

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ορυκτολογική-πετρογραφική μελέτη και διερεύνηση εμπλουτισσιμότητας του
λατεριτικού σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος του κοιτάσματος Hudenisht της
περιοχής Pogradec (Αλβανία)»**

Τσελεμπής Ρωμανός

Εξεταστική επιτροπή

Γεώργιος Αλεβίζος, Επικ.Καθηγητής (επιβλέπων)

Κωνσταντίνος Κομνίτσας, Καθηγητής

Μιχαήλ Γαλετάκης, Αναπλ. Καθηγητής

Χανιά

Δεκέμβριος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ορυκτολογική και πετρογραφική διερεύνηση του σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος του Hudenisht, η γεωχημική κατανομή των στοιχείων κατά μήκος της τομής δειγματοληψίας καθώς και σ' ένα μεγάλο μέρος η δυνατότητα εμπλουτισμού του με τις μεθόδους του βαρυτομετρικού και μαγνητικού διαχωρισμού.

Σύμφωνα με τη γεωλογία της περιοχής του Pogradec το σιδηρονικελιούχο κοιτάσμα αναπτύσσεται με μορφή στρωμάτων επάνω σε υπερβασικά πετρώματα μεταβαλλόμενης σύστασης (από χαρτσβουργίτες μέχρι σερπεντινίτες) και επικαλύπτεται από ασβεστολίθους του ανώτερου Κρητιδικού. Σημαντικότερα ορυκτά του μεταλλεύματος είναι ο αιματίτης, ο γκαϊτίτης και ο χρωμίτης και τα οποία βρίσκονται σε μεγαλύτερο ποσοστό. Σε μικρότερο ποσοστό έχουμε νικελιούχο χλωρίτη (νιμίτη), λιζαρδίτη, ασβεστίτη και σπινέλλιο. Κύριος φορέας του νικελίου είναι ο νικελιούχος χλωρίτης. Με βάση τη γεωχημική κατανομή του μεταλλεύματος οι μεγαλύτερες περιεκτικότητες του νικελίου βρίσκονται στο στρώμα του εξαλλοιωμένου οφιολίθου και του αργιλικού στρώματος με ποσοστά 2,81% και 1,77% αντιστοίχως.

Κατά τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος με τη μέθοδο των βαρέων υγρών, χρησιμοποιήθηκαν τα κοκκομετρικά κλάσματα -8+4 mm, -4+1 mm, -1+0,250 mm και -0,250+0,063 mm, όπου διαπιστώθηκε ότι η περιεκτικότητα του νικελίου είναι μεγαλύτερη στα ελαφριά προϊόντα του, αλλά η κατανομή του νικελίου είναι ως επί το πλείστον στα βαριά προϊόντα. Το παραπάνω αποτέλεσμα συμβαίνει κατά το βαρυτομετρικό διαχωρισμό με βαρέα υγρά, ενώ με βαρέα διάμεσα σε δύο κλάσματα το -8+4 mm και το -4+1 mm, όπου έλαβε χώρα η μέθοδος αυτή, επετεύχθη και κατανομή του νικελίου στα ελαφριά προϊόντα.

Κατά το μαγνητικό διαχωρισμό, χρησιμοποιήθηκαν και πάλι οι ίδιες κοκκομετρίες. Για τα δύο χονδρότερα κλάσματα χρησιμοποιήθηκε ο ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής (perm roll), ενώ για τα δύο λεπτότερα ο ξηρός επαγωγικός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης (high intensity induced magnetic separator). Διαπιστώθηκε ότι το νικέλιο παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στα κλάσματα -8+4 mm, -4+1 mm, -1+0,250 mm στα μαγνητικά προϊόντα, ενώ στο κλάσμα -0,250+0,063 mm εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στα μη μαγνητικά προϊόντα. Η κατανομή του νικελίου είναι σε όλες τις περιπτώσεις στα μαγνητικά προϊόντα.

Από τις δύο μεθόδους εμπλουτισμού, που χρησιμοποιήθηκαν, ο βαρυτομετρικός διαχωρισμός έδειξε σχετικά καλύτερα αποτελέσματα.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έλαβε χώρα στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή Γ. Αλεβίζου. Σκοπός της εργασίας ήταν η Ορυκτολογική-πετρογραφική μελέτη και οι δυνατότητες εμπλουτισιμότητας του λατεριτικού σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος του κοιτάσματος Hudenisht της περιοχής Pogradec (Αλβανία). Το ενδιαφέρον της συγκεκριμένης διπλωματικής έγκειται στο ότι το νικέλιο, το οποίο απαντάται κατά κύριο λόγο στο νικελιούχο χλωρίτη του μεταλλεύματος, αποτελεί πηγή άμεσου ενδιαφέροντος για τη βιομηχανία, διότι χρησιμοποιείται ευρέως σε ποικίλες εφαρμογές, κυριότερη από τις οποίες είναι η παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα. (Είναι μέταλλο ζωτικής σημασίας για την χαλυβουργία. Η υψηλή τιμή του σχετίζεται με την χαμηλή περιεκτικότητα των κοιτασμάτων Ni και το υψηλό κόστος για την επεξεργασία των μεταλλευμάτων Ni).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γ. Αλεβίσο για την καθοδήγηση και την επίβλεψή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και για τις εμπειρίες, αλλά και τις γνώσεις, που αποκόμισα σ' αυτή την περίοδο εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στη εξεταστική επιτροπή και συγκεκριμένα στον Καθηγητή κ. Κ. Κομνίτσα και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μ. Γαλετάκη για την συνεισφορά τους στη διαμόρφωση και ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Α. Στρατάκη, συνεργάτη του Εργαστηρίου Γενικής & Τεχνικής Ορυκτολογίας για τη συνολική του συνεισφορά στην ολοκλήρωση και διεξαγωγή της διπλωματικής αυτής, όπως επίσης και στον κ. Ε. Πετράκη, Διπλ. Μηχανικό Ορυκτών Πόρων για τη δική του συνεισφορά. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Διπλ. Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Παυλίνα Ροτόντο για τις μετρήσεις που πραγματοποίησε με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων Χ, όπως επίσης και τον κ. Γ. Αποστολάκη για την παρασκευή των στιλπνών τομών, που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μικροσκοπική εξέταση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΝΙΚΕΛΙΟ	6
1.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες.....	6
1.2 Οι χρήσεις του νικελίου.....	6
1.3 Κατανάλωση νικελίου	7
1.4 Αποθέματα νικελίου	8
1.5 Διακύμανση τιμής νικελίου	9
1.6: Μεταλλουργικές μέθοδοι εξαγωγής νικελίου.....	11
1.6.1: Μέθοδοι εξαγωγής νικελίου	11
1.6.2: Παραγωγή σιδηρονικελίου στην Ελλάδα	11
1.6.3: Αξιοποίηση πυρομεταλλουργικών μεθόδων από τη ΛΑΡΚΟ.....	12
1.6.4: Περιγραφή πυρομεταλλουργικής μεθόδου της ΛΑΡΚΟ.....	12
1.6.5: Προϊόντα ΛΑΡΚΟ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ	14
2.1: Ταξινόμηση κοιτασμάτων νικελίου.....	14
2.2: Θειούχα κοιτάσματα.....	14
2.2.1: Γεωχημεία θειούχων κοιτασμάτων	15
2.3: Λατεριτικά κοιτάσματα	15
2.3.1: Ορυκτολογική σύσταση μητρικών πετρωμάτων λατεριτών	15
2.3.2: Γεωχημεία μητρικών πετρωμάτων λατεριτών.....	16
2.3.3: Λατεριτική αποσάθρωση.....	16
2.3.4: Ταξινόμηση νικελιούχων λατεριτικών κοιτασμάτων	17
2.3.6: Νικελιούχα λατερικά κοιτάσματα	18
2.4: Ιζηματογενή λατεριτικά κοιτάσματα.....	18
2.4.1: Ορυκτολογική ανάλυση ιζηματογενών κοιτασμάτων	19
2.5: Κατηγορίες σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων σύμφωνα με τη γένεση τους	19
2.6: Κοιτάσματα νικελίου στα Βαλκάνια	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Γεωλογία της περιοχής του Pogradec (Αλβανία).....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Υπόβαθρο πειραματικών μεθόδων.....	23
4.1: Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο	23
4.2: Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM).....	24
4.3: Περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD)	25
4.4: Φασματοσκοπία ακτίνων-X φθορισμού (XRF)	27

4.5: Μέθοδοι εμπλουτισμού	30
4.5.1: Βαρυτομετρικός διαχωρισμός	30
4.5.2: Εργαστηριακή μέθοδος Βαρέων υγρών	30
4.5.3: Βιομηχανική μέθοδος των Βαρέων Διαμέσων	30
4.6: Μαγνητικός διαχωρισμός.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ορυκτολογία-Πετρογραφία και Χημισμός του σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος της περιοχής Hudensisht (Pogradec)	33
5.1: Δειγματοληψία	33
5.2: Χημικές αναλύσεις των αρχικών δειγμάτων	34
5.3: Ορυκτολογική-πετρογραφική εξέταση των αρχικών δειγμάτων.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Γεωχημική μελέτη	40
6.1 Συντελεστής Pearson.....	40
6.2:Γεωχημική κατανομή των στοιχείων κατά μήκος της τομής	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ	46
7.1: Προετοιμασία-θραύση δειγμάτων για εργαστηριακές δοκιμές εμπλουτισμού	46
7.2: Δοκιμή εμπλουτισμού με τη μέθοδο του βαρυτομετρικού διαχωρισμού.....	48
7.2.1: Αποτελέσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού με βαρέα διάμεσα.....	55
7.2.1: Μικροσκοπική εξέταση κλασμάτων βαρυτομετρικού διαχωρισμού.....	58
7.3: Δοκιμή εμπλουτισμού με τη μέθοδο του μαγνητικού διαχωρισμού	60
7.3.1: Μικροσκοπική εξέταση κλασμάτων μαγνητικού διαχωρισμού	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Τελικά συμπεράσματα	13
8.1: Συμπεράσματα ορυκτολογικής εξέτασης.....	13
8.2: Συμπεράσματα γεωχημικής εξέτασης	13
8.3: Συμπεράσματα μεθόδων εμπλουτισμού.....	14
8.3.1: Βαρυτομετρικός διαχωρισμός με τη μέθοδο βαρέων υγρών.....	14
8.3.2: Βαρυτομετρικός διαχωρισμός με τη μέθοδο βαρέων διαμέσων	14
8.3.3: Μαγνητικός διαχωρισμός.....	14
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	16
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΝΙΚΕΛΙΟ

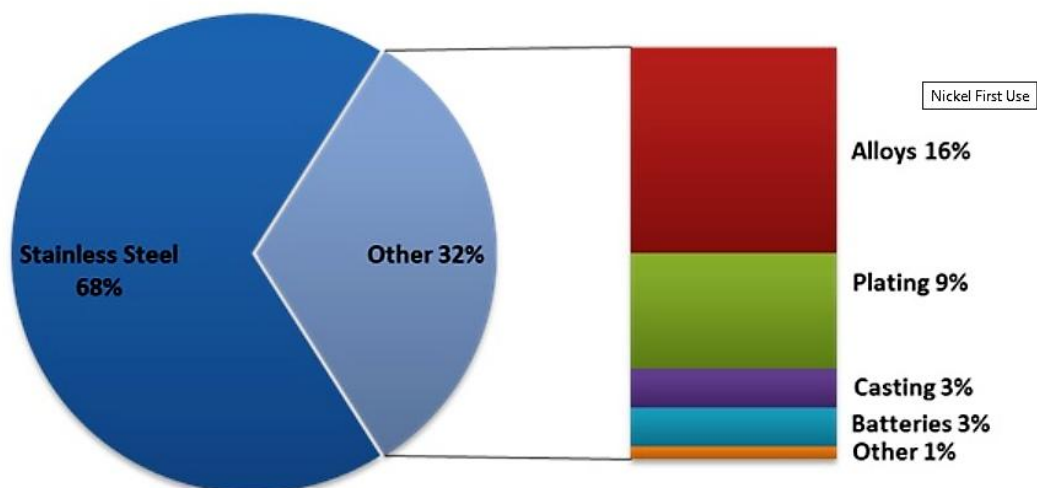
1.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες

Το νικέλιο αν και είναι γνωστό πάνω από 4000 χρόνια για την κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων, αναγνωρίστηκε σαν ανεξάρτητο στοιχείο μόλις τον 18ο αιώνα. Οικονομική σημασία απέκτησε στα μέσα του 19ου αιώνα, όταν ο Άγγλος φυσικός Faraday ανέπτυξε μια μέθοδο παραγωγής ανοξειδωτου χάλυβα με βάση την επινικέλωση. Το νικέλιο σχηματίζει μαζί με το κοβάλτιο και το σίδηρο την όγδοη ομάδα της τέταρτης περιόδου του περιοδικού συστήματος των στοιχείων. Είναι αργυρόλευκο, σκληρό ελατό μέταλλο με ατομικό βάρος 58,71 και δομή ατόμου, που αποτελείται από μίγμα 5 σταθερών ισοτόπων.

Το νικέλιο εμφανίζεται στις χημικές ενώσεις του με διάφορα θετικά σθένη 2,3,4. Το νικέλιο με σθένος 3 και 4 έχει μόνο θεωρητική σημασία καθώς οι κανονικές Eh και pH συνθήκες υδατικών διαλυμάτων δεν επιτρέπουν το σχηματισμό τους. Συνεπώς στη φύση το νικέλιο εμφανίζεται μόνο ως δισθενές (Αποστολίκας, 2009).

1.2 Οι χρήσεις του νικελίου

Το νικέλιο χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή ανοξειδωτου χάλυβα μέσω του κράματος του σιδηρονικελίου (68%, εικόνα 1.1). Αυτό που κάνει το νικέλιο κατάλληλο για την παραγωγή ανοξειδωτου χάλυβα είναι ότι μειώνει το ρυθμό διάβρωσης, σταθεροποιεί την ωστενιτική δομή και προσδίδει αντοχή και ελατότητα. Συγκρινόμενο με άλλα στοιχεία, το νικέλιο είναι ελατό προσδίδει καλύτερη αντοχή στη διάβρωση, μεγαλύτερη σκληρότητα, περισσότερη αντοχή σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες, καλή θερμική αγωγιμότητα, καθώς και ιδιαίτερες μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες (ηλεκτρική αγωγιμότητα), είναι μαγνητικό σε θερμοκρασία δωματίου, είναι ανθεκτικό στα αλκάλια και καταλυτικό. Συνδυάζεται με πληθώρα άλλων στοιχείων, όπως χαλκός, χρυσός, χρώμιο, ασήμι, προκειμένου να επιτευχθεί το καταλληλότερο δυνατό κράμα για την εκάστοτε εφαρμογή. Αυτά χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως στις οικοδομικές κατασκευές, στη χημική βιομηχανία, στα ηλεκτρονικά, στην κατασκευή πλοίων, στην πυρομεταλλουργία, στις επιμεταλλώσεις, στη μεταφορά και αποθήκευση του υδρογόνου μέσω προσρόφησής του μ' αυτό. Συγκεκριμένα ένα κράμα του νικελίου το monel (με περιεκτικότητα περίπου 70% νικέλιο, 30% χαλκό με ίχνη σιδήρου, μαγγανίου και πυριτίου), χρησιμοποιείται στην κατασκευή ελίκων πλοίων και σε μονάδες αφαλάτωσης, εξαιτίας της εξαιρετικής του αντοχής στη διάβρωση από το θαλασσινό νερό. Το νικέλιο επίσης αντιστέκεται στη διάβρωση και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, γι' αυτό και χρησιμοποιείται στην κατασκευή αεριοστροβίλων και κινητήρων πυραύλων (www.metalpedia.com).



Εικόνα 1.1: Χρήσεις νικελίου (www.insg.org)

1.3 Κατανάλωση νικελίου

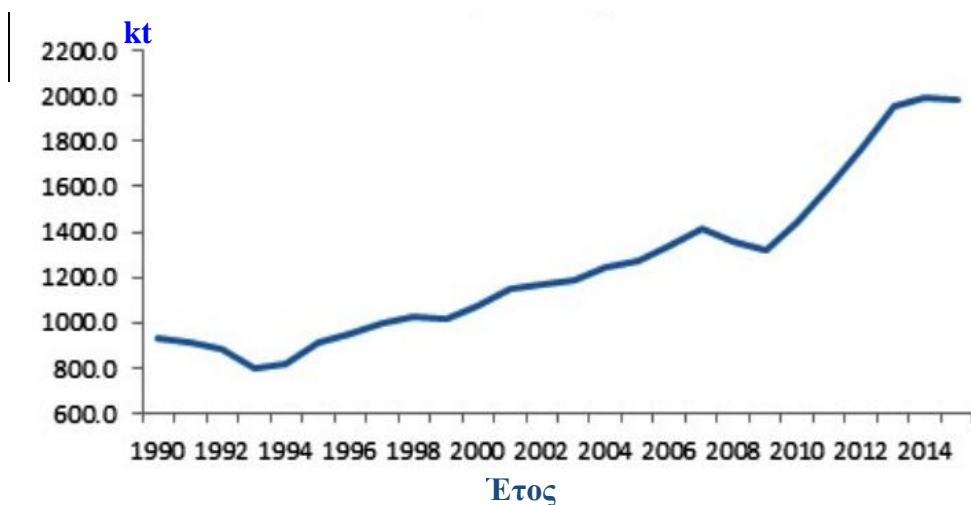
Η χρήση του νικελίου αυξάνεται διαχρονικά αναλόγως με την οικονομική ανάπτυξη ανά τον κόσμο. Οι απαιτήσεις για το νικέλιο αυξήθηκαν από 907.000 τόνους το 1990 σε 1.465.000.000 τόνους το 2010, με ετήσια αύξηση 2,3%. Με την αυξανόμενη άνθιση της κινέζικης οικονομίας υπήρξε περαιτέρω αύξηση από το 2010 μέχρι το 2015, με ετήσια αύξηση των αναγκών σε ποσοστό 5%. Η Ασία είναι πλέον με διαφορά η μεγαλύτερη αγορά νικελίου αντιπροσωπεύοντας το 71% της παγκόσμιας ζήτησης (πίνακας 1.1), ενώ παράγει αντίστοιχα το 48% της παγκόσμιας παραγωγή πρωτογενούς νικελίου (πίνακας 1.2). Η κατανάλωση Ni στην Κίνα αντιστοιχεί στο 51% της παγκόσμιας ζήτησης σε νικέλιο, σε αντίθεση με το ποσοστό της πριν 10 χρόνια, που έφτανε μόλις το 18%. Λόγω της μεγάλης αύξησης της ζήτησης του νικελίου, υπήρξε αύξηση και στην πρωτογενή παραγωγή του νικελίου, έτσι ώστε από μια παραγωγή των 900.000 περίπου τόνους το 1990 να έχει φτάσει στους 1.983.000 τόνους το 2014 έχοντας ετήσιο ρυθμό αύξησης της παραγωγή την τελευταία πενταετία 5.5% (Εικόνα 1.2). (www.insg.org)

Πίνακας 1.1: Χρήση πρωτογενούς νικελίου σε kt (www.insg.org)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Africa	31,7	24,0	23,9	24,6	22,9	21,4
America	121,8	153,2	165,0	166,4	174,8	181,9
Asia	760,4	929,4	1050,6	1109,9	1233,7	1308,6
Europe	317,7	355,9	364,5	364,1	350,8	353,9
EU27	279,9	317,4	325,5	322,0	310,6	313,5
Oceania	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
WORLD	1234,3	1465,2	1606,7	1667,7	1784,9	1868,5

Πίνακας 1.2: Παραγωγή πρωτογενούς νικελίου σε kt (www.insg.org)

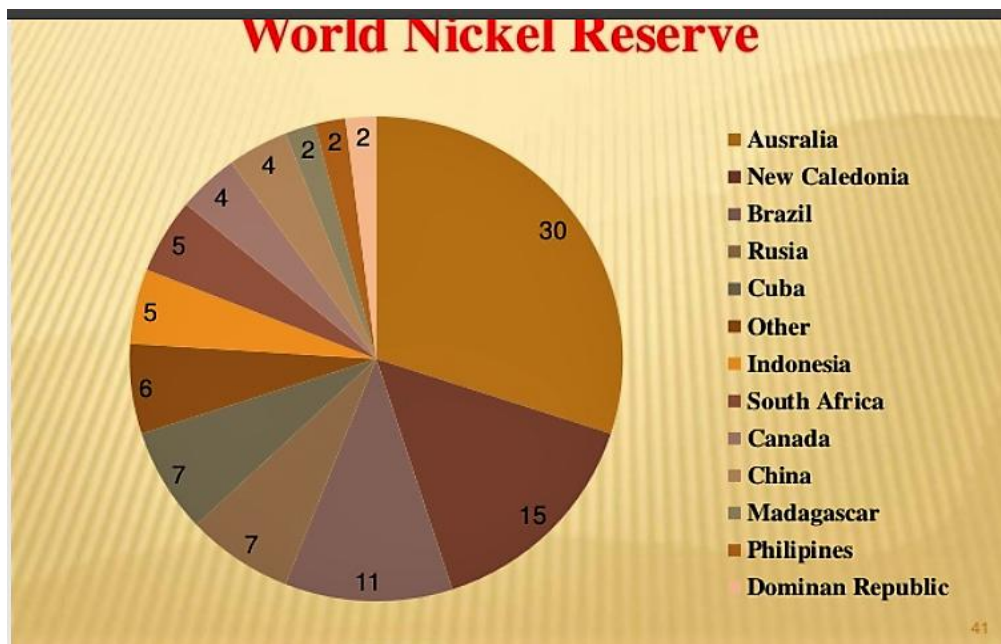
	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Africa	36,6	36,3	36,7	41,2	59,0	75,2
America	234,1	223,1	268,0	306,1	293,3	295,7
Asia	432,0	537,6	631,2	728,0	922,5	939,6
Europe	446,1	503,4	515,7	510,3	498,3	483,4
EU27	81,5	108,7	119,2	117,8	116,6	109,6
Oceania	167,6	141,4	150,2	174,1	189,9	199,8
WORLD	1316,4	1441,8	1601,8	1759,7	1963,1	1993,6



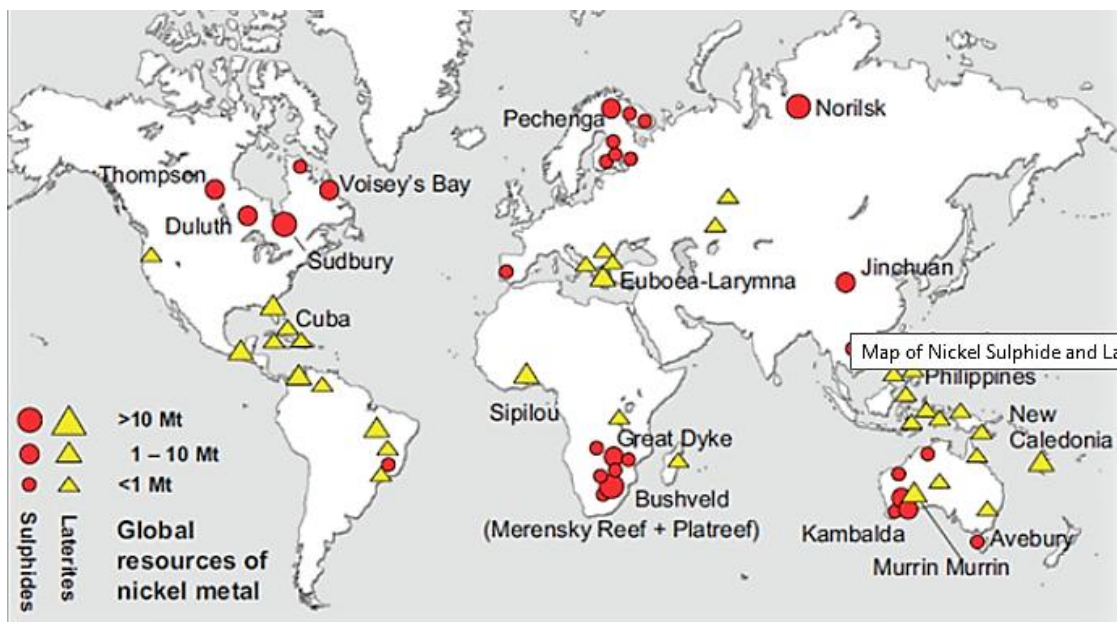
Εικόνα 1.2: Παραγωγή πρωτογενούς νικελίου σε kt από 1990 έως 2014 (www.insg.org)

1.4 Αποθέματα νικελίου

Υφίστανται πολλά ερωτήματα σχετικά με την αφθονία των αποθεμάτων των διαφόρων στοιχείων, που απαντώνται στο στερεό φλοιό. Σχετικά με το νικέλιο οι προβληματισμοί είναι αβάσιμοι, διότι θεωρείται ότι είναι το πέμπτο κοινότερο στοιχείο στη Γη, φυσικά όμως τα αποθέματά του σε κοιτάσματα, τα οποία είναι και οικονομικά εκμεταλλεύσιμα είναι πιο περιορισμένα. Οι στατιστικές που μας δίνονται και αφορούν τα κοιτάσματα αυτά, αναφέρονται μόνο σε κοιτάσματα εδάφους κι όχι σ' αυτά της θάλασσας. Η ανάπτυξη καινούριων τεχνολογιών, πιστεύεται ότι θα βοηθήσει στην πρόσβαση κι άλλων κοιτασμάτων. Σύμφωνα με κάποιες πηγές τα αποθέματα νικελίου στο βυθό της θάλασσας ξεπερνούν κατά πολύ αυτά, που βρίσκονται στην ξηρά. Θεωρείται ότι τα αποθέματα της ξηράς επαρκούν για περισσότερα από 100 ακόμη χρόνια (www.insg.org). Στις εικόνες 1.3 και 1.4 παρουσιάζονται τα παγκόσμια αποθέματα ανά χώρα και η κατανομή τους στον παγκόσμιο χάρτη, όπου περίπου τα μισά αποθέματα βρίσκονται στην Αυστραλία, Νέα Καληδονία και Βραζιλία.



Εικόνα 1.3: Ποσοστιαία (%) κατανομή αποθεμάτων νικελίου στον κόσμο ανά χώρα.

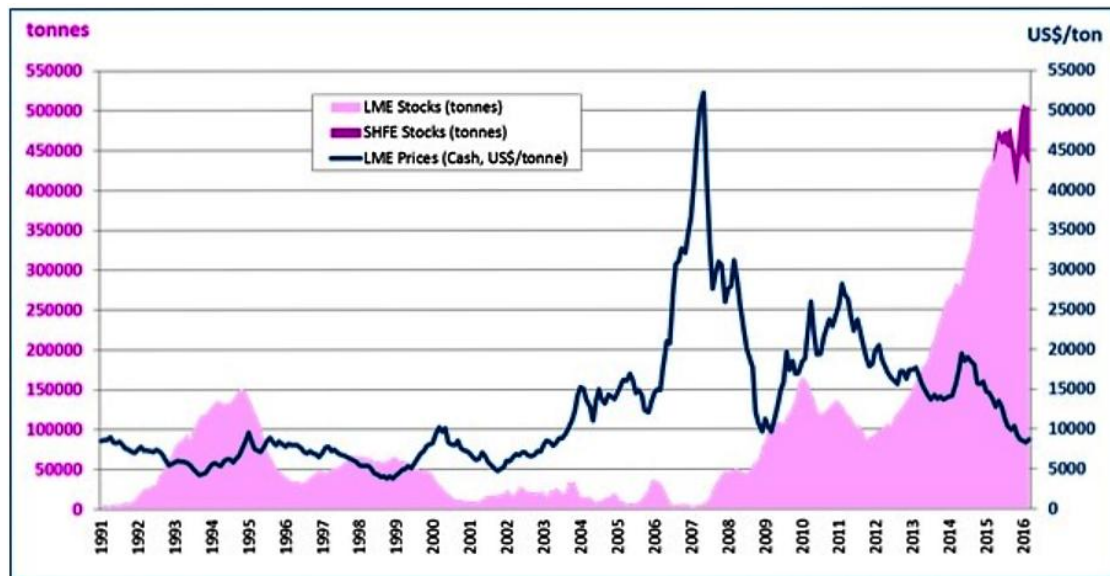


Εικόνα 1.4: Παγκόσμιος χάρτης με κοιτάσματα νικελίου

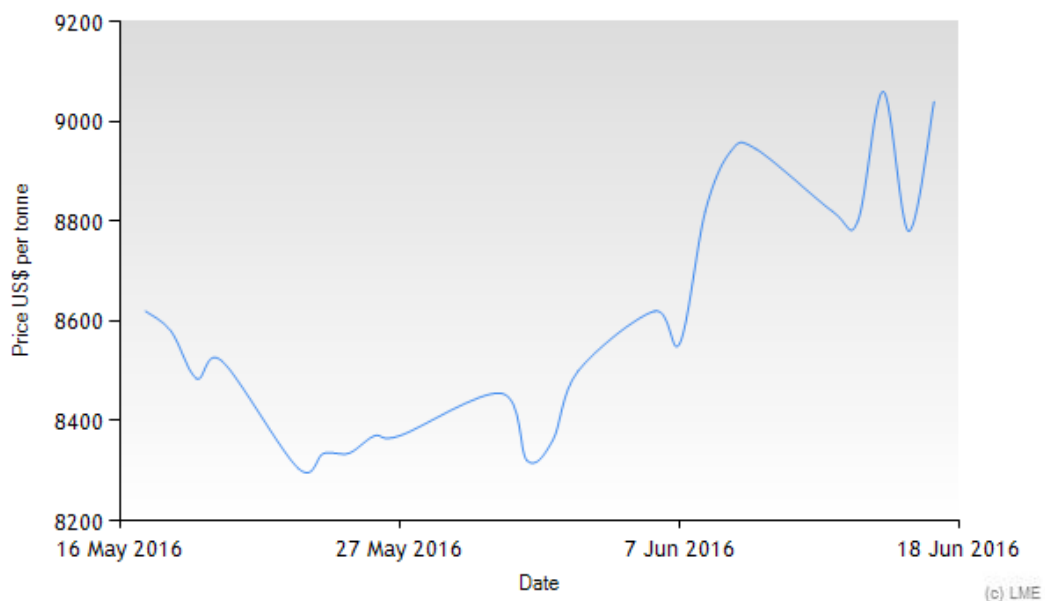
1.5 Διακύμανση τιμής νικελίου

Η διακύμανση της τιμής του νικελίου εμφανίζει έντονες αυξομειώσεις και εξαρτάται τόσο από τη ζήτηση όσο και από την παραγόμενη ποσότητα νικελίου. Τα τελευταία 25 χρόνια

εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις, ενώ οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται τις χρονικές περιόδους όπου καταναλώνεται το σύνολο της παραγωγής, αποθηκεύοντας μικρό μέρος της παραγόμενης ποσότητας (Εικόνα 1.5). Τα τελευταία 5 χρόνια εμφανίζεται αυξητική τάση στα παραγόμενα αποθέματα με αντίστοιχη μειούμενη τάση στην τιμή. Ενδεικτικά, στην εικόνα 1.6 απεικονίζεται η μεταβολή της τιμής του νικελίου στη διάρκεια ενός μήνα (16 Μαΐου 2016 – 18 Ιουνίου 2016), όπου η τιμή μεταβάλλεται από 8250US\$/tonne έως 9000US\$/tonne.



Εικόνα 1.5: Διακύμανση της τιμής σε σχέση με τα Stocks του νικελίου (www.insg.org)



Εικόνα 1.6: Διακύμανση της τιμής του νικελίου (www.lme.com)

1.6: Μεταλλουργικές μέθοδοι εξαγωγής νικελίου

1.6.1: Μέθοδοι εξαγωγής νικελίου

Η ανάκτηση του νικελίου από τους λατερίτες είναι δύσκολη λόγω της πολύπλοκης ορυκτολογικής τους σύστασης. Η ποικιλία των μεταλλευμάτων (επομένως και της χημικής τους σύστασης) και η έλλειψη ενός συγκεκριμένου νικελιούχου ορυκτού που να μπορεί να ανακτηθεί με συμβατικές φυσικές ή φυσικοχημικές μεθόδους εμπλουτισμού, αντιπροσωπεύουν τις κύριες αιτίες της σχετικά περιορισμένης εκμετάλλευσης των λατεριτών. Παραπέρα δυσκολίες παρουσιάζονται από το γεγονός ότι μέσα στο μετάλλευμα υπάρχουν και άλλα μέταλλα, τα οποία δεν μπορούν να εξαχθούν οικονομικά, όπως ο σίδηρος, το κοβάλτιο, το χρώμιο. Γενικά, η πολυμορφία των μεταλλευμάτων οδήγησε στην ανάπτυξη μιας ποικιλίας μεθόδων εξαγωγής νικελίου, μερικές από τις οποίες βρίσκονται σε εμπορική λειτουργία και είναι πυρομεταλλουργικές, υδρομεταλλουργικές, ή συνδυασμοί πυρομεταλλουργίας και υδρομεταλλουργίας. Κάθε μία από τις μεθόδους εξαγωγής του νικελίου εφαρμόζεται και σε διαφορετικό τύπο λατερίτη, ανάλογα δηλαδή με τις ιδιαιτερότητες του μεταλλεύματος που θα υποστεί επεξεργασία κάθε φορά (Τζουβελάκης, 1981).

1.6.2: Παραγωγή σιδηρονικελίου στην Ελλάδα

Τα κοιτάσματα, τα οποία βρίσκονται σήμερα υπό καθεστώς εκμετάλλευσης είναι του Αγ. Ιωάννη Λάρυμνας, της Εύβοιας καθώς και της Καστοριάς. Η ΛΑΡΚΟ Γ.Μ.Μ.Α.Ε. διαθέτει επίσης μεταλλεία στο Νέο Κόκκινο Βοιωτίας και δύο λιγνιτωρυχεία για ιδιόχρηση λιγνίτη στα Σέρβια Κοζάνης και Κορώνη Μεσσηνίας. Κοιτάσματα σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων έχουν εξακριβωθεί και σε άλλες περιοχές της χώρας, όπως Έδεσσα, Σκύρος, Γρεβενά, Αττική, Κοζάνη, Μυτιλήνη και αλλού. Τα συνολικά αποθέματα της χώρας σε νικελιούχα μεταλλεύματα υπολογίζονται σε 200 εκ. τόνους (Παπαμαντέλλος, 1989).

Στον ελληνικό χώρο έχουν περιγραφεί περισσότερες από 110 μικρές και μεγάλες εμφανίσεις σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων, χαρακτηριστικό γνώρισμα των οποίων είναι η συνύπαρξη νικελίου, σιδήρου, χρωμίου και κοβαλτίου. Η συγκέντρωση των στοιχείων αυτών συνδέεται άμεσα με τον τρόπο γένεσης των μεταλλευμάτων και οφείλεται στη λατεριτική αποσάθρωση οφιολιθικών πετρωμάτων.

Η περιεκτικότητα των ελληνικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων σε νικέλιο είναι σχετικά χαμηλή και είναι συνήθως γύρω στο 1% και σπάνια ξεπερνά το 1,2%. Η περιεκτικότητα των μεταλλευμάτων σε σίδηρο κυμαίνεται μεταξύ 20 και 79% και τα υπόλοιπα συστατικά τους είναι κυρίως οξείδια του αργιλίου, πυριτίου, όπως και οξείδια του μαγνησίου και του χρωμίου σε ποσοστό 2-3%

Τα ελληνικά νικελιούχα κοιτάσματα είναι τα φτωχότερα στον κόσμο, σε σχέση με τα κοιτάσματα της Νέας Καληδονίας και της Ρωσίας με περιεκτικότητες 2-3% σε νικέλιο,

καθώς και του Αγ.Δομίνικου και του Oregon των ΗΠΑ με περιεκτικότητες 1,6-1,7% (Καλλές, 1993; Αλεβίζος, 1997).

1.6.3: Αξιοποίηση πυρομεταλλουργικών μεθόδων από τη ΛΑΡΚΟ

Το νικέλιο, που παράγει η ΛΑΡΚΟ αντιστοιχεί στο 2-3% της παραγωγής νικελίου στο δυτικό κόσμο ή διαφορετικά στο 6-7% της κατανάλωσης πρωτογενούς νικελίου της Ευρωπαϊκής χαλυβουργίας ανοξείδωτου χάλυβα.

Η επιτυχής πυρομεταλλουργική επεξεργασία των συγκριτικά φτωχών ελληνικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '70 κατέστη εφικτή, εξαιτίας:

- Της συγκριτικά χαμηλότερης περιεκτικότητάς τους σε:
 - Φυσική υγρασία (περίπου 4,5%, έναντι 20 έως 30% άλλων λατεριτών)
 - Απώλεια πύρωσης (περίπου 9,0% έναντι 12 έως 20% άλλων λατεριτών)
 - Περιεκτικότητα MgO (περίπου 3,5% έναντι 5 έως 35% άλλων λατεριτών),.

Τα παραπάνω κάτι, χαρακτηριστικά προσδίδουν συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι άλλων λατεριτών, λόγω χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων για ξήρανση, πυροδιάσπαση και τήξη μέχρι την παραγωγή σκωρίας.

- Της εφαρμογής μεθόδων μαζικής εξόρυξης με χαμηλό κόστος (περισσότερο από το 80% του επεξεργαζόμενου σήμερα μεταλλεύματος προέρχεται από τις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις).
- Της ύπαρξης εγχωρίων πηγών στερεών καυσίμων (λιγνίτες)
- Του συγκριτικά χαμηλότερου κόστους εργατικών και ηλεκτρικής ενέργειας (Κομνίτσας, 2005).

1.6.4: Περιγραφή πυρομεταλλουργικής μεθόδου της ΛΑΡΚΟ

Η μέθοδος επεξεργασίας που εφαρμόζει η ΛΑΡΚΟ περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Θραύση και ομοιογενοποίηση των λατεριτικών νικελιούχων μεταλλευμάτων και ελεγχόμενη ανάμιξή τους με στερεά καύσιμα για τη δημιουργία μίγματος καθορισμένης σύστασης
- Θέρμανση μέχρι τους 870°C, περίπου και μερική αναγωγή των μεταλλευμάτων του μεταλλουργικού μίγματος σε Π/Κ

- Αναγωγική θέρμανση και τήξη μέχρι τους 1450°C του προϊόντος εξαγωγής των περιστροφικών καμίνων σε Η/Κ εμβαπτισμένου τόξου ανοιχτού λουτρού για την παραγωγή τηγμένου κράματος Fe-Ni (12-16% Ni) και απόρριψη στον Ευβοϊκό κόλπο μετά από κοκκοποίηση με θαλασσινό νερό της παραγόμενης σκωρίας.
- Εξευγενισμός του τηγμένου κράματος Fe-Ni σε μεταλλάκτες OBM με εμφύσηση οξυγόνου και προθήκη ασβέστη σε θερμοκρασίες μέχρι 1700° C για την παραγωγή κοκκοποιημένου κράματος Fe-Ni (18-24% Ni) με χρήση θαλασσινού νερού (Κομνίτσας, 2005).

1.6.5: Προϊόντα ΛΑΡΚΟ

Τα προϊόντα, που παράγει η ΛΑΡΚΟ από την καμίνευση των ελληνικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων είναι:

- Κοκκοποιημένο σιδηρονικέλιο (FeNi) με περιεκτικότητα σε νικέλιο 18-20% (16.000 tn/έτος νικέλιο ή 80.000 tn/έτος FeNi 20%) παραγωγής μεταλλακτών οξυγόνου, ελεύθερο άνθρακα χαμηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο. Πρώτη ύλη παραγωγής ανοξείδωτου χάλυβα.
- Σκουριά ηλεκτροκαμίνων αναγωγής (1.700.000 tn/έτος) κοκκοποιημένη πρώτη ύλη για την τσιμεντοβιομηχανία, άριστο υλικό για αμμοβολή και επίστρωση δρόμων. Διατίθεται κυρίως στο εσωτερικό (το 40% της παραγωγής). Το υπόλοιπο ποντίζεται στο Β.Ευβοϊκό κόλπο.
- Σκουριά μεταλλακτών (70.000 tn/έτος) θρυμματισμένη, άριστο υλικό για βαρύ σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στην πάκτωση αντλητικών νησίδων πετρελαίου, σαν περίβλημα υποθαλάσσιων αγωγών, κ.ά.

Το τελικό προϊόν της ΛΑΡΚΟ είναι FeNi, το οποίο εξάγεται στο σύνολό του στις ευρωπαϊκές χαλυβουργίες ανοξείδωτου χάλυβα. Το FeNi της ΛΑΡΚΟ, λόγω της πολύ χαμηλής περιεκτικότητάς του σε C%, S% και P% καθώς και της αντίστοιχα υψηλής σε Fe% (περίπου 80%) αξιολογείται, σαν προϊόν άριστης ποιότητας κατάλληλο για την παραγωγή ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα (Κομνίτσας, 2005).

Κατά το έτος 2015, η ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ παρήγαγε 17.113 τόνους νικελίου έναντι 18.481 της παραγωγής του 2014, σημειώνοντας μείωση παραγωγής κατά 7,4%. Αντίστοιχα, οι εξαγωγές του έτους ανήλθαν σε 17.541 τόνους, ποσότητα που αντιστοιχεί σε μείωση 1,9%. Οι ανάγκες της μεταλλουργικής μονάδας σε πρώτη ύλη, καλύφθηκαν αποκλειστικά με σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα (λατερίτες) που προήλθαν από τα μεταλλεία Ευβοίας, Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας και Καστοριάς, με συνολική παραγωγή που ανήλθε σε 2.264.000 τόνους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

2.1: Ταξινόμηση κοιτασμάτων νικελίου

Τα κοιτάσματα μεταλλευμάτων γενικότερα σε σύγκριση με την κανονική δομή του γήινου φλοιού και τη χημική του σύσταση, απεικονίζουν μια σημαντική συγκέντρωση των αντίστοιχων μετάλλων. Η συγκέντρωση αυτή οφείλεται στην επίδραση διαφόρων γεωλογικών και γεωχημικών συμβάντων, όπως ενδογενείς διαδικασίες (μαγματισμός, μεταμόρφωση, τεκτονισμός) ή εξωγενείς (κύκλος αποσάθρωσης, μεταφοράς απόθεσης υλικών).

Τα μεταλλεύματα νικελίου με βάση τον τρόπο γένεσης ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Θειούχα
- Λατεριτικά
- Ιζηματογενή

Σύμφωνα με τον Kuck (USGS Mineral Commodity Summaries, 2005) τα αποθέματα νικελιούχων μεταλλευμάτων παγκοσμίως περιέχουν 130.000.000 τόνους νικελίου εκ των οποίων 60% εμπεριέχεται σε λατεριτικά νικελιούχα μεταλλεύματα και 40% σε θειούχα. Αξιοσημείωτο όμως είναι ότι τα λατεριτικά κοιτάσματα περιέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό νικελίου, ενώ αντιθέτως η παγκόσμια παραγωγή στο μεγαλύτερο μέρος της προέρχεται από θειούχα σε 60% και από λατεριτικά σε ποσοστό 40% (Elias, 2002; Αποστολίκας, 2009).

2.2: Θειούχα κοιτάσματα

Τα μαγματικά θειούχα κοιτάσματα είναι συγκεντρώσεις θειούχων ορυκτών συνδεδεμένων με συμπλέγματα βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων, τα οποία σχηματίστηκαν από πρώιμη κρυστάλλωση μάγματος (ορθομαγματικό στάδιο) βασικής σύστασης εντός μαγματικών θαλάμων. Η κρυστάλλωση δυσδιάλυτων θειούχων ενώσεων από ένα μαγματικό τήγμα είναι η βασική διαδικασία, που οδηγεί στη δημιουργία θειούχων κοιτασμάτων. Το θειούχο τήγμα λειτουργεί σαν συλλέκτης για το νικέλιο, κοβάλτιο, χαλκό και πλατινοειδή (PGE), ενώ ο σίδηρος συμμετέχει σε πολύ μικρότερο βαθμό αλλά λόγω του ότι αποτελεί κύριο στοιχείο του μάγματος, τα περισσότερα θειούχα τήγματα είναι πλούσια σε σίδηρο. Τα κοιτάσματα αυτά είναι συνήθως πολυμεταλλικά και συνδέονται με τα μεταλλεύματα χαλκού και πλατινοειδών (PGE). Η ιδιαιτερότητα αυτή τους προσδίδει ιδιαίτερα μεγάλη μεταλλευτική αξία (Αποστολίκας, 2009).

Γενικότερα τα βασικά και τα υπερβασικά σώματα, που φιλοξενούν θειούχα κοιτάσματα διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Βασικό τήγμα, που προήλθε από πρόσκρουση μετεωρίτη (Sudbury Καναδά)
- Ρεύματα βασαλτών σε ενδοηπειρωτικές ρηξιγενείς ζώνες.
- Διεισδύσεις κοματιϊτικών ρωών (Kambalda-Agnew Αυστραλίας, Thompson-Raglan Καναδά)
- Άλλες βασικές – υπερβασικές διεισδύσεις (Voisey's Bay Καναδά)

2.2.1: Γεωχημεία θειούχων κοιτασμάτων

Η διακύμανση της περιεκτικότητας του νικελίου, του χαλκού και των πλατινοειδών στα θειούχα μεταλλεύματα εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση του μαγματικού τήγματος. Οι κυριότεροι παράγοντες, που ελέγχουν τη σύσταση τους είναι τρεις:

- ο λόγος πυριτικών/θειούχων ορυκτών
- η σύσταση του μάγματος, από το οποίο προέρχονται
- η ποσότητα σταγονιδίων δυσδιάλυτων θειούχων ενώσεων (Αποστολίκας, 2009).

2.3: Λατεριτικά κοιτάσματα

Τα λατεριτικά νικελιούχα κοιτάσματα αποτελούν το 72% των παγκοσμίων αποθεμάτων νικελίου. Πρόκειται για υπολειμματικά κοιτάσματα λατεριτικών φλοιών αποσάθρωσης υπερβασικών πετρωμάτων με οικονομική σημασία, όσον αφορά την περιεκτικότητά τους σε νικέλιο κατά κανόνα και κοβάλτιο.

Η συντριπτική πλειοψηφία των κοιτασμάτων αυτών αναπτύσσεται επιφανειακά, χωρίς να καλύπτονται από υπερκείμενα πετρώματα με εξαίρεση μια σειρά κοιτασμάτων της Βαλκανικής, που καλύπτονται από κυμαινόμενου πάχους υπερκείμενα, που λειτούργησαν προστατευτικά για τη διατήρησή τους. Η κάλυψη των κοιτασμάτων αυτών καθιστά την εκμετάλλευσή τους, σε σύγκριση με τα επιφανειακά, οικονομικά ακριβότερη (Αποστολίκας, 2009).

2.3.1: Ορυκτολογική σύσταση μητρικών πετρωμάτων λατεριτών

Οι περιδοτίτες συνίστανται κυρίως από ολιβίνες, πυρόξενους και δευτερεόντως από αμφιβόλους, μαρμαρυγίες, σπινελλίους, γρανάτες και σερπεντίνες. Οι κυριότεροι περιδοτίτες, που συμμετέχουν σαν μητρικά πετρώματα στο σχηματισμό λατεριτών, είναι δουνίτες-χαρτσβουργίτες και σερπεντίνιτες. Η ορυκτολογική σύσταση των περιδοτιτών με την υψηλή συμμετοχή του ολιβίνης ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το σχηματισμό των λατεριτικών νικελιούχων κοιτασμάτων, διότι ο ολιβίνης, που περιέχεται στα παραπάνω πετρώματα, αποτελεί την αρχική πηγή νικελίου. Ο ολιβίνης είναι ισόμορφη παράμειξη

μεταξύ των ακραίων μελών φορστερίτη Mg_2SiO_4 και φαυαλίτη Fe_2SiO_4 και στα υπερβασικά πετρώματα είναι κυρίως μαγνησιούχος με αξιόλογες περιεκτικότητες νικελίου.

Οι δουνίτες αποτελούνται κυρίως από ολιβίνη σε ποσοστό μεγαλύτερο από 90%, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό της σύστασής τους συμπληρώνεται με σπινελλίους (χρωμίτης), πυρόξενους και αμφιβόλους. Παρόμοια ορυκτολογική σύσταση, με διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής των επιμέρους φάσεων, έχουν και οι χαρτσβουργίτες.

Η τρίτη ομάδα πετρωμάτων, που συμμετέχει στο σχηματισμό νικελιούχων λατεριτικών φλοιών αποσάθρωσης είναι οι σερπεντινίτες. Τα ορυκτά της ομάδας του σερπεντίνης αποτελούν τα κύρια συστατικά των σερπεντινιτών και σχηματίζονται δευτερογενώς από την υδροθερμική εξαλλοίωση (σερπεντινίωση) πλούσιων σε μαγνήσιο πετρωμάτων, όπως ο περιδοτίτης και ο πυροξενίτης και ιδιαίτερα από τα ορυκτά ολιβίνη, πυρόξενο και σπανιότερα από Mg-αμφιβόλους.

Τα κυριότερα προϊόντα της σερπεντινίωσης είναι τα χρυσοτίλης, λιζαρδίτης, αντιγορίτης, και βρουκίτης. Εκτός των παραπάνω ορυκτών στους σερπεντινίτες δευτερευόντως βρίσκουμε τάλκη, ακτινόλιθο και ανθρακικά ορυκτά (Αποστολίκας, 2009).

2.3.2: Γεωχημεία μητρικών πετρωμάτων λατεριτών

Σε συγκεκριμένα πετρώματα του γήινου φλοιού, όπως τα υπερβασικά, το Ni εμφανίζει ιδιαίτερη αυξημένη συγκέντρωση. Ο ρόλος των υπερβασικών στο σχηματισμό των νικελιούχων λατεριτικών κοιτασμάτων αντικατοπτρίζεται στο χημισμό αυτών των μεταλλευμάτων. Η συγκέντρωση του σιδήρου σε σχέση με τις χαμηλές περιεκτικότητες αλουμινίου και ο εμπλουτισμός σε νικέλιο είναι τα χαρακτηριστικά κριτήρια των νικελιούχων λατεριτών και δείχνουν τη συγγενική τους σχέση με τα υπερβασικά.

Εκτός των κυρίων στοιχείων, στα υπερβασικά πετρώματα εμφανίζεται επίσης μια σειρά ιχνοστοιχείων σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, χωρίς τα περισσότερα από αυτά να έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη χημική σύστασή τους (Αποστολίκας, 2009).

2.3.3: Λατεριτική αποσάθρωση

Η λατεριτίωση είναι μια έντονη χημική, ορυκτολογική και μορφολογική μεταβολή, τα προϊόντα της οποίας παρουσιάζουν πολλές φορές διαφορετικά χημικά, ορυκτολογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά από αυτά του μητρικού πετρώματος.

Σύμφωνα με το “IGCP 129”-working group on laterites (Schellmann, 1982).

«Λατερίτες είναι προϊόντα έντονης αποσάθρωσης πετρωμάτων σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αποτελούνται κυρίως από γκαιτίτη, αιματίτη, Al-υδροξείδια, καολινίτη και χαλαζία. Η σχέση $SiO_2:(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ ενός λατερίτη θα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή του καολινιτοποιημένου μητρικού πετρώματος, στο οποίο το συνολικό Al_2O_3 βρίσκεται υπό μορφή καολινίτη και ο συνολικός Fe_2O_3 υπό μορφή οξειδίων του σιδήρου. Η περιεκτικότητα του

λατερίτη σε SiO_2 δε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα του περιεχόμενου στον καολινίτη και στον πρωτογενή χαλαζία του μητρικού πετρώματος.»

Η διεργασία της λατεριτίωσης έχει ως εξής: το μετεωρικό νερό είναι ελαφρώς όξινο εξαιτίας του διαλυμένου σε αυτό CO_2 . Το εδαφικό νερό έχει επίσης όξινο pH (4 με 5) αφού περιέχει διάφορα χουμικά οξέα. Όλα τα πετρογενετικά ορυκτά είναι διαλυτά υπό κατάλληλες φυσικοχημικές συνθήκες, δηλαδή αυτές που δημιουργούνται από όξινα και οξειδωτικά εδαφικά ύδατα. Κατ' αυτόν τον τρόπο τα ορυκτά αποσυντίθενται μέσω της μετακίνησης ορισμένων στοιχείων σε βαθύτερους ορίζοντες και της παραμονής των άλλων στις θέσεις αποσάθρωσης. Έτσι, στα τροπικά κλίματα όπου η συγκέντρωση των χουμικών οξέων είναι επαρκής, η έκπλυση χημικών στοιχείων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική. Ως αδιάλυτα στην επιφάνεια παραμένουν μόνο το Fe και το Al, σχηματίζοντας οξείδια (Σταθογιάννη, 2007).

2.3.4: Ταξινόμηση νικελιούχων λατεριτικών κοιτασμάτων

Στα λατεριτικά εδάφη διακρίνονται τρεις ζώνες, η εξέλιξη των οποίων, από την επιφάνεια προς τους βαθύτερους ορίζοντες, δίνεται από τον Golightly (1981) ως εξής:

- Ζώνη λειμωνίτη
- Ζώνη σαπρολίτη
- Αργιλική ζώνη

Ζώνη λειμωνίτη:

Η ζώνη αυτή αποτελεί κυρίως ένα κάλυμμα ερυθρού ή κίτρινου λειμωνίτη. Μερικές μαλακές λειμωνιτικές ζώνες είναι δυνατόν να περιέχουν υψηλό ποσοστό αιματίτη. Ο λειμωνίτης μπορεί σε όξινες συνθήκες να μετατραπεί σε σιδηροπαγές (ferricrete).

Αργιλική ζώνη:

Είναι ένα ενδιάμεσο στρώμα που αποτελείται κυρίως από νοντρονίτη και χαλαζία. Η προγενέστερη δομή του μητρικού πετρώματος είναι συνήθως καλά διατηρημένη.

Ζώνη σαπρολίτη:

Είναι μια ζώνη εν μέρει εξαλλοιωμένου υποβάθρου, στην οποία τα περισσότερα από τα ορυκτά του μητρικού πετρώματος, εξακολουθούν να υφίστανται και ο αρχικός ιστός του πετρώματος διατηρείται σε καλή κατάσταση. Αποτελείται από ένα μίγμα αναλλοίωτου μητρικού πετρώματος, σαπρολίτη, μπλοκ χαλαζία (Silcrete) και φλεβίδια γαρνιεριτών. Σε ορισμένα κοιτάσματα το ανώτερο τμήμα του σαπρολίτη μπορεί να εμφανίζει υψηλές περιεκτικότητες σιδήρου, χωρίς όμως να δύναται να χαρακτηριστεί σαν λειμωνιτική ζώνη (Αποστολίκας, 2009).

Το νικέλιο φθάνει στη μέγιστη τιμή σε διαφορετικούς ορίζοντες των λατεριτικών φλοιών αποσάθρωσης. Σύμφωνα με τους Golightly (1981) και Harju (1979) στους περισσότερους τυπικούς λατερίτες μεγάλη συγκέντρωση Ni παρατηρείται στη σαπρολιτική ζώνη. Το

μητρικό πέτρωμα είναι κυρίως χαρτσβουργίτης, αλλά μπορεί να είναι και κάποιος άλλος τύπος περιδοτίτη.

Το Co δείχνει μια παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του Ni, εξ' αιτίας όμως της μικρότερης κινητικότητας, η μέγιστη συγκέντρωση του Co απαντάται μόνιμα πάνω από τη ζώνη με το μέγιστο του Ni. Το Mn, το οποίο οξειδώνεται πιο δύσκολα από τον Fe, αλλά πιο εύκολα από το Ni, ακολουθεί την ίδια πορεία με το Co. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις Co και Mn παρατηρούνται συνήθως στο ανώτερο τμήμα της αργιλικής ζώνης.

Στα νικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα το νικέλιο συγκεντρώνεται σε έναν ή περισσότερους ορίζοντες του λατεριτικού φλοιού αποσάθρωσης.

2.3.6: Νικελιούχα λατερικά κοιτάσματα

Οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην ανάπτυξη των νικελιούχων λατεριτικών κοιτασμάτων είναι απλούστερες από αυτές των θειούχων κοιτασμάτων. Τα λατεριτικά κοιτάσματα αναπτύσσονται επιφανειακά επί υπερβασικών χωρίς να καλύπτονται από άλλα πετρώματα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το χαμηλό κόστος παραγωγής τους. Εξαιρέση αποτελούν κυρίως τα κοιτάσματα των Βαλκανίων που καλύπτονται συχνά από μεγάλου πάχους νεότερα πετρώματα.

2.4: Ιζηματογενή λατεριτικά κοιτάσματα

Τα ιζηματογενή κοιτάσματα νικελίου κυρίως Κρητιδικής ηλικίας, που εμφανίζονται στα Βαλκάνια διαφέρουν γενετικά από τα κοιτάσματα των άλλων δύο τύπων. Τα ιζηματογενή κοιτάσματα νικελίου δημιουργήθηκαν από προϊόντα αποσάθρωσης και μεταφοράς του λατεριτικού υλικού. Δεν υπάρχει όμως καμία ποιοτική διαφορά στη χημική σύσταση μεταξύ ιζηματογενών και λατεριτικών κοιτασμάτων νικελίου. Τα ιζηματογενή κοιτάσματα αποτελούν μια ιδιαιτερότητα και αναπτύσσονται στις χώρες της Βαλκανικής και στις ίδιες χώρες έχουμε και την εμφάνιση λατεριτικών κοιτασμάτων, όπως είναι αναμενόμενο. Πολλά κοιτάσματα της Αλβανίας και της Ελλάδος ανήκουν στην κατηγορία των λατεριτικών πρωτογενών κοιτασμάτων. Τα κοιτάσματα αυτά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- κοιτάσματα, που υπέρκεινται υπερβασικών πετρωμάτων
- κοιτάσματα, που υπέρκεινται ανθρακικών πετρωμάτων και χαρακτηρίζονται ως καρστικά
- μικτά κοιτάσματα, που υπέρκεινται ανθρακικών πετρωμάτων και στα οποία συνυπάρχουν σιδηρονικελιούχοι ορίζοντες με βωξίτες ή σιδηρούχους αργιλικούς ορίζοντες (Αποστολίκας, 2009)

2.4.1: Ορυκτολογική ανάλυση ιζηματογενών κοιτασμάτων

Τα σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα διακρίνονται με βάση τα ιστολογικά χαρακτηριστικά τους σε δύο κυρίως τύπους:

- Συμπαγές μετάλλευμα
- Πισσολιθικό μετάλλευμα

Σε ορισμένα κοιτάσματα μπορεί να παρατηρηθούν σε περιορισμένη έκταση επίσης ορίζοντες πηλινικού μεταλλεύματος και κροκαλοπαγούς.

Η κύρια ορυκτολογική σύσταση των διαφόρων κοιτασμάτων είναι παρόμοια, με μικρές διαφοροποιήσεις σε δευτερεύοντα ορυκτά σε επιμέρους κοιτάσματα.

Σημαντική συμμετοχή στη δομή των μεταλλευμάτων εμφανίζουν τα σιδηρούχα ορυκτά αιματίτης (Fe_2O_3) και γκαιτίτης (FeOOH), επίσης ο χαλαζίας (SiO_2), ο ασβεστίτης (CaCO_3), ο χρωμίτης (FeCr_2O_4) και τα φυλλοπυριτικά ορυκτά χλωρίτης ($(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) και τάλκης ($\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$).

Ο αιματίτης και ο γκαιτίτης αποτελούν το κυριότερο συστατικό των πισσοειδών και της κύριας μάζας. Ο χαλαζίας βρίσκεται κυρίως υπό τη μορφή κλαστικών τεμαχίων κατά προτίμηση στην κύρια μάζα και λιγότερο στα πισσοειδή. Ο χρωμίτης, που λόγω της ανθεκτικότητάς του στην αποσάθρωση εμφανίζεται υπό μορφή κλαστικών κόκκων, βρίσκεται διάσπαρτος στην κύρια μάζα ή συχνά αποτελεί πυρήνα των πισσολιθικών δομών του μεταλλεύματος.

Τα φυλλοπυριτικά ορυκτά βρίσκονται διάσπαρτα κυρίως στην κύρια μάζα και σε μικρότερο βαθμό σε πισσολιθικές δομές.

Το νικέλιο στα νικελιούχα σιδηρομεταλλεύματα είναι κυρίως συνδεδεμένο με τα φυλλοπυριτικά ορυκτά χλωρίτη και τάλκη. Επίσης νικέλιο εμπεριέχουν τα ορυκτά νεπουϊτης, τακοβίτης και ασβολάνης. Δευτερευόντως τα σιδηρούχα αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα δέσμευσης του νικελίου, με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις να εντοπίζονται στον γκαιτίτη ([Αποστολίκας, 2009](#)).

2.5: Κατηγορίες σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων σύμφωνα με τη γένεση τους

Μελετητές, που ασχολήθηκαν με τη μελέτη των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων της Λοκρίδας και της Εύβοιας, κατατάσσουν τα μεταλλεύματα αυτά σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα αυτόχθονα ή πρωτογενή ή από αποσάθρωση και τα ετερόχθονα ή δευτερογενή ή ιζηματογενή. Το 1962 ο [Augustithis](#) εισήγαγε μια τρίτη κατηγορία, τα ψευδοαυτόχθονα, στην οποία ανήκει και το υπό μελέτη κοίτασμα. Οι ορισμοί των τριών κατηγοριών είναι οι ακόλουθοι:

- Αυτόχθονα θεωρούνται τα μεταλλεύματα, τα οποία δεν υπέστησαν καμία μετακίνηση από τα μητρικά πετρώματα, επάνω στα οποία σχηματίσθηκαν (οφιολίθους).
- Ετερόχθονα χαρακτηρίζονται αυτά, τα οποία μεταφέρθηκαν από τα μητρικά πετρώματα και εναποτέθηκαν επάνω σε ιζηματογενή πετρώματα (ασβεστολίθους).
- Ψευδοαυτόχθονα τέλος, θεωρούνται τα μεταλλεύματα, τα οποία μεταφέρθηκαν από τα μητρικά, σε μικρές αποστάσεις και έχουν εναποτεθεί πάλι επάνω σε οφιολίθους, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σαν αυτόχθονα μεταλλεύματα.

2.6: Κοιτάσματα νικελίου στα Βαλκάνια

Η ύπαρξη νικελιούχων κοιτασμάτων στα Βαλκάνια είναι στενά συνδεδεμένη με την παρουσία οφιολιθικών συμπλεγμάτων. Τα κοιτάσματα αυτά είναι πρωτογενείς νικελιούχοι λατεριτικοί φλοιοί αποσάθρωσης ή δευτερογενή ιζηματογενή σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα διαφόρων ηλικιών και διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

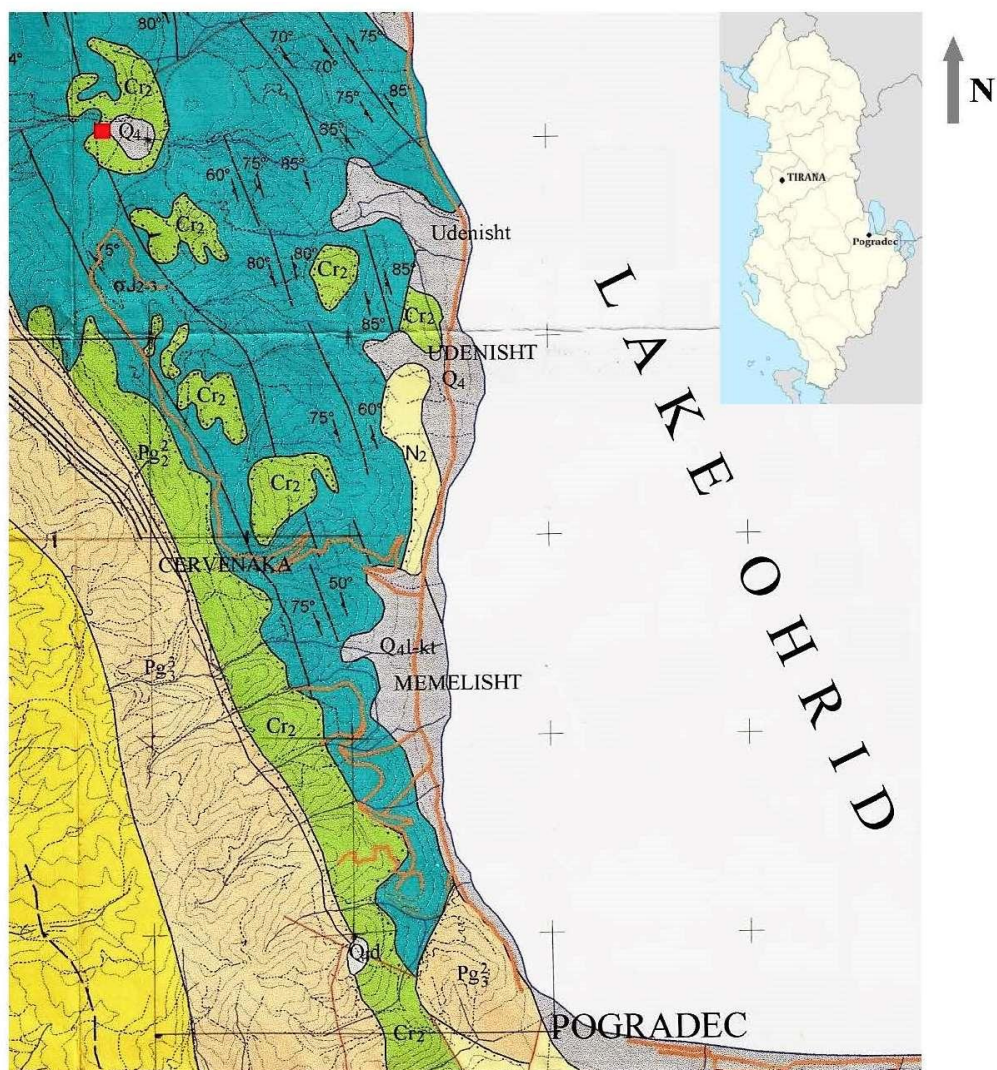
- Κοιτάσματα νικελίου ιζηματογενούς τύπου, με εναπόθεση προϊόντων λατεριτικής αποσάθρωσης, πάνω σε καρστικοποιημένα ανθρακικά πετρώματα, κυρίως Ιουρασικής ηλικίας, που καλύπτονται από ασβεστολίθους του Κρητιδικού
- Κοιτάσματα νικελίου ιζηματογενούς τύπου, με εναπόθεση προϊόντων λατεριτικής αποσάθρωσης, πάνω σε οφιολιθικά πετρώματα, που καλύπτονται από ασβεστολίθους του Κρητιδικού
- Κοιτάσματα in situ με υποκείμενα οφιολιθικά πετρώματα, που καλύπτονται από ασβεστολίθους του Κρητιδικού
- Κοιτάσματα in situ με υποκείμενα οφιολιθικά πετρώματα, που καλύπτονται από πετρώματα του Τριτογενούς
- Κοιτάσματα in situ με υποκείμενα οφιολιθικά πετρώματα, που αναπτύσσονται επιφανειακά, χωρίς την κάλυψη από νεώτερα πετρώματα ([Αποστολίκας, 2009](#)).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Γεωλογία της περιοχής του Pogradec (Αλβανία)

Η περιοχή των Βαλκανίων στον Ευρωπαϊκό χώρο αποτελεί τμήμα της Νέας Ευρώπης, η οποία δημιουργήθηκε κατά την αλπική ορογένεση. Σύμφωνα με τις αντιλήψεις, που διαμορφώθηκαν μέχρι σήμερα για τη γεωδυναμική εξέλιξη του αλπικού συστήματος, ο χώρος των Βαλκανίων αποτελεί συνέχεια του Δειναρικού κλάδου του ορογενετικού συστήματος και χαρακτηρίζεται από τις Δειναρίδες στην Αλβανία-πρώην Γιουγκοσλαβία και τις Ελληνίδες στην Ελλάδα. Η συνέχεια της ορογενετικής αλυσίδας εκτείνεται στις Ταυρίδες, Ιρανίδες, Αφγανίδες και καταλήγει στα Ιμαλάια (Αποστολίκας, 2009).

Η Αλβανία από γεωλογική άποψη εντάσσεται στο αλπικό σύστημα και βρίσκεται μεταξύ των Δειναρίδων στα βόρεια και των εσωτερικών Ελληνίδων στα νότια. Οι Αλβανίδες διαχωρίζονται σε εσωτερικές στα ανατολικά και σε εξωτερικές στα δυτικά της χώρας (www.geo.auth.gr). Η γεωτεκτονική ζώνη Mirdita, η οποία διασχίζει την Αλβανία κατά μήκος από Βορρά προς Νότο, ανήκει στις εσωτερικές Αλβανίδες και συνδέεται με την παρουσία μιας σειράς οφιολιθικών συμπλεγμάτων Ιουρασικής ηλικίας. Η ζώνη της Mirdita χωρίζεται σε δύο οφιολιθικές ζώνες, μία ανατολική και μία δυτική. Και στις δύο ζώνες υπάρχουν χαρτσβουργίτες, αλλά στη δυτική ζώνη σε χαμηλά επίπεδα δημιουργούνται επίσης λερζόλιθοι. Στη Βόρειο και Κεντρική Αλβανία η μεταλλοφορία εξελίχθηκε πριν ή κατά τη διάρκεια του Κατώτερου Κρητιδικού και στη Νότιο πριν το Ηώκαινο. Η νικελιούχος μεταλλοφορία στα κεντροανατολικά της χώρας αναπτύσσεται στην περιοχή του Pogradec, όπου εκεί εντάσσεται το κοίτασμα του Hudenisht.

Το κοίτασμα του Hudenisht απαντάται 12 km βόρεια του Pogradec, το οποίο βρίσκεται Νοτιοδυτικά της λίμνης Οχρίδας (Εικόνα 3.1). Το σιδηρονικελιούχο κοίτασμα εμφανίζεται με τη μορφή στρωμάτων με συνολικό πάχος 8,5 m μεταξύ υπερβασικών πετρωμάτων μεταβαλλόμενης σύστασης (από χαρτσβουργίτες μέχρι σερπεντινίτες) και επικαλυπτόμενους ασβεστολίθους του ανώτερου Κρητιδικού. Η περιοχή Pogradec-Librazhd βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της χώρας και αποτελείται από μια σειρά κοιτασμάτων διαφορετικών τύπων, που αναπτύσσονται σε διαφορετικά γεωλογικά περιβάλλοντα. Η μεταλλοφόρος περιοχή χωρίζεται σε δύο επιμέρους τομείς. Ο ανατολικός τομέας χαρακτηρίζεται από το οφιολιθικό σύμπλεγμα Pogradec-Librazhd μήκους 50 km, με το οποίο συνδέονται μια σειρά κοιτασμάτων, που υπέρκεινται υπερβασικών και είναι τα πρώτα, που έτυχαν εκμετάλλευσης. Πρόκειται για λατεριτικούς φλοιούς αποσάθρωσης, που υπέρκεινται χαρτσβουργιτών-σερπεντινιτών και καλύπτονται από ασβεστολίθους του Ανώτερου Κρητιδικού. Επικρατεί ο λειμωνιτικός ορίζοντας, ενώ η ύπαρξη του σαπρολιτικού ορίζοντα είναι ελάχιστη έως μηδαμινή και παρατηρείται μόνο στα κοιτάσματα Bushtrica, Skroska και δυτική Cervenaka με πάχος έως 2 m. Εξαίρεση αποτελούν δύο μικρά ιζηματογενή κοιτάσματα της περιοχής το Vulcan και το Katiel, εκ των οποίων το πρώτο αναπτύσσεται επί Τριαδικών ασβεστολίθων και καλύπτονται από ιζήματα του Τριτογενούς αντίστοιχα. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα από Βορρά προς Νότο είναι τα: Bushtrica, Skroska, Prrenjas, Hundenisht, Cervenaka και Guri I Kuq. Τα μεταλλοφόρα στρώματα έχουν μήκος έως 1500 m και πάχος, που διαφοροποιείται στα επιμέρους κοιτάσματα και κυμαίνεται μεταξύ 2-25 m. Οι μεταλλευτικοί πόροι εκτιμώνται σε $105 \cdot 10^6$ τόνους με μέση περιεκτικότητα νικελίου 0,98% και κοβαλτίου 0,07% (Αποστολίκας, 2009).



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Q ₄ pl	Αλλουβιακές αποθέσεις
Q ₄ l-kt	Λιμναίες – βαλτώδεις αποθέσεις
N ₂	Πλειόκαινο – Κροκαλοπαγή με αμμώδη στρώματα από μικροκροκαλοπαγή
N _{1a}	Μειόκαινο – Αργίλοι, αργιλοκοί ψαμμίτες με στρώματα γαιανθράκων
Pg ₃ ³	Ανώτερο Ολιγόκαινο – Αμμώδη στρώματα με λεπτά στρώματα αργίλων και ψαμμιτών
Pg ₂ ²	Μέσο Ολιγόκαινο – Κροκαλοπαγή κυρίως με αδρομερή ανθρακικά και υπόλοιπο από οφιολίθους
Cr ₂	Ανώτερο Κρητιδικό – Οργανογενής ασβεστόλιθος με ρουδιστές
Q ₂₋₃	Χαρτσβουργίτες και σερπεντινίτες με φακούς δουνίτη
■	Σιδηρομετάλλευμα

Κλίμακα: 1:50.000

Εικόνα 3.1: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερη περιοχής του Pogradec

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Υπόβαθρο πειραματικών μεθόδων

4.1: Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο

Η μικροσκοπική μελέτη των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου τύπου JENALAB του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (Εικόνα 4.1).

Το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ή αλλιώς μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός, διαφέρει από εκείνο του διερχόμενου φωτός στα εξής τέσσερα σημεία:

- Ο ανακλαστήρας, που έχει τοποθετηθεί μεταξύ του αντικειμενικού και του προσοφθάλμιου φακού, κατευθύνει το προσπίπτον φως κάθετα στη στιλβωμένη επιφάνεια του μελετώμενου παρασκευάσματος.
- Χρησιμοποιούνται ειδικοί αντικειμενικοί φακοί για την παρατήρηση μη καλυμμένων παρασκευασμάτων.
- Η περιστρεφόμενη τράπεζα μετακινείται ελεύθερα προς τα πάνω ή προς τα κάτω, ώστε να είναι εφικτή η εστίαση σε διαφορετικά πάχη παρασκευασμάτων.
- Τα συνήθη μεταλλογραφικά μικροσκόπια διαθέτουν δυο τύπους ανακλαστήρων: τη γυάλινη πλάκα και το πρίσμα ολικής ανάκλασης, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιλεκτικά (Αλεβίζος, 2005).



Εικόνα 4.1: Μικροσκόπιο διερχόμενου και ανακλώμενου φωτός του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Προετοιμασία δειγμάτων:

Για τη μελέτη ενός μεταλλεύματος είναι απαραίτητη η παρασκευή μιας καλά στίλβωμένης τομής, η επιφάνεια της οποίας θα πρέπει να στερείται χαραγών και ανωμαλιών. Το προς στίλβωση υλικό πρέπει αρχικά να εμποτιστεί σε ειδική τεχνητή ρητίνη, στη συνέχεια τοποθετείται σε ειδικές φόρμες διαμέτρου 2-4 cm στις οποίες προστίθεται ποσότητα του υγρού υλικού εγκλίσεως. Στη συνέχεια, ακολουθεί η λείανση της επιφάνειας του δείγματος. Ως λειαντικό μέσο χρησιμοποιείται καρβίδιο του πυριτίου ή του βολφραμίου διαφόρων κοκκομετριών. Η διαδικασία της λείανσης ολοκληρώνεται σε τρία στάδια με διαφορετικές κοκκομετρίες λειαντικών μέσων το καθένα. Το παρασκεύασμα λειαίνεται πάνω σε έναν περιστρεφόμενο μεταλλικό δίσκο ή με το χέρι πάνω σε γυάλινη πλάκα με τις κοκκομετρίες των λειαντικών μέσων του πρώτου σταδίου. Σημειώνεται ότι η λείανση του παρασκευάσματος γίνεται πάντα παρουσία νερού.

Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία της στίλβωσης. Κατά τη μέθοδο Vanderwilt-Rehwald, χρησιμοποιείται η συσκευή Rehwald και γίνεται επιλογή διάφορων μέσων στίλβωσης (π.χ αλοιφές-Rehwald, αδαμανταλοιφές, καρβίδιο του βορίου με εκχύλισμα πίσσας) διαφόρων κοκκομετριών. Ως λιπαντικό μέσο χρησιμοποιείται ένα μείγμα από παραφινέλαιο, πετρέλαιο και εκχυλίσματα πίσσας. Η ποιότητα της στίλβωσης εξαρτάται τόσο από τη διάρκεια αυτής, όσο και από τη χρήση αλοιφής MgO κατά το τελικό στάδιο της στίλβωσης. Η μέθοδος Rehwald είναι η μοναδική μέθοδος στίλβωσης με την οποία παρασκευάζονται στιλπνές τομές ελεύθερες από ανάγλυφο και χαραγές (Αλεβίζος, 2005).

4.2: Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Μικροσκοπική εξέταση και μικροανάλυση σε ένα δείγμα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) τύπου JEOL JSM 5400, του Εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, σε συνδυασμό με EDS-μικροαναλύσεις. Συνθήκες μέτρησης: U=20 KV, I=5 nA. Έγινε χρήση φυσικών και συνθετικών προτύπων, ενώ η επεξεργασία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα INCA ENERGY 30.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο, που λειτουργεί περίπου όπως ένα οπτικό μικροσκόπιο, μόνο, που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας, αντί για φως, ώστε να εξεταστούν αντικείμενα σε πιο λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια λόγω της κυματικής τους φύσης υπόκεινται σε εστίαση, όπως και τα φωτεινά κύματα, αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια. Ένα ηλεκτρονικό κανόνι θερμοϊονικής εκπομπής παράγει ηλεκτρόνια, τα οποία επιταχύνονται σε ενέργεια τυπικά 1-40 keV. Η δέσμη εστιάζεται μέσω ενός ή δύο συμπυκνωτών φακών, έτσι ώστε στο επίπεδο του δείγματος να έχει διάμετρο 2-100nm. Η λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με τη βοήθεια των πηνίων σάρωσης, ενώ ένας ανιχνευτής δευτερογενών ηλεκτρονίων μετρά τα παραγόμενα ηλεκτρόνια. Ταυτόχρονα η κηλίδα της οθόνης CRT σαρώνει την οθόνη σε συγχρονισμό με τη δέσμη των ηλεκτρονίων και η φωτεινότητά της διαμορφώνεται από το ενισχυμένο σήμα του ανιχνευτή. Η σάρωση γίνεται σε ένα κανάβο (raster), που αποτελείται από ένα αριθμό οριζόντιων γραμμών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ποσότητα των δευτερογενών ηλεκτρονίων, που προέρχονται από κάθε σημείο του δείγματος να απεικονίζεται σαν οπτική εικόνα στην οθόνη

CRT. Η διακριτική ικανότητα στα σύγχρονα SEM είναι 3-5mm με θερμονικό κανόνι, ενώ στην περίπτωση κανονιού εκπομπής πεδίου είναι 1-2mm.

Επομένως, η λειτουργία του SEM στηρίζεται στις αλληλεπιδράσεις του προς εξέταση δείγματος και της προσπίπτουσας σε αυτό δέσμης ηλεκτρονίων. Τα βασικά στάδια λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι:

- Σχηματισμός μιας δέσμης ηλεκτρονίων από την πηγή, η οποία επιταχύνεται προς το δείγμα μέσω ενός θετικού ηλεκτρικού δυναμικού
- Χρήση μεταλλικών ανοιγμάτων, ηλεκτρομαγνητικών φακών και πηνίων σάρωσης, ώστε να επιτευχθεί μία λεπτή εστιασμένη μονοχρωματική δέσμη, η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος
- Καταγραφή των αλληλεπιδράσεων της δέσμης του δείγματος από τους ανιχνευτές και μετατροπή τους σε εικόνα (www.chemeng.ntua.gr).

4.3:Περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD)

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με το περιθλασίμετρο ακτίνων-X (XRD), τύπου D8-Advance της εταιρείας BrukerAXS (Εικόνα 4.2) του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

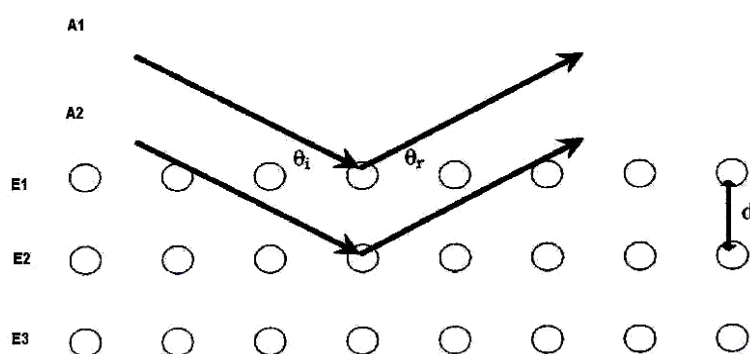


Εικόνα 4.2: Περιθλασίμετρο ακτίνων-X (XRD) του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η μέθοδος της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X στηρίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης των ακτίνων-X πάνω στους κρυστάλλους, το οποίο ερμηνεύτηκε από τον Bragg σαν ανάκλαση των ακτίνων-X, οι οποίες προσπίπτουν υπό ορισμένη γωνία σε πλεγματικά επίπεδα του κρυστάλλου, τα οποία είναι παράλληλα και διαδέχεται το ένα το άλλο πάντα στην ίδια απόσταση d . Η ανάκλαση στην προκειμένη περίπτωση διαφέρει από την ανάκλαση του ορατού φωτός στο ότι λόγω της μεγάλης ικανότητας διείσδυσης η προσπίπτουσα στον κρύσταλλο δέσμη ακτίνων-X διαπερνά έναν πολύ μεγάλο αριθμό πλεγματικών επιπέδων πριν να απορροφηθεί (Κωστάκης, 2005).

Εάν E_1, E_2, E_3 , τα πλεγματικά επίπεδα ενός κρυστάλλου, A_1, A_2 , δύο ακτίνες-X μήκους κύματος λ , θ , η γωνία με την οποία προσπίπτουν οι ακτίνες (Εικόνα 4.3) και n , η τάξη της ανάκλασης σύμφωνα με την εξίσωση του Bragg ισχύει:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

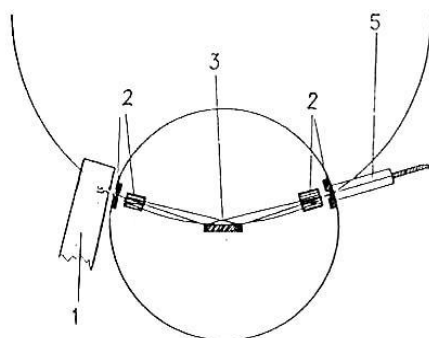


Εικόνα 4.3: Ανάκλαση ακτίνων-X στα πλεγματικά επίπεδα ενός κρυστάλλου

Με τη μέθοδο του περιθλασιμέτρου ακτίνων-X είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών, όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων-X, που προσπίπτουν πάνω σ'ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως.

Οι βασικές μονάδες, που συνθέτουν ένα σύγχρονο περιθλασίμετρο ακτίνων-X είναι η μονάδα παραγωγής της υψηλής τάσεως, η λυχνία των ακτίνων-X, το γωνιόμετρο, ο απαριθμητής των ακτίνων-X με την ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής των κρούσεων και τέλος, η μονάδα του μικροϋπολογιστή μέσω του οποίου καθοδηγείται ολόκληρο το σύστημα και αξιολογούνται τα δεδομένα, που προκύπτουν από την εξέταση του δείγματος (Κωστάκης, 2005).

Το παρασκεύασμα τοποθετείται στον δειγματοφορέα του γωνιομέτρου του περιθλασιμέτρου, ο οποίος βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να παραμένει πάντα στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων-X (εικόνα 4.4) και μάλιστα έτσι ώστε το επίπεδο του παρασκευάσματος να είναι πάντα κάθετο προς το επίπεδο του κύκλου.



Εικόνα 4.4: Σχηματική παράσταση της διάταξης εστιασμού των ακτίνων-X. 1) λυχνία ακτίνων-X, 2) διαφράγματα, 3) παρασκεύασμα, 4) βάση απαριθμητή ακτίνων -X και 5) απαριθμητής ακτίνων -X.

Ταυτόχρονα ως προς τον ίδιο άξονα γύρω από τον οποίο διαγράφει τον κύκλο, περιστρέφεται ο απαριθμητής με κάποια σταθερή γωνιακή ταχύτητα $2\theta/\text{min}$ και το επίπεδο του δείγματος με γωνιακή ταχύτητα θ/min ίση προς το ήμισυ εκείνης του απαριθμητή έτσι ώστε με τη σύγχρονη αυτή μετατόπιση του απαριθμητή και τη περιστροφή του δείγματος ο απαριθμητής να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος όπως και στο σημείο εξόδου των ακτίνων-X της λυχνίας.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η καταγραφή της ακτινοβολίας που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος που βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων-X των προερχόμενων από την λυχνία, ώστε να πληρούται για κάποια ομάδα πλεγματικών επιπέδων η εξίσωση του Bragg.

Το δείγμα, που πρόκειται να αναλυθεί βρίσκεται υπό μορφή κόνεως μέσα στην κοιλότητα ενός πλαστικού ή μεταλλικού πλακιδίου. Το βάθος της κοιλότητας αυτής είναι περίπου 1mm και έχει έκταση μερικών cm^2 , ώστε να μπορεί σε αυτό να φιλοξενηθεί μάζα ίση με 1g, η οποία κατανέμεται στο δειγματοφορέα, έτσι ώστε η επιφάνειά της να είναι επίπεδη (Κωστάκης, 2005).

Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση λυχνίας Cu, καταμετρητή LynxEye και φίλτρο νικελίου, τάση λυχνίας $U=35\text{KV}$ και ένταση ρεύματος $I=35\text{mA}$. Οι συνθήκες μέτρησης των δειγμάτων ήταν: γωνία 2θ $4-70^\circ$, βήμα $0,02^\circ$ και χρόνο/βήμα $0,2\text{sec}$.

4.4: Φασματοσκοπία ακτινών-X φθορισμού (XRF)

Η χημική ανάλυση των δειγμάτων έγινε με τη μέθοδο φασματοσκοπίας ακτινών-X φθορισμού (XRF), όπου χρησιμοποιήθηκε το φασματοσκόπιο S2 Ranger της εταιρείας BrukerAXS (Σχήμα 4.5) του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Εικόνα 4.5: Φασματοσκόπιο ακτίνων-X φθορισμού του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

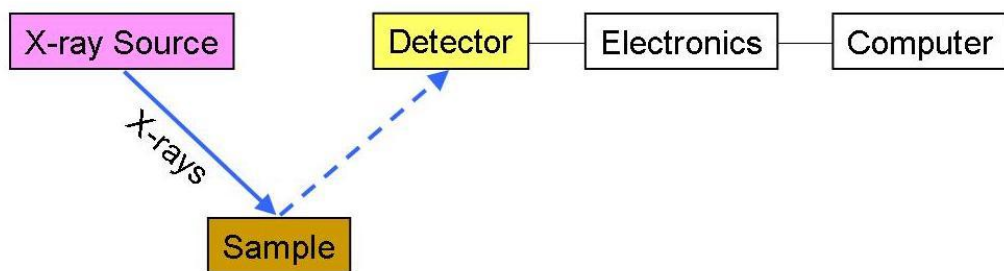
Η φασματοσκοπία ακτίνων-X φθορισμού αποτελεί μία από τις βασικές αναλυτικές μεθόδους γεωλογικού υλικού. Είναι μη καταστρεπτική μέθοδος εφ' όσον το δείγμα αναλύεται σε στερεά κατάσταση, συνήθως κονιοποιημένο, δίχως χημικές επεξεργασίες και διαλυτοποιήσεις.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι: 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 τις εξωτερικές στοιβάδες. Η πλήρωση των θέσεων αυτών συνοδεύεται με εκπομπή ακτίνων-X ενέργειας ίσης με τη διαφορά ενέργειας της αντίστοιχης εξωτερικής από την εσωτερική στοιβάδα (δευτερογενώς εκπεμπόμενη ακτινοβολία).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6 το σύστημα φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού που χρησιμοποιήθηκε, αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη:

- Τη λυχνία παραγωγής πρωτογενούς ακτινοβολίας X
- Το δειγματοφορέα
- Τον ανιχνευτή
- Το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής

Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση λυχνίας Pd, με τάση λυχνίας $U=30\text{KV}$, και ένταση ρεύματος $I=100\mu\text{A}$. Οι συνθήκες μέτρησης των δειγμάτων ήταν ένταση $I=250\mu\text{A}$, και τάση μέτρησης 40KV για τα βαρέα στοιχεία (Fe, Mn, Ti, Ca, K) και 20kV για τα ελαφρά (P, Si, Al, Mg, Na).



Εικόνα 4.6: Σχηματική παράσταση της διάταξης φασματοσκοπίου ακτίνων-X φθορισμού τύπου EDS-XRF. του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Τα δείγματα στα οποία προσδιορίστηκε η χημική σύσταση με τη παραπάνω μέθοδο λειοτριβήθηκαν σε κοκκομετρία κάτω των 60 μm και στη συνέχεια πιέστηκαν εντός ειδικής μήτρας, με πίεση 150 atm (εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Υδραυλική πρέσα για κατασκευή ταμπλέτας για XRF

4.5: Μέθοδοι εμπλουτισμού

4.5.1: Βαρυτομετρικός διαχωρισμός

Με τον όρο βαρυτομετρικός διαχωρισμός χαρακτηρίζεται μία σειρά μεθόδων εμπλουτισμού μεταλλευμάτων, οι οποίες εκμεταλλεύονται τη διαφορά των πυκνοτήτων των, προς διαχωρισμό, ορυκτών. Το αποτέλεσμα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού εξαρτάται, επίσης, από το μέγεθος και το σχήμα των τεμαχιδίων. Οι βαρυτομετρικές μέθοδοι εμπλουτισμού ήταν οι πρώτες μηχανικές διεργασίες που χρησιμοποιήθηκαν για τον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων και εφαρμόζονται για μία μεγάλη ποικιλία ορυκτών, από τα βαρέα σουλφίδια μετάλλων, όπως ο γαληνίτης (πυκνότητα $7,5\text{gr/cm}^3$) μέχρι το γαιάνθρακα (πυκνότητα $1,3\text{gr/cm}^3$). Το μέγεθος των τεμαχιδίων, που μπορούν να επεξεργασθούν, ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο, από τα 200mm έως τα 50μm (Σταμπολιάδης, 2008).

4.5.2: Εργαστηριακή μέθοδος Βαρέων υγρών

Εάν σε ένα υγρό με πυκνότητα ρ_0 προσθέσουμε κόκκους δύο ορυκτών α και β με αντίστοιχες πυκνότητες $\rho_\alpha < \rho_0$ και $\rho_\beta > \rho_0$, τότε οι κόκκοι του ορυκτού α θα επιπλεύσουν (float), ενώ αυτοί του ορυκτού β θα βυθισθούν (sink). Με τον τρόπο αυτό, μπορεί κανείς να χωρίσει εύκολα τα ορυκτά α και β . Τα ορυκτά έχουν πυκνότητες αρκετά μεγαλύτερες από το νερό και για το λόγο αυτό, ένα υγρό που έχει ενδιάμεση πυκνότητα μεταξύ δύο ορυκτών ονομάζεται βαρύ υγρό. Τα προς χρήση, στο εργαστήριο, βαρέα υγρά είναι οργανικά υγρά ή ακόμη υδατικά διαλύματα ευδιάλυτων αλάτων βαρέων μετάλλων, όπως του βολφραμίου W. Η μέθοδος των βαρέων υγρών είναι μία καθαρά βαρυτομετρική μέθοδος.

Επειδή τα οργανικά υγρά είναι αναμίξιμα, μπορεί κανείς, χρησιμοποιώντας δύο από αυτά, να φτιάξει οποιαδήποτε ενδιάμεση πυκνότητα. Η πυκνότητα των υδατικών διαλυμάτων ευδιάλυτων αλάτων μεταβάλλεται ανάλογα με την περιεκτικότητα του άλατος στο διάλυμα, η οποία δεν μπορεί να υπερβεί της συγκέντρωση κορεσμού.

Τα βαρέα υγρά χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο όχι μόνο για να διαχωρίσουν ελεύθερους κόκκους δύο ορυκτών, αλλά και σύμμεικτους κόκκους με διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής της κάθε ορυκτολογικής φάσης. Ανεξαρτήτως του τρόπου παρασκευής τους, τα βαρέα υγρά είναι ομοιογενείς υγρές φάσεις και διατηρούν την πυκνότητά τους σταθερή για αρκετό χρόνο, πράγμα που επιτρέπει σχολαστική εργαστηριακή εργασία. Εξαιτίας του μεγάλου κόστους, τα βαρέα υγρά δε χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική παραγωγή για τον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων (Σταμπολιάδης, 2008).

4.5.3: Βιομηχανική μέθοδος των Βαρέων Διαμέσων

Η μέθοδος των βαρέων διαμέσων είναι ανάλογη με αυτή των βαρέων υγρών και έρχεται να καλύψει την ανάγκη για μία φθηνή βιομηχανική μέθοδο. Κατά τη μέθοδο αυτή, η ρευστή

φάση δεν είναι ένα ομοιογενές υγρό, αλλά ένας πολφός νερού εντός του οποίου αιωρούνται λεπτοί κόκκοι ενός ή περισσότερων στερεών. Η φαινόμενη πυκνότητα του αιωρήματος μεταβάλλεται με την περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο στερεό και την πυκνότητά του. Τα στερεά, που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για το σκοπό αυτό είναι, κυρίως, το φυσικό ορυκτό μαγνητίτης (Fe_3O_4 5,5g/cm³) και το τεχνητό σιδηροπυρίτιο (FeSi 7,2g/cm³). Στο εργαστήριο μπορεί κανείς να παρασκευάσει αιωρήματα με άλλα υλικά. Γενικά, τα στερεά αυτά υλικά ονομάζονται *βαρέα διάμεσα* και το παρασκευαζόμενο αιώρημα πολφός *βαρέων διαμέσων*, αν και ο όρος βαρύ διάμεσο χρησιμοποιείται μερικές φορές για να υποδηλώσει και τον πολφό.

Η πυκνότητα του πολφού ρ_π δίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\rho_\pi = \alpha_v \cdot \rho_\sigma + (1 - \alpha_v) \cdot \rho_v,$$

όπου ρ_v : η πυκνότητα του νερού ($\rho_v=1$), ρ_σ : η πυκνότητα του στερεού και α_v : το κλάσμα όγκου του στερεού στον πολφό.

Η πυκνότητα του πολφού αυξάνεται όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σ' ένα συγκεκριμένο βαρύ διάμεσο. Μεγαλύτερη επίδραση έχει η αύξηση του κλάσματος όγκου.

Στην πράξη το πυκνότερο βαρύ διάμεσο, που χρησιμοποιείται είναι το σιδηροπυρίτιο (περίπου $\rho_\sigma=7\text{g/cm}^3$).

Τα βαρέα διάμεσα καθιζάνουν με το χρόνο όταν ο πολφός ηρεμεί και, για το λόγο αυτό, αφενός έχουν κοκκομετρία μικρότερη των 200mesh (75μm) για να μικραίνει η ταχύτητα καθίζησης και αφετέρου ο πολφός διατηρείται συνέχεια σε κίνηση για να αποφεύγεται η καθίζηση. Στα διάφορα μηχανήματα, που χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των ορυκτών, που διαφέρουν ως προς την πυκνότητά τους, τα βαρύτερα από τον πολφό βυθίζονται, ενώ τα ελαφρύτερα καθιζάνουν.

Για το σκοπό αυτό, πριν από το διαχωρισμό το μετάλλευμα κοσκινίζεται με καταιονισμό νερού και αφαιρούνται οι μικρότεροι κόκκοι, που η ταχύτητα καθίζησής τους στον πολφό είναι μικρή διότι, αναμιγνύονται με τους κόκκους του βαρέος διαμέσου, μειώνουν την πυκνότητα του πολφού και αυξάνουν το ιξώδες του. Κατά την κοσκίνηση της τροφοδοσίας αφαιρούνται και τα μεγαλύτερα μεγέθη απ' αυτά, που μπορεί να δεχθεί το κάθε μηχανήμα (Σταμπολιάδης, 2008).

4.6: Μαγνητικός διαχωρισμός

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 προσδιορισθεί. Τα υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα, εάν έλκονται ή απωθούνται από το 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.

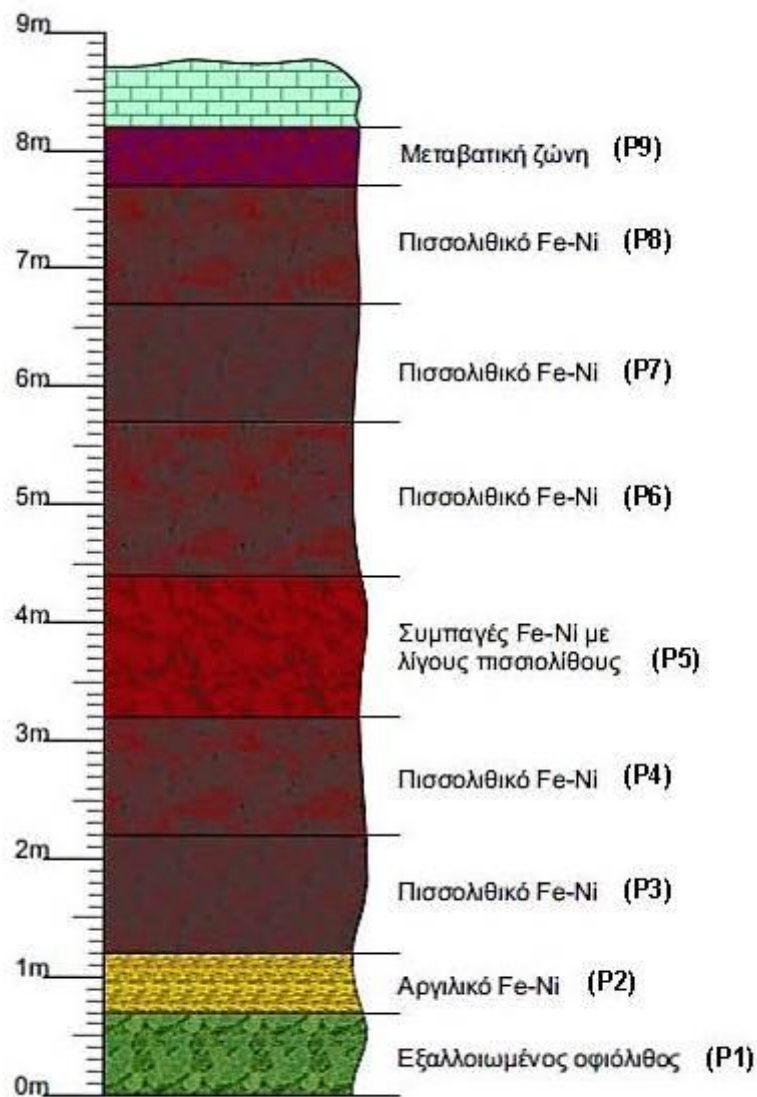
Παραμαγνητικά: ονομάζονται τα υλικά που έλκονται από τις γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου και οδεύουν προς τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου αυξάνει. Πολλά παραμαγνητικά υλικά μπορούν να εμπλουτισθούν με μαγνητικούς διαχωριστές υψηλής έντασης. Παραδείγματα παραμαγνητικών ορυκτών που εμπλουτίζονται βιομηχανικά με μαγνητικό διαχωρισμό είναι ο ιλμενίτης, το ρουτίλιο, ο αιματίτης ο σιδηρίτης ο χρωμίτης FeCr_2O_4 κ.ά. 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, μία 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 απ' 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 σιδηρίτης FeCO_3 και αιματίτης Fe_2O_3 μπορούν να μετατραπούν σε μαγνητίτη μετά από οξειδωτική και αναγωγική φρύξη αντίστοιχα, ενώ ο σιδηροπυρίτης FeS_2 να μετατραπεί σε μαγνητικό πυρροτίτη FeS μετά από οξειδωτική φρύξη (Σταμπολιάδης, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ορυκτολογία-Πετρογραφία και Χημισμός του σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος της περιοχής Hudenisht (Pogradec)

5.1: Δειγματοληψία

Η διαδικασία της δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκε από τους [Αποστολίκας και Τσελεμάρκος](#) το 2014 σε ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα του κοιτάσματος κατά μήκος τομής κάθετης προς την οροφή του κοιτάσματος, στην περιοχή του Hudenisht στο Pogradec της Αλβανίας και συνολικά ελήφθησαν 9 αρχικά δείγματα.



Εικόνα 5.1: Λιθοστρωματογραφική στήλη του σιδηρονικελιούχου κοιτάσματος της μελετώμενης περιοχής

5.2: Χημικές αναλύσεις των αρχικών δειγμάτων

Στα αρχικά δείγματα (P1-P9) πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της χημικής τους σύστασης με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ φθορισμού, όπως επίσης και προσδιορισμός της απώλειας πύρωσής τους. Με την τελευταία μέθοδο προσδιορίζεται το ποσοστό του κρυσταλλικού νερού και του άνθρακα που περιέχεται στα δείγματα. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2. Παρακάτω δίνεται η αναλυτική περιγραφή των εξετασθέντων δειγμάτων.

Πίνακας 5.2: Χημικές αναλύσεις των αρχικών δειγμάτων

Δείγμα	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	NiO (%)	CoO (%)	Α.Π. (%)	ΣΥΝΟΛΟ
P1	15,60	2,26	0,71	56,72	0,79	6,98	0,71	0,01	2,81	0,16	13,29	100,02
P2	5,34	2,30	5,20	73,10	0,19	2,22	0,76	0,01	1,77	0,24	8,74	99,88
P3	5,32	3,88	8,69	72,27	0,25	2,09	0,89	0,01	0,84	0,16	5,47	99,86
P4	5,97	4,41	4,02	76,13	0,21	2,62	0,85	0,02	0,80	0,16	4,60	99,84
P5	5,49	2,14	6,22	75,71	0,29	2,72	0,67	0,02	0,85	0,18	5,76	100,05
P6	5,12	3,58	4,91	67,74	0,22	1,65	6,74	0,01	0,76	0,14	9,26	100,12
P7	5,44	3,31	4,34	79,18	0,25	2,21	0,82	0,01	0,67	0,17	3,56	99,97
P8	5,19	3,42	3,99	59,44	0,34	1,53	11,86	0,01	0,65	0,14	13,29	99,85
P9	5,4	1,74	1,82	35,04	0,41	1,06	26,47	0,01	0,33	0,09	29,25	99,86

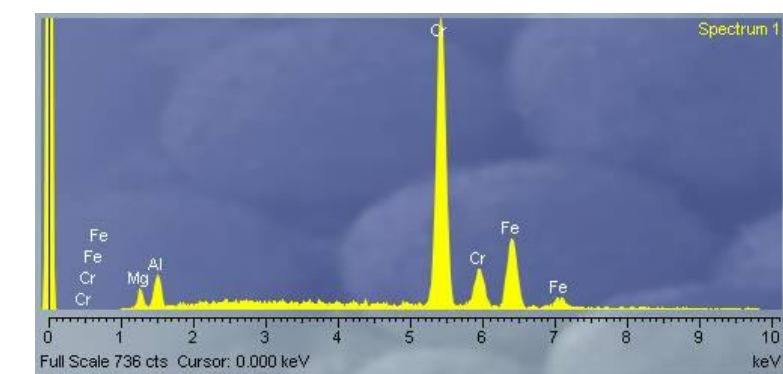
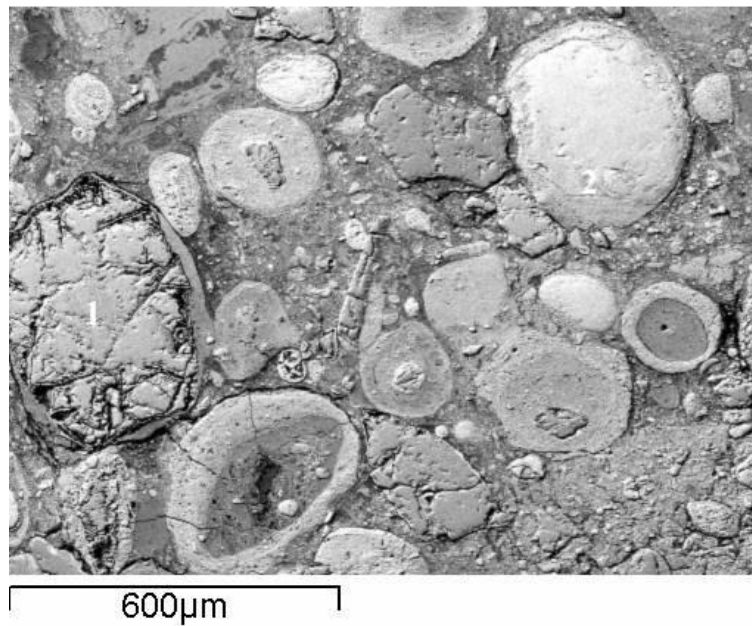
5.3: Ορυκτολογική-πετρογραφική εξέταση των αρχικών δειγμάτων

Η ορυκτολογική εξέταση των δειγμάτων του μεταλλεύματος πραγματοποιήθηκε κατά μήκος της τομής, αρχίζοντας από τη βάση (εξαλλοιωμένος οφιόλιθος) προς την οροφή (πισσολιθικό μετάλλευμα και μεταβατική ζώνη). Τα ακτινοδιαγράμματα των δειγμάτων αυτών παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Εικόνα 1-9).

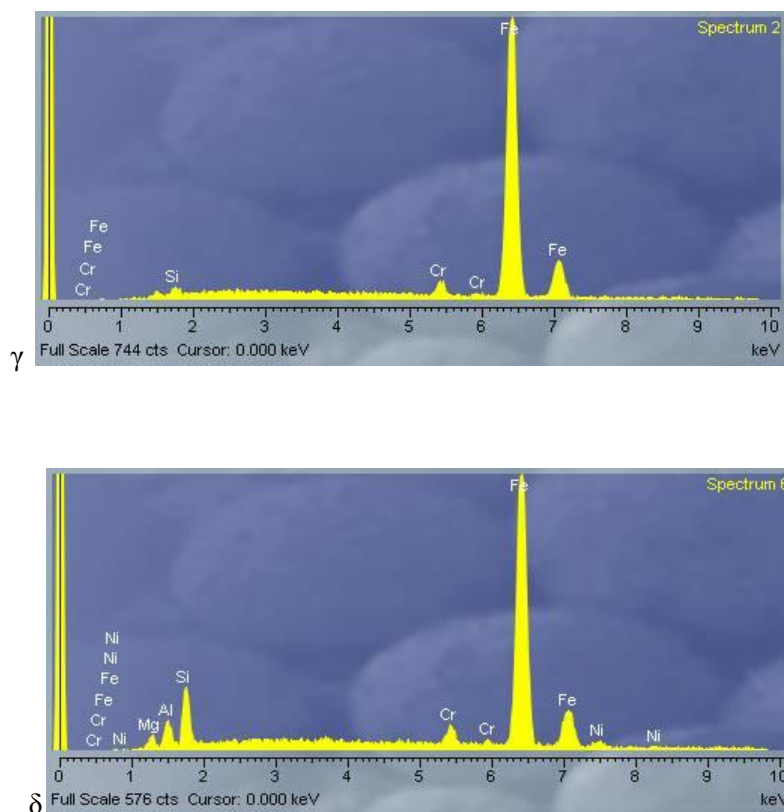
P1: Το δείγμα από τον εξαλλοιωμένο οφιόλιθο, που αποτελεί το υποκείμενο πέτρωμα, είναι πολύ εύθρυπτο και η ακτινοσκοπική εξέταση έδειξε την παρουσία κυρίως λιζαρδίτη, γκαιτίτη, αιματίτη και χρωμίτη.

Ο λιζαρδίτης απαντάται με μορφή συνδετικού υλικού, στο οποίο έχουν ενσωματωθεί θραύσματα κρυστάλλων αιματίτη και χρωμίτη, σύμφωνα με τη μικροσκοπική εξέταση. Οι

κρύσταλλοι αιματίτη είναι γενικά κατακερματισμένοι και σε μερικές περιπτώσεις παρατηρήθηκαν ίχνη προϋπάρχοντος μαγνητίτη. Ο μαγνητίτης μεταβαίνει σταδιακά σε αιματίτη (μαρτιτίωση). Οι χρωμίτες είναι γενικώς κατακερματισμένοι (κατακλαστικός ιστός) (Εικ. 5.2) και συχνά υπόκεινται σε αντικατάσταση μέσω σιδηρούχων διαλυμάτων (αιματίτη).



α



Εικόνα 5.2: (α) Μικροφωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) του σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος. (β) Στοιχειακή ανάλυση (EDS) κλαστικού κόκκου χρωμίτη (1). (γ) Στοιχειακή ανάλυση (EDS) πελοειδούς από αιματίτη (2). Δείγμα P1.

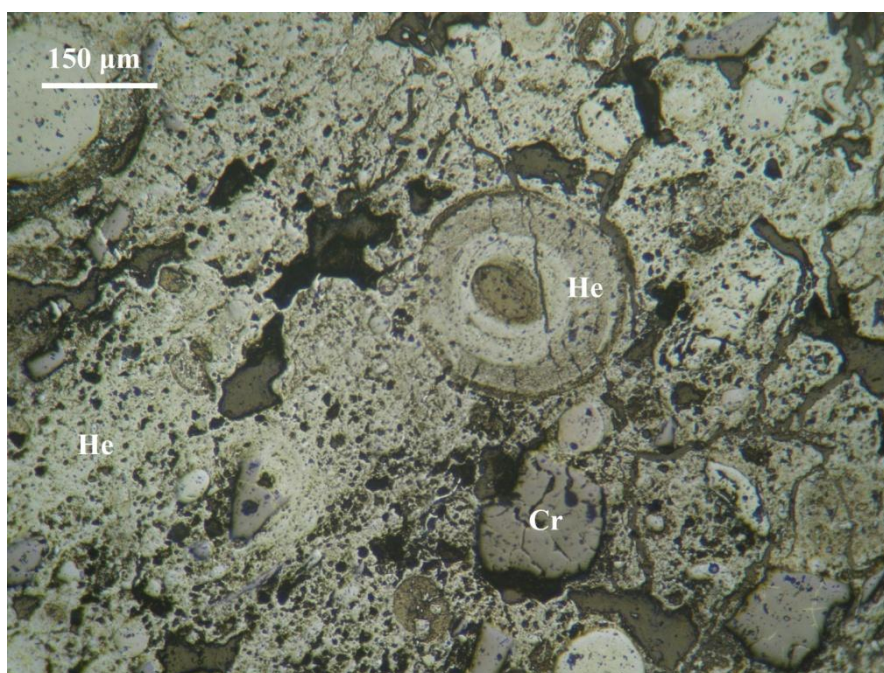
P2: Το δείγμα αυτό προέρχεται από τον ορίζοντα αργλικού σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος, το οποίο υπέρκειται του εξαλλοιωμένου οφιολίθου. Η μικροσκοπική παρατήρηση έδειξε την παρουσία μεμονωμένων κόκκων χρωμίτη, οι οποίοι είναι διάσπαρτοι σε ένα αργλικό συνδετικό υλικό, το οποίο σύμφωνα με την ακτινοσκοπική διερεύνηση αποτελείται από νικελιούχο χλωρίτη (νιμίτη). Νικελιούχος χλωρίτης έχει ανιχνευθεί επίσης στο νικελιούχο λατεριτικό κοίτασμα του Nome (Αλβανία) από τους Αλεβίζος κ.α. (2011), με συγκεντρώσεις NiO που κυμαίνονται μεταξύ 2,63% και 3,62% κ.β. Το συνδετικό υλικό υπόκειται σε αντικατάσταση μέσω σιδηρούχων διαλυμάτων με μορφή γκαιτίτη, ο οποίος μεταβαίνει σταδιακά σε αιματίτη, λόγω αφυδάτωσης.

P3: Η μικροσκοπική εξέταση του δείγματος (Εικόνα 5.3) έδειξε την παρουσία μεγάλου αριθμού σφαιροειδών σωματιδίων όλων των ειδών και διαφόρων μεγεθών. Παρατηρήθηκε μεγάλος αριθμός ωοειδών, πελοειδών και σε μικρότερο ποσοστό πισοειδών και σύνθετων σφαιροειδών. Σπανιότερα παρατηρήθηκαν θραύσματα προϋπαρχόντων ωοειδών, τα οποία έχουν ενσωματωθεί στο συνδετικό υλικό του μεταλλεύματος.

Τα σύνθετα σφαιροειδή έχουν συχνά ενσωματώσει προϋπάρχοντα ωοειδή, πελοειδή ή θραύσματα αυτών, καθώς και κόκκους χρωμιτών και σπινελίων. Το συνδετικό υλικό μεταξύ

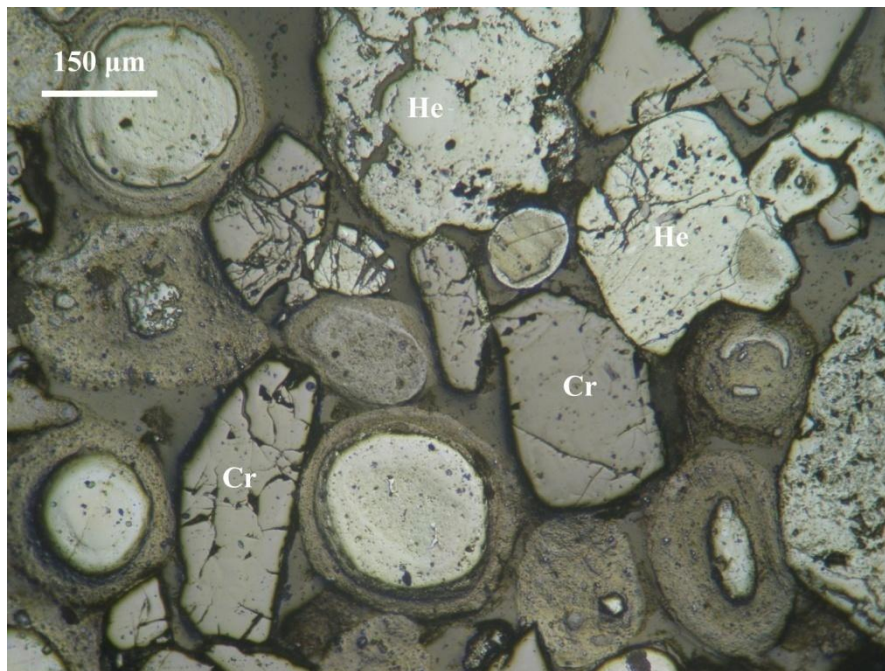
των κόκκων αποτελείται κυρίως από χλωριτικό υλικό, το οποίο έχει υποστεί μεταλλοποίηση μέσω σιδηρούχων διαλυμάτων με μορφή γκαϊτίτη και αιματίτη.

Στο μετάλλευμα παρατηρήθηκε επίσης μεγάλος αριθμός κλαστικών κόκκων χρωμίτη διάσπαρτων στο συνδετικό υλικό, καθώς επίσης και με μορφή εγκλεισμάτων στα σύνθετα σφαιροειδή. Οι χρωμίτες είναι συνήθως κατακερματισμένοι, ένδειξη τεκτονικής καταπόνησης.



Εικόνα 5.3: Ωοειδές από αιματίτη (He) και κλαστικοί κόκκοι χρωμίτη (Cr) ενσωματωμένα στο συνδετικό υλικό που έχει υποστεί αντικατάσταση μέσω σιδηρούχων διαλυμάτων. Δείγμα P3, Ανακλώμενο φως, //Nicols.

P4: Το δείγμα αυτό είναι επίσης πηλολιθικού τύπου αντίστοιχου με το P3, με τη διαφορά ότι τα σφαιροειδή σώματα είναι πολύ μεγαλύτερου μεγέθους και αποτελούνται κυρίως από σύνθετα σφαιροειδή και πελοειδή και σε μικρότερο ποσοστό από ωοειδή. Παρατηρήθηκαν επίσης κλαστικοί κόκκοι χρωμιτών και σπινελίων.



Εικόνα 5.4: Κλαστικοί κόκκοι αιματίτη (He) και χρωμίτη (Cr).
Δείγμα P4, Ανακλώμενο φως, //Nicols.

P5: Το δείγμα αυτό προέρχεται από ένα στρώμα συμπαγούς σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος με πισσόλιθους και στο οποίο παρατηρήθηκε μεγάλος αριθμός σφαιροειδών σωματιδίων διαφόρων μεγεθών. Ωοειδή, πελοειδή βρίσκονται ενσωματωμένα εντός του συνδετικού υλικού, χλωριτικής σύστασης, το οποίο στο μεγαλύτερο μέρος του έχει αντικατασταθεί μέσω σιδηρούχων διαλυμάτων.

Μεγάλος αριθμός σύνθετων σφαιροειδών παρατηρήθηκε επίσης με μέγεθος έως και 4mm με εγκλείσματα ωοειδών, πελοειδών και κρυστάλλων χρωμίτη. Η σύσταση των σφαιροειδών είναι κυρίως αιματιτική και γκαιτιτική.

P6: Το δείγμα αυτό προέρχεται από ένα στρώμα πισσολιθικού μεταλλεύματος στο οποίο παρατηρήθηκε μεγάλος αριθμός ωοειδών, πελοειδών και σύνθετων σφαιροειδών, μεγάλου σχετικά μεγέθους (Εικόνα 5.5). Τα σφαιροειδή σωματίδια, καθώς και κρύσταλλοι χρωμιτών έχουν ενσωματωθεί σ' ένα αργλικό συνδετικό υλικό, μέρος του οποίου έχει αντικατασταθεί από σιδηρούχα διαλύματα δευτερογενούς προελεύσεως. Παρατηρήθηκε επίσης πληθώρα κλαστικών κόκκων χρωμίτη, διάσπαρτων στο συνδετικό υλικό.



Εικόνα 5.5: Ωοειδές από αιματίτη (He) ενσωματωμένο σε ένα σύνθετο σφαιροειδές αιματιτικής σύστασης.

Δείγμα P6, Ανακλώμενο φως, //Nicols.

P7: Πληθώρα σφαιροειδών σωματιδίων, κυρίως πελοειδών, μικρού σχετικά μεγέθους και ελάχιστων ωοειδών κατεγράφησαν στο στρώμα αυτό, κατά τη μικροσκοπική παρατήρηση. Σπάνια παρατηρήθηκαν σύνθετα σφαιροειδή. Κρύσταλλοι χρωμιτών, μικρού σχετικά μεγέθους παρατηρήθηκαν διάσπαρτοι στο συνδετικό υλικό. Το συνδετικό υλικό έχει υποστεί μιας μικρής έκτασης αντικατάσταση, μέσω σιδηρούχων διαλυμάτων.

P8: Στον ορίζοντα αυτό πισσολιθικού μεταλλεύματος, διαπιστώθηκε η ύπαρξη ωοειδών, πελοειδών, καθώς και σύνθετων σφαιροειδών διαφόρων μεγεθών. Επίσης παρατηρήθηκε πληθώρα κλαστικών κόκκων χρωμίτη, διάσπαρτων στο συνδετικό υλικό του μεταλλεύματος.

P9: Το δείγμα αυτό προέρχεται από μια μεταβατική ζώνη και υπόκειται των υπερκειμένων ανθρακικών πετρωμάτων. Σ' αυτό παρατηρήθηκε μικρός αριθμός κυρίως πελοειδών και ελάχιστων ωοειδών, μικρού σχετικά μεγέθους, καθώς και μεμονωμένοι κόκκοι σύνθετων σφαιροειδών. Η ακτινοσκοπική εξέταση του δείγματος, έδειξε την παρουσία ασβεστίτη, ο οποίος είναι δευτερογενούς προέλευσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Γεωχημική μελέτη

6.1 Συντελεστής Pearson

Υπάρχει πληθώρα αριθμητικών μέτρων, που προσδιορίζουν το μέγεθος της στατιστικής εξάρτησης μεταξύ των ζευγών των παρατηρήσεων, που προκύπτουν στις διάφορες μελέτες. Το συντριπτικά πιο κοινό από τα μέτρα αυτά είναι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson (r). Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson είναι ένα αριθμητικό μέτρο ή δείκτης του μεγέθους της συσχέτισης μεταξύ δύο συνόλων τιμών. Κυμαίνεται σε μέγεθος από +1,00 μέχρι -1,00. Το θετικό πρόσημο σημαίνει θετική συσχέτιση (οι τιμές μιας μεταβλητής αυξάνονται όταν αυξάνονται και της άλλης), ενώ ένα πρόσημο αρνητικό σημαίνει αρνητική συσχέτιση (οι τιμές μιας μεταβλητής αυξάνονται καθώς μειώνονται της άλλης). Συντελεστής συσχέτισης 1,00 σημαίνει μια τέλεια συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Με άλλα λόγια, ένα γράφημα διασποράς των δύο μεταβλητών θα δείξει ότι όλα τα σημεία προσαρμόζονται απόλυτα σε μια ευθεία γραμμή. Όσο πλησιέστερα στο 1 είναι η απόλυτη τιμή του συντελεστή τόσο ισχυρότερη είναι η συσχέτιση. Τιμές κοντά στο μηδέν υποδεικνύουν ανυπαρξία γραμμικής συσχέτισης.

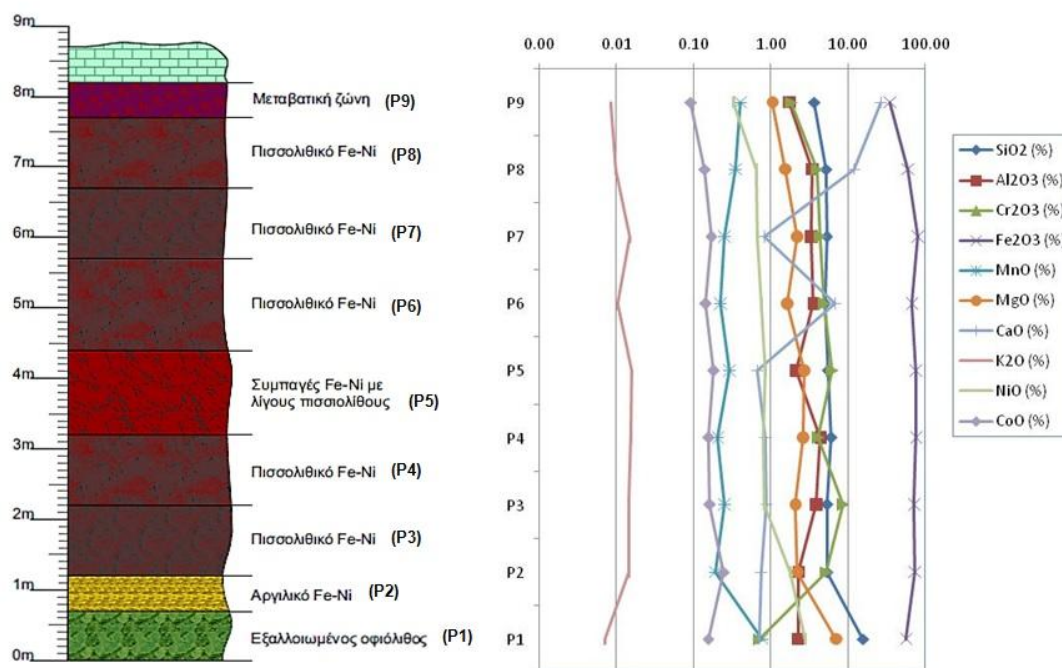
6.2: Γεωχημική κατανομή των στοιχείων κατά μήκος της τομής

Για τη γεωχημική κατανομή κατά μήκος της τομής του κοιτάσματος μελετήθηκαν τα ακόλουθα στοιχεία: Fe_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 , NiO , MnO , CoO , Al_2O_3 , CaO , MgO και το K_2O . Τα αποτελέσματα της γεωχημικής κατανομής παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 6.1.

Σύμφωνα με τις καμπύλες των κατανομών, παρατηρούμε ότι το Fe_2O_3 , παρουσιάζει πανομοιότυπη συμπεριφορά με το CoO και το K_2O , ενώ Cr_2O_3 και το Al_2O_3 δείχνουν μια σχετικά αντίστοιχη κατανομή κατά μήκος της τομής.

Το MgO , το SiO_2 και το NiO παρουσιάζουν αντίστοιχη κατανομή κατά μήκος του προφίλ του κοιτάσματος, ενώ μικρή διαφοροποίηση εμφανίζει το MnO .

Το CaO δεν παρουσιάζει αντιστοιχία στην κατανομή με τα υπόλοιπα στοιχεία κατά μήκος της τομής.



Εικόνα 6.1: Γεωχημική κατανομή κατά μήκος της τομής του κοιτάσματος του Hudenisht (Pogradec).

Κατόπιν μελετήθηκε η συσχέτιση επιλεγμένων στοιχείων, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.

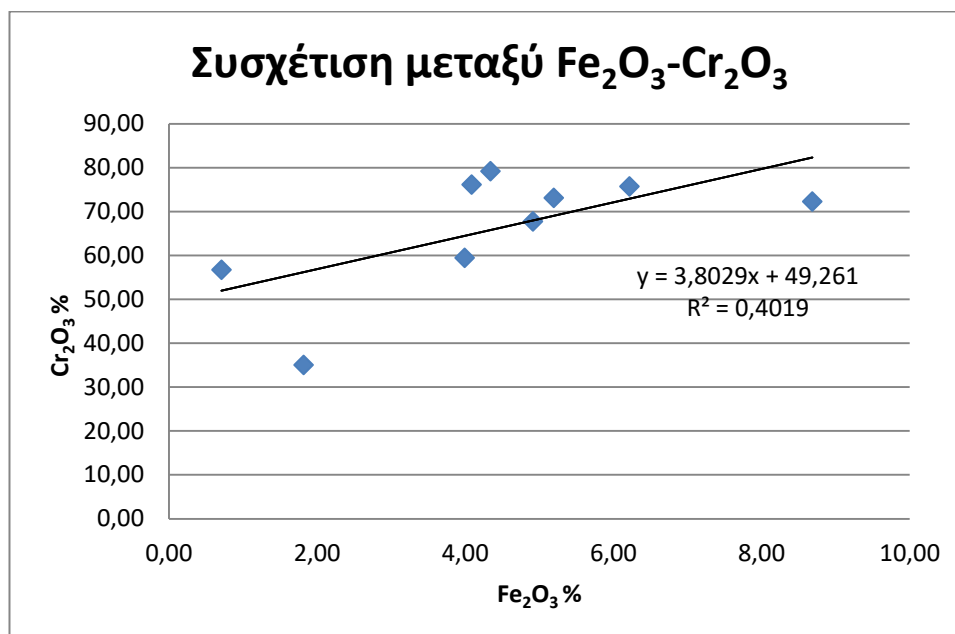
Πίνακας 6.1: Συντελεστές συσχέτισης Pearson (r) επιλεγμένων στοιχείων των αρχικών δειγμάτων.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	NiO	CoO
SiO ₂	1									
Al ₂ O ₃	-0,19	1								
Cr ₂ O ₃	-0,52	0,43	1							
Fe ₂ O ₃	-0,09	0,53	0,63	1						
MnO	0,86	-0,46	-0,70	-0,53	1					
MgO	0,98	-0,21	-0,45	0,01	0,81	1				
CaO	-0,36	-0,37	-0,42	-0,88	0,12	-0,46	1			
K ₂ O	-0,46	0,36	0,73	0,83	-0,75	-0,32	-0,58	1		
NiO	0,89	-0,31	-0,37	0,03	0,67	0,89	-0,46	-0,29	1	
CoO	0,09	-0,03	0,38	0,70	-0,29	0,18	-0,74	0,60	0,46	1

Βάσει των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1, παρατηρούμε ότι θετική συσχέτιση έχουν τα MnO, MgO, NiO με το SiO₂, με αξιοσημείωτη συσχέτιση (σχεδόν ταύτιση) εκείνη του MgO με το SiO₂ (0,98), ενώ του NiO με το SiO₂ (0,89) και του MnO με το SiO₂ (0,86). Επιπλέον θετική συσχέτιση έχουν το Fe₂O₃ με τα Cr₂O₃, K₂O, CoO και το MgO με το MnO.

Αρνητική συσχέτιση παρουσιάζει το MnO με το Cr_2O_3 , τα K_2O και CoO με το CaO και το MnO , με μέγιστη αρνητική εκείνη του CoO με το CaO (-0,74). Αξίζει να σημειωθεί ότι όπως είναι εμφανές και στο διάγραμμα το CaO δε συσχετίζεται με τίποτε άλλο.

Η συμπεριφορά των πιο σημαντικών από τα παραπάνω στοιχεία απεικονίζεται σε παρακάτω διαγράμματα.

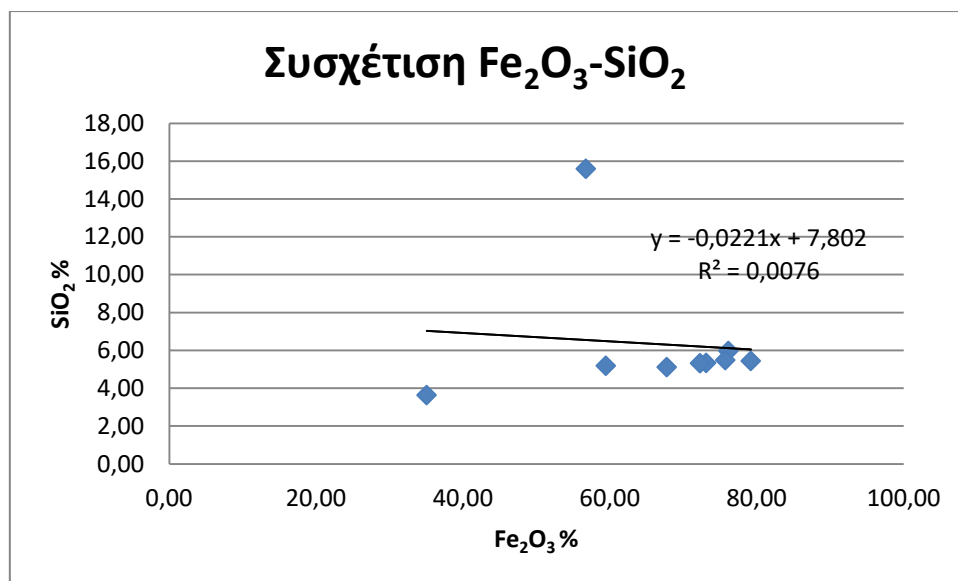


Σχήμα 6.1: Συσχέτιση μεταξύ Cr_2O_3 - Fe_2O_3

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων Fe και Cr, αλλά δεν είναι πολύ ισχυρή. Ο σίδηρος έχει γενικά πολύ υψηλές συγκεντρώσεις σε όλα τα δείγματα με υψηλότερες συγκεντρώσεις στα πισσολιθικά στρώματα P4 και P7, με ποσοστά 76,13% και 79,18% αντιστοίχως. Το χρώμιο έχει μέγιστα ποσοστά 8,69% και 6,22% στα δείγματα P3 και P5 αντιστοίχως.

Ο σίδηρος υφίσταται σε τόσο μεγάλο ποσοστό, εξαιτίας της συμμετοχής του στα ορυκτά του γκαιίτη και του αιματίτη αφενός και αφετέρου στους σπινελλίους, στους χρωμίτες και χλωρίτες.

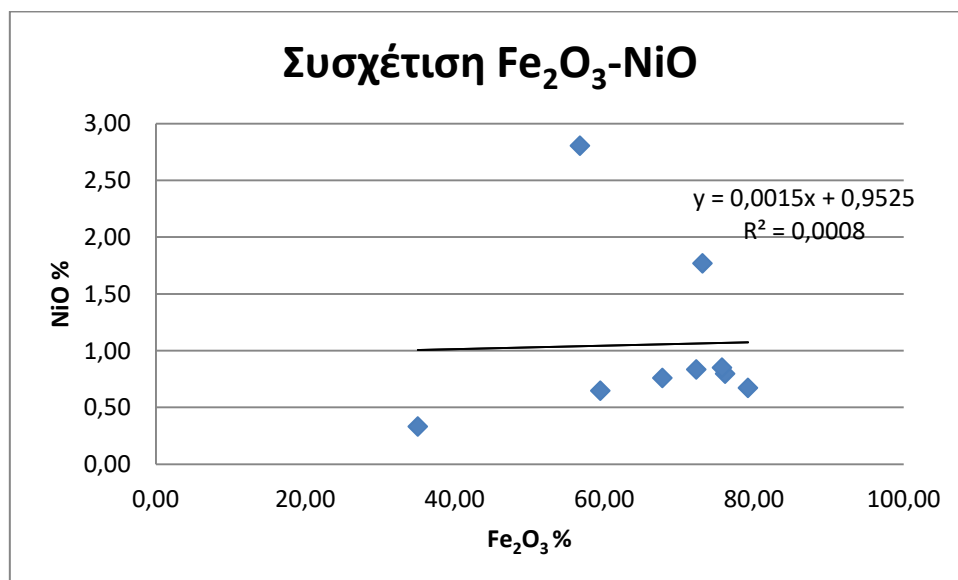
Το χρώμιο από την άλλη σχετίζεται με την παρουσία χρωμιτών και κατά δεύτερο λόγο, ένα μικρό ποσοστό χρωμίου απαντάται σε ορυκτά του σιδήρου. Η δέσμευση του χρωμίου στο πλέγμα των σιδηρούχων ορυκτών είναι δυνατή, εξαιτίας της αναλογίας της ιοντικής ακτίνας Fe^{3+} και Cr^{3+} . Πιθανή επίσης φαίνεται μια προσροφητική δέσμευση του Cr στα ορυκτά του σιδήρου (Friedrich et al., 1980).



Σχήμα 6.2:Συσχέτιση μεταξύ Fe_2O_3 - SiO_2

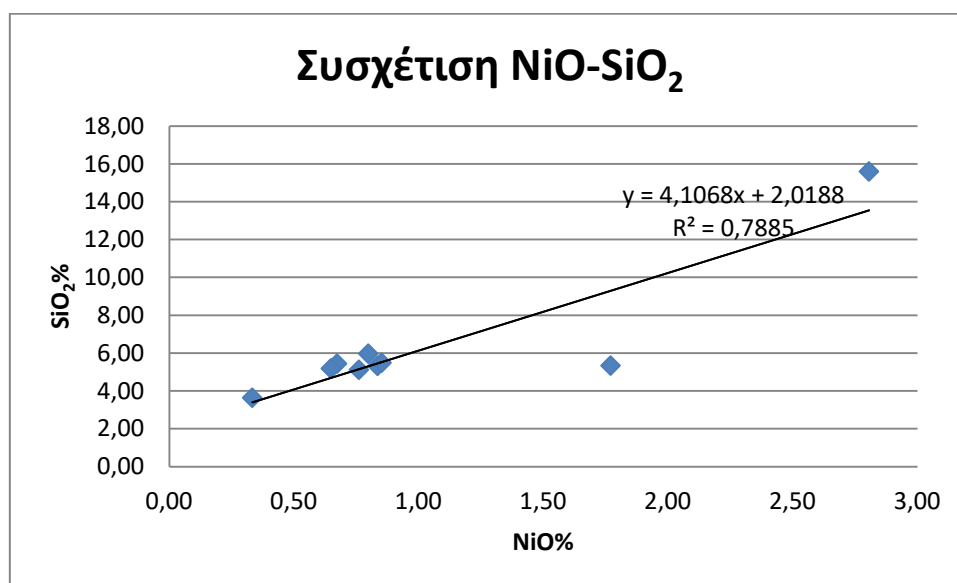
Παρατηρείται και από το διάγραμμα ότι SiO_2 και Fe_2O_3 έχουν αρνητική έως μηδενική συσχέτιση, καθώς υπάρχει μια τυχαία διαφοροποίηση των τιμών του SiO_2 χωρίς να ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη σχέση με το Fe_2O_3 , όπως φαίνεται και από την τιμή του συντελεστή -0.09.

Το πυρίτιο απαντάται σε ορυκτά, όπως είναι ο χαλαζίας, αλλά βρίσκεται και στο πλέγμα ορυκτών όπως ο χλωρίτης (νιμίτης) και όπως ο λιζαρδίτης και κατ' επέκταση στα ορυκτά της ομάδας του σερπεντίνη.



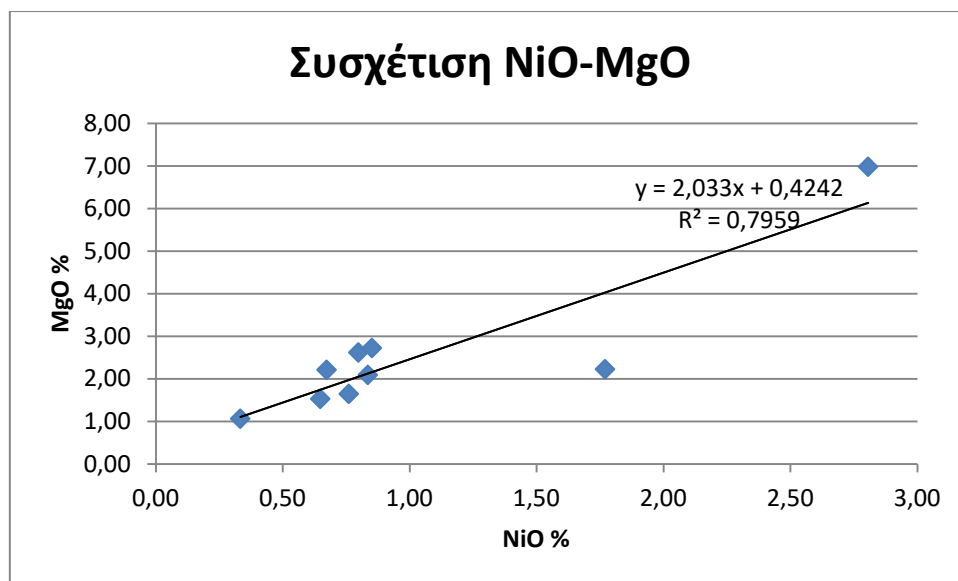
Σχήμα 6.3:Συσχέτιση μεταξύ Fe_2O_3 - NiO

Το νικέλιο εμφανίζει μια σχεδόν μηδενική συσχέτιση με το σίδηρο και δε φαίνεται να σχετίζονται με κάποιο τρόπο. Απαντάται κυρίως στους νικελιούχους χλωρίτες και στους σερπεντίνες του μεταλλεύματος. Το νικέλιο βρίσκεται επίσης στα ορυκτά του σιδήρου και η παρουσία του εξηγείται με τα φαινόμενα της προσρόφησης και της αντικατάστασης σε μεγαλύτερο βαθμό. Γενικά το νικέλιο θεωρείται σιδηρόφιλο στοιχείο, εξαιτίας του υψηλού δυναμικού ιόντος του και συνήθως αντικαθιστά στοιχεία όπως Fe^{2+} , Mg . Οι παράγοντες, που παίζουν ρόλο στην αντικατάσταση είναι το σθένος και η ιοντική ακτίνα και λαμβάνει χώρα σε ορυκτά, στα οποία τα ιόντα έχουν ακτίνες, που δε διαφέρουν περισσότερο από 20%. Τα σθένη δεν είναι απαραίτητο να είναι τα ίδια, αλλά απαραίτητο είναι να διατηρείται η ηλεκτρική ισορροπία από αντικατάσταση επιπρόσθετου ιόντος (Κελεπερτζής, 2010). Σύμφωνα με τον Schellmann (1978), η εξισορρόπηση των φορτίων κατά την αντικατάσταση του Fe^{2+} από το Ni εξισορροπείται με την επιπρόσθετη υποδοχή στο πλέγμα Si^{4+} . Ο ίδιος ερευνητής έδειξε, μέσω μικροανάλυσεων, ότι το Si και το Ni συσχετίζονται με το Fe . Τα στοιχεία Mn , Fe , Co , Ni ανήκουν σε μια ομάδα μεταβατικών στοιχείων, των οποίων τα άτομα έχουν μια ατελώς συμπληρωμένη εσωτερική στοιβάδα με περισσότερα από 8 ηλεκτρόνια. Τα στοιχεία Ni και Cr δείχνουν έναν αξιοσημείωτο εμπλουτισμό σε υπερβασικά εκρηξιγενή πετρώματα σε σχέση προς το Mg και το Fe . Οι αιτίες για τη μετακίνησή τους στα πρώιμα στάδια της κρυστάλλωσης δεν είναι τελείως κατανοητές (Κελεπερτζής, 2010).



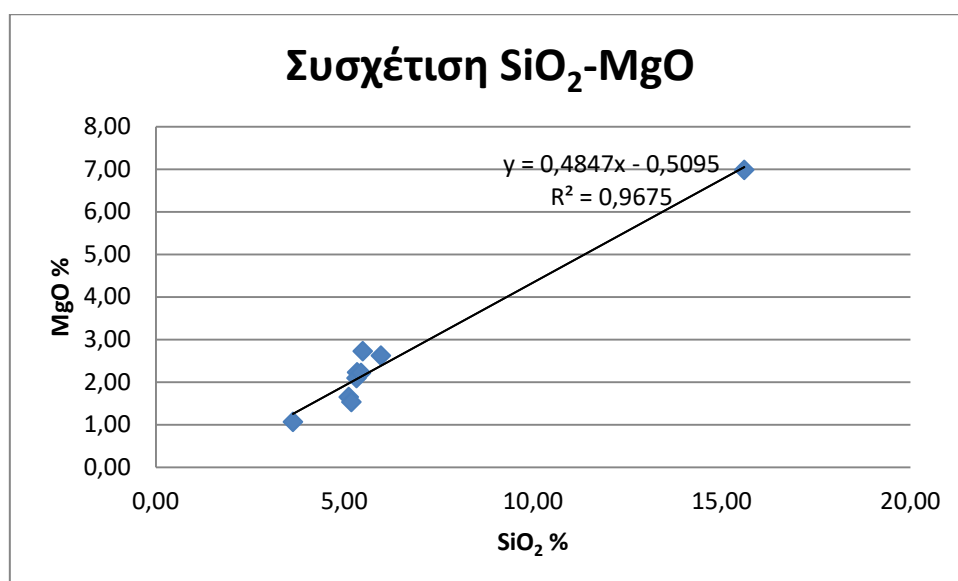
Σχήμα 6.4: Συσχέτιση μεταξύ NiO - SiO_2

Σ' αυτό το διάγραμμα, όπως επίσης και στην καμπύλη των κατανομών, είναι φανερή η συσχέτιση του πυριτίου με το νικέλιο, μία από τις υψηλότερες συσχετίσεις μεταξύ των στοιχείων του κοιτάσματος. Η ισχυρή αυτή συσχέτιση μεταξύ τους οφείλεται στο ότι συνυπάρχουν στο πλέγμα κάποιων συγκεκριμένων ορυκτών, που είναι ο σερπεντίνης (λιζαρδίτης) και ο χλωρίτης (νιμίτης), στα οποία το νικέλιο αντικαθιστά το μαγνήσιο.



Σχήμα 6.5:Συσχέτιση μεταξύ NiO-MgO

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η συσχέτιση NiO-MgO είναι εξαιρετικά ισχυρή (0,89), αφού το πρώτο αντικαθιστά το δεύτερο σε φυλλοπυριτικά ορυκτά (σερπεντίνης, χλωρίτης).



Σχήμα 6.6:Συσχέτιση μεταξύ SiO₂-MgO

Στο παραπάνω σχήμα διαπιστώνουμε την ισχυρή συσχέτιση SiO₂-MgO (0,98), εξαιτίας της συνύπαρξής τους στο πλέγμα του λιζαρδίτη και του χλωρίτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

7.1: Προετοιμασία-θραύση δειγμάτων για εργαστηριακές δοκιμές εμπλουτισμού

Τα αρχικά δείγματα ομογενοποιήθηκαν και θραύστηκαν σε μέγεθος -8 mm με χρήση σιαγωνωτού θραυστήρα. Το προϊόν του θραυστήρα κοσκινίστηκε και διαχωρίστηκε σε 5 κοκκομετρικά κλάσματα:

- -8.00+4.00 mm
- -4.00+1.00 mm
- -1+0.250 mm
- -0.250+0.063 mm
- -0.063 mm

Συγκεκριμένα, το προϊόν του θραυστήρα κοσκινίστηκε εν υγρώ σε μέγεθος -0.063 mm, ενώ το +0,063 mm οδηγήθηκε σε φούρνο για ξήρανση και στη συνέχεια κοσκινίστηκε στα κόσκινα 8 mm, 4 mm, 1 mm και 0.250 mm, ώστε να προκύψουν τα κλάσματα -8.00+4.00 mm, -4.00+1.00 mm, -1.00+0.250 mm και -0.250+0.063 mm. Το κάθε κλάσμα χωρίστηκε ισόποσα σε δύο μέρη, ένα για βαρυτομετρικό κι ένα για μαγνητικό διαχωρισμό. Σε όλα αυτά τα δείγματα πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση με τη μέθοδο φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού (XRF), ενώ έγινε ορυκτολογική ανάλυση με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (XRD) και παρασκευάστηκαν στιλπνές τομές, προκειμένου να μελετηθούν στο μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός. Το πιο λεπτόκοκκο κλάσμα (-0,063 mm) δε χρησιμοποιήθηκε για τις μεθόδους εμπλουτισμού, γιατί το μέγεθός του δεν είναι κατάλληλο για τις συγκεκριμένες μεθόδους εμπλουτισμού που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η κατανομή του βάρους στα επιμέρους κοκκομετρικά κλάσματα παρουσιάζεται στον πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1:Βάρος και κατανομή βάρους στα κοκκομετρικά κλάσματα

Κοκκομετρικά κλάσματα (mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)
-8,00+4,00	1294,4	53,6
-4,00+1,00	688,6	28,5
-1,00+0,250	241,7	10,0
-0,250+0,063	99,9	4,1
-0,063	91,03	3,8
ΣΥΝΟΛΟ	2415,63	100,0

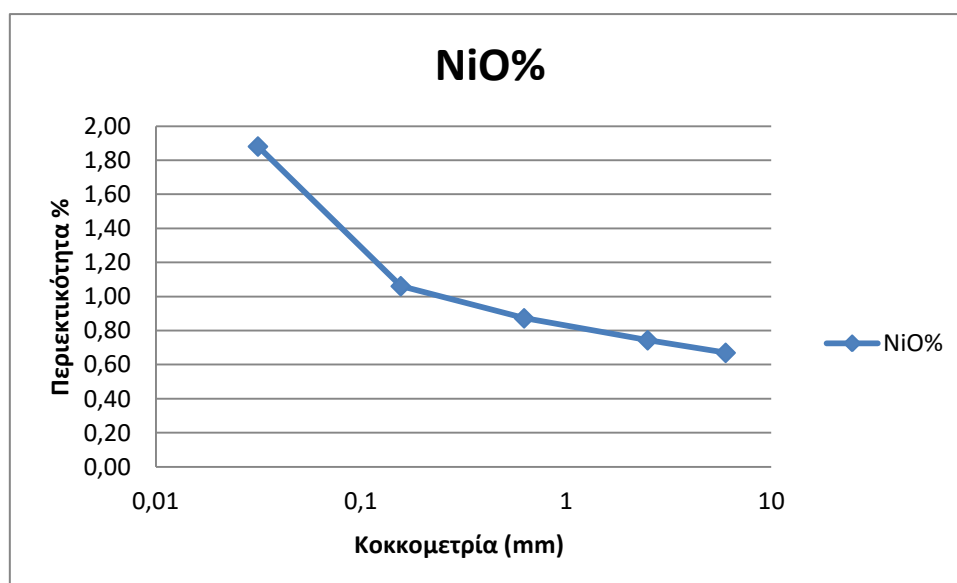
Στα προαναφερθέντα κοκκομετρικά κλάσματα (PK1-PK5) προσδιορίστηκε η απώλεια πύρωσης, η χημική σύσταση με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού (XRF), η ορυκτολογική σύσταση με περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD) και τέλος, μικροσκοπική εξέταση. Τα αποτελέσματα των περιεκτικοτήτων για τα δείγματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων στα κοκκομετρικά κλάσματα

Κοκκομετρικά κλάσματα	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	NiO (%)	CoO (%)	A.Π. (%)	ΣΥΝΟΛΟ
-8,00+4,00	5,31	3,89	5,56	75,92	0,28	1,89	1,23	0,02	0,67	0,17	4,96	99,89
-4,00+1,00	5,70	2,17	5,14	74,82	0,29	1,93	2,48	0,02	0,74	0,16	6,55	100,00
-1,00+0,250	6,18	2,17	6,21	71,90	0,29	2,66	2,45	0,02	0,87	0,16	7,19	100,10
-0,250+0,063	7,08	3,94	7,45	66,33	0,33	2,52	2,52	0,01	1,06	0,17	8,34	99,76
-0,063	11,68	6,81	2,78	55,14	0,86	4,57	2,79	0,03	1,88	0,16	13,26	99,95

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα 7.2 η μεγαλύτερη συγκέντρωση του NiO (1,88% κ.β.) καταγράφεται στο κοκκομετρικό κλάσμα -0,063 mm σε σχέση με τα υπόλοιπα κοκκομετρικά κλάσματα. Στο κοκκομετρικό αυτό κλάσμα, όπως προαναφέρθηκε, δεν έγινε εμπλουτισμός. Αντίστοιχες υψηλές συγκεντρώσεις NiO (1,05% κ.β.) παρατηρήθηκαν στο εν λόγω κλάσμα και στο νικελιούχο λατεριτικό μέταλλευμα του Nome (Αλβανία) (Katzagiannakis et al., 2014).

Η διακύμανση της περιεκτικότητας (%) του NiO στα κοκκομετρικά κλάσματα αποτυπώνεται στο σχήμα 7.1, όπου παρατηρείται ότι όσο μειώνεται το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται η περιεκτικότητα του NiO.



Σχήμα 7.1: Μεταβολή της περιεκτικότητας (%) του NiO στα κοκκομετρικά κλάσματα πριν τον εμπλουτισμό

7.2: Δοκιμή εμπλουτισμού με τη μέθοδο του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

Κατά τη συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν 4 κοκκομετρικά κλάσματα, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3: Κατανομή βαρών των κοκκομετρικών κλασμάτων του βαρυτομετρικού εμπλουτισμού

Κοκκομετρικά κλάσματα (mm)	Βάρος (%)
-8,00+4,00	54,45
-4,00+1,00	26,96
-1,00+0,250	8,44
-0,250+0,063	3,08

Για τη διεκπεραίωση της διαδικασίας σημαντική ήταν η επιλογή ενός βαρέος υγρού με τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα. Όπως φαίνεται και από τις χημικές αναλύσεις των δειγμάτων, το μετάλλευμα είναι ιδιαίτερα σιδηρούχο, οπότε ήταν απαραίτητο ένα βαρύ υγρό με μεγάλη πυκνότητα και γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε το τετραβρωμοαιθάνιο ($d=2,96 \text{ g/cm}^3$). Με τον τρόπο αυτό διαχωρίζουμε τα βαριά ορυκτά, τα οποία είναι ο αιματίτης ($5,25 \text{ g/cm}^3$), ο γκαϊτίτης ($3,3\text{-}4,3 \text{ g/cm}^3$) και ο χρωμίτης ($4,5\text{-}4,8 \text{ g/cm}^3$), από τα υπόλοιπα ελαφρύτερα, όπως ο λιζαρδίτης ($2,2 - 2,6 \text{ g/cm}^3$), ο ασβεστίτης ($2,7 \text{ g/cm}^3$) και ο χλωρίτης ($2,6\text{-}3,3 \text{ g/cm}^3$). Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ποτήρι ζέσεως των 1000 ml, στο οποίο βάλαμε 500 ml τετραβρωμοαιθανίου ($2,96 \text{ g/cm}^3$) και σύμφωνα με τη μέθοδο, ύστερα από καλή ανάδευση του βαρέως υγρού με το δείγμα μας παίρνουμε δύο κλάσματα γνωστά ως float (ελαφριά) και sink (βαριά). Τα ελαφριά προϊόντα είναι αυτά, που έχουν μικρότερη πυκνότητα από αυτή του βαρέος υγρού και γι' αυτό επιπλέουν, ενώ τα βαριά προϊόντα καταβυθίζονται γιατί έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα.

Στον πίνακα 7.4, παρουσιάζονται τα βάρη, οι περιεκτικότητες και η κατανομή των κοκκομετρικών κλασμάτων για τα βαριά και τα ελαφριά προϊόντα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού.

Πίνακας 7.4: Περιεκτικότητες και κατανομές των κλασμάτων του αρχικού βαρυτομετρικού διαχωρισμού.

Κοκκομετρικά κλάσματα d(mm)	Κλάσματα βαρυτομετρικού διαχωρισμού	ΒΑΡΗ			ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΕΣ (%)							ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΚΛΑΣΜΑΤΩΝ (%)						
		Βάρος (g)	Βάρος κλάσματος (%)	Βάρος επί αρχικού (%)	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
-8+4	Βαρύ (+2.96 g/cm ³)	669,60	95,55	52,34	74,22	5,34	5,28	0,86	3,08	2,01	2,22	97,64	96,32	97,72	97,05	96,67	66,06	98,19
	Ελαφρύ (-2.96 g/cm ³)	31,19	4,45	2,44	38,46	4,38	2,64	0,56	2,28	22,13	0,88	2,36	3,68	2,28	2,95	3,33	33,95	1,81
	Σύνολο	700,79	100	54,78	72,63	5,3	5,161	0,84	3,044	2,901	2,16	100,00	100,00	100,00	100,0	100,00	100,0	100,00
-4+1	Βαρύ (+2.96 g/cm ³)	274,3	80,84	21,44	75,94	5,18	5,19	0,72	3,28	1,73	2,12	83,96	77,06	79,46	74,42	77,68	53,02	80,52
	Ελαφρύ (-2.96 g/cm ³)	65,02	19,16	5,08	61,20	6,51	5,66	1,05	3,98	6,47	2,16	16,04	22,94	20,54	25,58	22,32	46,98	19,48
	Σύνολο	339,32	100	26,52	73,12	5,44	5,28	0,79	3,41	2,64	2,12	100,00	100,00	100,00	100,0	100,00	100,0	100,00
-1+0,250	Βαρύ (+2.96 g/cm ³)	101,08	93,07	7,90	72,66	5,46	6,350	0,78	3,15	1,71	2,26	96,88	82,84	98,98	82,18	94,54	58,81	83,60
	Ελαφρύ (-2.96 g/cm ³)	7,53	6,93	0,59	31,460	15,18	0,88	2,27	2,44	16,08	5,95	3,12	17,16	1,02	17,82	5,46	41,19	16,40
	Σύνολο	108,61	100	8,49	69,8	6,13	5,97	0,88	3,10	2,71	2,52	100,00	100,00	100,00	100,0	100,00	100,0	100,00
-0,250+0,063	Βαρύ (+2.96 g/cm ³)	34,93	88,21	2,73	68,50	6,74	8,38	0,83	4,05	1,93	2,33	90,77	85,59	97,91	72,97	91,04	71,87	81,45
	Ελαφρύ (-2.96 g/cm ³)	4,67	11,79	0,37	52,09	8,49	1,34	2,30	2,98	5,65	3,97	9,23	14,41	2,09	27,03	8,96	28,13	18,55
	Σύνολο	39,60	100,00	3,10	66,56	6,95	7,55	1,00	3,92	2,37	2,52	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-0,063		91,03	100,00	7,12	55,14	11,68	2,78	1,88	6,81	2,79	4,57	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Σύνολο	1279,35		47,66														

Σχολιασμός πίνακα:

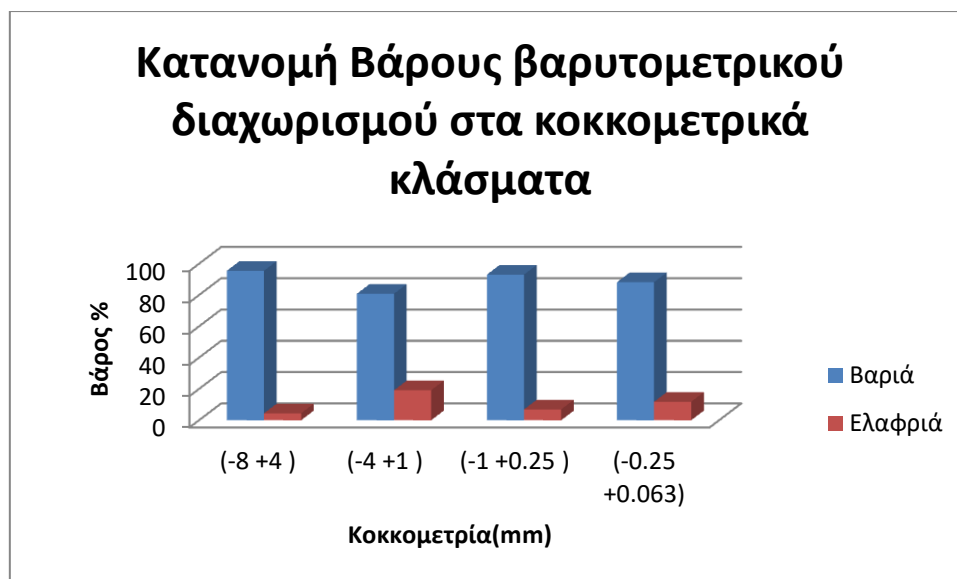
Ο σχολιασμός αφορά τη συμπεριφορά των οξειδίων Fe_2O_3 , SiO_2 και NiO .

- Εξετάζοντας τον πίνακα των περιεκτικότητων, που προέκυψαν από το βαρυτομετρικό διαχωρισμό, παρατηρούμε ότι το Fe_2O_3 εμπλουτίζεται στα βαρύτερα κλάσματα όλων των κοκκομετρικών κλασμάτων. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε Fe_2O_3 παρατηρούνται στα κοκκομετρικά κλάσματα -8+4 mm και -4+1 mm με ποσοστά 74,22 % και 75,94 % αντιστοίχως. Εν αντιθέσει με τα παραπάνω το SiO_2 εμπλουτίζεται στα ελαφριά προϊόντα σε όλες τις κοκκομετρίες, με εξαίρεση το κοκκομετρικό κλάσμα -8+4 mm, με υψηλότερα ποσοστά στην κοκκομετρία -1+0,250 mm με ποσοστό 15,18 % και στην κοκκομετρία -0,250+0,063 mm με ποσοστό 8,49 %.

Η κατανομή του Fe_2O_3 είναι εξαιρετικά μεγαλύτερη στα βαριά κλάσματα, όπως θα ήταν μάλιστα αναμενόμενο, επειδή και το βάρος, αλλά και η περιεκτικότητά του στα συγκεκριμένα κλάσματα είναι σαφώς μεγαλύτερη από τα ελαφριά κλάσματα όλων των κοκκομετριών. Στα ελαφριά προϊόντα η περιεκτικότητα του SiO_2 είναι μεγαλύτερη από αυτή των βαριών προϊόντων, αλλά η κατανομή του είναι στα βαριά προϊόντα, λόγω του πολλαπλάσιου βάρους στο αντίστοιχο προϊόν.

- Το NiO με βάση τον πίνακα των περιεκτικότητων φαίνεται ότι έχει την τάση να εμπλουτίζεται στα ελαφριά κλάσματα σε όλες τις κοκκομετρίες, εκτός από την κοκκομετρία -8+4 mm. Από εκεί και έπειτα, ο εμπλουτισμός του είναι σταδιακός με μέγιστη τιμή 2,3 % στο κοκκομετρικό κλάσμα -0,250+0,063 mm, αλλά και στην -1+0,250 mm με ποσοστό 2,27 %. Αξίζει ν' αναφερθεί ότι το κλάσμα -0,063 mm παρουσιάζει ιδιαίτερα εντυπωσιακό ποσοστό σε NiO με 1,88 %, ακόμη και χωρίς εμπλουτισμό. Όσον αφορά την κατανομή του NiO , αυτή φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στα βαρύτερα προϊόντα όλων των κοκκομετριών, επειδή και πάλι τα βάρη τους είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά των ελαφριών προϊόντων. Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη κατανομή είναι εκείνη του κλάσματος -8+4 mm με τιμή 97,05 %.

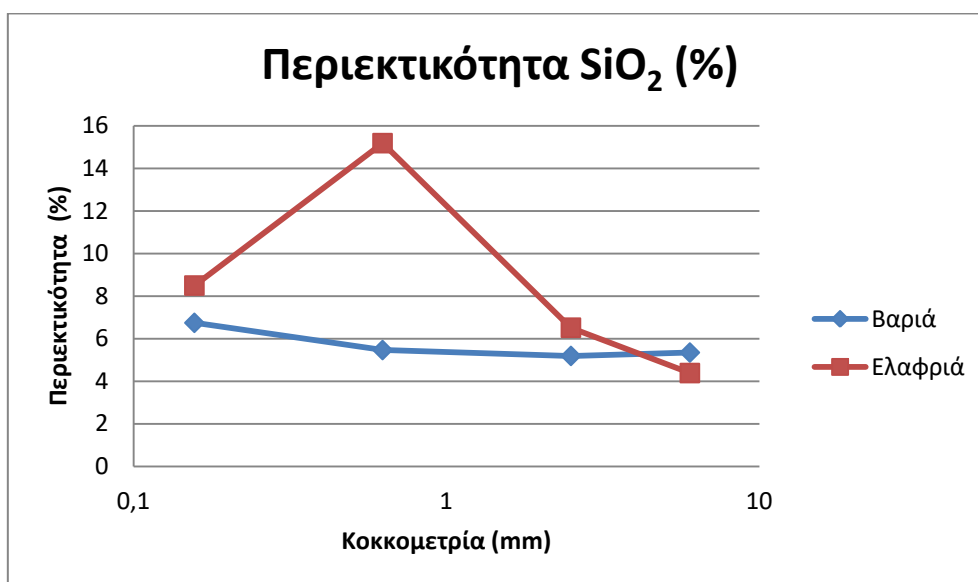
Η κατανομή βάρους των προϊόντων του βαρυτομετρικού διαχωρισμού που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4, αποτυπώνονται στο σχήμα 7.2



Σχήμα 7.2: Κατανομή βάρους (%) στα βαριά και στα ελαφριά σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

Όπως είναι φανερό από το παραπάνω διάγραμμα τα βαριά προϊόντα έχουν πολύ μεγαλύτερο βάρος από τα ελαφριά προϊόντα σε όλες τις κοκκομετρίες.

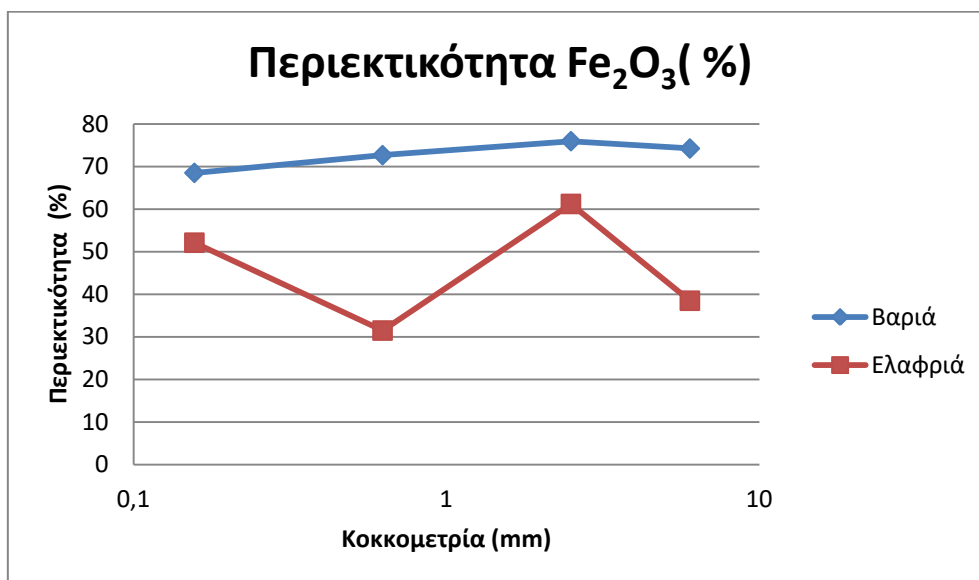
Στα σχήματα 7.3 έως 7.5 απεικονίζονται οι περιεκτικότητες (%) σε SiO_2 , Fe_2O_3 και NiO των κλασμάτων που προέκυψαν από το βαρυτομετρικό διαχωρισμό.



Σχήμα 7.3: Περιεκτικότητα σε SiO_2 στα κλάσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

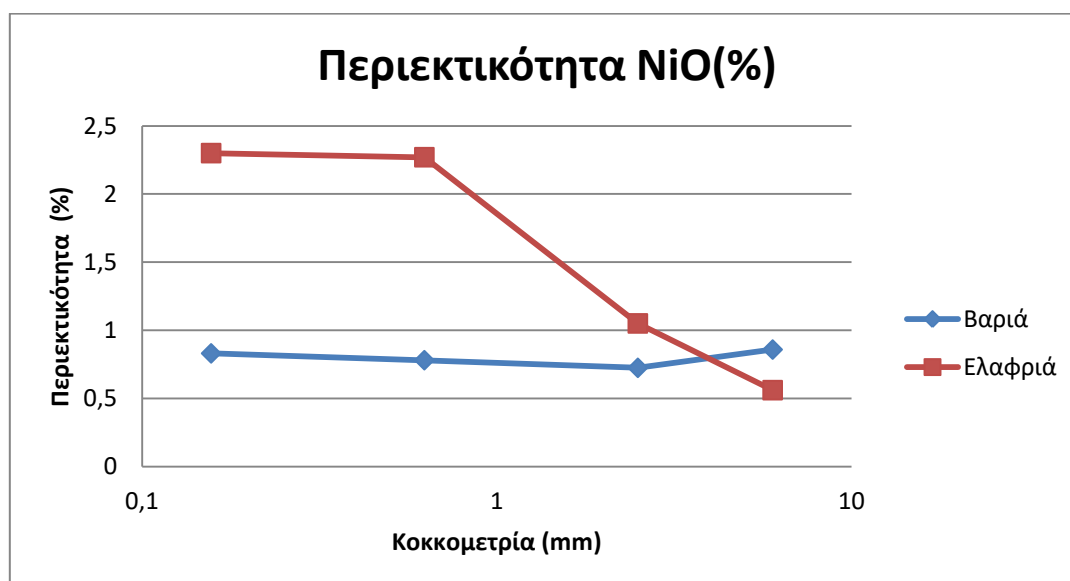
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται το SiO_2 εμπλουτίζεται στα ελαφριά προϊόντα, με μεγαλύτερες περιεκτικότητες στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα. Στα βαριά προϊόντα η περιεκτικότητά του παρουσιάζει πολύ μικρές διακυμάνσεις, παραμένοντας ως επί το πλείστον

σταθερή. Στο κοκκομετρικό κλάσμα -8+4 mm η περιεκτικότητα στα βαριά και στα ελαφριά προϊόντα είναι περίπου ίδια.



Σχήμα 7.4: Περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 στα κλάσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

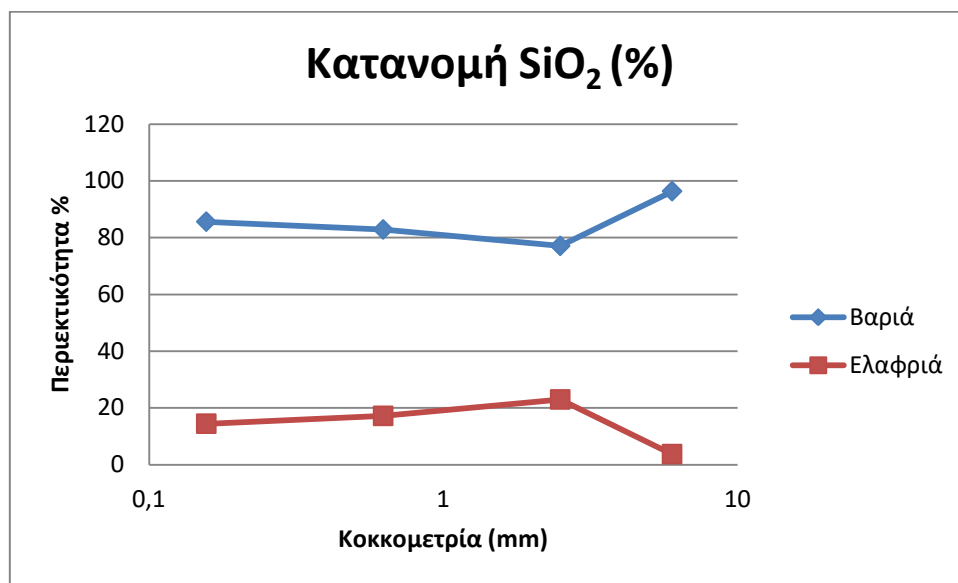
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το Fe_2O_3 εμπλουτίζεται στα βαριά προϊόντα με την τιμή της περιεκτικότητάς του να έχει μικρές διακυμάνσεις και μεγαλύτερες τιμές στα βαρύτερα κοκκομετρικά κλάσματα. Αντιθέτως στα ελαφριά προϊόντα η τιμή αυτή έχει συνεχώς διακυμάνσεις με μεγαλύτερη τιμή στο κλάσμα -4+1 mm.



Σχήμα 7.5: Περιεκτικότητα σε NiO στα κλάσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

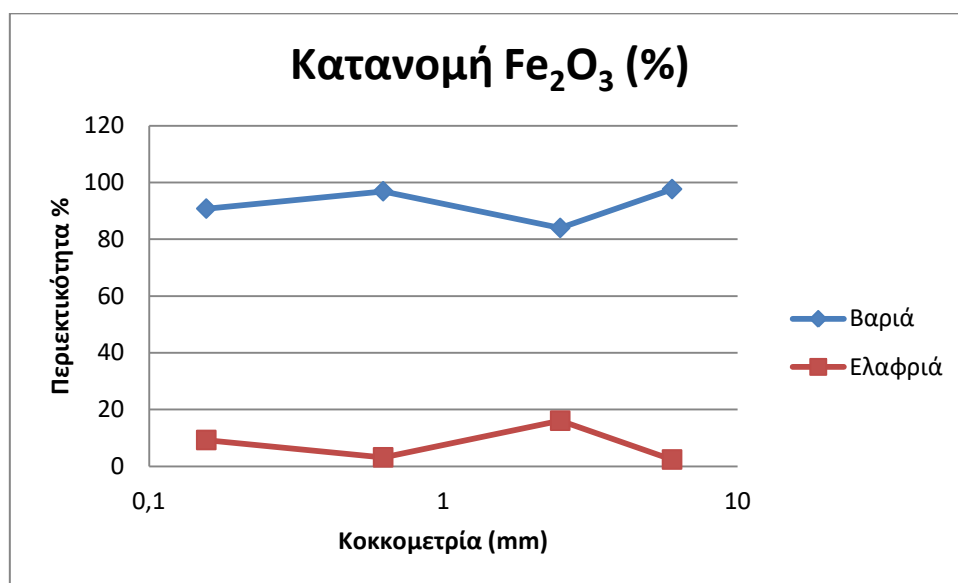
Το νικέλιο εμπλουτίζεται, όπως και το SiO_2 στα ελαφριά προϊόντα, ενώ στα βαριά η περιεκτικότητά του παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις. Μεγαλύτερη τιμή της περιεκτικότητας είναι στο κοκκομετρικό κλάσμα $-0,250+0,063 \text{ mm}$. Στο κοκκομετρικό κλάσμα $-8+4 \text{ mm}$ η περιεκτικότητα στα βαριά και στα ελαφριά προϊόντα είναι περίπου ίδια.

Στα σχήματα 7.6 έως και 7.8 απεικονίζονται οι κατανομές των SiO_2 , Fe_2O_3 και NiO στα κοκκομετρικά κλάσματα που προέκυψαν από το βαρυτομετρικό διαχωρισμό.



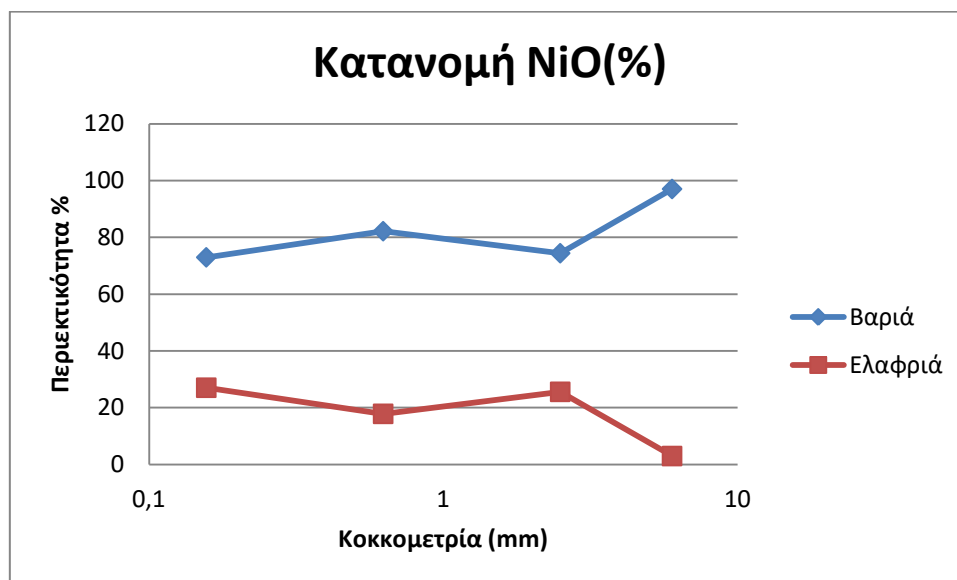
Σχήμα 7.6: Κατανομή του SiO_2 στα κλάσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι το SiO_2 κατανέμεται στα βαριά προϊόντα με μεγαλύτερο ποσοστό στο κοκκομετρικό κλάσμα $-8+4 \text{ mm}$. Η κατανομή του πέρα από το κλάσμα αυτό δεν παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις στα υπόλοιπα κοκκομετρικά κλάσματα.



Σχήμα 7.7: Κατανομή του Fe_2O_3 στα κλάσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

Η κατανομή του σιδήρου είναι στα βαριά προϊόντα με μεγαλύτερες τιμές εκείνες στα κοκκομετρικά κλάσματα -8+4 mm και -1+0,250 mm. Η κατανομή του δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις στα άλλα δυο κλάσματα.



Σχήμα 7.8: Κατανομή του NiO στα κλάσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

Η κατανομή του NiO είναι μεγαλύτερη στα βαριά προϊόντα από αυτή στα ελαφριά προϊόντα με τη μεγαλύτερη τιμή να είναι, όπως και στα παραπάνω οξείδια στο κοκκομετρικό κλάσμα -8+4 mm.

Επειδή στα κλάσματα -8+4 mm και -4+1 mm, ο διαχωρισμός με το τετραβρωμοαιθάνιο ($2,96\text{gr/cm}^3$) δεν ήταν ικανοποιητικός και οι περισσότεροι κόκκοι πήγαιναν στα βαριά, επαναλήφθηκε η διαδικασία, όπου παρασκευάστηκε βαρύ διάμεσο, σύμφωνα με τη σχέση υπολογισμού της πυκνότητας πολφού (παράγραφος 4.5.3), το οποίο αποτελούταν από 600gr FeSi και 300ml βρωμοφόρμιο και τελική πυκνότητα 4g/cm^3 . Έτσι έχουμε στα δύο αυτά κλάσματα τρία προϊόντα κι όχι δύο, τα οποία είναι με πυκνότητες $+4\text{g/cm}^3$, $-4+2,96\text{g/cm}^3$ και $-2,96\text{g/cm}^3$. Για τα άλλα δύο κλάσματα, δε χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία του εμπλουτισμού με βαρέα διάμεσα, γιατί αφενός είναι πολύ δύσκολο, λόγω της πολύ μικρής κοκκομετρίας να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των βαρέων διαμέσων και να διαχωριστεί το δείγμα, και αφετέρου γιατί ο διαχωρισμός που επετεύχθη ήταν επαρκής. Οι μικρότεροι κόκκοι μειώνουν την πυκνότητα του πολφού και αυξάνουν το ιζώδες και επομένως μειώνουν την οξύτητα του διαχωρισμού. Τέλος στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα είναι δύσκολο να ξεχωρίσουμε το μετάλλευμά μας από τον πολφό.

7.2.1: Αποτελέσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού με βαρέα διάμεσα

Όπως προαναφέρθηκε, για να επιτευχθεί καλύτερος διαχωρισμός στα κοκκομετρικά κλάσματα -8+4 mm και -4+1 mm, χρησιμοποιήθηκε βαρύ διάμεσο με τελική πυκνότητα 4g/cm^3 . Το αρχικό κοκκομετρικό κλάσμα και στις δύο κοκκομετρίες έχει πυκνότητα μεγαλύτερη του $2,96\text{ g/cm}^3$. Το βαρύ προϊόν από το διαχωρισμό με το βαρύ διάμεσο και στα δύο κοκκομετρικά κλάσματα έχει πυκνότητα μεγαλύτερη του 4g/cm^3 και το ελαφρύ προϊόν έχει πυκνότητα μεταξύ του $2,96\text{g/cm}^3$ και του 4g/cm^3 . Στον πίνακα 7.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το διαχωρισμό αυτό.

Πίνακας 7.5: Περιεκτικότητες και κατανομή των κλασμάτων του βαρυτομετρικού διαχωρισμού

Κοκκομετρικά κλάσματα d(mm)	Κλάσματα βαρυτομετρικού διαχωρισμού	ΒΑΡΗ			ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΕΣ (%)			ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΚΛΑΣΜΑΤΩΝ (%)		
		Βάρος (g)	Βάρος (%)	Βάρος επί του αρχικού (%)	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	NiO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	NiO
-8+4	Βαρύ (+4g/cm ³)	329,8	49,25	27,87	77,56	4,82	0,65	51,47	44,43	37,31
	Ελαφρύ (-4+2.96g/cm ³)	339,8	50,75	28,72	70,98	5,85	1,06	48,53	55,57	62,69
	Αρχικό (+2.96 g/cm ³)	669,6	100	56,60	74,22	5,34	0,86	100	100	100
-4+1	Βαρύ (+4g/cm ³)	75,6	27,56	6,39	82,87	4,09	0,42	30,07	21,75	15,98
	Ελαφρύ (-4+2.96 g/cm ³)	198,7	72,44	16,79	73,31	5,60	0,84	69,93	78,25	84,02
	Αρχικό (-2.96 g/cm ³)	274,3	100	23,18	75,94	5,18	0,72	100	100	100

Σχολιασμός πίνακα:

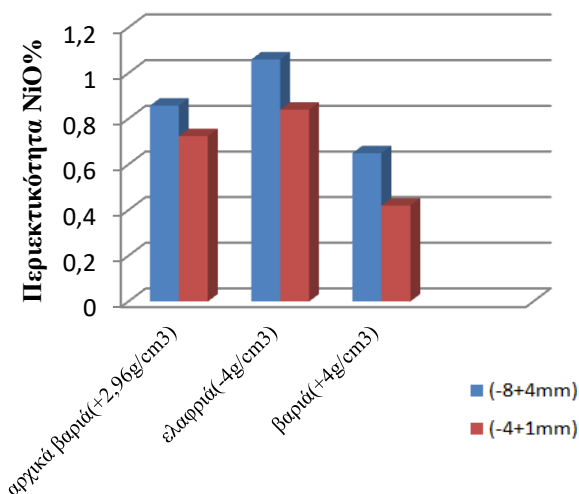
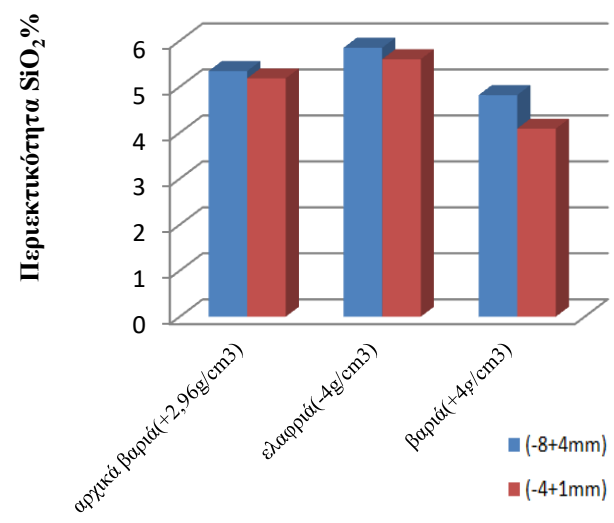
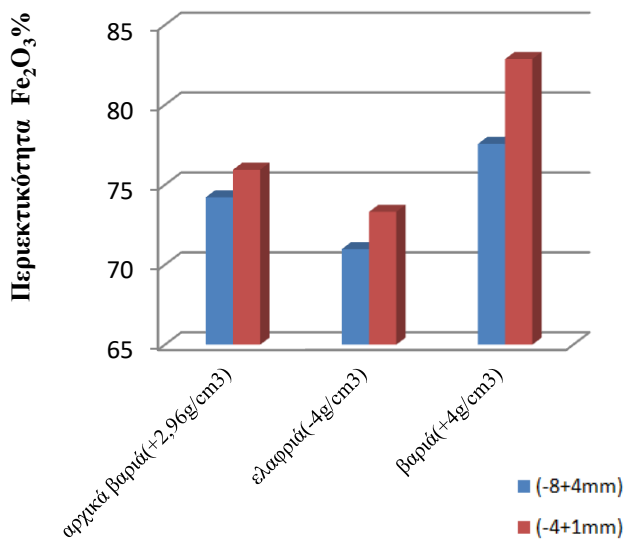
Από τον πίνακα 7.5 για τα κοκκομετρικά κλάσματα -8+4 mm και -4+1 mm, προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Στο κοκκομετρικό κλάσμα -8+4 mm η περιεκτικότητα του Fe₂O₃ στο ελαφρύ προϊόν είναι μικρότερη (70,98%) από εκείνη στο βαρύ προϊόν (77,56%). Στο κοκκομετρικό κλάσμα -4+1 mm οι περιεκτικότητες των προϊόντων είναι και πάλι μεγαλύτερες στο βαρύ 82,87% σε σχέση με το ελαφρύ 73,31%. Στο κοκκομετρικό κλάσμα -4+1 mm έχουμε τη μεγαλύτερη συγκέντρωση Fe₂O₃ στα βαριά προϊόντα (82,87%). Το Fe₂O₃ κατανέμεται στα βαριά προϊόντα στο κοκκομετρικό κλάσμα -8+4 mm. Στο κλάσμα -4+1 mm το Fe₂O₃ έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο βαρύ προϊόν, αλλά επειδή το ελαφρύ έχει αρκετά μεγαλύτερο βάρος η κατανομή του στο ελαφρύ προϊόν είναι μεγαλύτερη.

Το SiO_2 αντιθέτως έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στα ελαφριά προϊόντα σε σχέση με τα βαριά προϊόντα και η κατανομή του είναι επίσης μεγαλύτερη στο ελαφριά προϊόντα σε σχέση με τα βαριά προϊόντα.

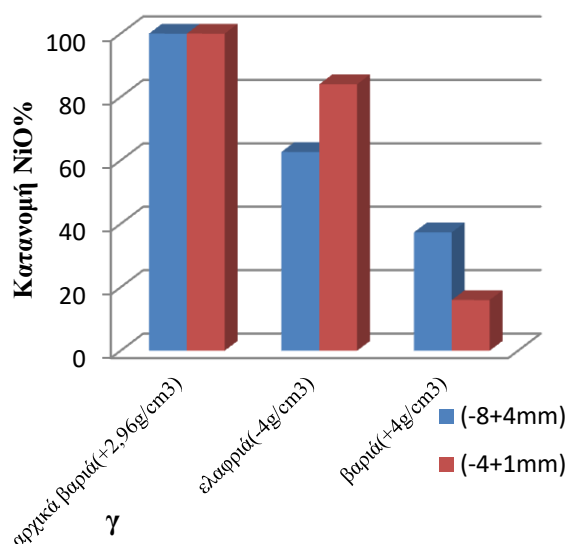
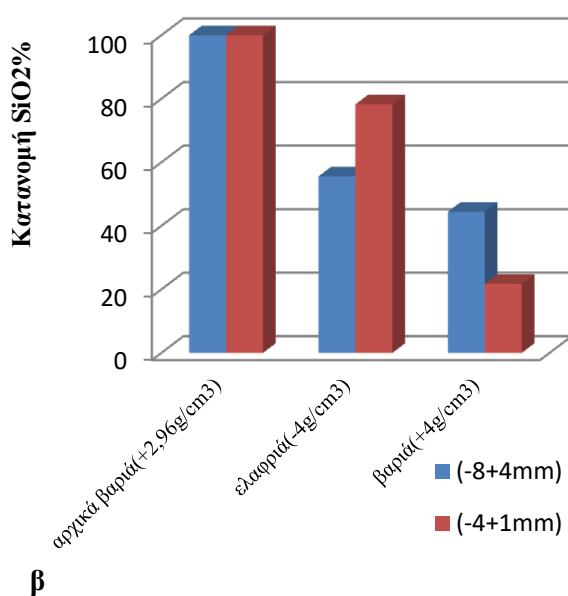
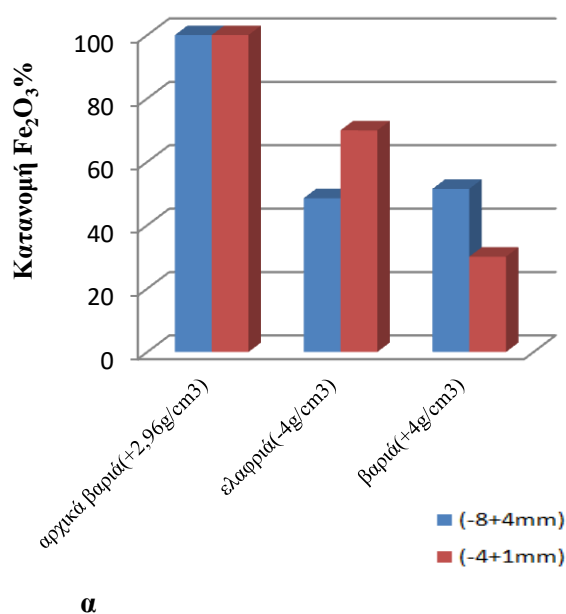
- Το NiO ακολουθεί την ίδια τάση με το SiO_2 ως προς την αύξηση της περιεκτικότητάς του με το μεγαλύτερο ποσοστό του στο κοκκομετρικό κλάσμα $-8+4 \text{ mm}$ με 1,06% στο ελαφρύ προϊόν. Στο κλάσμα $-4+1 \text{ mm}$ το NiO έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα επίσης στο ελαφρύ προϊόν. Οι κατανομές του NiO είναι μεγαλύτερες στο ελαφρύ προϊόν με μεγαλύτερη τιμή στο κοκκομετρικό κλάσμα $-4+1 \text{ mm}$ με τιμή 84,02%.

Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού με βαρέα διάμεσα αποτυπώνονται στα διαγράμματα των σχημάτων 7.9 και 7.10.



Σχήμα 7.9 α,β,γ: Περιεκτικότητες σε Fe_2O_3 (%), SiO_2 (%), NiO (%)

Από το διάγραμμα 7.9α παρατηρούμε ότι η περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 αυξάνεται στο βαρύ προϊόν (+4 g/cm³) και μάλιστα στην κοκκομετρία -4+1 mm, η περιεκτικότητά του φτάνει σε ποσοστό 82,87%. Από το διάγραμμα 7.9β φαίνεται ότι το SiO_2 εμπλουτίζεται στο ελαφρύ προϊόν (-4+2,96 g/cm³) και στα δύο κοκκομετρικά κλάσματα. Στο διάγραμμα 7.9γ παρατηρούμε ότι η περιεκτικότητα σε NiO αυξάνεται στα ελαφριά προϊόντα και στις δύο κοκκομετρίες. Στο κοκκομετρικό κλάσμα -8+4mm παρατηρούμε μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε NiO(1,06%) από το κοκκομετρικό κλάσμα -4+1mm(0,84%).



Σχήμα 7.10α,β,γ: Κατανομές σε Fe_2O_3 (%), SiO_2 (%), NiO (%).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.10α, το Fe_2O_3 κατανέμεται στα ελαφριά προϊόντα στο μικρότερο κοκκομετρικό κλάσμα ($-4+1 \text{ mm}$), ενώ στο κλάσμα $-8+4 \text{ mm}$ κατανέμεται στα βαριά προϊόντα. Αυτό συμβαίνει, επειδή το βάρος του κλάσματος $-4+1 \text{ mm}$ στα ελαφριά προϊόντα είναι πολύ μεγαλύτερο από το βάρος του ίδιου κλάσματος στα βαριά προϊόντα. Σύμφωνα με το διάγραμμα 7.10β, το SiO_2 κατανέμεται στα ελαφριά προϊόντα και στις δύο κοκκομετρίες. Σύμφωνα με το διάγραμμα 7.10γ παρατηρούμε ότι το NiO κατανέμεται στα ελαφριά προϊόντα και στα δύο κοκκομετρικά κλάσματα, όπως και το SiO_2 . Στο κοκκομετρικό κλάσμα $-4+1 \text{ mm}$ παρατηρούμε στο NiO μεγαλύτερη κατανομή από το κοκκομετρικό κλάσμα $-8+4 \text{ mm}$.

7.2.1: Μικροσκοπική εξέταση κλασμάτων βαρυτομετρικού διαχωρισμού

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μικροσκοπική εξέταση για τα κοκκομετρικά κλάσματα $-1+0,250 \text{ mm}$ και $-0,250+0,063 \text{ mm}$, που παρουσιάζουν περισσότερο ενδιαφέρον.

Κοκκομετρικό κλάσμα $-1+0,250 \text{ mm}$:

- ❖ Στην τομή PK3B (βαρύ) παρατηρείται ωοειδές αιματίτη, καθώς και ένας κατακερματισμένος κόκκος χρωμίτη (κατακλαστικός ιστός), οι οποίοι είναι μη αποδεσμευμένοι (εικ.7.1).
- ❖ Στην τομή PK3E (ελαφρύ) φαίνεται το συνδετικό υλικό του μεταλλεύματος, το οποίο είναι χλωριτικής σύστασης και περιέχει υπολείμματα κόκκων αιματίτη, οι οποίοι είναι μη αποδεσμευμένοι (εικ. 7.2).



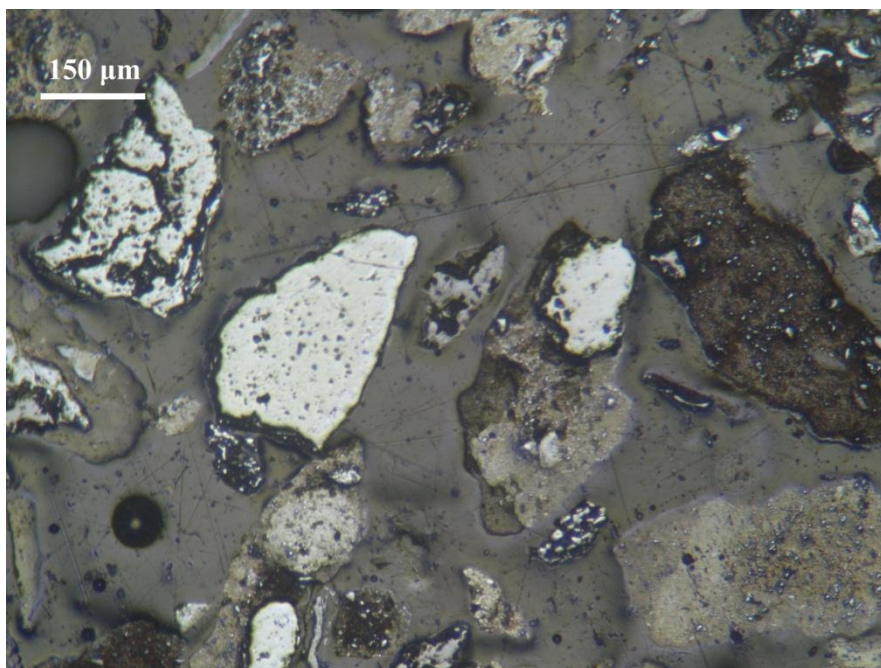
Εικόνα 7.1: Μη αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη (ωοειδές) και χρωμίτη.
Δείγμα PK3B, βαρύ (-1+0,250 mm). Ανακλώμενο φως, //Nicols.



Εικόνα 7.2: Συνδετικό υλικό με μη αποδεσμευμένους κόκκους αιματίτη.
Δείγμα PK3E, ελαφρύ (-1+0,250 mm). Ανακλώμενο φως, //Nicols.

Κοκκομετρικό κλάσμα -0,250+0,063 mm:

- ❖ Στην τομή PK4B (βαρύ) παρατηρούνται κόκκοι αιματίτη ακανόνιστου σχήματος και συνδετικού υλικού, οι οποίοι είναι μερικώς αποδεσμευμένο (εικ. 7.3).



Εικόνα 7.3: Μερικώς αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη και συνδετικού υλικού.
Δείγμα PK4B, βαρύ (-0,250+0,063 mm), Ανακλώμενο φως, //Nicols.

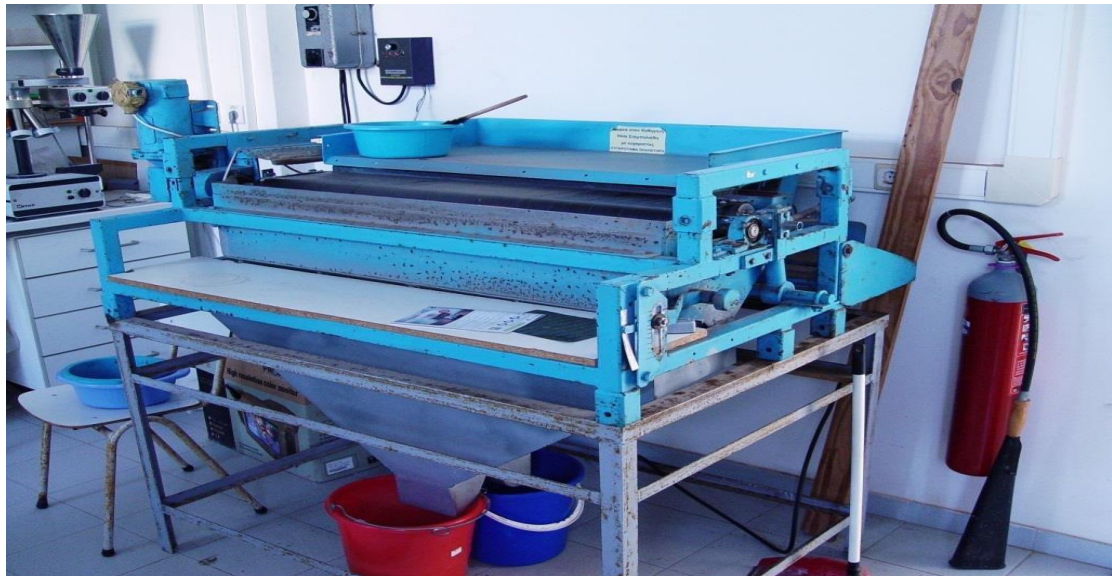
7.3: Δοκιμή εμπλουτισμού με τη μέθοδο του μαγνητικού διαχωρισμού

Όπως και κατά το βαρυτομετρικό διαχωρισμό, έτσι κι εδώ χρησιμοποιήθηκαν 4 από τα 5 κλάσματα, των οποίων η κατανομή τους φαίνεται στον πίνακα 7.6.

Πίνακας 7.6: Κατανομή του βάρους των κοκκομετρικών κλασμάτων για τις δοκιμές του μαγνητικού διαχωρισμού

Κοκκομετρικά κλάσματα d(mm)	Βάρος (%)
-8,00+4,00	49,86
-4,00+1,00	28,33
-1,00+0,250	9,98
-0,250+0,063	3,89

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί μαγνητικοί διαχωριστές, ανάλογα με την κοκκομετρία των κλασμάτων. Έτσι, για τα χονδρότερα (-8.00+4.00 mm και -4.00+1.00 mm), χρησιμοποιήθηκε ο ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής (Perm roll), ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 7.4.



Εικόνα 7.4: Ο ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής (Perm roll).

Για τα δύο μικρότερα κλάσματα ($-1+0.250$ mm) και ($-0.250+0.063$ mm) χρησιμοποιήθηκε ο ξηρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης. (High Intensity Induced Magnetic Separator Carpco MIH 111-5).



Εικόνα 7.5: Ο ξηρός μαγνητικός διαχωριστής της Carpco (High Intensity Induced Magnetic Separator Carpco MIH 111-5).

Για τα πρώτα δύο κλάσματα ($-8.00+4.00$ mm και $-4.00+1.00$ mm) ρυθμίστηκε αρχικά η λεπίδα διαχωρισμού σε τέτοια θέση, ώστε το υλικό να περνάει στο μη μαγνητικό. Η πειραματική διαδικασία ήταν η ακόλουθη: Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού

τυμπάνου ρυθμίστηκε στις 180 rpm στο πρώτο πέρασμα από το οποίο πάρθηκαν δύο προϊόντα, ένα μη μαγνητικό (μη μαγνητικό 1) και ένα μαγνητικό. Στη συνέχεια η ταχύτητα περιστροφής ρυθμίστηκε στις 220 rpm και οδηγήθηκε προς διαχωρισμό το μαγνητικό προϊόν του προηγούμενου περάσματος. Από το πέρασμα αυτό συλλέχθηκαν πάλι δύο προϊόντα, ένα μη μαγνητικό (μη μαγνητικό 2) και ένα μαγνητικό, το οποίο αποτελεί και την τροφοδοσία του τελευταίου περάσματος. Στο τελευταίο πέρασμα η ταχύτητα περιστροφής ρυθμίστηκε στις 260 rpm και από το πέρασμα αυτό πάρθηκαν και πάλι δύο προϊόντα, το μη μαγνητικό (μη μαγνητικό 3) και το μαγνητικό, το οποίο αποτελεί το τελικό μαγνητικό μας προϊόν.

Για τα άλλα δύο κλάσματα ($-1+0.250$ mm και $-0.250+0.063$ mm) η διαδικασία ήταν ακριβώς η ίδια με τα δύο μεγαλύτερα κλάσματα ($-8.00+4.00$ mm και $-4.00+1.00$ mm) με τη διαφορά ότι, λόγω του διαφορετικού μαγνητικού διαχωριστή, έπρεπε να ρυθμιστεί η ένταση του ρεύματος, η οποία ρυθμίστηκε στο μέγιστο και κυμαινόταν γύρω στα 3A. Επιπλέον η δόνηση του διαχωριστή ρυθμίστηκε στο 40% και η θέση των λεπίδων διαχωρισμού ήταν τέτοια, ώστε το υλικό να περνάει οριακά στο μη μαγνητικό. Ο τρόπος συλλογής των προϊόντων ήταν ο ίδιος ακριβώς με τα πρώτα δύο χονδρότερα κλάσματα ($-8.00+4.00$ mm και $-4.00+1.00$ mm).

Στους πίνακες 7.7 έως 7.9 φαίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής του μαγνητικού διαχωρισμού, όπως και οι περιεκτικότητες, οι κατανομές βάρους και τα αθροιστικά μη μαγνητικά και μαγνητικά.

Πίνακας 7.7: Περιεκτικότητες και κατανομές των κλασμάτων του μαγνητικού διαχωρισμού

		ΒΑΡΗ			ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΕΣ (%)								ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΚΛΑΣΜΑΤΩΝ (%)						
Κοκκομετρικά κλάσματα d(mm)	Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Βάρος επί του αρχικού (%)	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	
-8+4	Μη μαγνητικό 1 (180 gpm)	14,8	2,58	1,29	68,630	4,350	4,290	0,460	3,170	5,750	1,800	2,46	2,24	2,12	1,50	2,39	4,23	2,37	
	Μη μαγνητικό 2 (220 gpm)	48,2	8,41	4,19	76,400	2,130	5,190	0,720	2,130	3,560	1,710	8,92	3,57	8,35	7,63	5,23	8,52	7,35	
	Μη μαγνητικό 3 (260 gpm)	43,5	7,59	3,79	72,020	4,860	5,740	0,700	3,520	2,520	2,050	7,59	7,34	8,34	6,70	7,80	5,44	7,95	
	Μαγνητικό (260 gpm)	466,6	81,42	40,60	71,710	5,360	5,210	0,820	3,560	3,530	1,980	81,03	86,86	81,19	84,17	84,59	81,81	82,33	
	Σύνολο	573,1	100	49,87	72,05	5,02	5,22	0,79	3,43	3,51	1,96	100	100	100	100	100	100	100	
-4+1	Μη μαγνητικό 1 (180 gpm)	7,5	2,30	0,65	68,540	5,660	4,970	0,770	3,110	4,750	3,220	2,37	2,49	2,40	2,22	2,12	4,22	3,25	
	Μη μαγνητικό2 (220 gpm)	11,8	3,62	1,03	71,840	4,930	5,030	0,570	3,520	3,440	1,700	3,90	3,41	3,82	2,58	3,78	4,80	2,70	
	Μη μαγνητικό3 (260 gpm)	24,7	7,59	2,15	73,430	5,140	5,090	0,640	3,720	2,890	1,990	8,34	7,44	8,08	6,07	8,37	8,45	6,62	
	Μαγνητικό (260 gpm)	281,6	86,49	24,50	72,350	5,700	5,180	0,880	3,670	2,730	2,480	93,73	94,10	93,79	95,20	94,09	90,98	94,05	
	Σύνολο	325,6	100	28,33	66,76	5,24	4,80	0,80	3,37	2,60	2,28	100	100	100	100	100	100	100	
-1+0,250	Μη μαγνητικό 1 (180 gpm)	17,8	15,51	1,55	71,920	5,180	4,120	0,510	2,910	3,910	1,960	15,82	13,07	10,91	9,11	11,33	22,78	14,41	
	Μη μαγνητικό 2 (220 gpm)	10,7	9,32	0,93	69,440	6,710	5,250	0,960	3,710	3,200	1,690	9,18	10,17	8,36	10,31	8,68	11,21	7,47	
	Μη μαγνητικό 3 (260 gpm)	10,8	9,41	0,94	69,100	5,900	6,040	0,790	4,010	2,940	2,270	9,22	9,03	9,71	8,57	9,47	10,39	10,13	
	Μαγνητικό (260 gpm)	75,5	65,77	6,57	70,510	6,330	6,320	0,950	4,270	2,250	2,180	65,78	67,73	71,02	72,01	70,51	55,61	67,99	
	Σύνολο	114,8	100	9,99	70,50	6,15	5,85	0,87	3,98	2,66	2,109	100	100	100	100	100	100	100	
-0,250+0,063	Μη μαγνητικό 1 (180 gpm)	6	13,42	0,52	55,880	9,110	4,150	1,110	3,620	7,610	4,140	12,31	17,21	8,69	13,68	20,26	42,34	18,61	
	Μη μαγνητικό 2 (220 gpm)	5,6	12,53	0,49	62,120	9,590	4,510	1,330	4,020	3,360	4,850	12,77	16,91	8,81	15,30	20,99	17,45	20,35	
	Μη μαγνητικό 3 (260 gpm)	3,8	8,50	0,33	63,940	9,550	5,090	1,240	4,580	2,790	5,330	8,92	11,43	6,75	9,68	16,23	9,83	15,18	
	Μαγνητικό (260 gpm)	29,3	65,55	2,55	69,660	7,140	8,070	1,180	2,150	1,480	2,780	74,92	65,88	82,50	71,02	58,75	40,21	61,04	
	Σύνολο	44,7	100	3,89	60,94	7,10	6,41	1,09	2,40	2,41	2,99	100	100	100	100	100	100	100	
-0,063		91,03	100	7,92	55,140	11,680	2,780	1,880	6,810	2,790	4,570	100	100	100	100	100	100	100	
ΣΥΝΟΛΟ		1149,23		100															

Πίνακας 7.8: Περιεκτικότητες αθροιστικών μη μαγνητικών προϊόντων διαχωρισμού

Κοκκομετρικά κλάσματα d(mm)	Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος (%)	ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΕΣ (%)		
			Fe ₂ O ₃	SiO ₂	NiO
8+4	Μη μαγνητικό 1	2,58	68,63	4,35	0,46
	Μη μαγνητικό 2	10,99	74,57	2,65	0,66
	Μη μαγνητικό 3	18,58	73,53	3,55	0,67
-4+1	Μη μαγνητικό 1	2,30	68,54	5,66	0,77
	Μη μαγνητικό 2	5,93	70,55	5,21	0,65
	Μη μαγνητικό 3	13,51	72,17	5,17	0,64
-1+0,250	Μη μαγνητικό 1	15,51	71,92	5,18	0,51
	Μη μαγνητικό 2	24,83	70,10	5,75	0,68
	Μη μαγνητικό 3	34,23	70,47	5,79	0,71
-0,250+0,063	Μη μαγνητικό 1	13,42	55,88	9,11	1,11
	Μη μαγνητικό 2	25,95	58,89	9,34	1,21
	Μη μαγνητικό 3	34,45	60,14	9,40	1,22

Πίνακας 7.9: Περιεκτικότητες αθροιστικών μαγνητικών προϊόντων διαχωρισμού

Κοκκομετρικά κλάσματα d(mm)	Κλάσματα μαγνητικού διαχωρισμού	Βάρος (%)	ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΕΣ (%)		
			Fe ₂ O ₃	SiO ₂	NiO
-8+4	Μαγνητικό 1	97,42	72,14	5,04	0,80
	Μαγνητικό 2	89,01	71,74	5,31	0,81
	Μαγνητικό 3	81,42	71,71	5,36	0,82
-4+1	Μαγνητικό 1	97,70	66,71	5,23	0,80
	Μαγνητικό 2	94,07	66,51	5,24	0,81
	Μαγνητικό 3	86,49	65,91	5,25	0,82
-1+0,250	Μαγνητικό 1	84,49	70,23	6,32	0,93
	Μαγνητικό 2	75,17	70,33	6,28	0,93
	Μαγνητικό 3	65,77	70,51	6,33	0,95
-0,250+0,063	Μαγνητικό 1	86,58	61,73	6,79	1,08
	Μαγνητικό 2	74,05	61,66	6,32	1,04
	Μαγνητικό 3	65,55	61,37	5,90	1,02

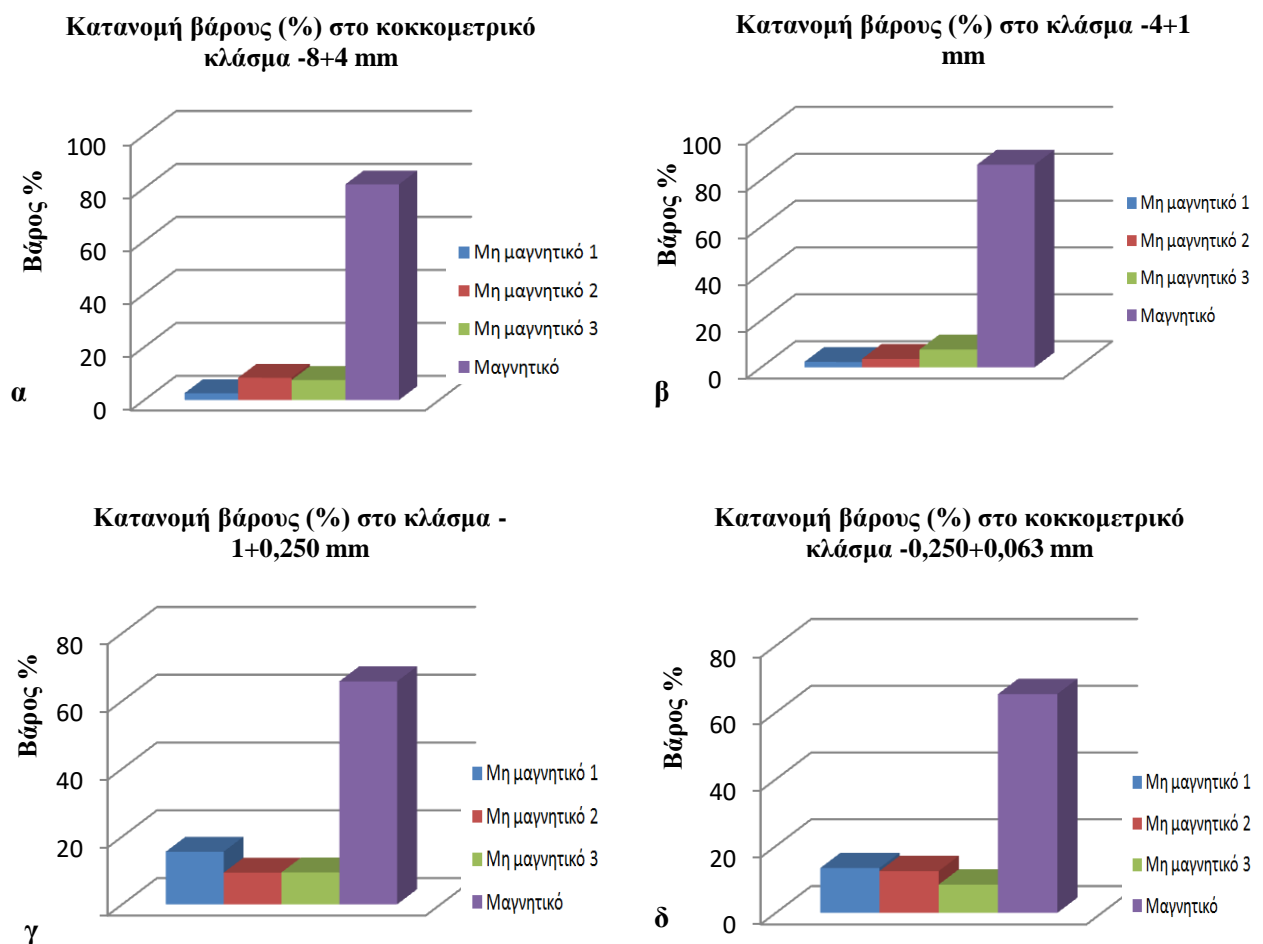
Σχολιασμός πινάκων:

Ο σχολιασμός αφορά στη συμπεριφορά των οξειδίων Fe₂O₃, SiO₂ και NiO στον πίνακα 7.7.

- Το Fe₂O₃ εμφανίζει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητά του κυρίως στα μη μαγνητικά προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού με εξαίρεση το κοκκομετρικό κλάσμα -0,250+0,063 mm, όπου η περιεκτικότητα στο μαγνητικό προϊόν είναι μεγαλύτερη (69,66%). Το NiO έχει τις μεγαλύτερες περιεκτικότητες κυρίως στα μαγνητικά προϊόντα με εξαίρεση το κοκκομετρικό κλάσμα -0,250+0,063 mm, όπου η μεγαλύτερη περιεκτικότητα εμφανίζεται στα μη μαγνητικά προϊόντα.

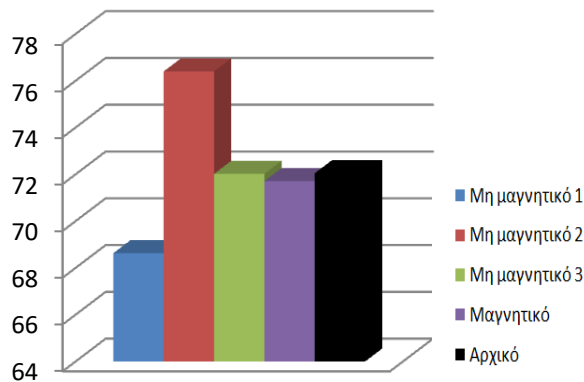
- Οι κατανομές των παραπάνω οξειδίων είναι συντριπτικά μεγαλύτερες στα μαγνητικά προϊόντα, επειδή τα βάρη των μαγνητικών προϊόντων είναι εξαιρετικά μεγαλύτερα από τα βάρη των μη μαγνητικών προϊόντων. Ως αποτέλεσμα αυτού στο κοκκομετρικό κλάσμα -4+1 mm έχουμε κατανομή 93,73% στο Fe_2O_3 , 94,10% στο SiO_2 και 95,20% στο NiO .

Από τον πίνακα 7.7 που φαίνονται η κατανομή βάρους, οι περιεκτικότητες και οι κατανομές κλασμάτων στα μαγνητικά και στα μη μαγνητικά προϊόντα προκύπτουν τα επόμενα σχήματα 7.11 έως 7.17.



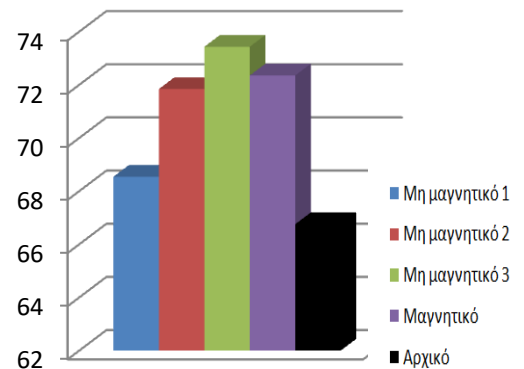
Σχήμα 7.11α,β,γ,δ: Κατανομή βάρους στα μαγνητικά και στα μη μαγνητικά προϊόντα

Περιεκτικότητα Fe_2O_3 (%) στο κλάσμα -8+4



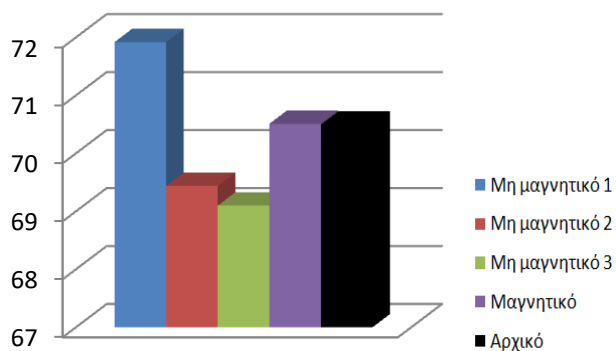
α

Περιεκτικότητα Fe_2O_3 (%) στο κλάσμα -4+1



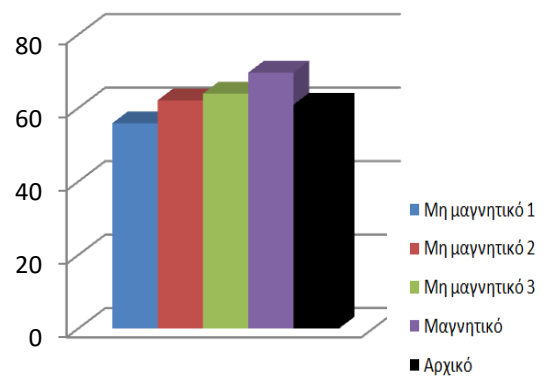
β

Περιεκτικότητα Fe_2O_3 (%) στο κλάσμα -1+0,250



γ

Περιεκτικότητα Fe_2O_3 (%) στο κλάσμα -0,250+0,063



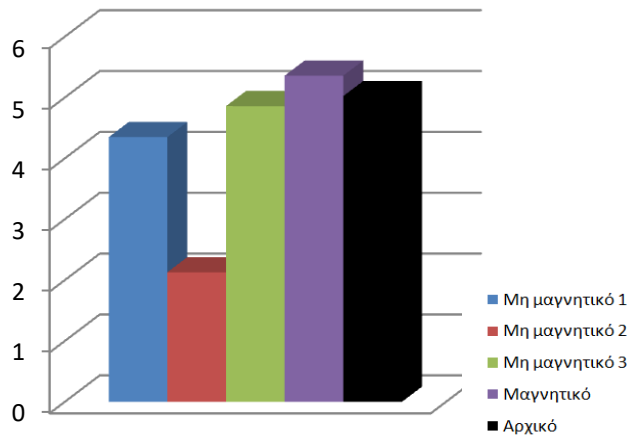
δ

Σχήματα 7.12α,β,γ,δ: Περιεκτικότητα του Fe_2O_3 (%) σε όλα τα κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού

Στο κλάσμα -8+4 mm το Fe_2O_3 εμπλουτίζεται μόνο στα μη μαγνητικά προϊόντα, ενώ στο κλάσμα -4+1 mm παρατηρούμε εμπλουτισμό και στο μαγνητικό προϊόν με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο μη μαγνητικό 3.

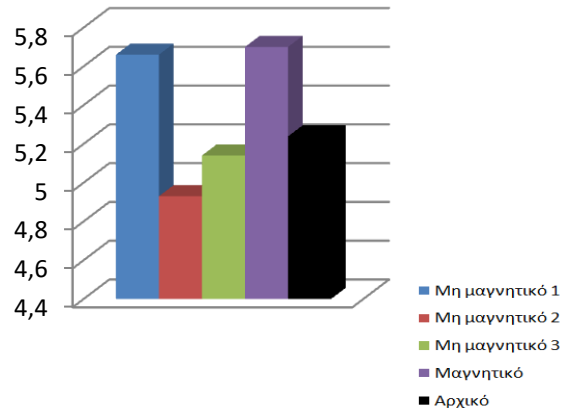
Στα διαγράμματα 7.12γ και 7.12δ η περιεκτικότητα του Fe_2O_3 είναι αξιοσημείωτη στο μαγνητικό προϊόν και στα δύο κλάσματα, ενώ στο κλάσμα -1+0,250 mm η μεγάλη περιεκτικότητα εμφανίζεται στο μη μαγνητικό 1.

Περιεκτικότητα SiO₂ % στο κλάσμα -8+4



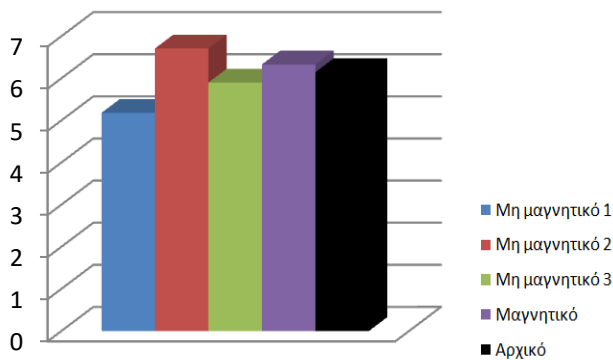
α

Περιεκτικότητα SiO₂ % στο κλάσμα -4+1



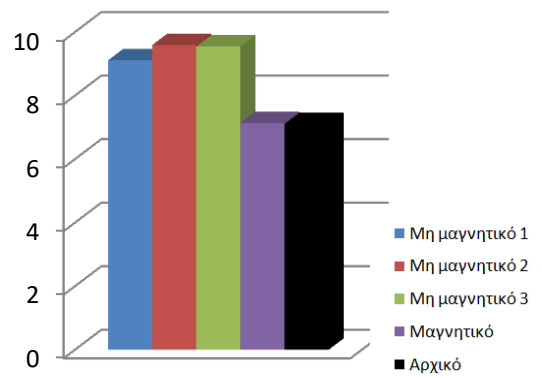
β

Περιεκτικότητα SiO₂ % στο κλάσμα -1+0,250



γ

Περιεκτικότητα SiO₂ % στο κλάσμα -0,250+0,063

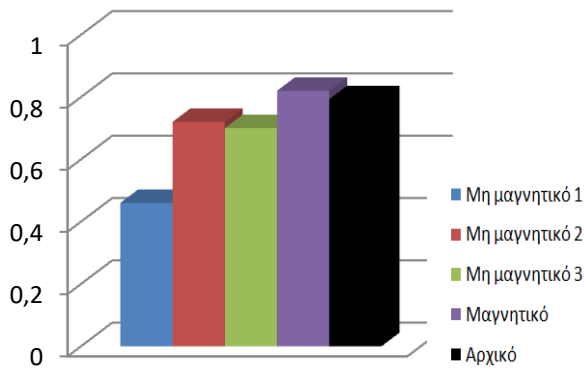


δ

Σχήματα 7.13 α,β,γ,δ: Περιεκτικότητα του SiO₂ (%) σε όλα τα κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού

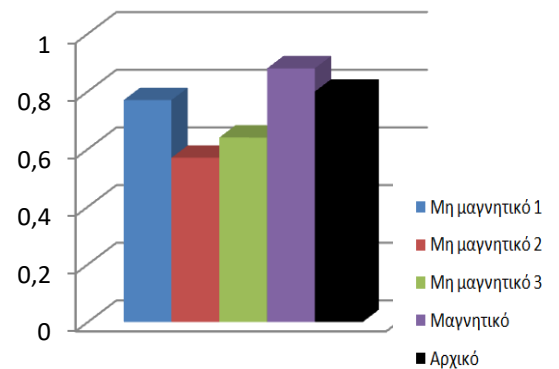
Με βάση τα διαγράμματα 7.13α και 7.13β διαπιστώνουμε ότι η περιεκτικότητα του SiO₂ είναι μεγαλύτερη στα μαγνητικά προϊόντα, απ' ό,τι στα μη μαγνητικά. Στο κλάσμα -1+0,250 mm (σχήμα 7.13γ), η αύξηση της περιεκτικότητας σε σχέση με το αρχικό μας υλικό συμβαίνει στο μη μαγνητικό 2 και στο μαγνητικό προϊόν, ενώ στο κλάσμα -0,250+0,063 mm, έχουμε αύξηση της περιεκτικότητας σε όλα τα προϊόντα, μαγνητικά και μη μαγνητικά με μεγαλύτερες περιεκτικότητες στα μη μαγνητικά προϊόντα 2 και 3.

Περιεκτικότητα NiO % στο κλάσμα -8+4



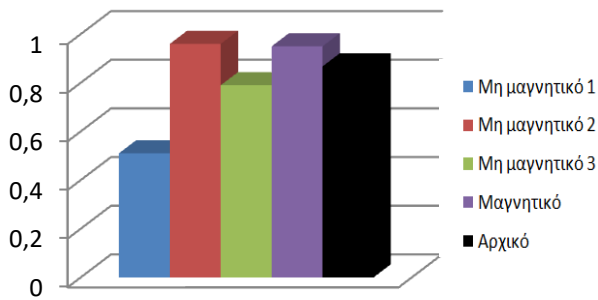
α

Περιεκτικότητα % NiO στο κλάσμα -4+1



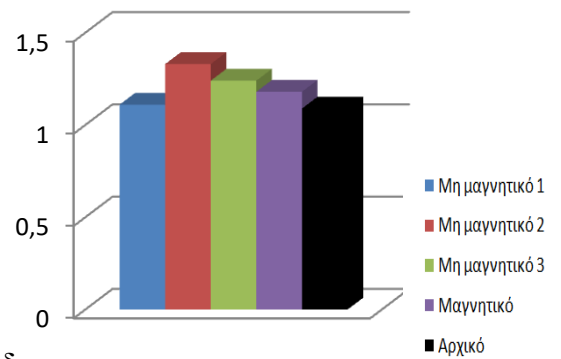
β

Περιεκτικότητα NiO % στο κλάσμα -1+0,250



γ

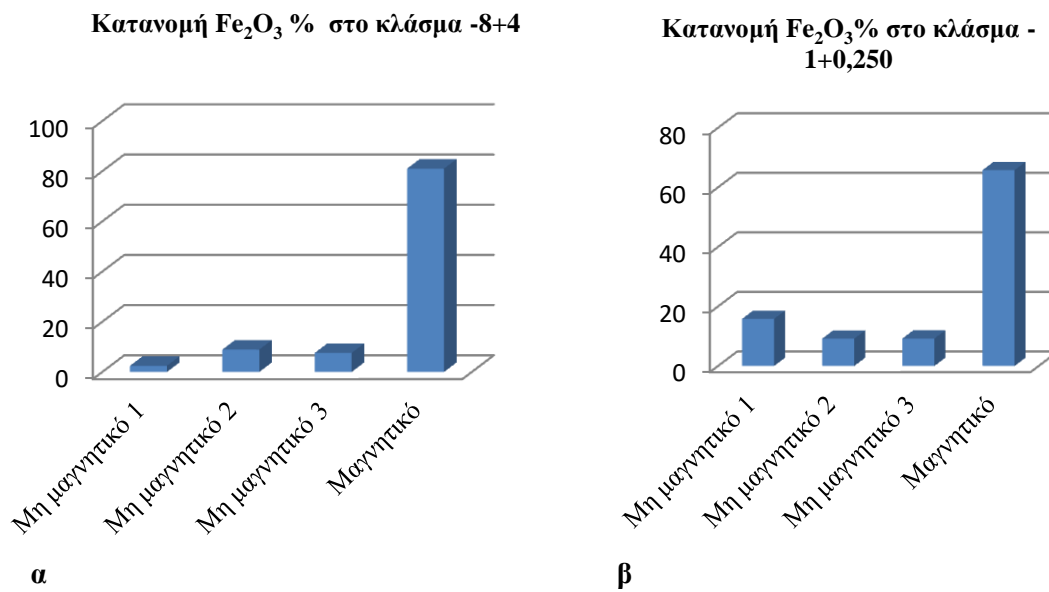
Περιεκτικότητα NiO % στο κλάσμα -0,250+0,063



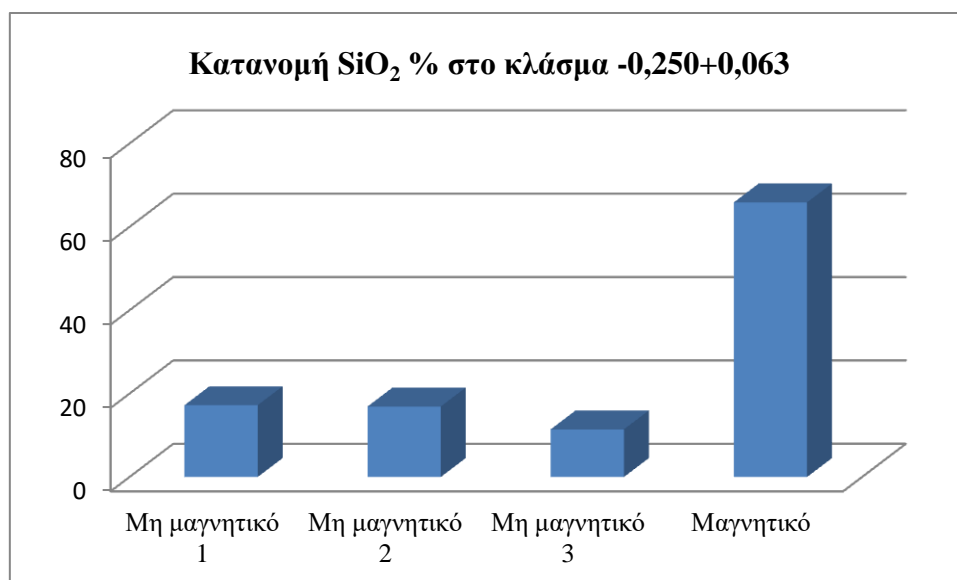
δ

Σχήματα 7.14 α,β,γ,δ: Περιεκτικότητα του NiO (%) σε όλα τα κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού

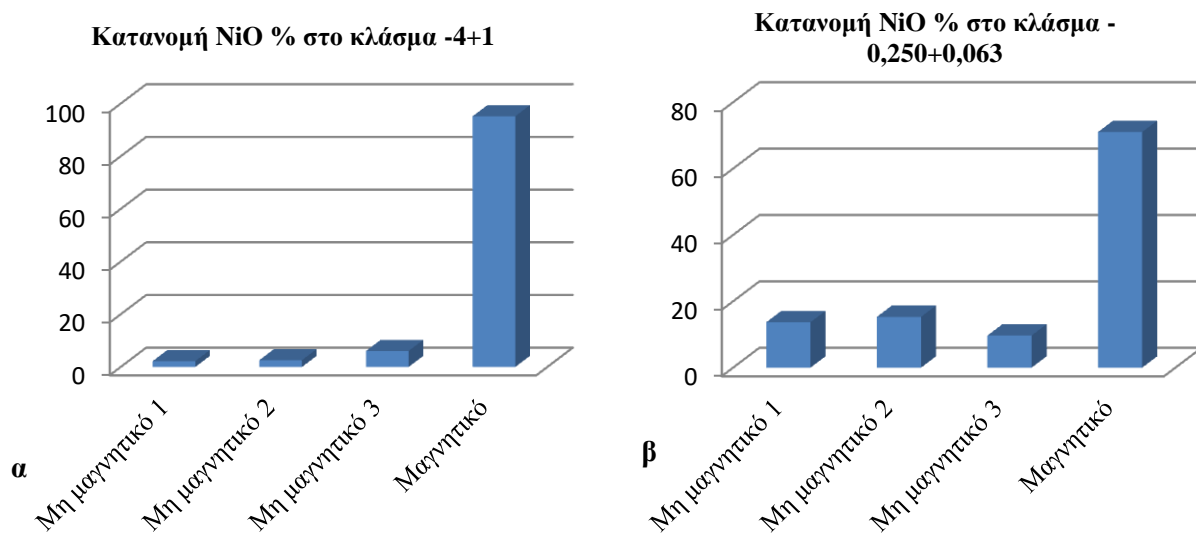
Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι έχουμε αύξηση της περιεκτικότητας του NiO στα μαγνητικά προϊόντα. Παρατηρούμε ότι η περιεκτικότητα του NiO στο κλάσμα -1+0,250 mm αυξάνεται στο μη μαγνητικό 2 καθώς επίσης και στο μαγνητικό προϊόν. Στο κλάσμα 0,250+0,063 mm είναι αξιοσημείωτη η αύξηση της περιεκτικότητάς του σε όλα τα προϊόντα, μαγνητικά κα μη μαγνητικά με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο μη μαγνητικό 2, με ποσοστό 1,33%.



Σχήμα 7.15α,β: Κατανομή Fe_2O_3 (%) στα κλάσματα -8+4 mm και -1+0,250 mm του μαγνητικού διαχωρισμού



Σχήμα 7.16: Κατανομή SiO_2 (%) στο κλάσμα -0,250+0,063 mm του μαγνητικού διαχωρισμού

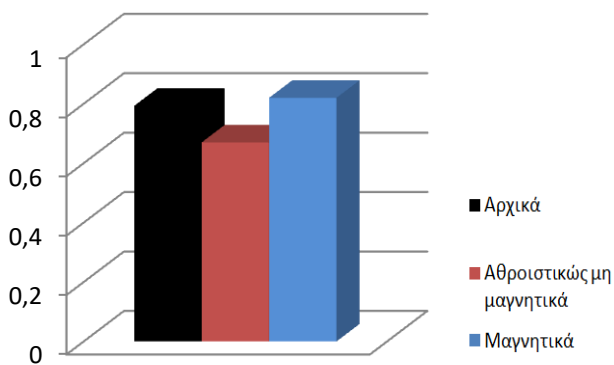


Σχήμα 7.17α,β: Κατανομή NiO (%) στα κλάσματα -4+1 mm και -0,250+0,063 mm του μαγνητικού διαχωρισμού

Σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα από το 7.15 έως το 7.17 παρατηρείται ότι η κατανομή σε όλα τα στοιχεία είναι εξαιρετικά μεγαλύτερη στα μαγνητικά προϊόντα, ενώ στα μικρότερα κλάσματα η κατανομή όλων των στοιχείων αυξάνεται στα μη μαγνητικά προϊόντα.

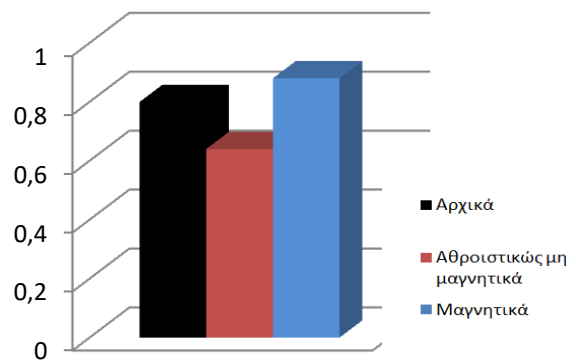
Από τους πίνακες 7.8 και 7.9, όπου όλα τα μη μαγνητικά προϊόντα παρουσιάζονται σαν ένα προϊόν (αθροιστικώς μη μαγνητικά) και τα μαγνητικά επίσης σαν ένα προϊόν, παίρνουμε τα παρακάτω διαγράμματα (σχήμα 7.18 και 7.19).

Περιεκτικότητα NiO% στο κλάσμα -8+4



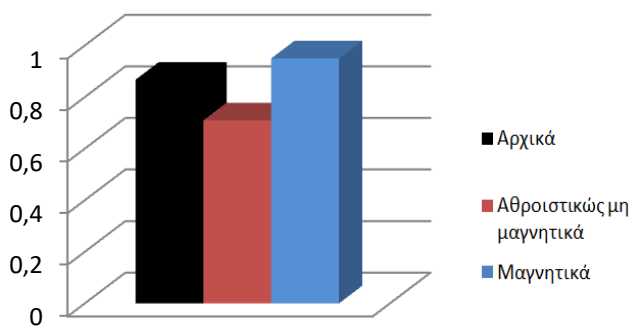
α

Περιεκτικότητα NiO% στο κλάσμα -4+1



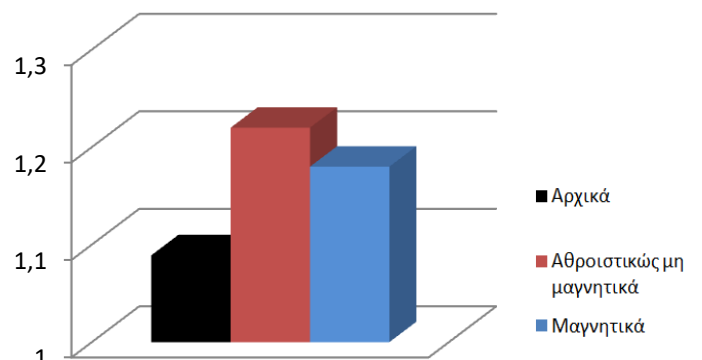
β

Περιεκτικότητα NiO% στο κλάσμα -1+0,250



γ

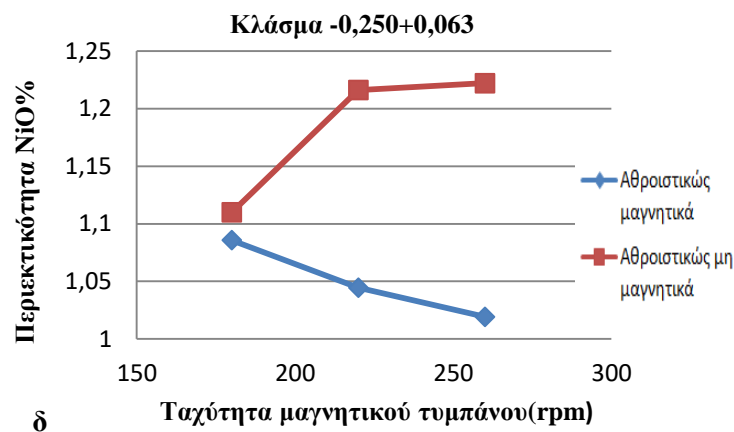
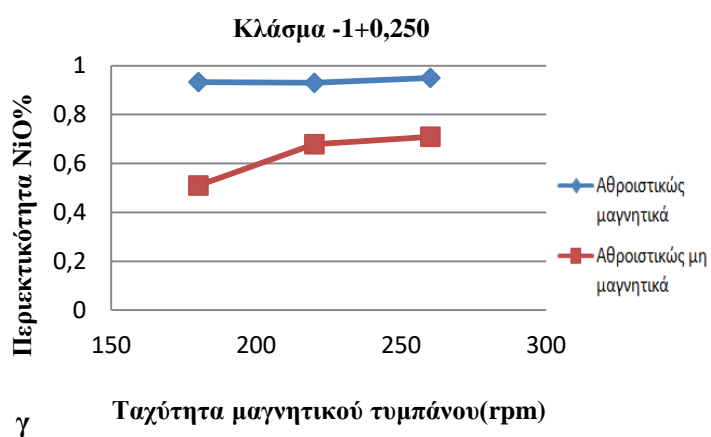
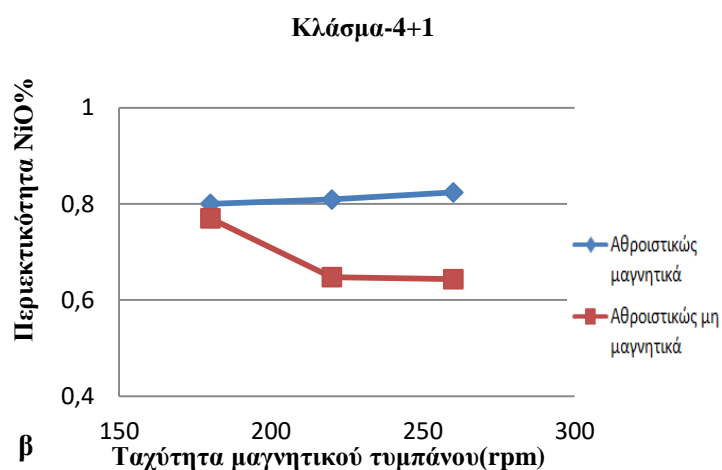
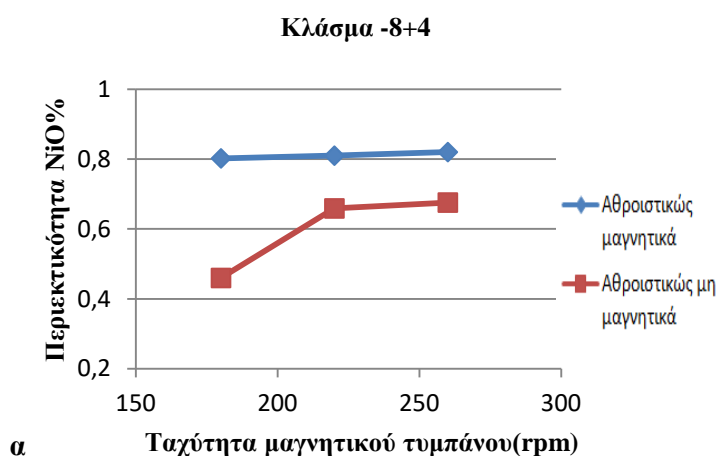
Περιεκτικότητα NiO% στο κλάσμα -0,250+0,063



δ

Σχήμα 7.18 α,β,γ,δ: Περιεκτικότητα του NiO (%) στα αθροιστικών μη μαγνητικά και στα μαγνητικά προϊόντα σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα

Από το σχήμα 7.18, παρατηρούμε ότι το NiO συγκεντρώνεται στα μαγνητικά προϊόντα σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα, εκτός από το κλάσμα -0,250+0,063 mm, όπου πηγαίνει στα μη μαγνητικά προϊόντα και παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα με ποσοστό 1,22%.



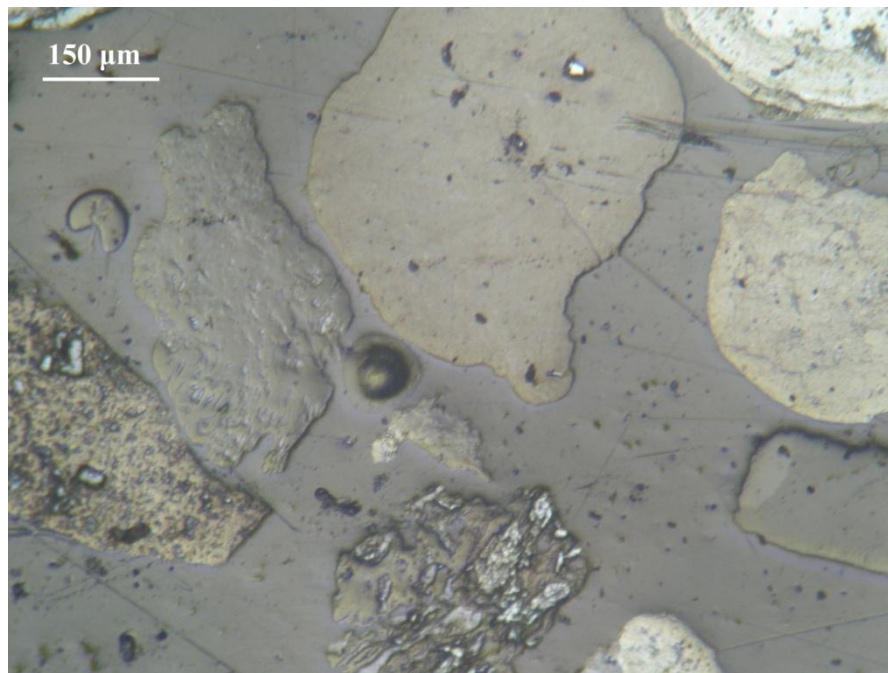
Σχήματα 7.19α,β,γ,δ: Περιεκτικότητα του NiO (%) στα αθροιστικώς μη μαγνητικά και αθροιστικώς μαγνητικά σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι σε όλα τα κλάσματα εκτός του -4+1 mm η περιεκτικότητα NiO αυξάνεται όσο αυξάνουμε τις στροφές. Επιπλέον παρατηρούμε ότι σε όλα τα κλάσματα πλην του -0,250+0,063 mm, όσο αυξάνουμε τις στροφές αυξάνει η περιεκτικότητά του στα μαγνητικά προϊόντα και η περιεκτικότητα αυτή είναι σταθερά μεγαλύτερη από αυτή των μη μαγνητικών προϊόντων. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το NiO συγκεντρώνεται στα μαγνητικά προϊόντα και όσο αυξάνουμε την ταχύτητα του μαγνητικού τυμπάνου, αυξάνεται η περιεκτικότητα του NiO.

7.3.1: Μικροσκοπική εξέταση κλασμάτων μαγνητικού διαχωρισμού

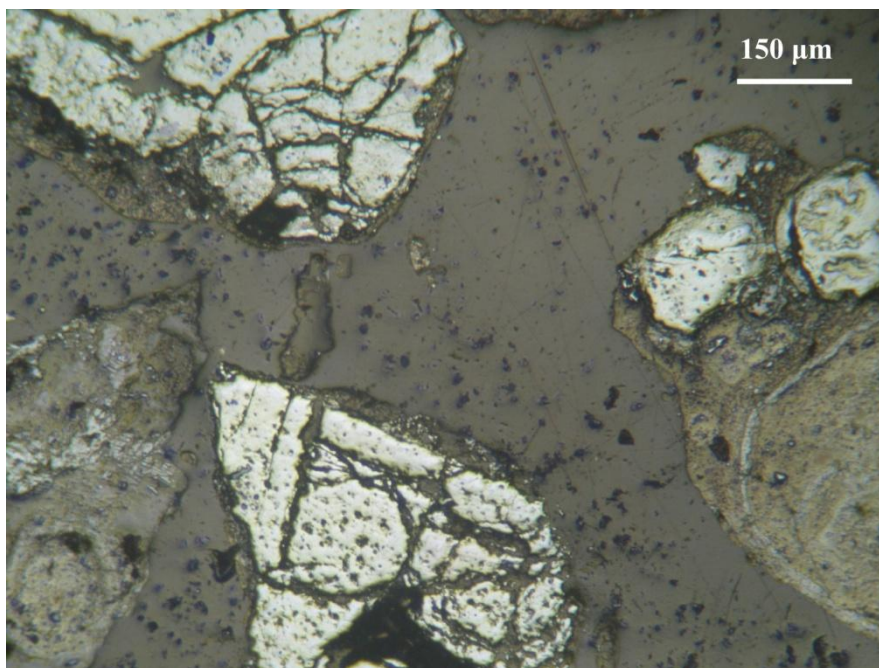
Κοκκομετρικό κλάσμα $-1+0,250$ mm:

- ❖ Στην τομή PK3MM1 φαίνονται τα στείρα του μαγνητικού διαχωρισμού. Κυριαρχεί το συνδετικό υλικό, μερικώς αποδεσμευμένοι, το οποίο είναι χλωριτικής σύστασης και περιέχει υπολείμματα κόκκων αιματίτη (εικ. 7.6)
- ❖ Στην τομή PK3M είναι ευδιάκριτοι μεγάλοι κόκκοι αιματίτη, οι οποίοι είναι κατακερματισμένοι, αλλά και πελοειδή από αιματίτη συνδεδεμένοι με υλικό χλωριτική σύστασης, μερικώς αποδεσμευμένοι, (εικ.7.7).



Εικόνα 7.6: Κόκκοι συνδετικού υλικού μερικώς αποδεσμευμένοι με υπολείμματα κόκκων αιματίτη.

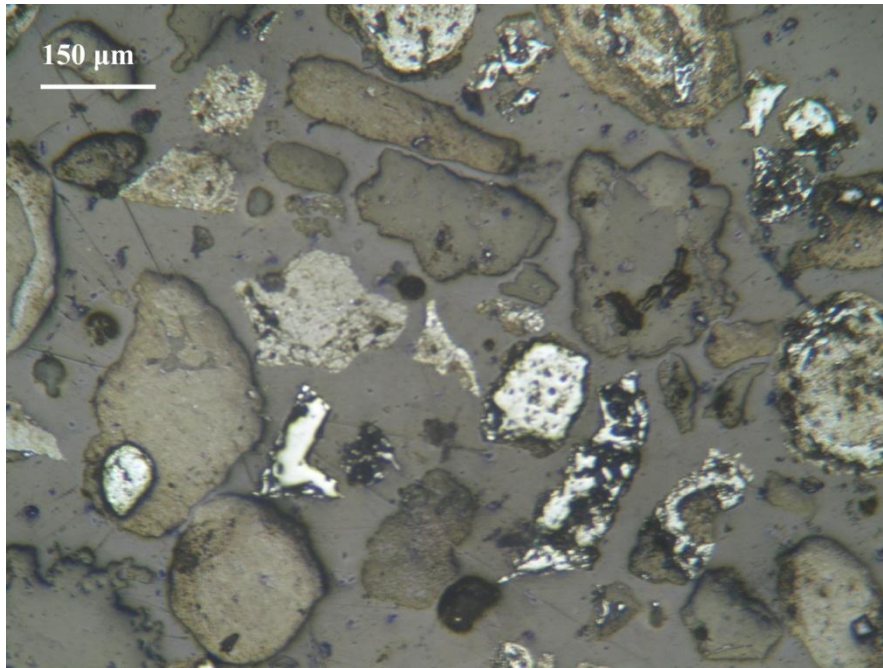
Δείγμα PK3MM1, μη μαγνητικό 1 ($-1+0,250$ mm). Ανακλώμενο φως, // Nicols



Εικόνα 7.7: Κόκκοι αιματίτη μερικώς αποδεσμευμένοι από το συνθετικό υλικό.
Δείγμα PK3M, μαγνητικό (-1+0,250 mm). Ανακλώμενο φως, // Nicols

Κοκκομετρικό κλάσμα -0,250+0,063 mm:

- ❖ Στην τομή PK4MM1 παρατηρούνται τα στείρα από το διαχωρισμό. Ιδιαίτερα ευδιάκριτο είναι το συνδετικό υλικό, με μη αποδεσμευμένους κόκκους αιματίτη, (εικ. 7.8).
- ❖ Στην τομή PK4M απαντώνται αποστρογγυλεμένοι κόκκοι αιματίτη (πελοειδή), αλλά και άλλοι ακανόνιστου σχήματος, πλήρως αποδεσμευμένοι, (εικ. 7.9).



Εικόνα 7.8: Κόκκοι συνδετικού υλικού μερικώς με μη αποδεσμευμένους κόκκους αιματίτη.
 Δείγμα PK4MM1, μη μαγνητικό 1 ($-0,250+0,063$ mm), Ανακλώμενο φως, // Nicols.



Εικόνα 7.9: Πλήρως αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη.
 Δείγμα PK4M, μαγνητικό ($-0,250+0,063$ mm), Ανακλώμενο φως, // Nicols

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Τελικά συμπεράσματα

8.1: Συμπεράσματα ορυκτολογικής εξέτασης

Το σιδηρονικελιούχο μέταλλευμα του κοιτάσματος του Hudenisht της περιοχής Pogradec (Αλβανία) αναπτύσσεται υπό μορφή στρωμάτων επάνω σε εξαλλοιωμένο οφιολίθο. Στο ανώτερο τμήμα του εξαλλοιωμένου οφιολίθου απαντάται ένας ορίζοντας αργιλικού Fe-Ni-μεταλλεύματος. Στη συνέχεια ακολουθούν ορίζοντες πισσολιθικού Fe-Ni-μεταλλεύματος, οι οποίοι στο ενδιάμεσο τμήμα της τομής εναλλάσσονται με στρώμα συμπαγούς Fe-Ni-μεταλλεύματος. Των οριζόντων αυτών υπέρκειται μια μεταβατική ζώνη, η οποία καλύπτεται από ασβεστόλιθους του Ανώτερου Κρητιδικού.

Τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του μεταλλεύματος είναι αιματίτης, γκαιτίτης, χρωμίτης και δευτερευόντως, χλωρίτης (κλινόχλωρο, νιμίτης), λιζαρδίτης, ασβεστίτης και σπινέλλιος.

Ο αιματίτης απαντάται κυρίως με μορφή πισσοειδών, ωοειδών, πελοειδών και σύνθετων σφαιροειδών και δευτερευόντως σαν προϊόν αφυδάτωσης προϋπάρχοντος γκαιτιτικού υλικού. Ο γκαιτίτης αντικαθιστά το συνδετικό υλικό μεταξύ των κόκκων του μεταλλεύματος με μορφή σιδηρούχου μεταλλοφορίας επιγενετικής προέλευσης. Ο χρωμίτης απαντάται με μορφή κλαστικών κόκκων στο συνδετικό υλικό του μεταλλεύματος ή σαν έγκλεισμα στα σύνθετα σφαιροειδή. Το νικέλιο περιέχεται στο νικελιούχο χλωρίτη (νιμίτη), ο οποίος αποτελεί μέρος του συνδετικού υλικού του μεταλλεύματος.

8.2: Συμπεράσματα γεωχημικής εξέτασης

Σύμφωνα με τη γεωχημική εξέταση του μεταλλεύματος κατά μήκος της τομής καταγράφηκε η αντιστοιχία των διαφόρων στοιχείων.

Τα στοιχεία Fe_2O_3 , CoO , K_2O και μερικώς το Cr_2O_3 και το Al_2O_3 δείχνουν μια αντίστοιχη κατανομή κατά μήκος της τομής. Αντιστοιχία στην κατανομή παρουσιάζουν επίσης τα στοιχεία MgO , SiO_2 , NiO και σε μικρότερο βαθμό εμφανίζει το MnO .

Το CaO παρουσιάζει αναντιστοιχία στην κατανομή με τα υπόλοιπα στοιχεία κατά μήκος της τομής.

Βάσει των αποτελεσμάτων της γεωχημικής εξέτασης παρατηρείται θετική συσχέτιση των MnO , MgO , NiO με το SiO_2 , με πολύ υψηλή συσχέτιση εκείνη του MgO με το SiO_2 (0,98), ενώ ισχυρή είναι επίσης του NiO με το SiO_2 (0,89) και του MnO με το SiO_2 (0,86).

Το NiO παρουσιάζει μέγιστη συγκέντρωση στα στρώματα του εξαλλοιωμένου οφιολίθου με συγκέντρωση 2,81%, ενώ σε όλα τα υπόλοιπα στρώματα παρουσιάζει αξιόλογες συγκεντρώσεις, εκτός από τη μεταβατική ζώνη.

8.3: Συμπεράσματα μεθόδων εμπλουτισμού

8.3.1: Βαρυτομετρικός διαχωρισμός με τη μέθοδο βαρέων υγρών

Από τα αποτελέσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού με τη μέθοδο των βαρέων υγρών συμπεραίνουμε ότι το NiO εμπλουτίζεται σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα στο ελαφρύ προϊόν τους εκτός από το κλάσμα -8+4 mm, όπου εμπλουτίζεται στο βαρύ προϊόν, επειδή δεν έχει γίνει επιτευχθεί ακόμη καλή αποδέσμευση. Αξιοσημείωτα αποτελέσματα καταγράφονται στα κλάσματα -1+0,250 mm με περιεκτικότητα σε NiO στο ελαφρύ προϊόν 2,27%, όπως και στο κλάσμα -0,250+0,063 mm με περιεκτικότητα 2,3% αντίστοιχα.

Επειδή το βάρος των βαριών προϊόντων των κοκκομετρικών κλασμάτων ήταν κατά πολύ μεγαλύτερο από εκείνο των ελαφριών προϊόντων, η κατανομή στα βαριά προϊόντα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από εκείνη στα ελαφριά προϊόντα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό μας είναι εξαιρετικά σιδηρούχο και ο σίδηρος συγκεντρώνεται στα βαριά ορυκτά, όπως ο αιματίτης, ο γκαιτίτης και ο χρωμίτης.

8.3.2: Βαρυτομετρικός διαχωρισμός με τη μέθοδο βαρέων διαμέσων

Σύμφωνα με το βαρυτομετρικό διαχωρισμό που πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των βαρέων διαμέσων στα δύο μεγαλύτερα κοκκομετρικά κλάσματα -8+4 mm και -4+1 mm επετεύχθη εμπλουτισμός στο ελαφρύ προϊόν με περιεκτικότητα 1,06% στο κλάσμα -8+4 mm καθώς επίσης στο ελαφρύ προϊόν του κλάσματος -4+1 mm με περιεκτικότητα 0,84%.

Στα δύο αυτά ελαφριά προϊόντα η κατανομή του NiO ήταν ικανοποιητική με ποσοστά 62,69% στο κλάσμα -8+4 mm και 84,02% στο κλάσμα -4+1 mm.

8.3.3: Μαγνητικός διαχωρισμός

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού το NiO εμπλουτίζεται κατά πλειοψηφία στα μαγνητικά προϊόντα, εκτός από το κοκκομετρικό κλάσμα -0,250+0,063 mm. Η περιεκτικότητά του είναι ικανοποιητική με ποσοστά 0,82%, 0,88% και 0,95% στα κλάσματα -8+4 mm, -4+1 mm, -1+0,250 mm αντιστοίχως. Ο μεγαλύτερος εμπλουτισμός του στο κομμάτι της περιεκτικότητας, επετεύχθη στο κλάσμα -0,250+0,063 mm με περιεκτικότητα 1,33% στο προϊόν μη μαγνητικό 2.

Όσον αφορά τις κατανομές, σε όλα τα κλάσματα τα μαγνητικά προϊόντα έχουν συντριπτικά μεγαλύτερες κατανομές από τα μη μαγνητικά προϊόντα. Εκείνο, που παρατηρούμε είναι ότι όσο η κοκκομετρία μικραίνει οι κατανομές στα μη μαγνητικά προϊόντα μεγαλώνουν σε σχέση με τα μεγαλύτερα κοκκομετρικά κλάσματα. Οι μεγαλύτερες κατανομές είναι στο κλάσμα -8+4 mm με κατανομή 84,17% στο μαγνητικό προϊόν και στο κλάσμα -4+1 mm με κατανομή 95,20%. Οπότε στα μαγνητικά προϊόντα των κοκκομετρικών κλασμάτων -8+4 mm, -4+1 mm, -1+0,250 mm έχουμε υψηλή περιεκτικότητα και κατανομή σε NiO.

Το νικέλιο εμφανίζει μεγάλη περιεκτικότητα στα μαγνητικά προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού στις δύο μεγάλες κοκκομετρίες (-8+4 mm και -4+1 mm), επειδή το συνδετικό υλικό του μεταλλεύματος, το οποίο είναι χλωριτικής σύστασης έχει υποστεί μεταλλοποίηση μέσω δευτερογενούς αντικατάστασης από σιδηρούχα διαλύματα. Επιπλέον, όσο μικραίνει η κοκκομετρία, η αποδέσμευση γίνεται καλύτερη, οπότε και το νικέλιο εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στα μη μαγνητικά προϊόντα με μέγιστη τιμή εκείνη στο κοκκομετρικό κλάσμα -0,250+0,063 mm (1.33%) στο μη μαγνητικό 2.

Το πυρίτιο παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με το νικέλιο, επειδή υπάρχει στο χλωρίτη, ο οποίος αποτελεί μέρος του συνδετικού υλικού του μεταλλεύματος. Στο κλάσμα -0,250+0,063 mm εμφανίζει μέγιστη περιεκτικότητα στο μη μαγνητικό 2 (9,59%).

Ο σίδηρος στα κοκκομετρικά κλάσματα -8+4 mm, -4+1 mm, -1+0,250 mm έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στα μη μαγνητικά προϊόντα, ενώ στο κλάσμα -0,250+0,063 mm εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στα μαγνητικά προϊόντα, όπως θα έπρεπε εξ αρχής να συμβαίνει, εξαιτίας της καλύτερης αποδέσμευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. Αλεβίζος, Γ. (1997). Ορυκτολογία, γεωχημεία και γένεση ιζηματογενών νικελιούχων σιδηρομεταλλευμάτων Λοκρίδας (Κεντρική Ελλάδα). Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. Αλεβίζος, Γ. (2005). Μικροσκοπία ορυκτών πρώτων υλών και τεχνητών προϊόντων, τόμος Β. Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. Αλεβίζος, Γ., Αποστολίκας, Α., Ρεπούσκου, Ε. (2011). Ορυκτολογική-πετρογραφική και γεωχημική εξέταση του νικελιούχου λατεριτικού κοιτάσματος του Nome (Β.Α. Αλβανία), Ορυκτός Πλούτος/Mineral Wealth τόμος 161,σελ.7-21.
4. Αποστολίκας, Α. (2009). Κοιτασματολογία νικελίου. Εκδόσεις Εφύρα.
5. Καλλές, Ν. (1993). Η Ελληνική Βιομηχανία νικελίου: Παρόν και Προοπτικές. Πρακτικά Ημερίδας - Η Ελληνική Μεταλλευτική Βιομηχανία: Παρόν και Προοπτικές, Ελλ. Γεωλ. Εταιρία, σ. 29-38.
6. Κελεπερτζής, Α. (2010). Εφαρμοσμένη Γεωχημεία. Μακεδονικές εκδόσεις.
7. Κομνίτσας, Κ. (2005). Μεταλλουργικές διεργασίες. Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
8. Κωστάκης Γ. (2005): Γενική Ορυκτολογία. Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
9. Παπαμαντέλλος, Δ. (1989). Το παρόν και το μέλλον της νέας ΛΑΡΚΟ. Ενημ. Δελτίο ΤΕΕ, Τεύχος 1584, σ.23-26.
10. Σταθογιάννη, Φ. (2007). Ορυκτολογική εξέταση και δοκιμές εμπλουτισμού του σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος της περιοχής Κομνηνών Βερμίου. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
11. Σταμπολιάδης, Η. (2001). Εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων. Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
12. Τζουβελάκης, Κ.Ε. (1981). Κατεργασία των νικελούχων λατεριτών και η θέση του νικελίου στη παγκόσμια αγορά. Τεχνικά Χρονικά, τόμος Ιανουαρίου- Φεβρουαρίου, σελ. 171-185.

ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ

1. Alevizos G., Repouskou G. (2011). Ore Microscopy and Microanalysis of the Nickeliferous Iron Ores from Komnina Vermion Area (N.W. Greece). Geomaterials 1, 46-50.
2. Annersten, H., Ericsson, T., Filippidis, A. (1982). Cation ordering in Ni-Fe olivines. American Mineralogist, 67(11/12), 1212-1217.

3. Augustithis, S. (1962). Mineralogical and Geochemical Changes in the Diagenetic and Post-Diagenetic Phases of the Ni-Cr-Iron Oolitic Deposit of Larymna/Locris, Greece, *Chem. Erde*, 22, pp. 5-17.
4. Brand, N.W., Butt, C.R.M., Elias, M. (1998). Nickel laterites: Classification and features. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(4), 81-88.
5. Elias, M., (2002). Nickel laterite deposits - geological overview, resources and exploitation. In: Cooke, C.R., Pontgratz, J. (Eds.), *Giant Ore Deposits: characteristics, genesis and exploitation: Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, Special Publication 4*, pp. 205–220.
6. Elias, M., Donaldson, M.J., Giorgetta, N. (1981). Geology, mineralogy and chemistry of lateritic Nickel-Cobalt deposits near Kalgoorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 76, 1775-1783.
7. Fillipidis, A. (1997a). Chemical variation of chromite in the Gorgona olivine-orthopyroxenite, Thrace, Greece. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie Monatshefte*, 3, 113-130.
8. Fillipidis, A. (1997b). Chemical variation of chromite in the central sector of Xerolivado chrome mines of Vourinos, Western Macedonia, Greece. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie Monatshefte*, 8, 354-370.
9. Friedrich, G., Brunemann, H.G. & Wilcke, J. (1980). Chrome-spinels in lateritic soils and ultramafic source rocks, Acoje Mine, Zambales Philippines. UNESCO, IGCP No.169, Inter. Symp. Metallog. Maf. and Ultramaf. Compl., Nation. Techn. Univ. Athens, Vol.1, pp. 257-278.
10. Gleeson, S.A., Butt, C.R.M., Elias, M. (2003). Nickel laterites: A Review. *Newsletter, Society of economic geologists*, 54, 11-18.
11. Golightly, J.P. (1981). Nickeliferous Laterite Deposits. *Economic Geology* 75th Anniv. Volume, 710-735.
12. Harju, H.O. (1979). Exploration of Exmibal's nickel laterite deposits in Guatemala. *Internat. Laterite Symposium, New Orleans 1979, Soc. Mining Engineers AIME*, 245-251.
13. Katzagiannakis, N., Alevizos, G., Stamboliadis, E., Stratakis, A., Petrakis E. (2014). Mineralogical Investigation and Washability Treatment of the Nickeliferous Lateritic Deposit of Nome (Albania). *Geomaterials*, 4, pp. 105-115.
14. Kuck P. (2005). Nickel. *U.S. Geological Survey, 2006 Minerals Yearbook*.
15. Nahon D. (1991). Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. John Wiley & Sons, New York p. 313. In: Αποστολίκας, Α. (2009). *Κοιτασματολογία νικελίου*. Εκδόσεις Εφύρα.
16. Nord, A.G., Annerasten, H., Fillippidhs, A. (1982). The cation distribution in synthetic Mg-Fe-Ni olivines. *American Mineralogist*, 67(11/12), 1206-1211.
17. Schellmann, W. (1982). Eine neue Lateritdefinition. *Geol. Jahrb., Reihe, D38*, pp. 31–47. In: Αποστολίκας, Α. (2009). *Κοιτασματολογία νικελίου*. Εκδόσεις Εφύρα.
18. Skarpelis, N., Laskou, M., Alevisos, G. (1993). Mineralogy and Geochemistry of the Nickeliferous Lateritic Iron-ores of Kastoria, N.W. Greece. *Chem. Erde* 53, pp.331-339.

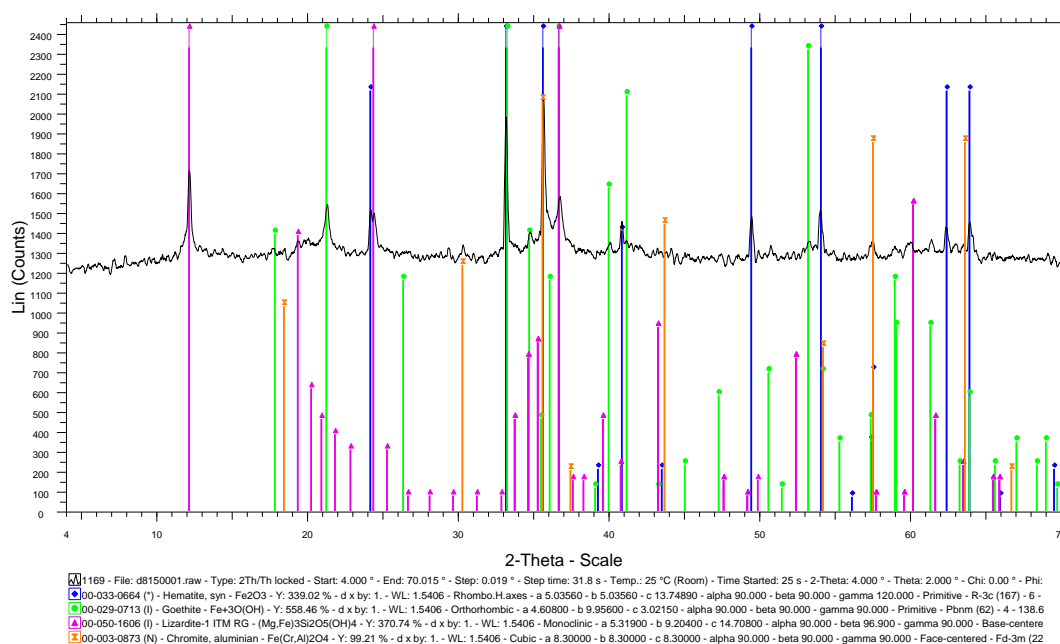
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. <http://www.larco.gr> (20/8/2016)

2. <http://www.lenntech.com> (30/10/2016)
3. <http://www.lme.com> (London Metal Exchange, 10/10/2016)
4. <http://www.metalpedia.com> (8/10/2016)
5. <http://www.goldendragoncapital.com> (7/9/2016)
6. <http://www.TheStainlessSteelInformationCenter.com> (23/10/2016)
7. <http://www.insg.org> (International Nickel Study Group, 30/10/2016)
8. <http://www.orykta.gr> (25/7/2016)
9. <http://www.ntua.gr> (15/8/2016)

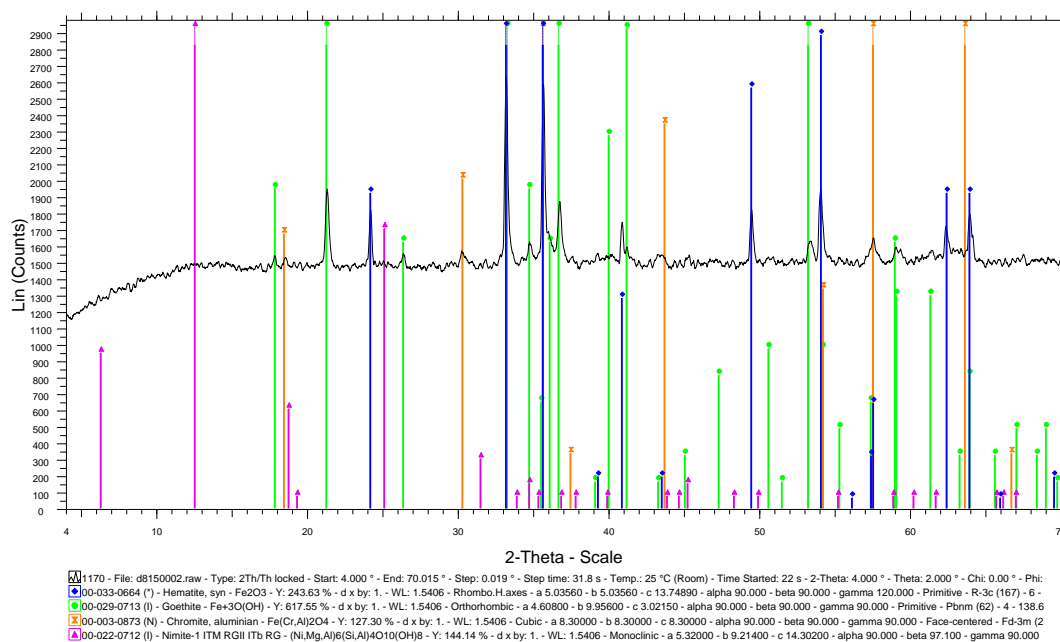
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

P1



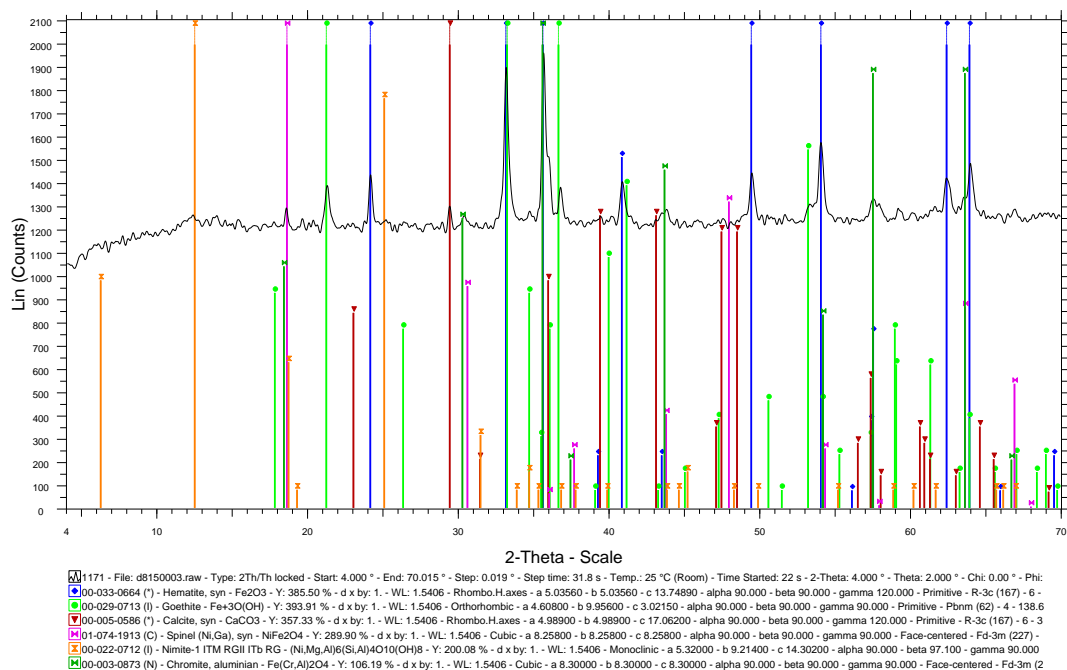
Εικόνα 1: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P1) από το στρώμα του εξαλλοιωμένου οφιολίθου (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Χρωμίτης)

P2



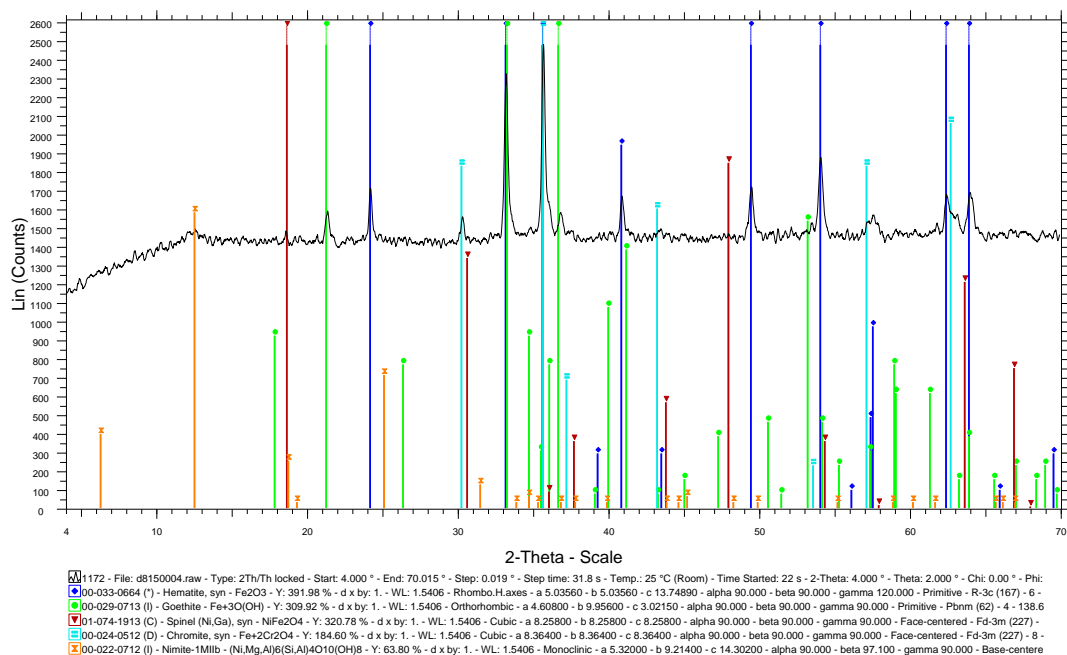
Εικόνα 2: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P2) από το αργλικό στρώμα Fe-Ni (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Νιμίτης)

P3



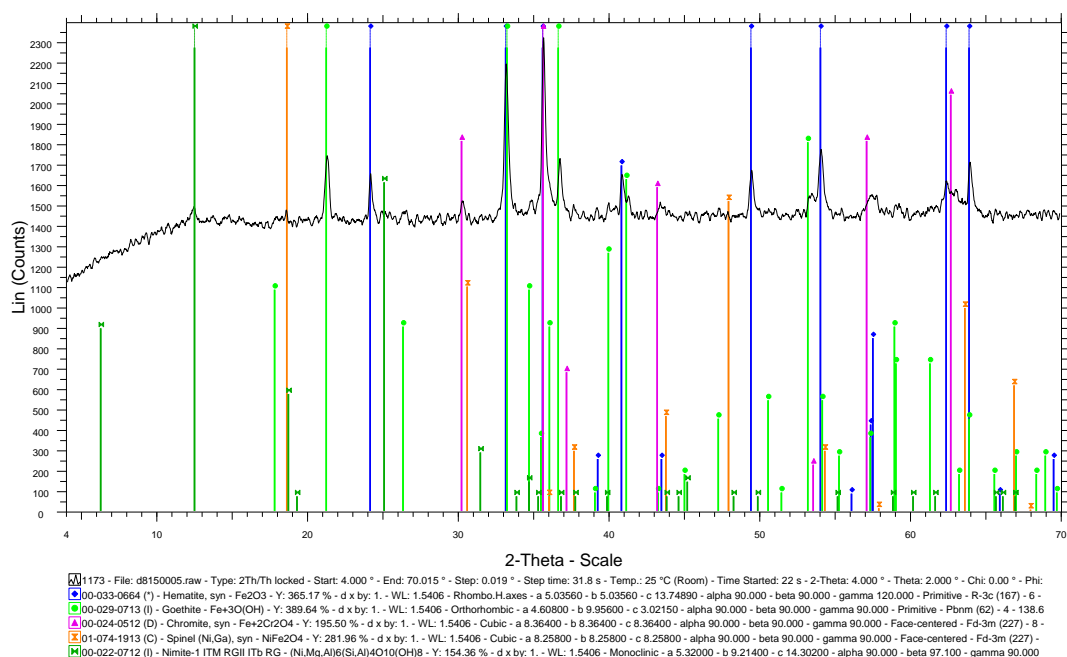
Εικόνα 3: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P3) από το πισσολιθικό στρώμα Fe-Ni (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Ασβεστίτης, Σπινέλλιος, Νιμίτης, Χρωμίτης)

P4



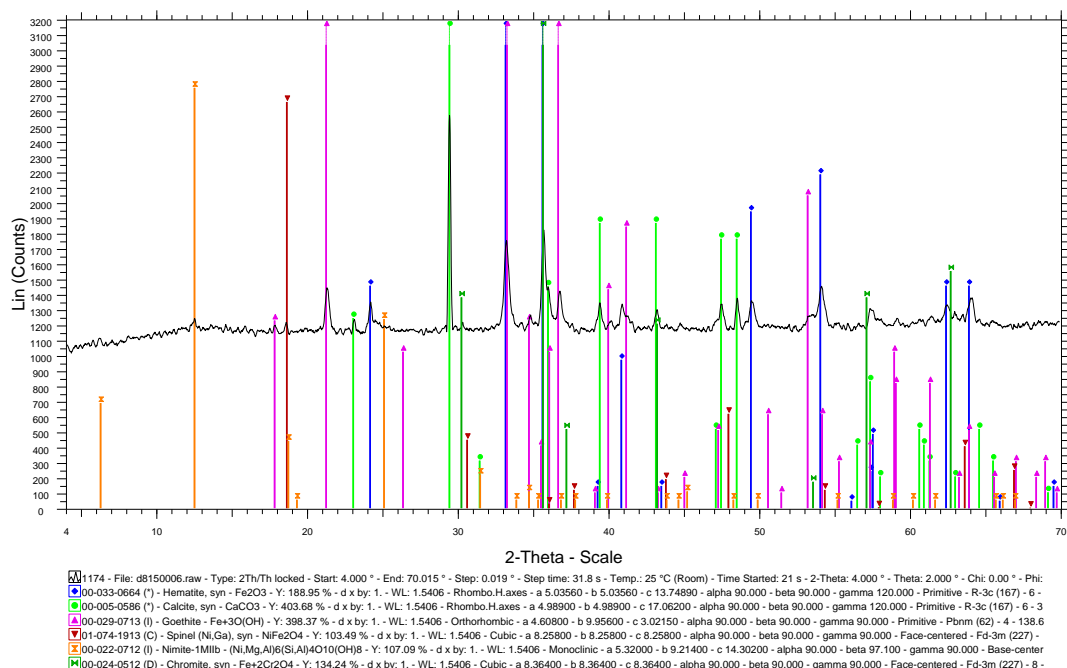
Εικόνα 4: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P4) από το πισσολιθικό στρώμα Fe-Ni (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Σπινέλλιος, Χρωμίτης, Νιμίτης)

P5



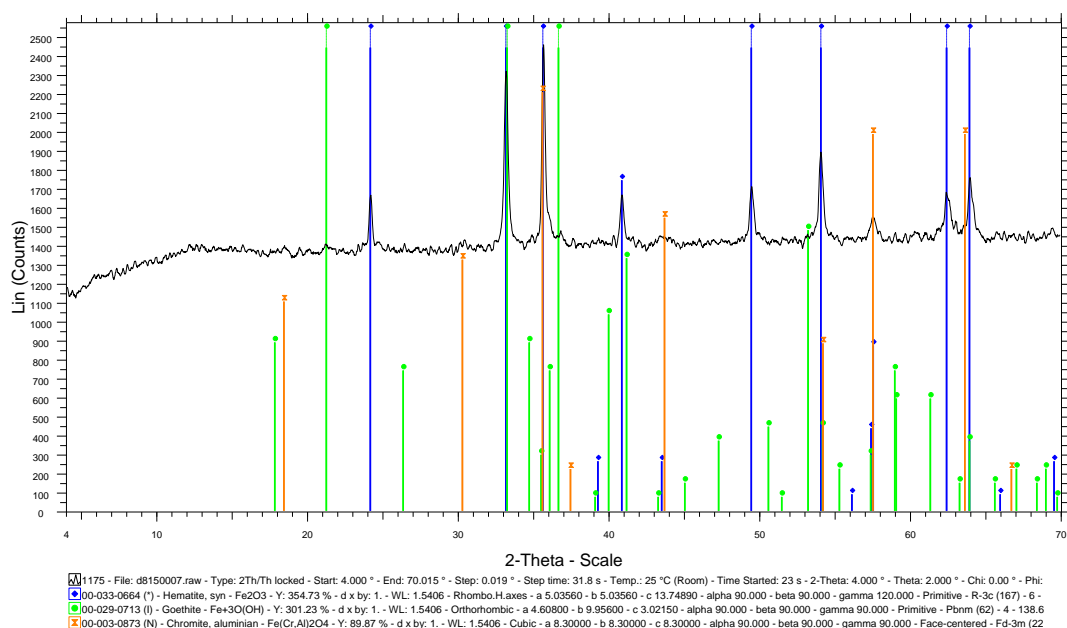
Εικόνα 5: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P5) από το συμπαγές στρώμα Fe-Ni με λίγους πισσολίθους (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Σπινέλλιος, Νιμίτης)

P6



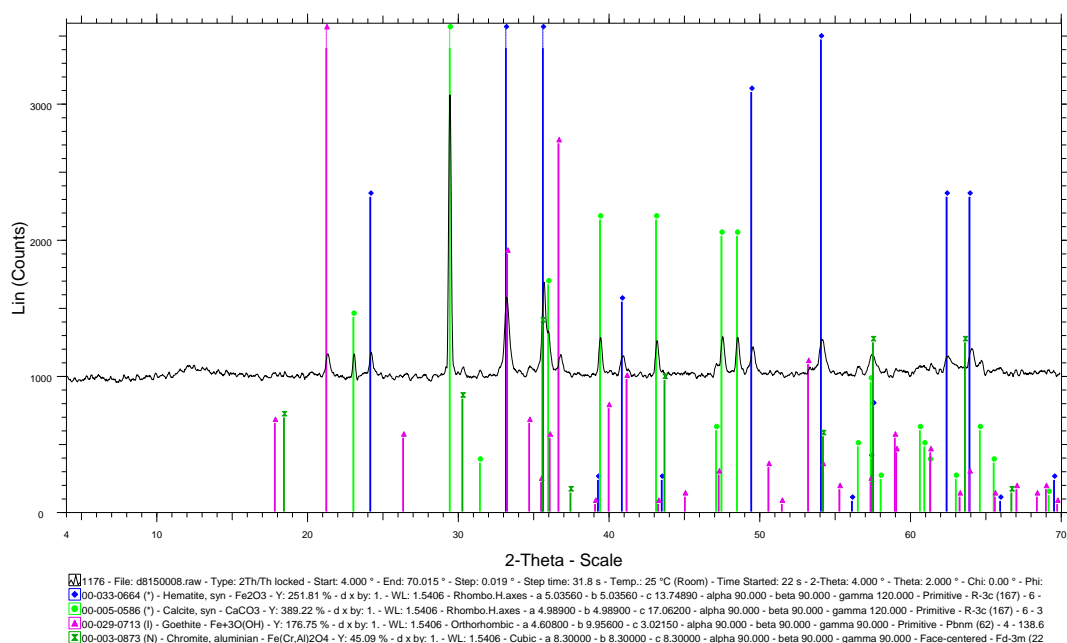
Εικόνα 6: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P6) από το πισσολιθικό στρώμα Fe-Ni (Αιματίτης, Ασβεστίτης, Γκαϊτίτης, Σπινέλλιος, Νιμίτης, Χρωμίτης)

P7



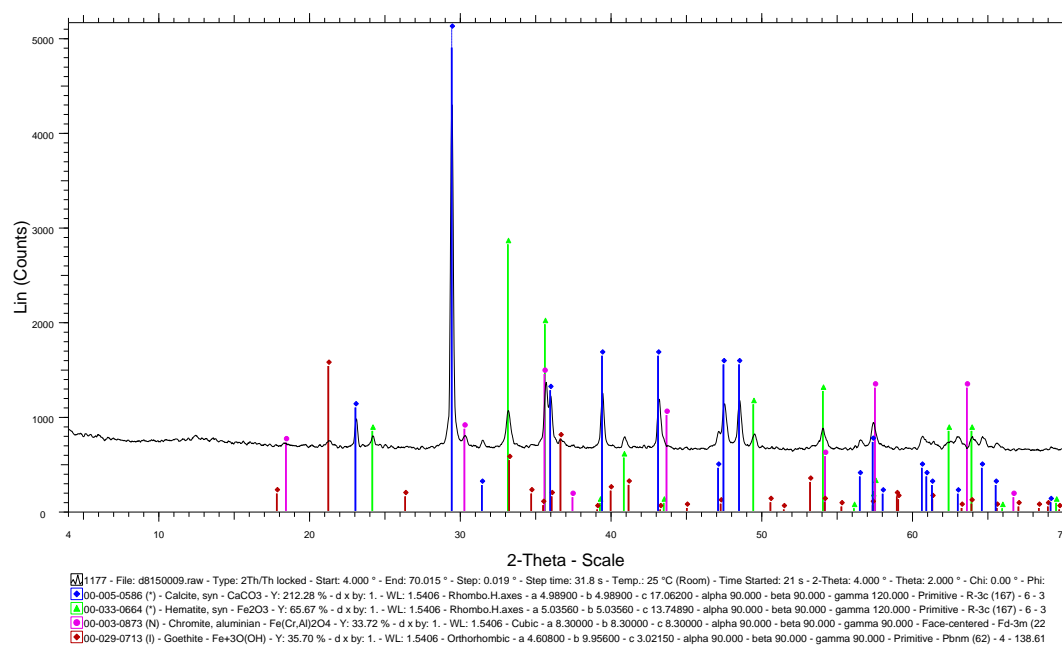
Εικόνα 7: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P7) από το πισσολιθικό στρώμα Fe-Ni (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης)

P8



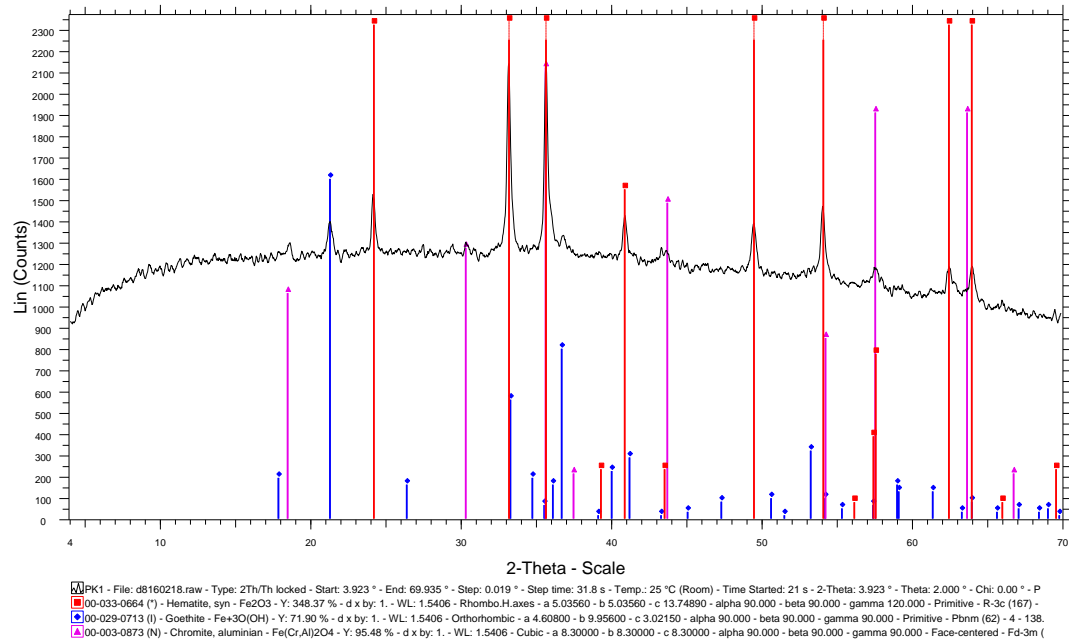
Εικόνα 8: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P8) από το πισσολιθικό στρώμα Fe-Ni (Αιματίτης, Ασβεστίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης)

P9



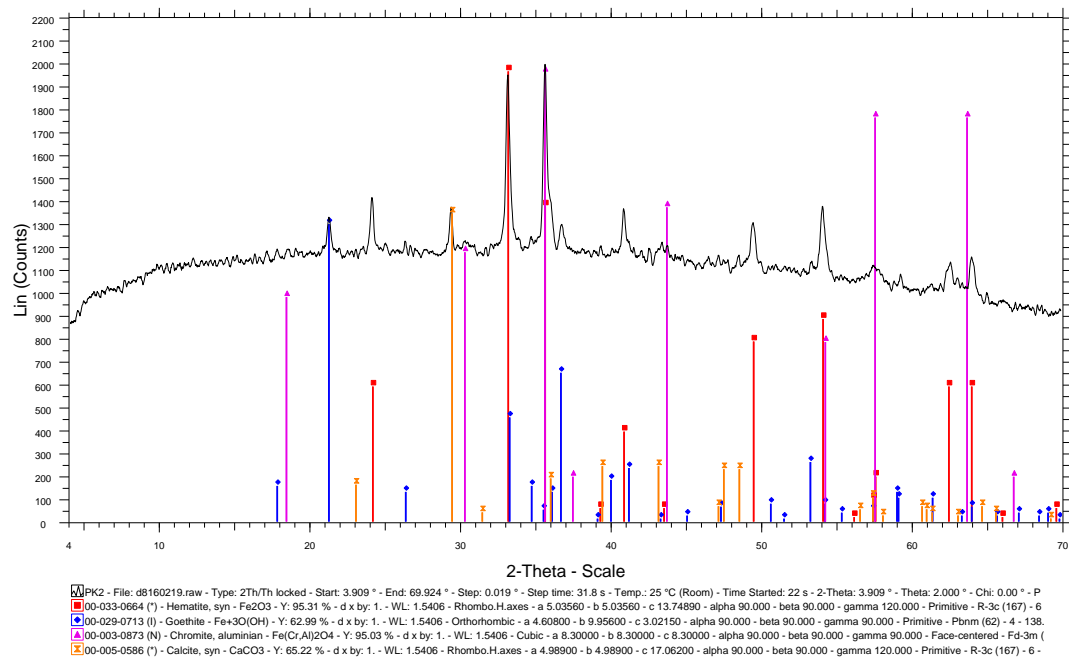
Εικόνα 9: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού δείγματος (P9) από τη μεταβατική ζώνη (Ασβεστίτης, Αιματίτης, Χρωμίτης, Γκαϊτίτης)

PK1



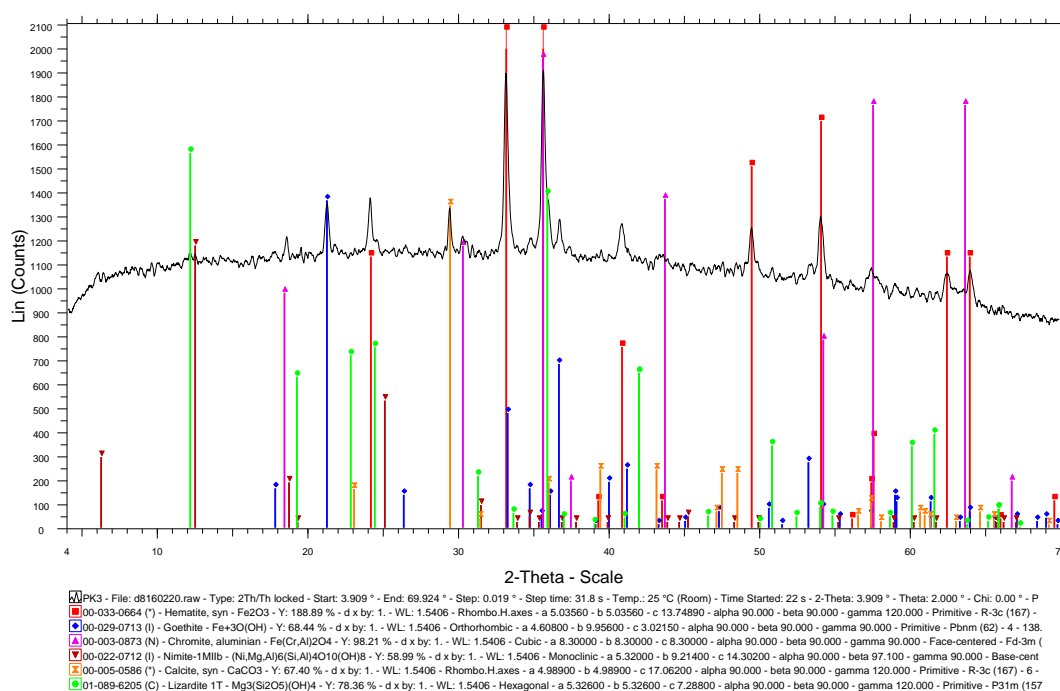
Εικόνα 10: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -8+4 mm (PK1) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης)

PK2



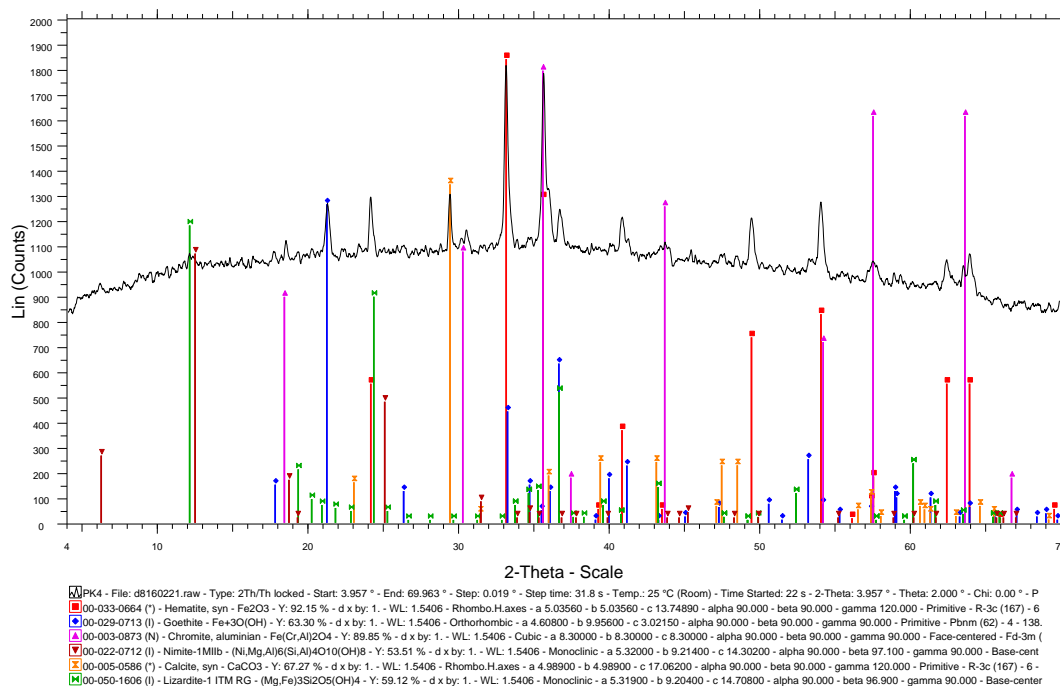
Εικόνα 11: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -4+1 mm (PK2) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK3



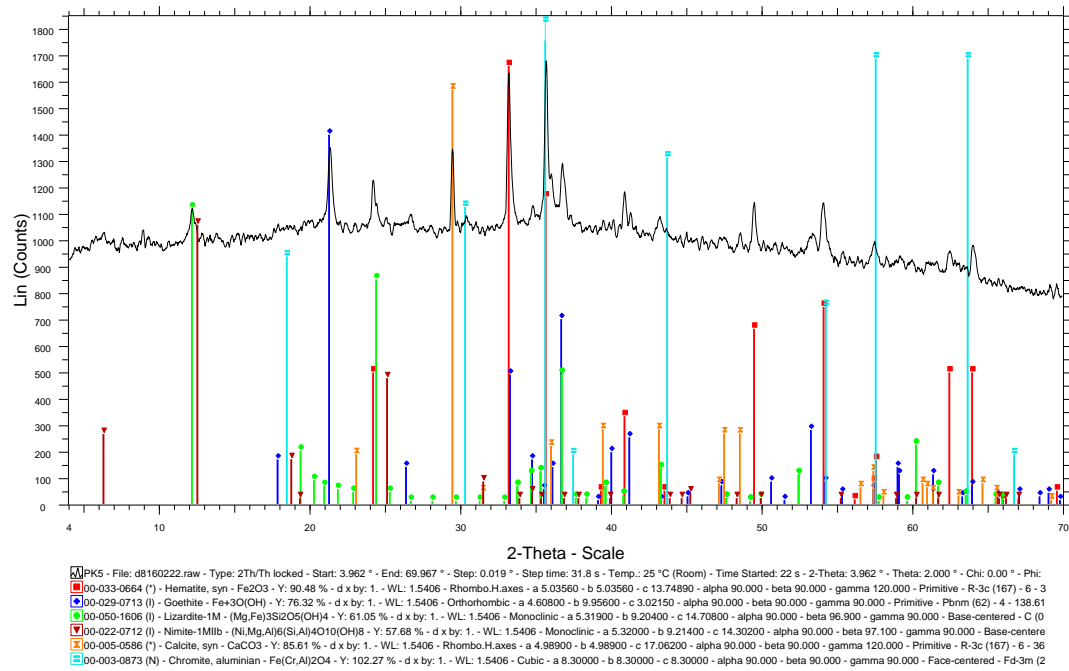
Εικόνα 12: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0,250 mm (PK3) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Νιμίτης, Ασβεστίτης, Λιζαρδίτης)

PK4



Εικόνα 13: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0,250 mm (PK4) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Νιμίτης, Ασβεστίτης, Λιζαρδίτης)

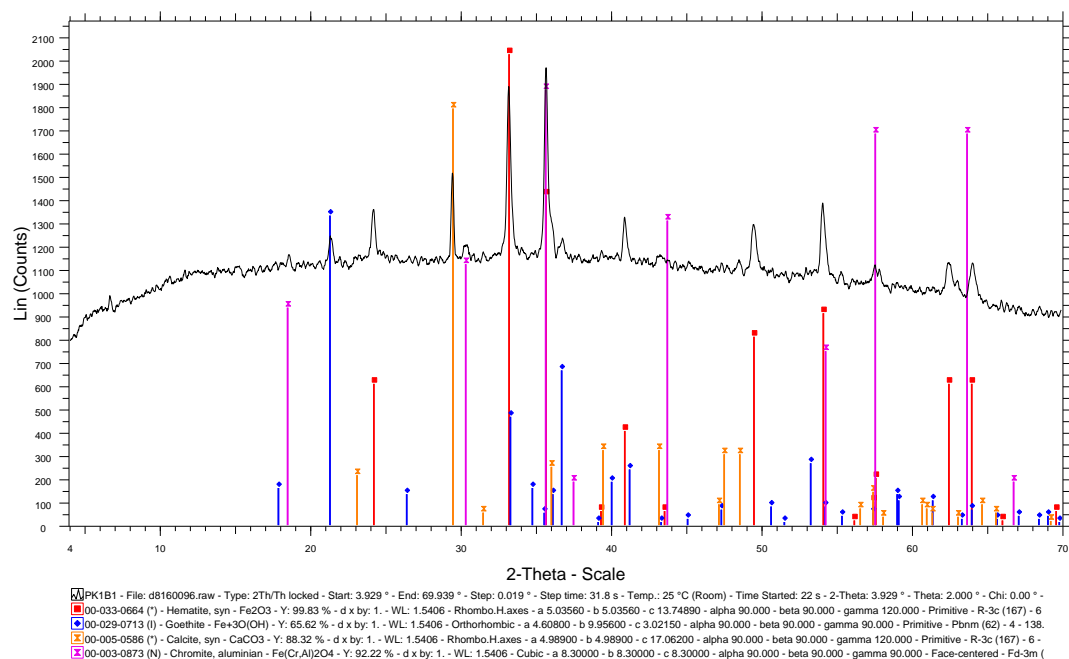
PK5



Εικόνα 14: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0,250 mm (PK4) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Νιμίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης)

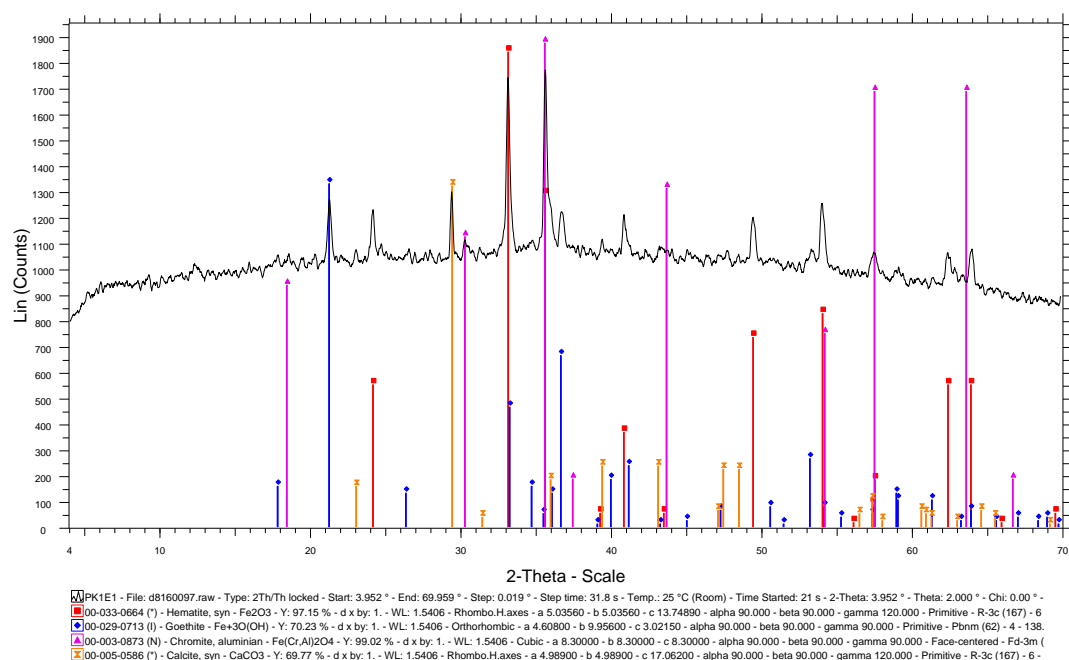
ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ

PK1B1



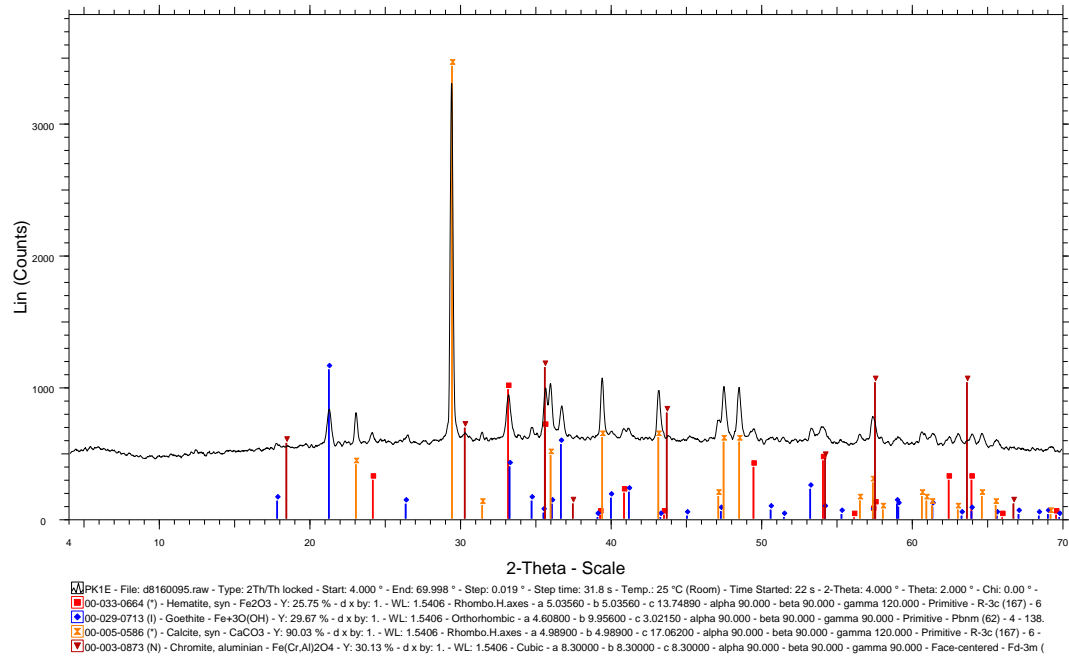
Εικόνα 15: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -8+4 mm, βαρύ +4g/cm³ (PK1B1) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης)

PK1E1



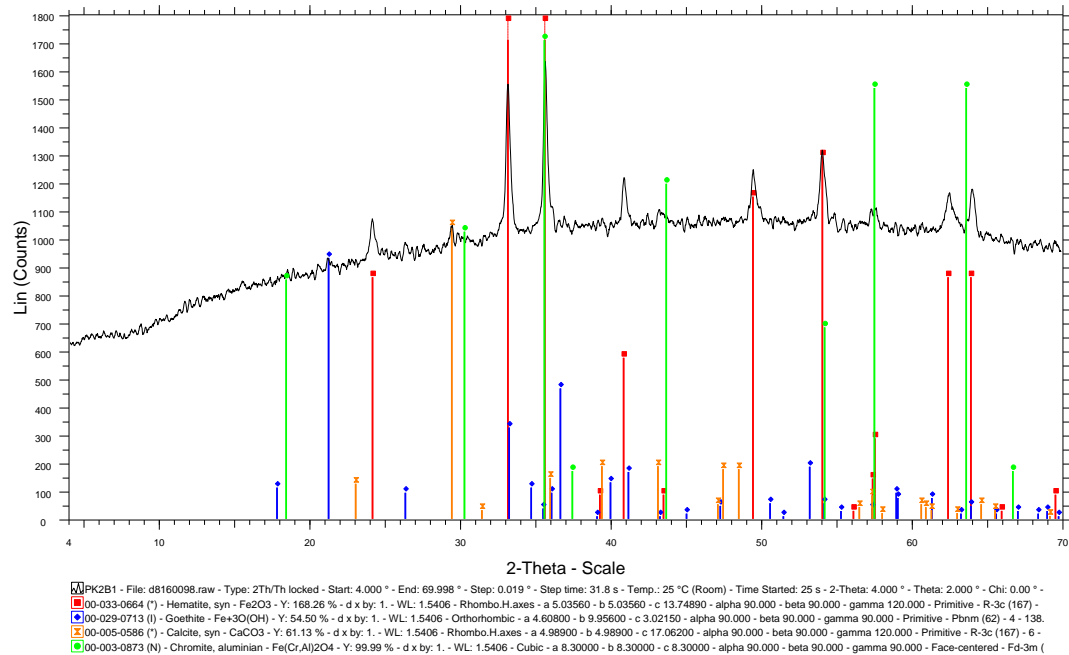
Εικόνα 16: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -8+4 mm, ελαφρύ -4+2.96 g/cm³ (PK1E1) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK1E



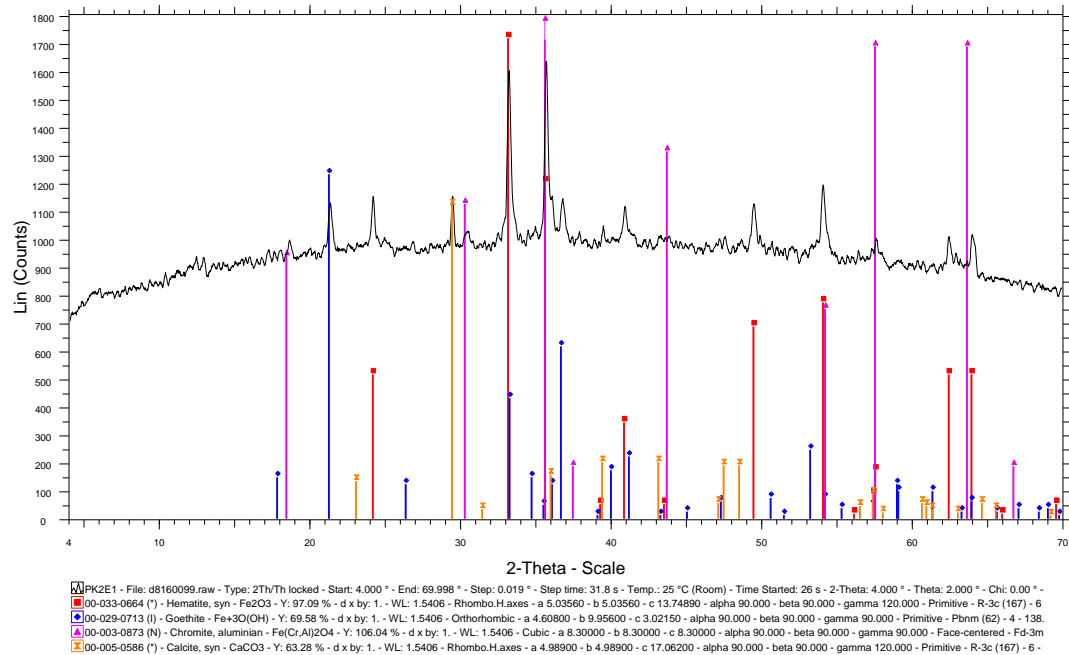
Εικόνα 17: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -8+4 mm, ελαφρύ -2.96 g/cm³ (PK1E) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης)

PK2B1



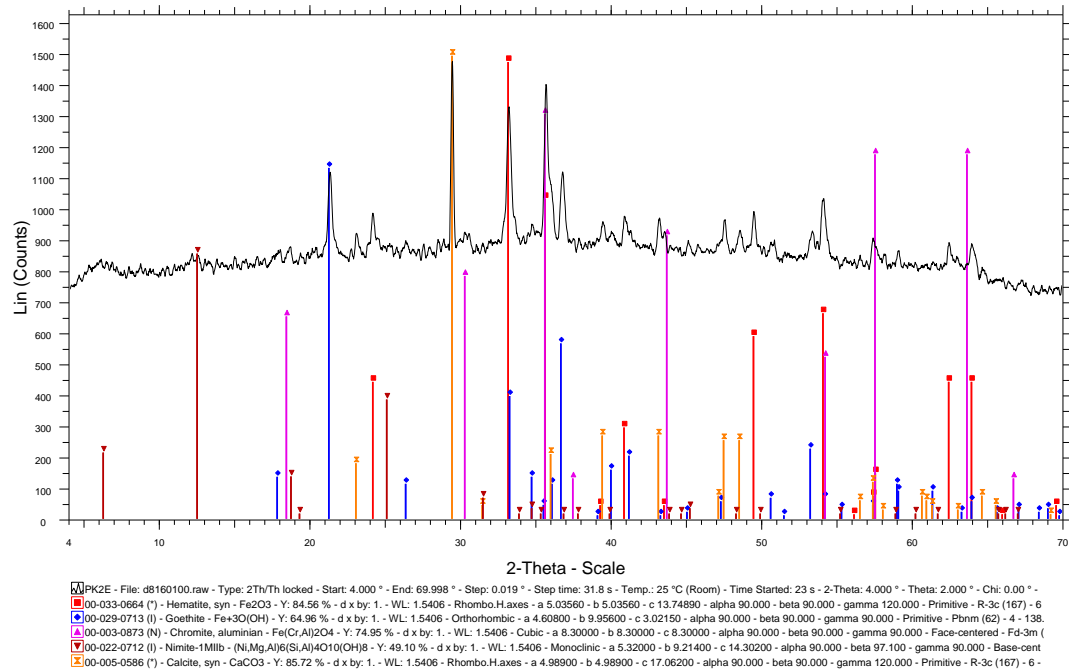
Εικόνα 18: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -4+1 mm, βαρύ +4 g/cm³ (PK2B1) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης)

PK2E1



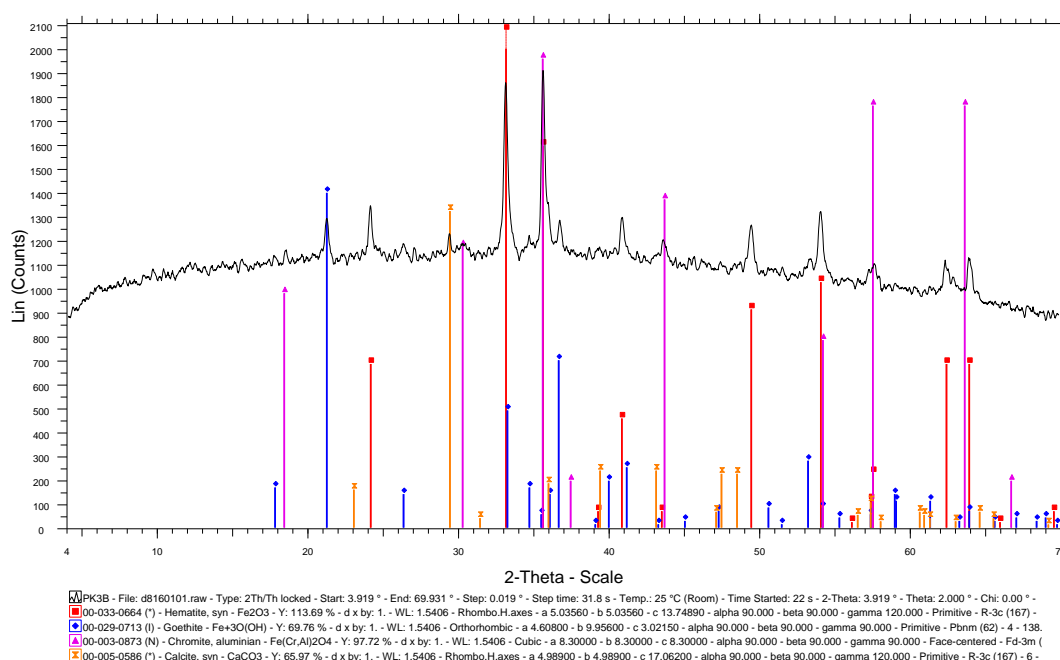
Εικόνα 19: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -4+1 mm, ελαφρύ -4+2.96 g/cm³ (PK2E1) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK2E



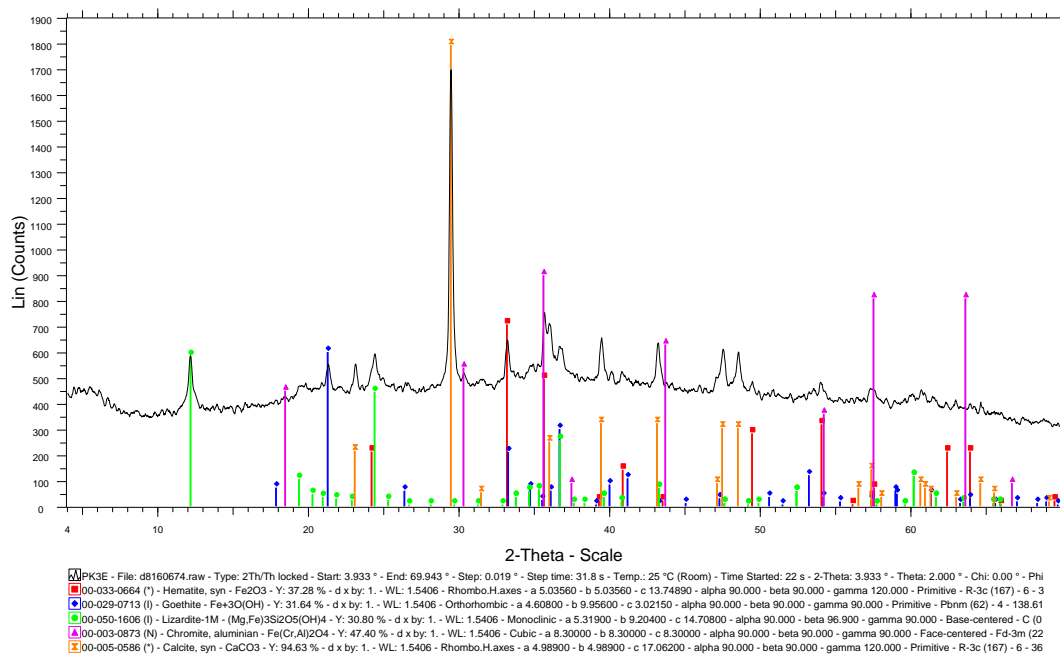
Εικόνα 20: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -4+1 mm, ελαφρύ -2.96 g/cm³ (PK2E) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK3B



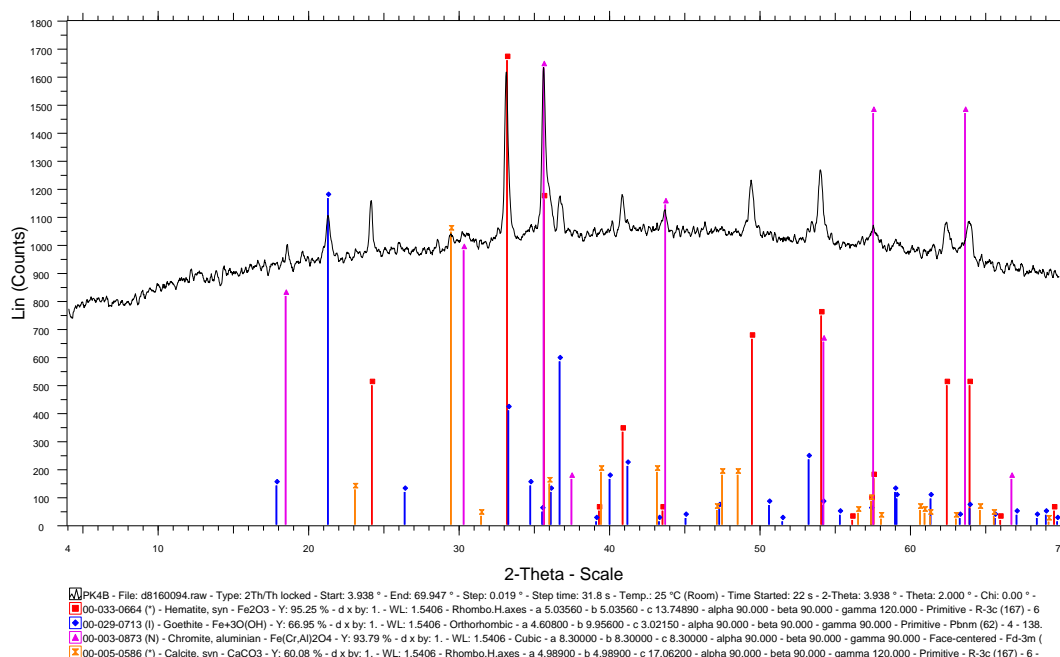
Εικόνα 21: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0.250 mm, βαρύ +2.96 g/cm³ (PK3B) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK3E



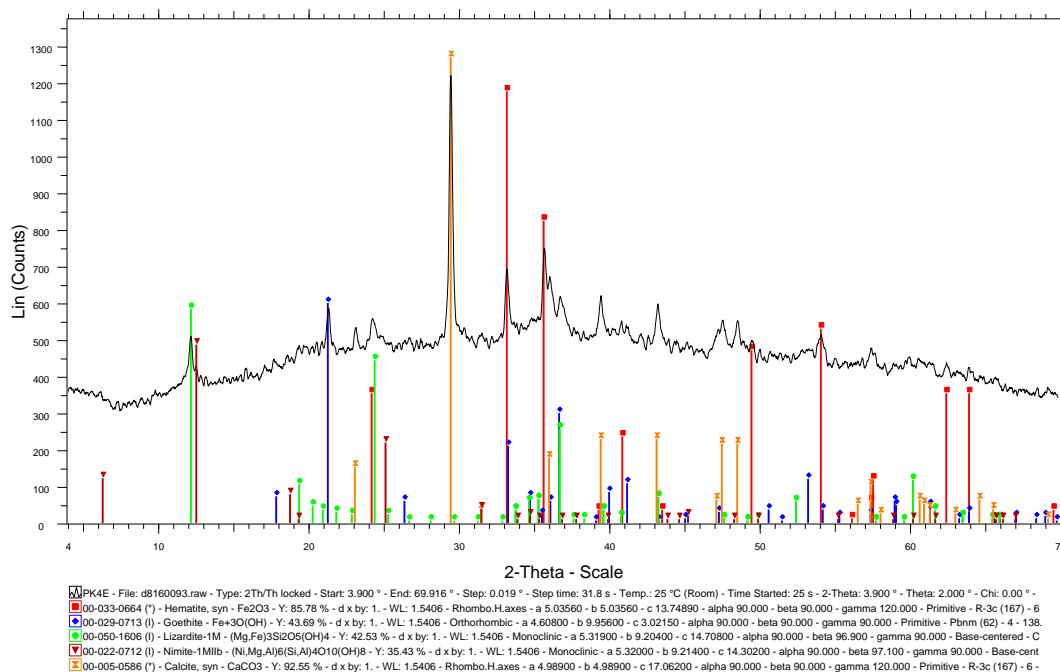
Εικόνα 22: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0.250 mm, ελαφρύ -2.96 g/cm³ (PK3E) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK4B



Εικόνα 23: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -0.250 ± 0.063 mm, βαρύ $+2.96 \text{ g/cm}^3$ (PK4B) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

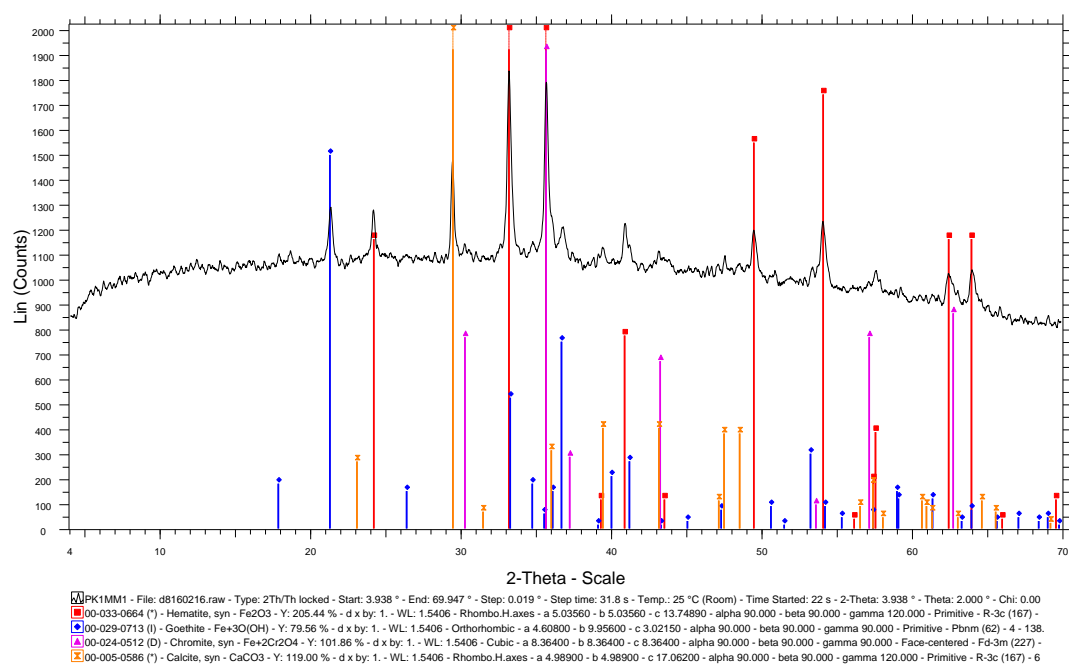
PK4E



Εικόνα 24: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -0.250 ± 0.063 mm, ελαφρύ -2.96 g/cm^3 (PK4E) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Νιμίτης, Ασβεστίτης)

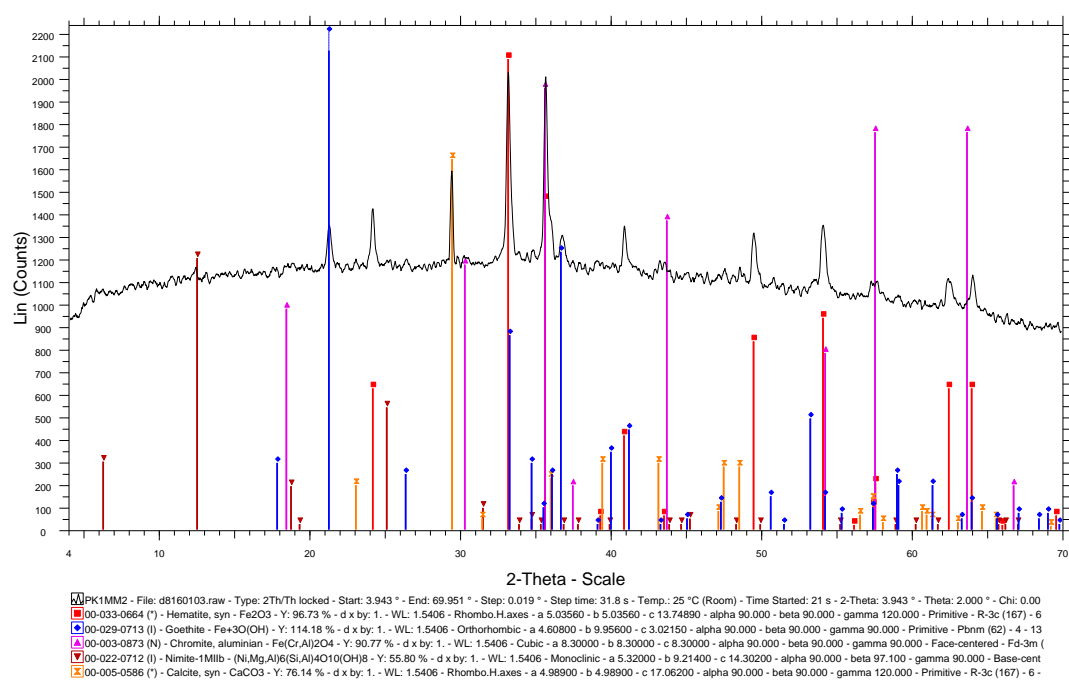
ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ

PK1MM1



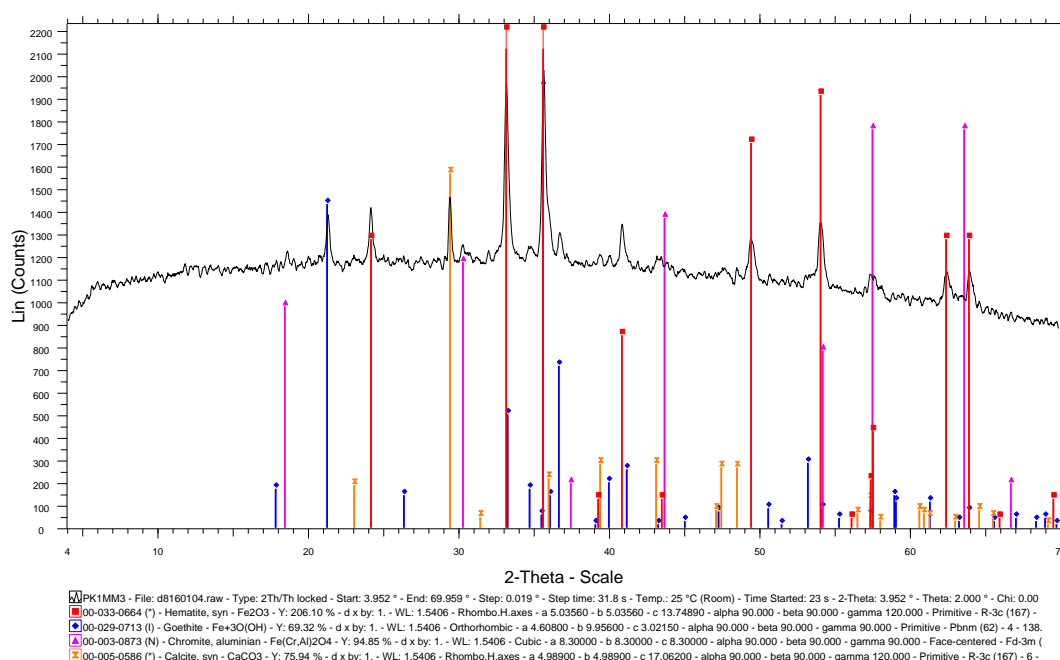
Εικόνα 25: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -8+4 mm, μη μαγνητικό1 (PK1MM1) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK1MM2



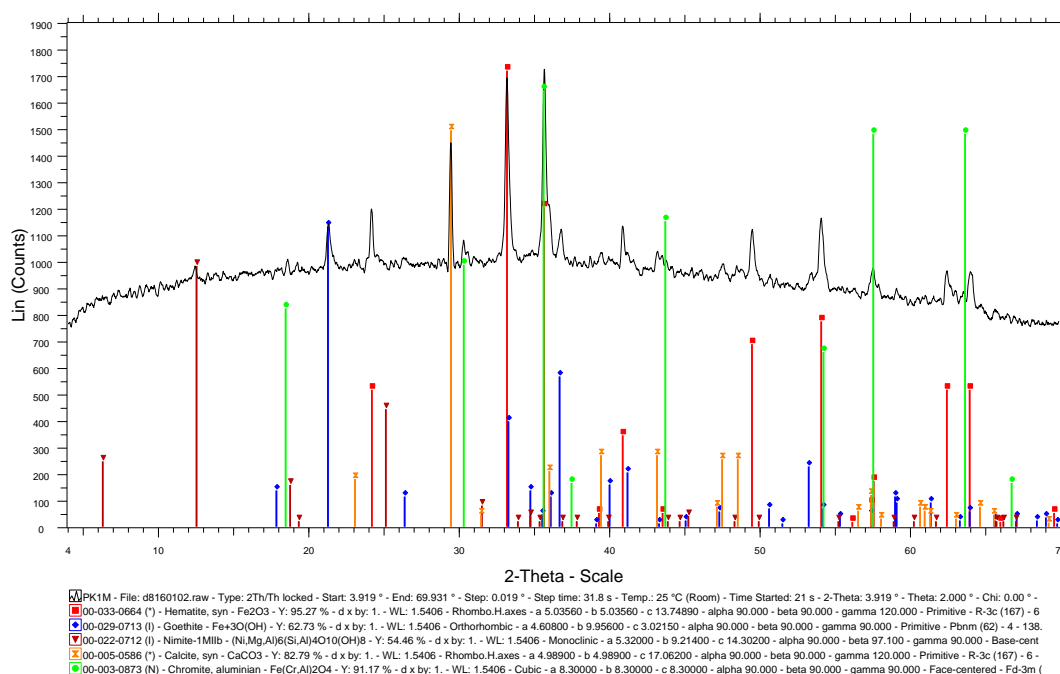
Εικόνα 26: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -8+4 mm, μη μαγνητικό 2 (PK1MM2) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Νιμίτης, Ασβεστίτης)

PK1MM3



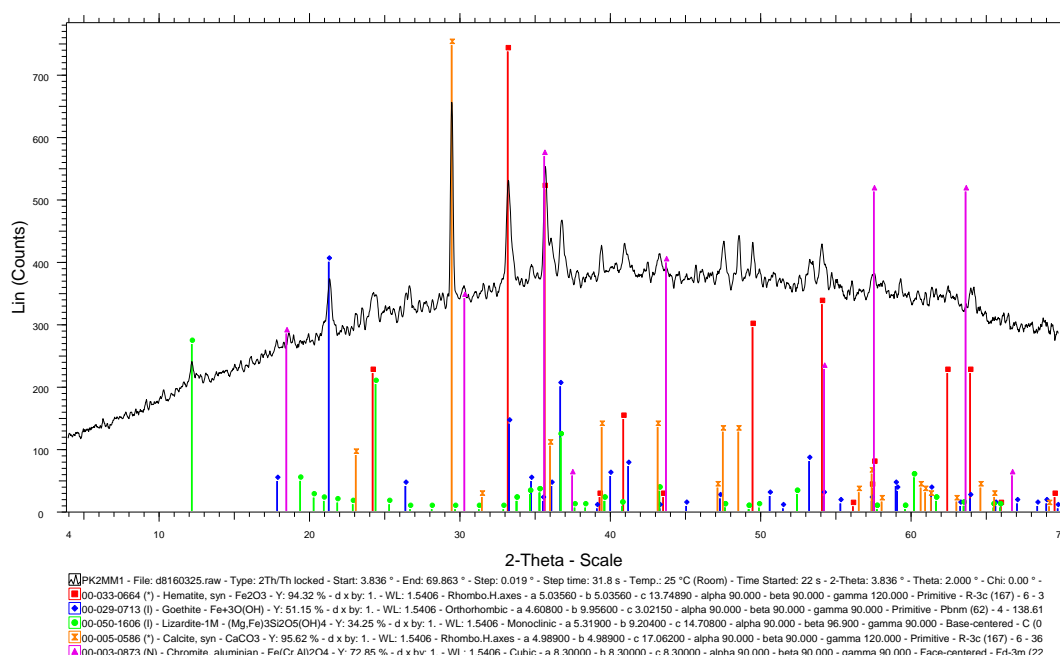
Εικόνα 27: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -8+4 mm, μη μαγνητικό 3 (PK1MM3) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK1M



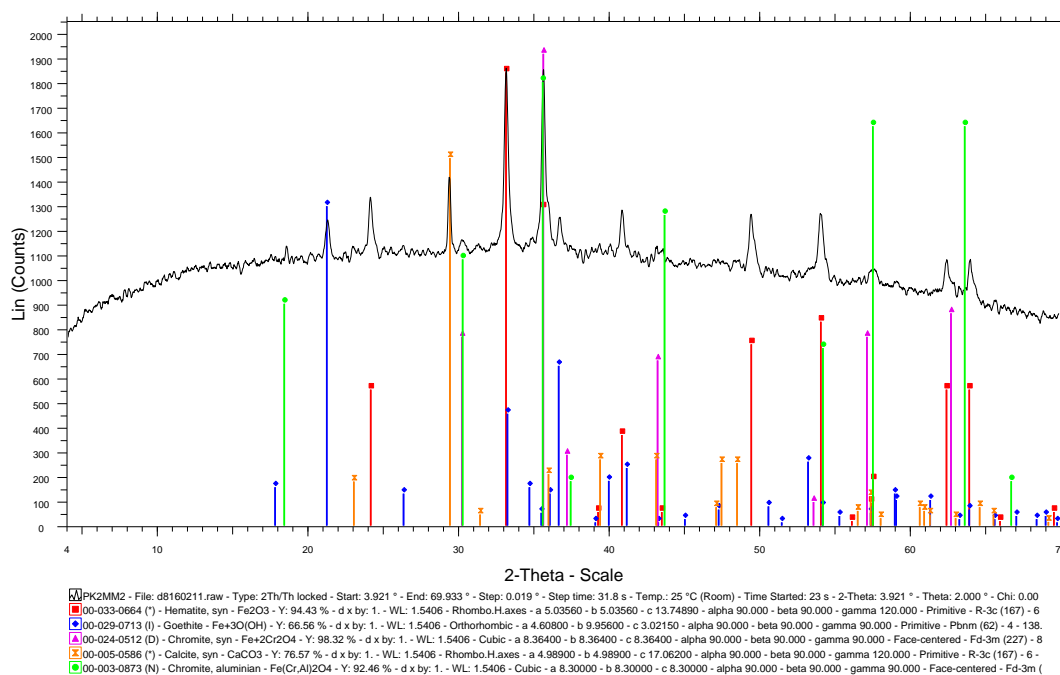
Εικόνα 28: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -8+4 mm, μαγνητικό (PK1M) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Νιμίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης)

PK2MM1



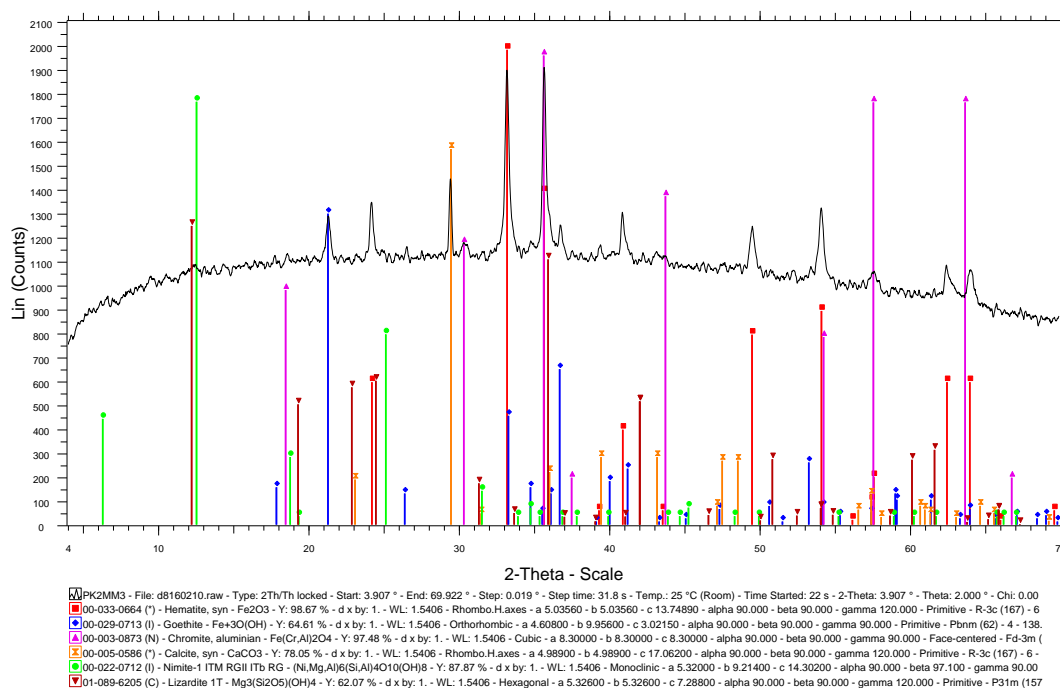
Εικόνα 29: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -4+1 mm, μη μαγνητικό 1 (PK2MM1) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης)

PK2MM2



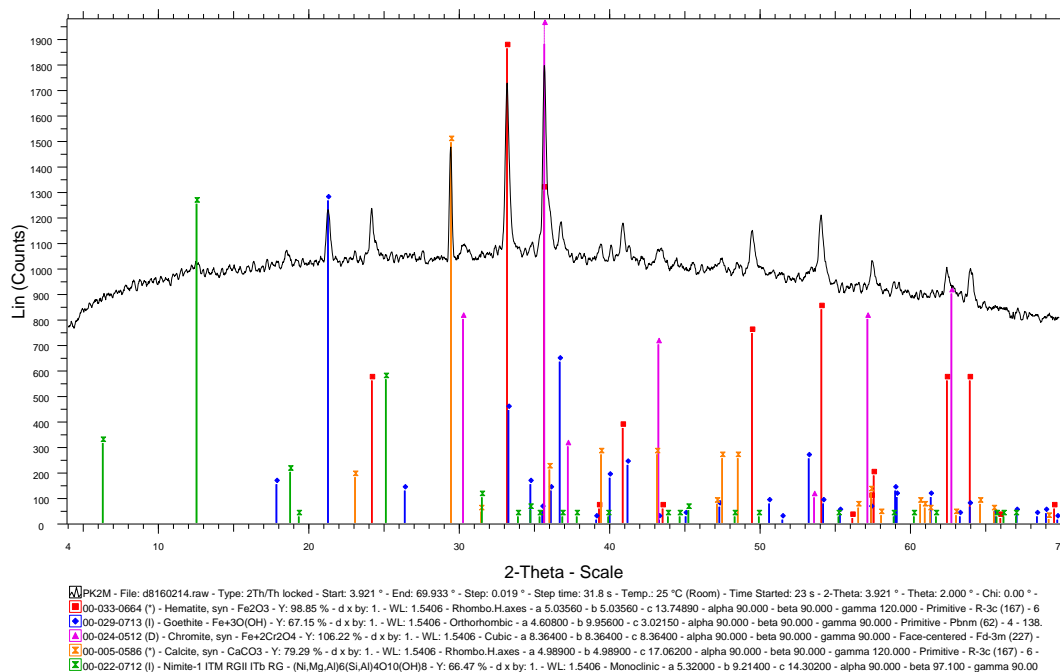
Εικόνα 30: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -4+1 mm, μη μαγνητικό 2 (PK2MM2) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK2MM3



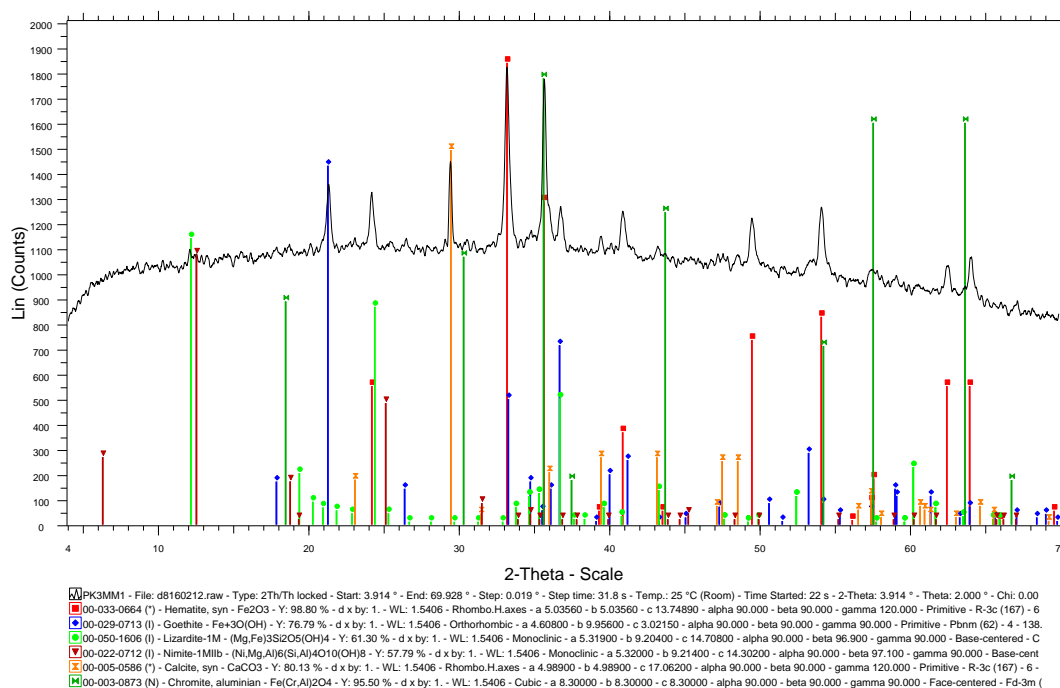
Εικόνα 31: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -4+1 mm, μη μαγνητικό 3 (PK2MM3) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης, Νιμίτης, Λιζαρδίτης)

PK2M



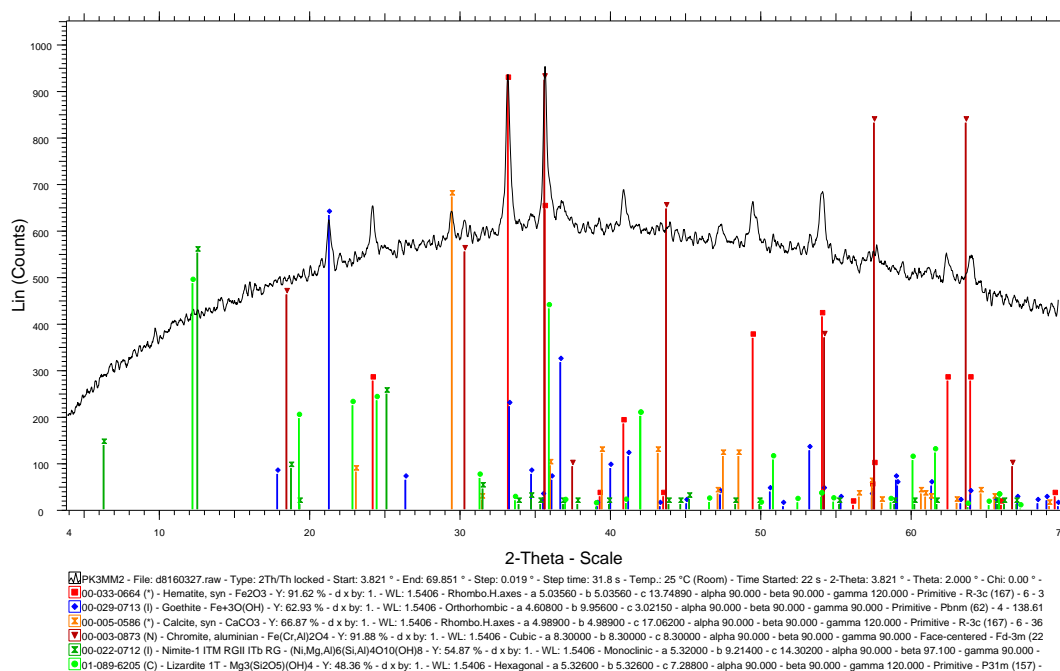
Εικόνα 32: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -4+1 mm, μαγνητικό (PK2M) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης, Νιμίτης)

PK3MM1



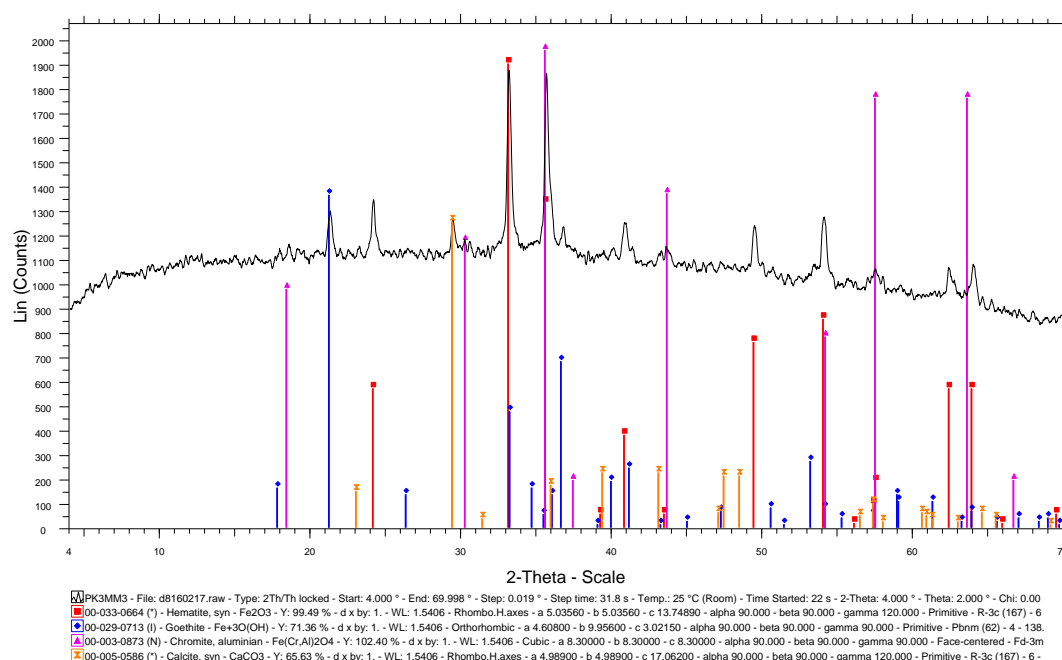
Εικόνα 33: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0,250 mm, μη μαγνητικό 1 (PK3MM1)
(Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Νιμίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης)

PK3MM2



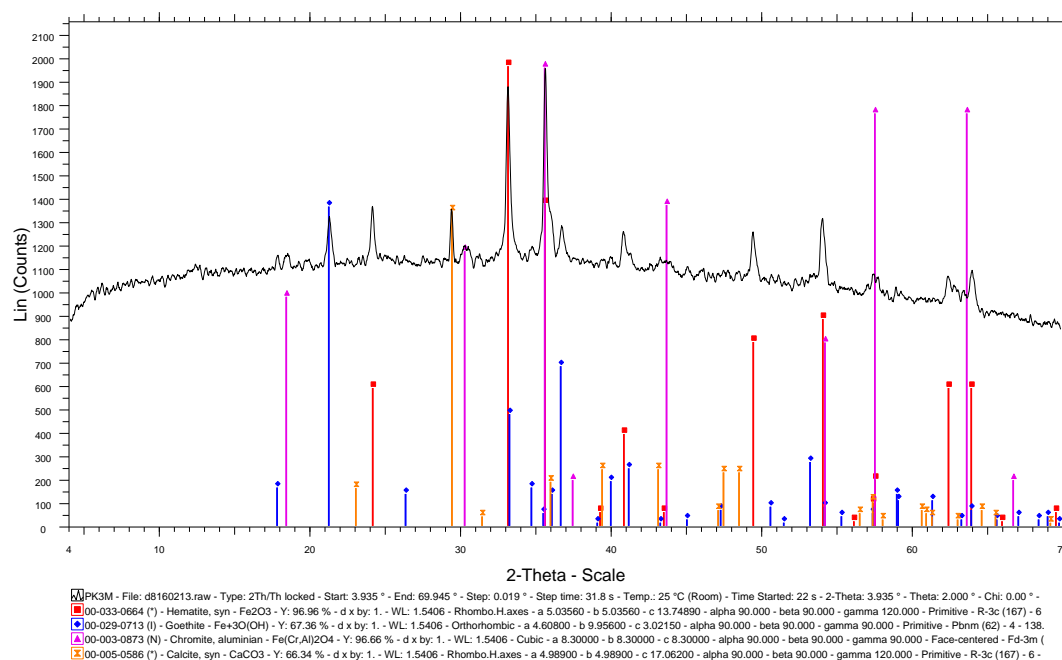
Εικόνα 34: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0,250 mm, μη μαγνητικό 2 (PK3MM2)
(Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης, Νιμίτης, Λιζαρδίτης)

PK3MM3



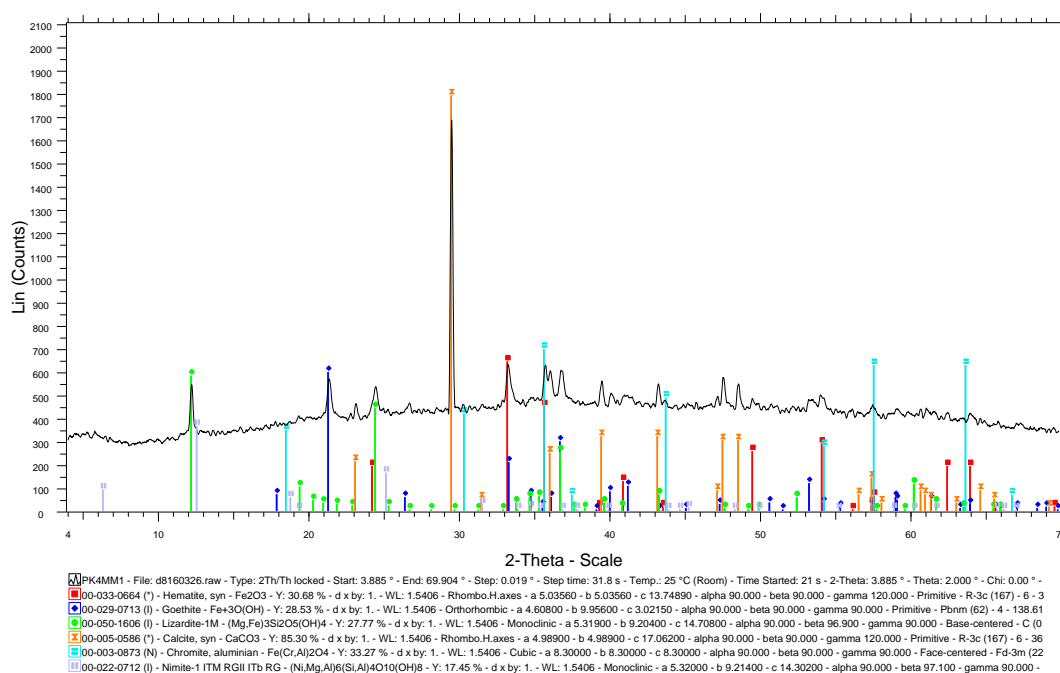
Εικόνα 35: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0,250 mm, μη μαγνητικό 3 (PK3MM3) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK3M



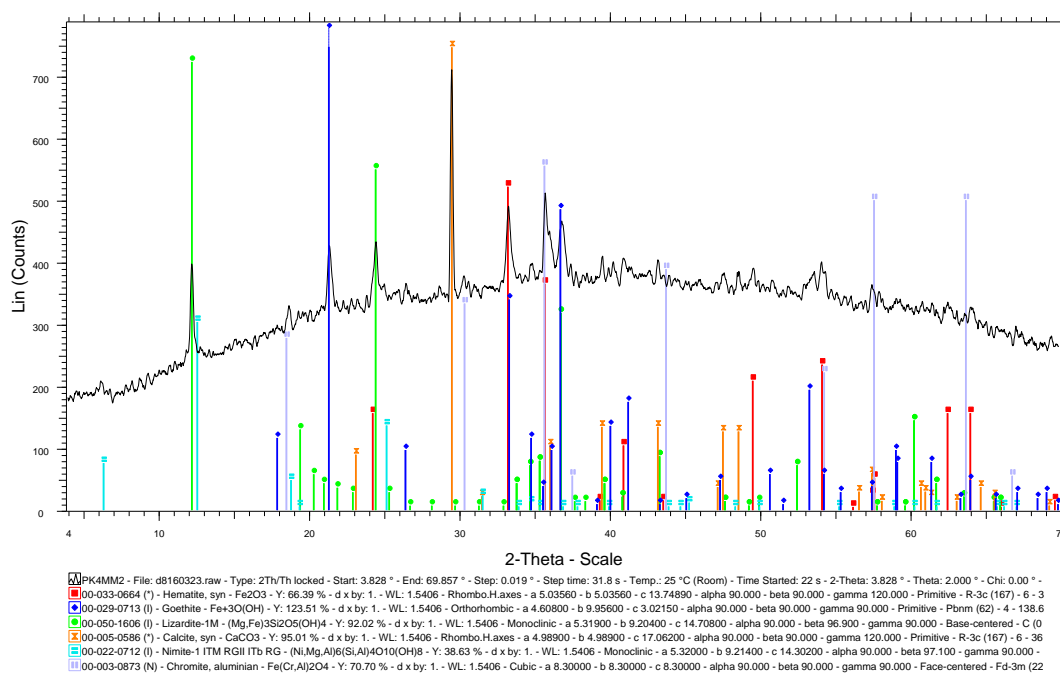
Εικόνα 36: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -1+0,250 mm, μαγνητικό (PK3M) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης, Ασβεστίτης)

PK4MM1



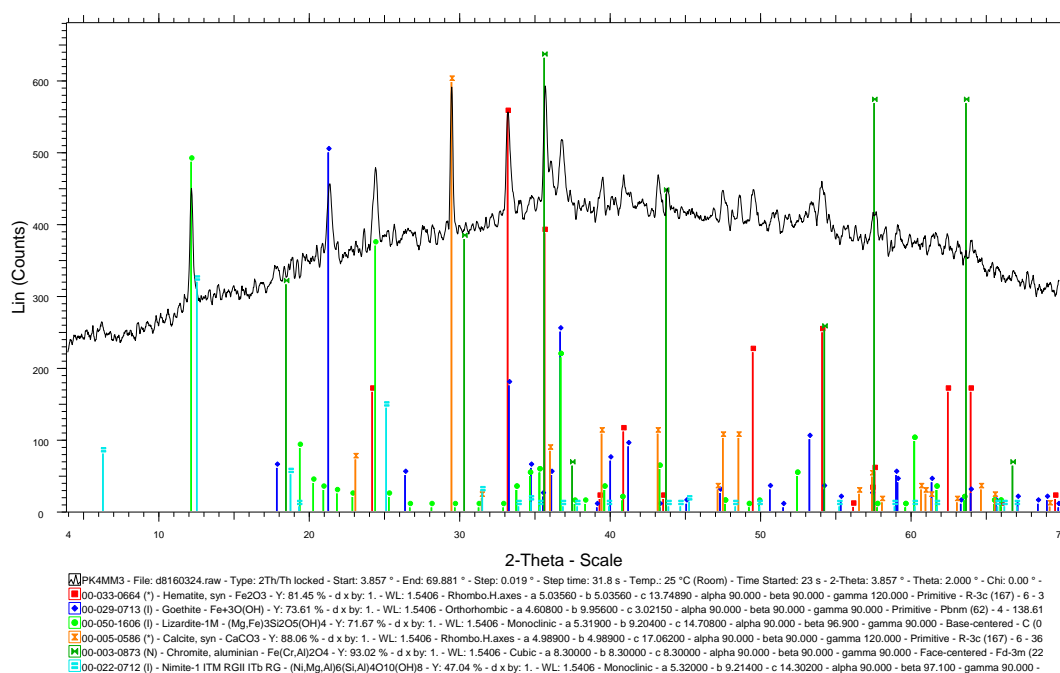
Εικόνα 37: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας $-0,250 \pm 0,063$ mm, μη μαγνητικό 1 (PK4MM1) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης, Νιμίτης)

PK4MM2



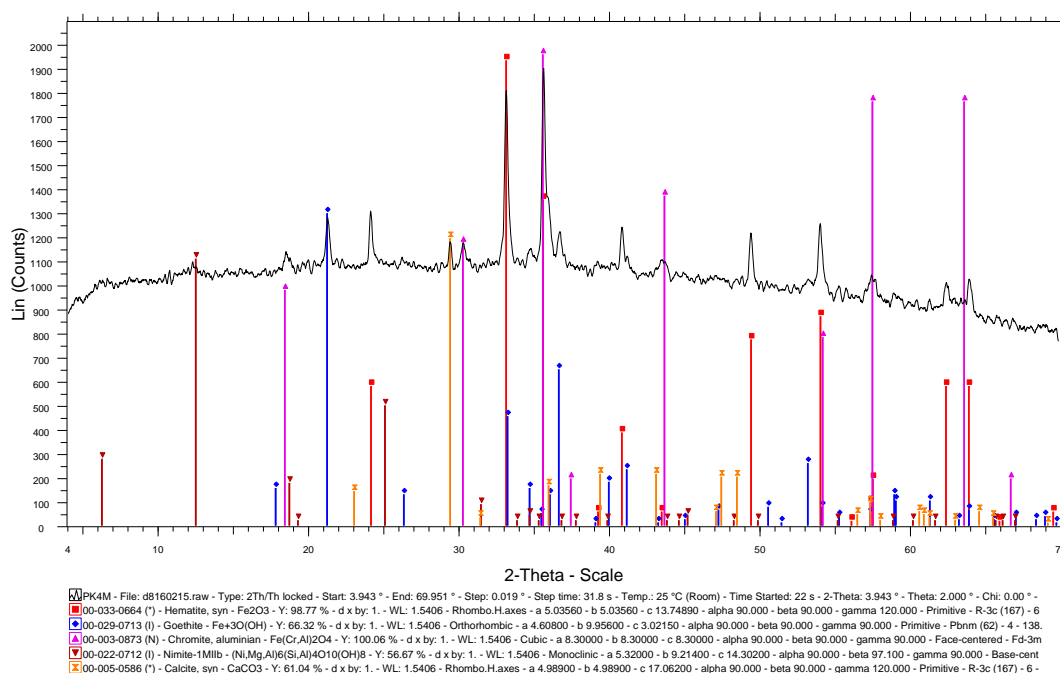
Εικόνα 38: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας $-0,250 \pm 0,063$ mm, μη μαγνητικό 2 (PK4MM2) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Ασβεστίτης, Νιμίτης, Χρωμίτης)

PK4MM3



Εικόνα 39: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -0,250+0,063 mm, μη μαγνητικό 3 (PK4MM3) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Ασβεστίτης, Χρωμίτης, Νιμίτης)

PK4M



Εικόνα 40: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος κοκκομετρίας -0,250+0,063 mm, μαγνητικό (PK4M) (Αιματίτης, Γκαϊτίτης, Λιζαρδίτης, Χρωμίτης, Νιμίτης, Ασβεστίτης)

