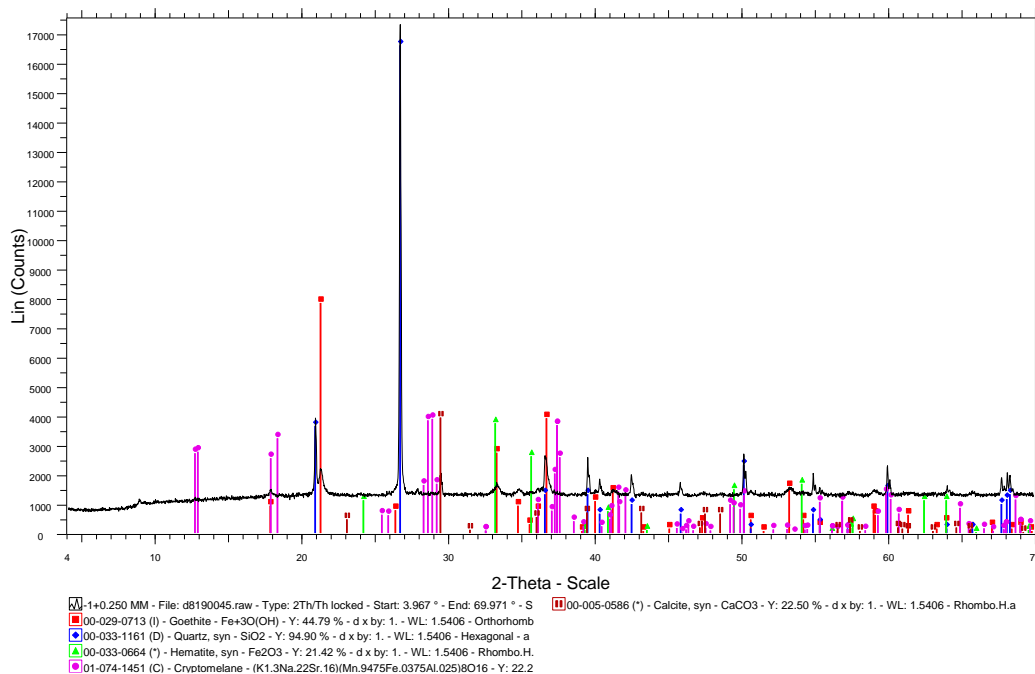
Δείγμα: Μαγνητικό 1 (κλάσμα -1+0.250 mm)



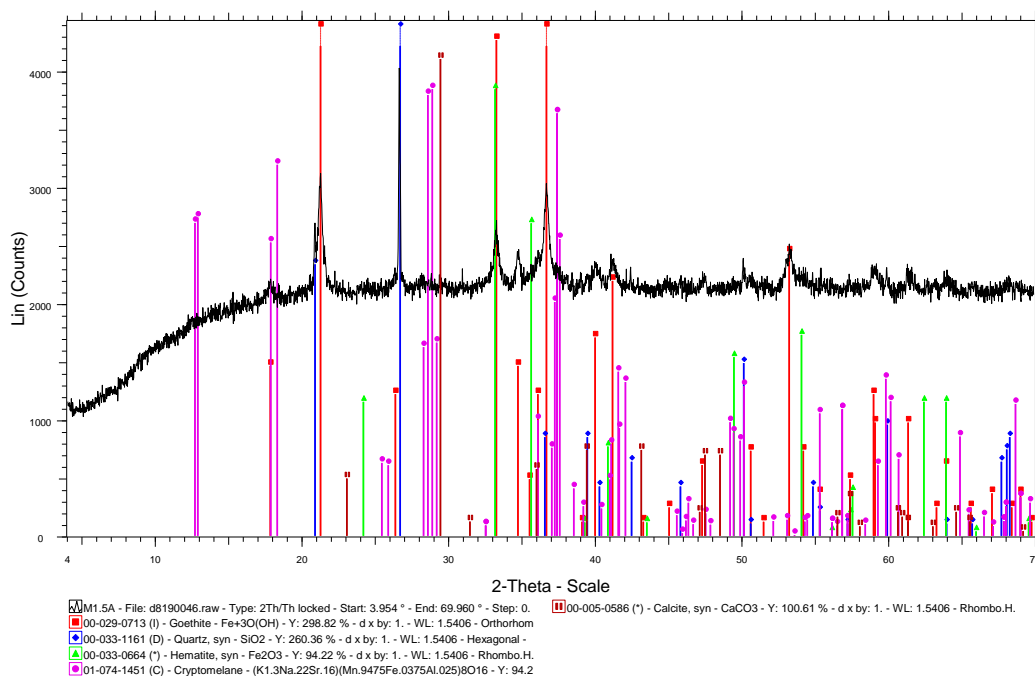
Δείγμα: Μαγνητικό 2 (κλάσμα -1+0.250 mm)



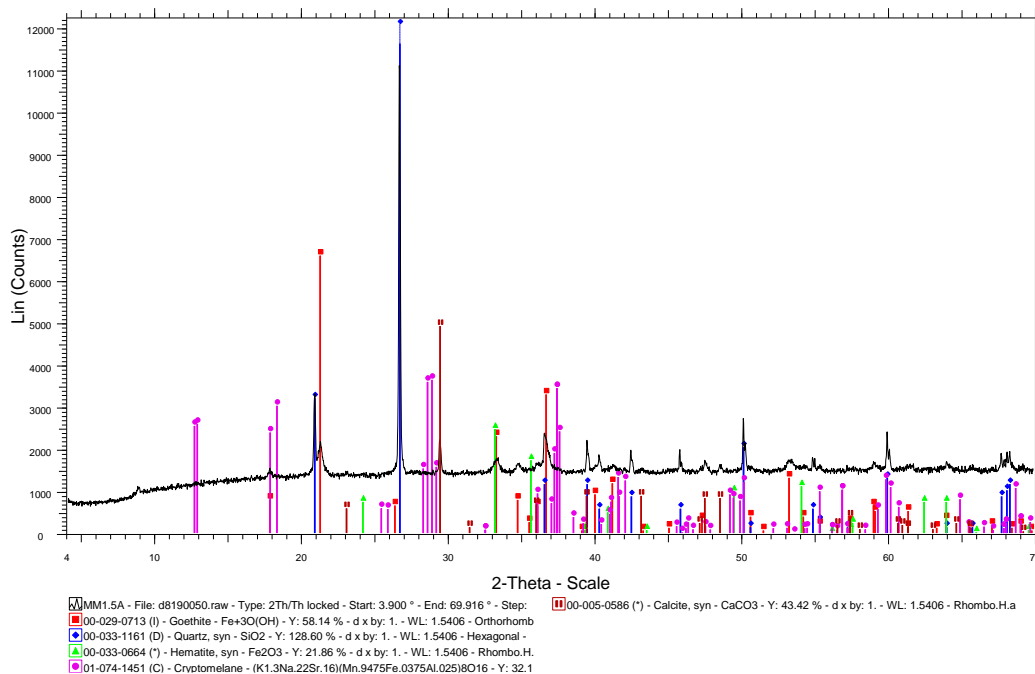
Δείγμα: Μη Μαγνητικό (κλάσμα -1+0.250 mm)



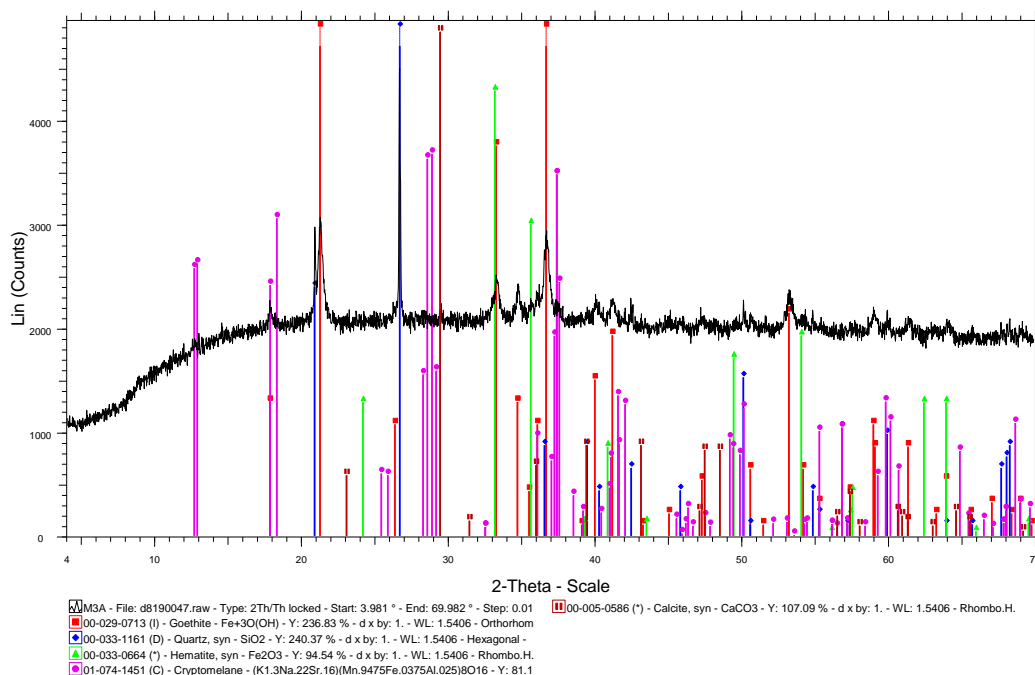
Δείγμα: Μαγνητικό 1.5 A (κλάσμα -0.250+0.010 mm)



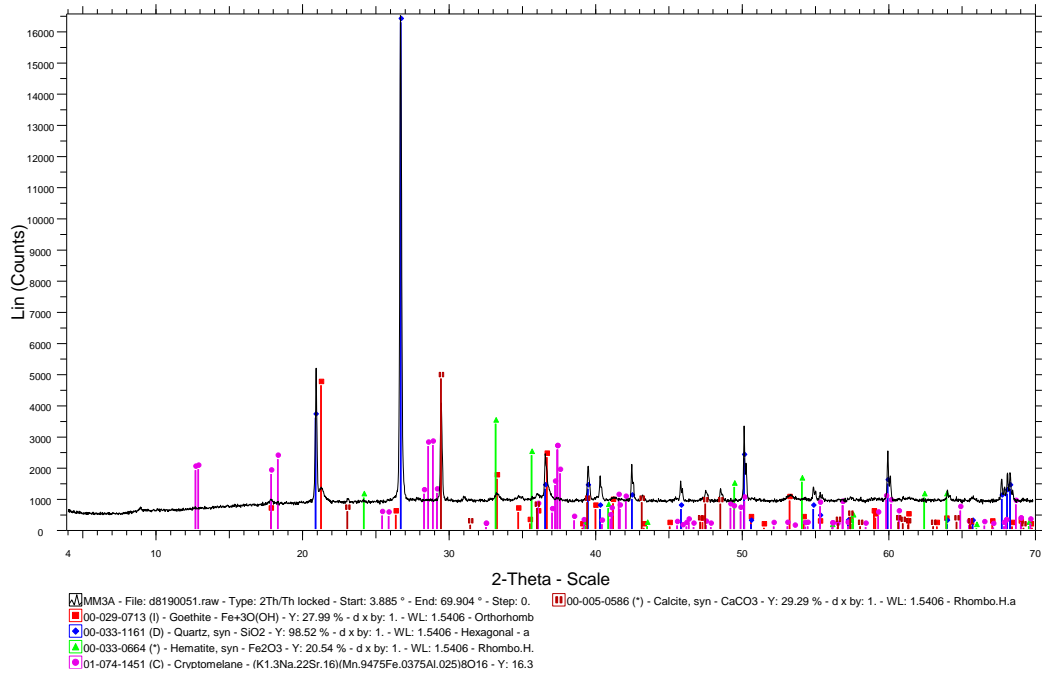
Δείγμα: Μη μαγνητικό 1.5 A (Κλάσμα -0.250+0.010 mm)



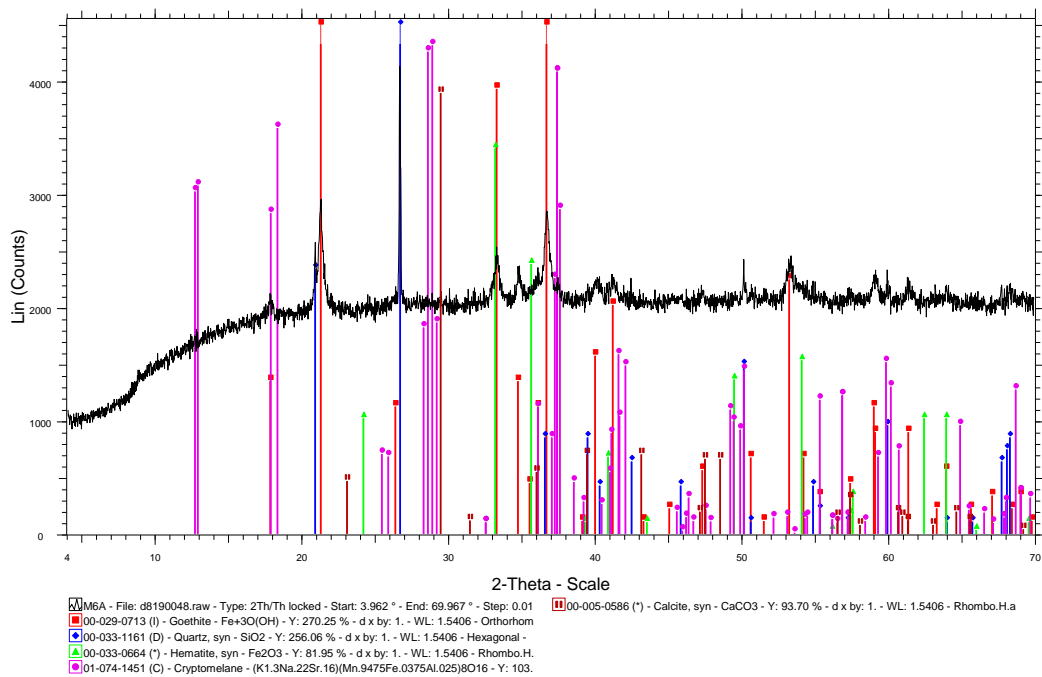
Δείγμα: Μαγνητικό 3 A (Κλάσμα -0.250+0.010 mm)



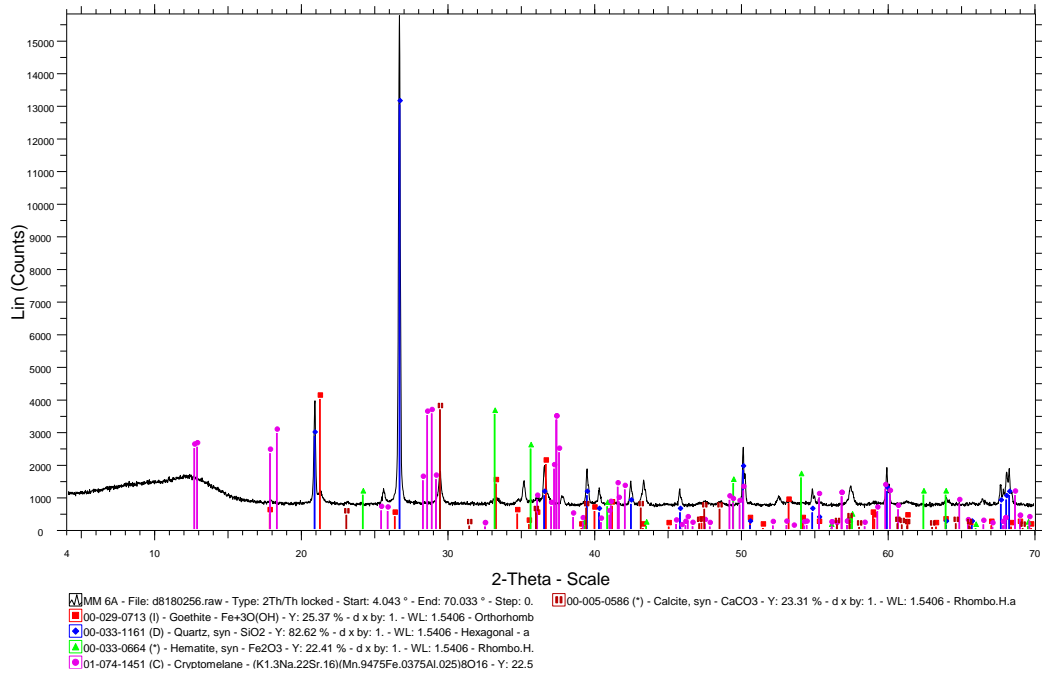
Δείγμα: Μη μαγνητικό 3 A (Κλάσμα -0.250+0.010 mm)



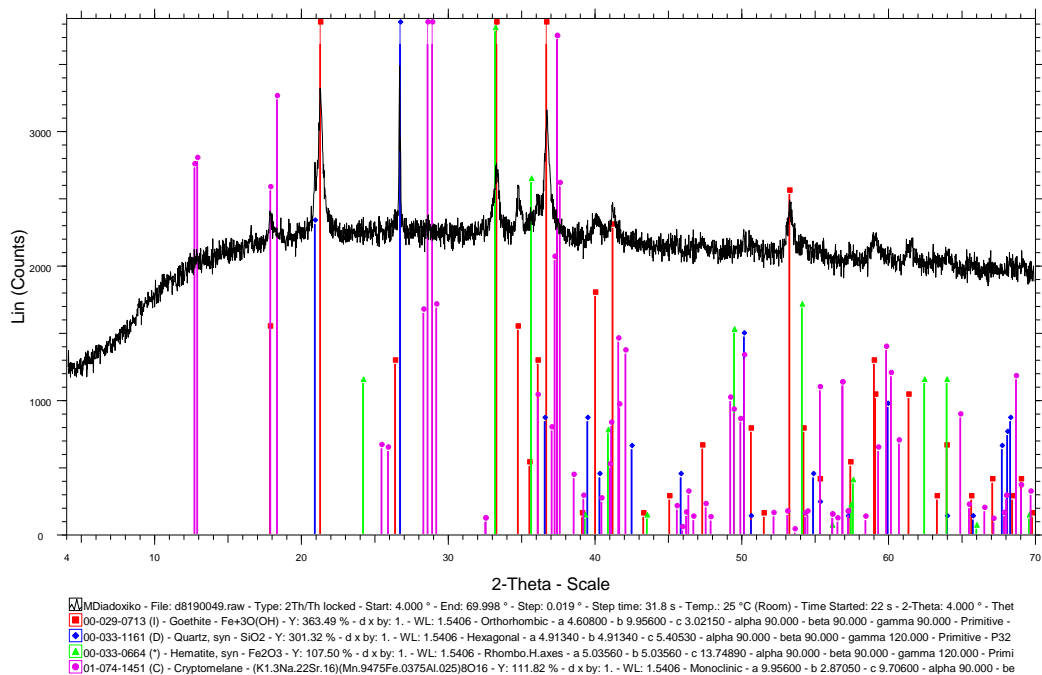
Δείγμα: Μαγνητικό 6 A (Κλάσμα -0.250+0.010 mm)



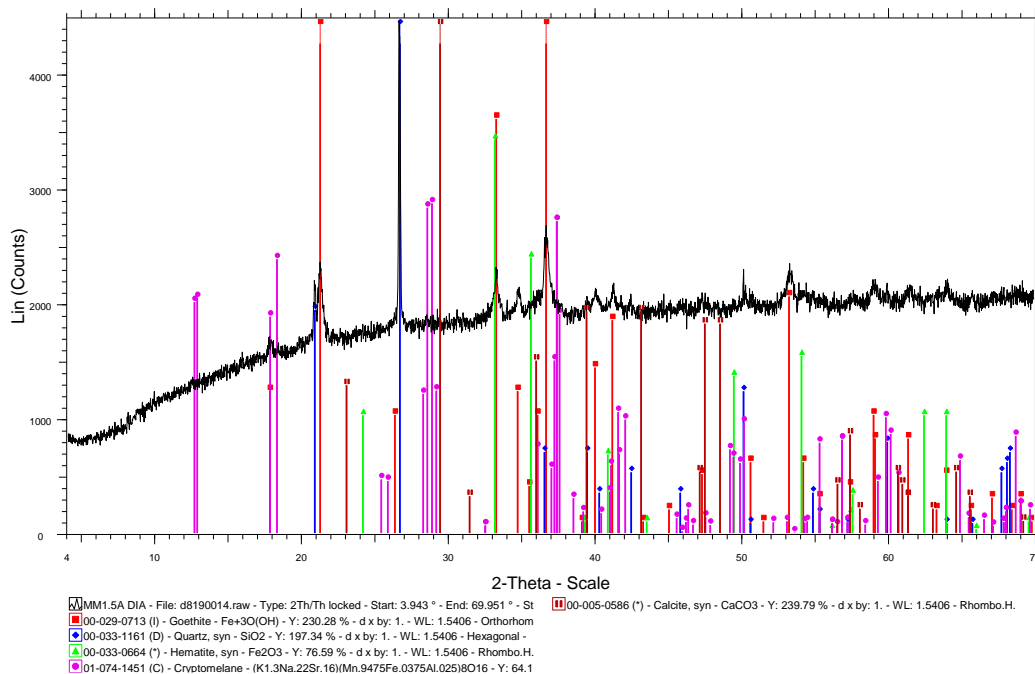
Δείγμα: Μη μαγνητικό 6 A (Κλάσμα -0.250+0.010 mm)



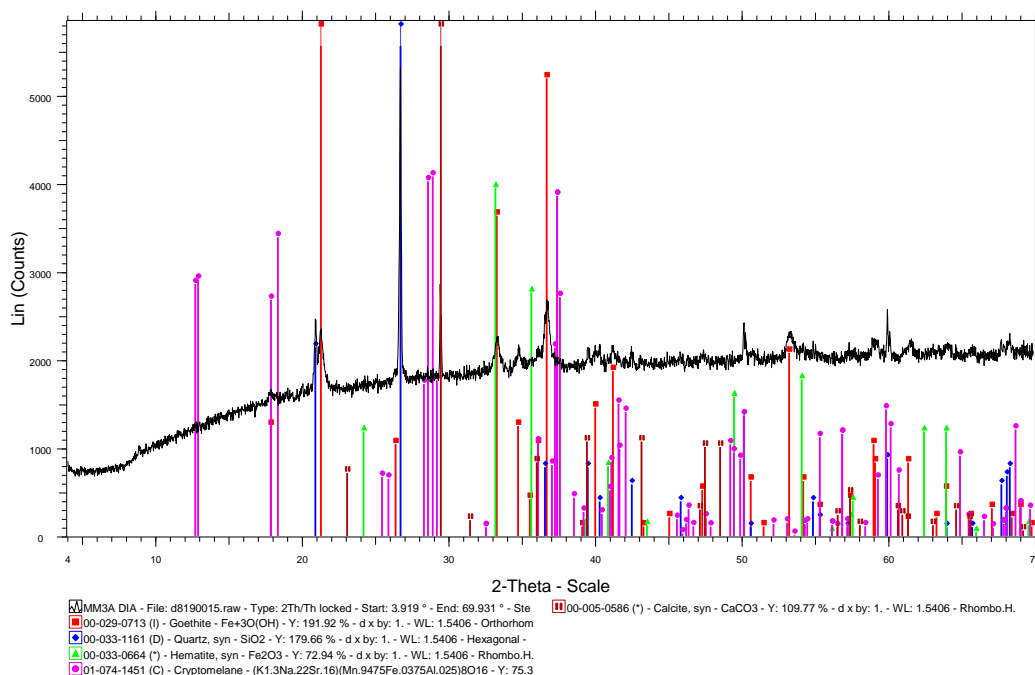
Δείγμα: Μαγνητικό διαδοχικό (Κλάσμα -0.250+0.010 mm)



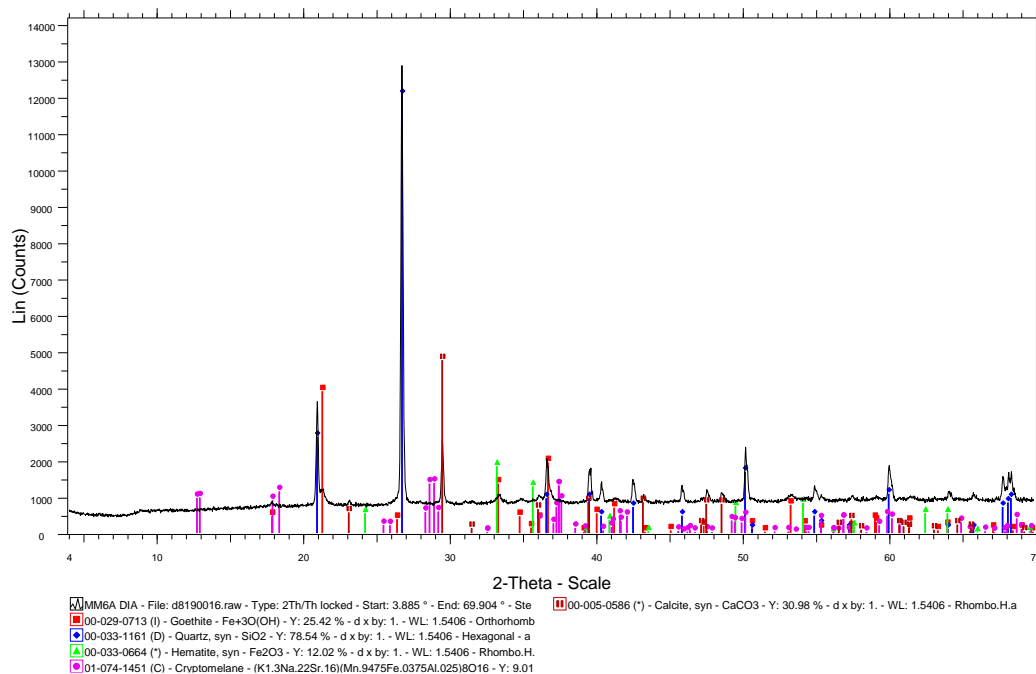
Δείγμα: Μη μαγνητικό διαδοχικό 1.5 A (κλάσμα -0.250+0.010 mm)



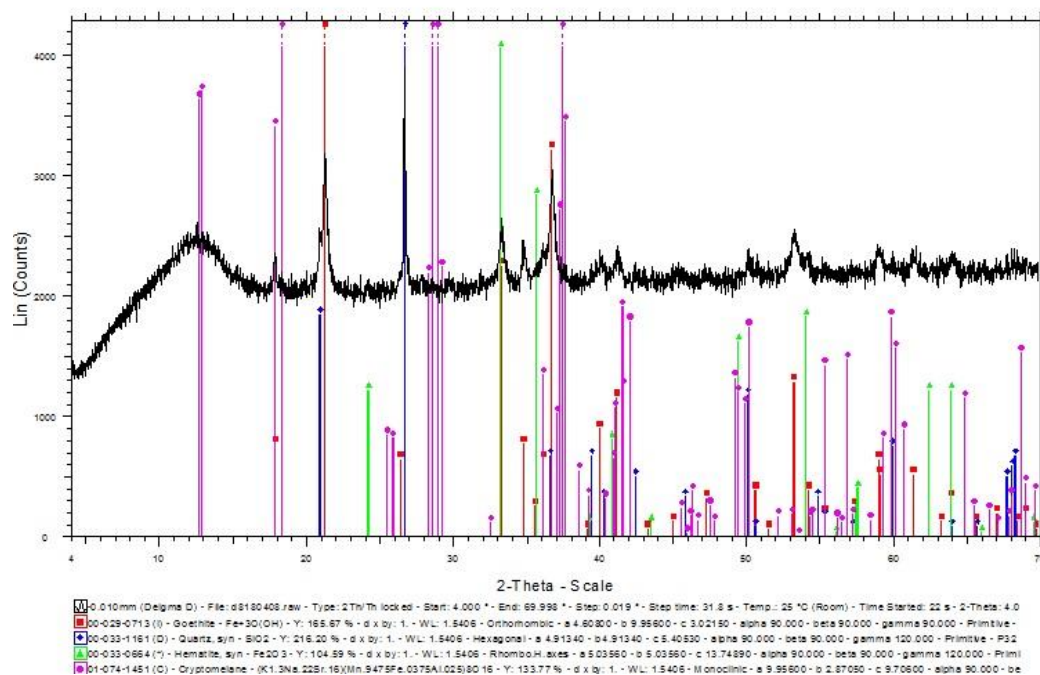
Δείγμα: Μη μαγνητικό διαδοχικό 3 A (κλάσμα -0.250+0.010 mm)



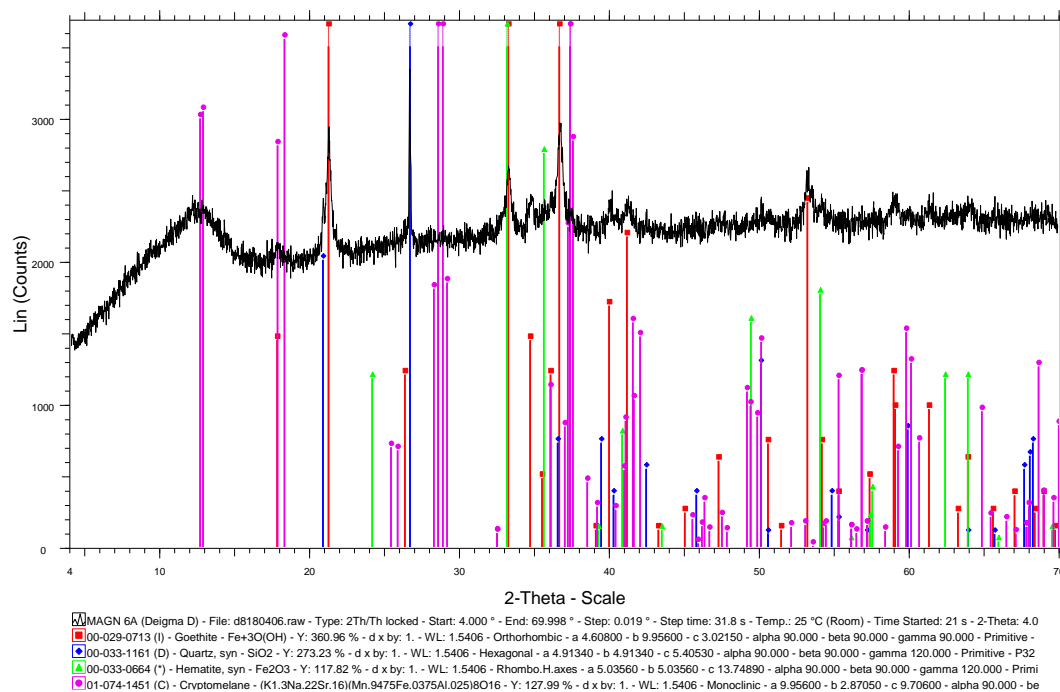
Δείγμα: Μη μαγνητικό διαδοχικό 6 A (κλάσμα -0.250+0.010 mm)



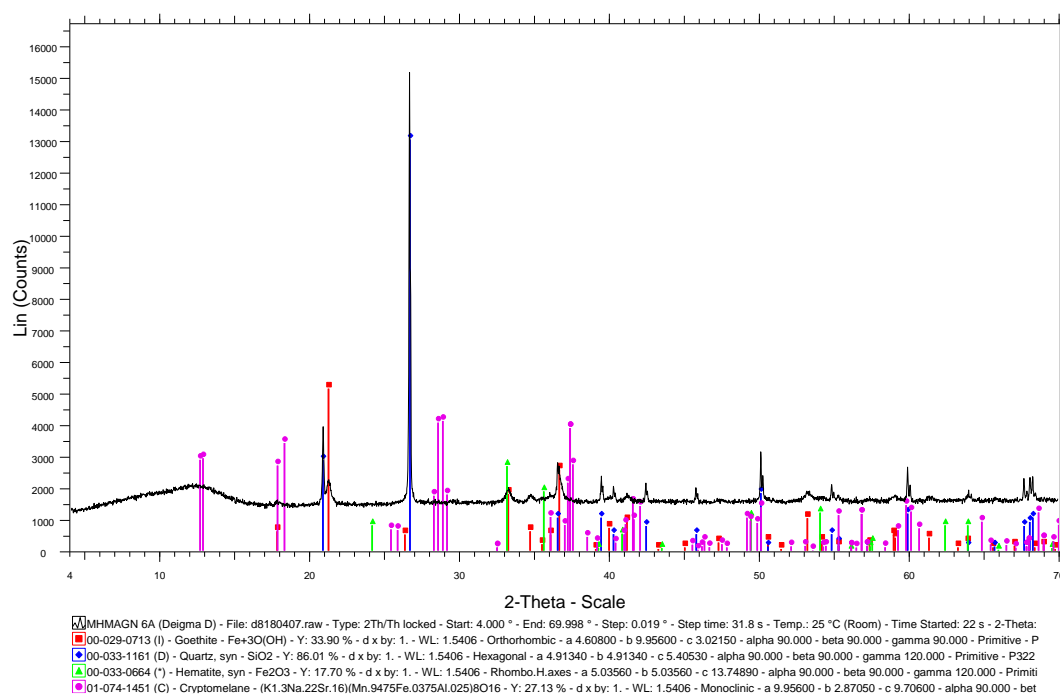
Δείγμα: Κλάσμα -0.010 mm του δείγματος Δ



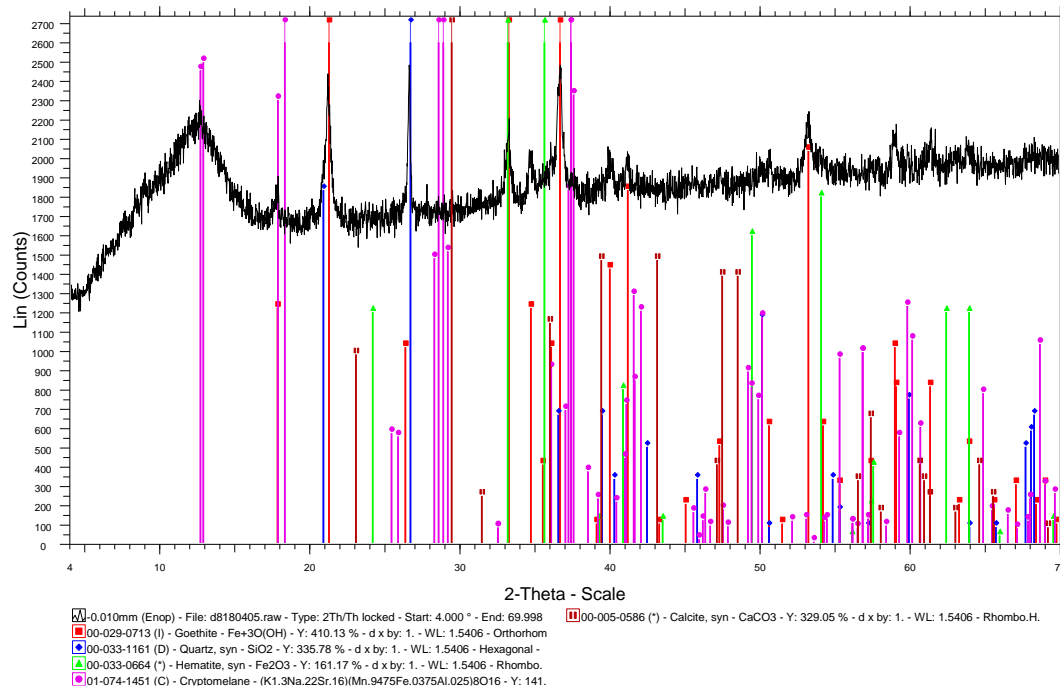
Δείγμα: Μαγνητικό 6 A του δείγματος Δ (κλάσμα -0.250+0.010 mm)



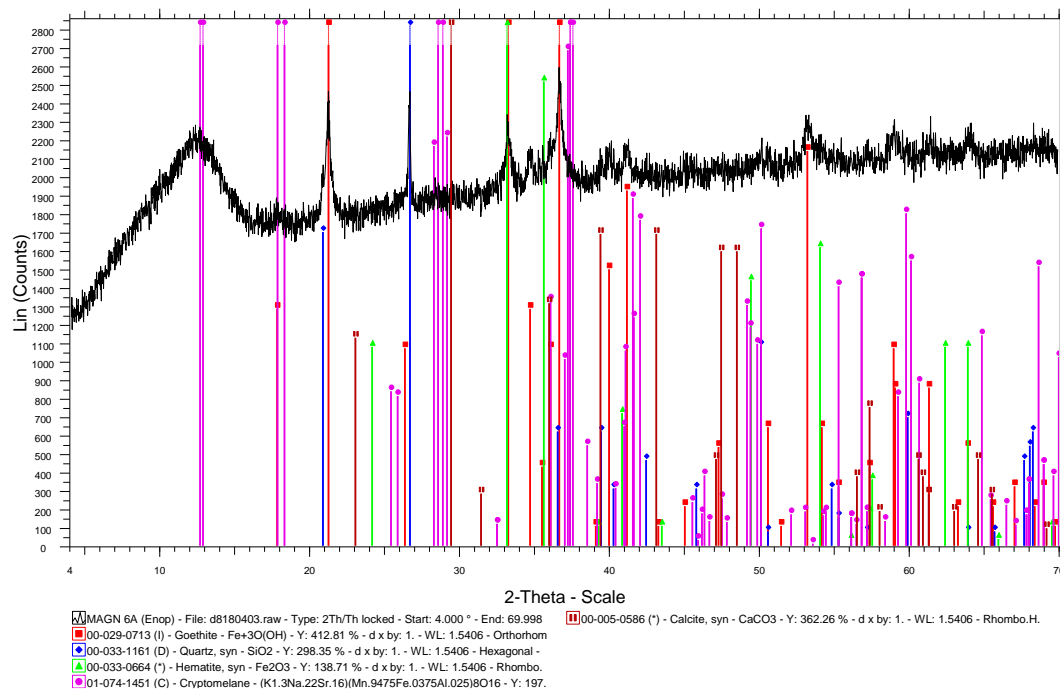
Δείγμα: Μη μαγνητικό 6 A του δείγματος Δ (κλάσμα -0.250+0.010 mm)



Δείγμα: Κλάσμα -0.010 των Ενοποιημένων μαγνητικών



Δείγμα: Μαγνητικό 6 A των Ενοποιημένων μαγνητικών (κλάσμα -0.250+0.010 mm)



Δείγμα: Μη μαγνητικό 6 Α των Ενοποιημένων μαγνητικών (κλάσμα -0.250+0.010 mm)

