



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**« ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΣΙΔΗΡΟΝΙΚΕΛΙΟΥΧΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΟΣ  
ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΔΑΡΔΑΝΕΛΙΩΝ »**

**ΑΛΕΞΙΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**

**Εξεταστική επιτροπή**

**Αλεβίζος Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής (Επιβλέπων)**

**Σταμπολιάδης Ηλίας, Καθηγητής**

**Πεντάρη Δέσποινα, Επίκουρος Καθηγήτρια**

XANIA 2017

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Γ. Αλεβίζου.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι ο εμπλουτισμός νικελιούχου λατεριτικού κοιτάσματος, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή Δαρδανελίων, σε αποδεκτά επίπεδα καθιστώντας το κοιτάσμα οικονομικά εκμεταλλεύσιμο.

Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του θέματος είναι ότι το νικέλιο χρησιμοποιείται, ως επί το πλείστον, στην παρασκευή του ανοξείδωτου χάλυβα. Επίσης η εργασία αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο μεταξύ των θεωρητικών γνώσεων και των προβλημάτων που αντιμετωπίζονται στην πράξη.

Στα πλαίσια της εργασίας έγιναν δοκιμές εμπλουτισμού στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού, χημικές αναλύσεις στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας, ορυκτολογικές αναλύσεις στο Εργαστήριο Γενικής & Τεχνικής Ορυκτολογίας και στο Εργαστήριο Πετρολογίας & Οικονομικής Γεωλογίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής, είναι η εργαστηριακή διερεύνηση εμπλουτισμού σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος σε μικρά κοκκομετρικά κλάσματα με σκοπό την ανάκτηση ενός νικελιούχου συμπυκνώματος ή, και την ανάκτηση ενός σιδηρομεταλλεύματος.

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από την περιοχή των Δαρδανελίων και αποτελείτο κυρίως από τα εξής ορυκτά: μαγνητίτη, αιματίτη, ασβεστίτη, χαλαζία, κλινόχλωρο και νιμίτη. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση διαπιστώθηκε ότι ο μαγνητίτης και ο αιματίτης δεν είναι αποδεσμευμένοι αλλά υπάρχει καλή αποδέσμευση μεταξύ αυτών και των κόκκων του χαλαζία και του ασβεστίτη. Η συνδετική ύλη, η οποία είναι χλωρίτης, συγκεκριμένα κλινόχλωρο και νιμίτης, περικλείει τους κόκκους των λοιπών ορυκτών.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε κατάτμηση και ταξινόμηση του υλικού. Οι μέθοδοι του εμπλουτισμού που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο μαγνητικός διαχωρισμός και η επίπλευση.

Η κατάτμηση, που περιλάμβανε τη θραύση και έπειτα τη λειοτρίβηση του αποδεσμευμένου μεταλλεύματος, αποσκοπεί στην ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων του σε μεγέθη κατάλληλα προς εμπλουτισμό. Η διαδικασία της κατάτμησης εφαρμόζεται συνήθως σε όλες τις μεθόδους εμπλουτισμού, ως πρωταρχική διεργασία, για να επιτευχθεί η αποδέσμευση του μεταλλεύματος από τα στείρα, και η δημιουργία κατάλληλων κοκκομετρικών κλασμάτων.

Ο μαγνητικός διαχωρισμός αποσκοπεί στο διαχωρισμό των ορυκτών του μεταλλεύματος που έχουν μαγνητικές ιδιότητες, όπως είναι ο μαγνητίτης και ο αιματίτης, από αυτά που δεν παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες, όπως ο χαλαζίας και ο ασβεστίτης.

Τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού έδειξαν έναν καλό διαχωρισμό των μαγνητικών ορυκτών από τα μη μαγνητικά. Ωστόσο δεν επετεύχθη σε κανένα προϊόν ανάλυση νικελίου μεγαλύτερη από 1%, που ήταν και ο στόχος της παρούσας εργασίας, με εξαίρεση το πρώτο μαγνητικό προϊόν του κοκκομετρικού κλάσματος -0.038 mm, όπου καταγράφεται ποσοστό 24%. Ο σίδηρος κατανέμεται στα μαγνητικά προϊόντα με ανάλυση όμως μικρότερη του 50%.

Ο στόχος της επίπλευσης η ανάκτηση νικελιούχου συμπυκνώματος ή, και σιδηρούχου μεταλλεύματος χρησιμοποιώντας τα μαγνητικά προϊόντα των μαγνητικών διαχωρισμών των κοκκομετρικών κλασμάτων 1-4 mm και 0.2-1 mm.

Οι δοκιμές επίπλευσης έδειξαν ότι το μέταλλευμα δεν εμπλουτίζεται στο σύνολό του. Οι αναλύσεις του νικελίου κατέγραψαν ποσοστά κάτω του 1% σε όλα τα προϊόντα της επίπλευσης με εξαίρεση το παραμένον του αντιδραστηρίου 726 με ποσοστό 1.14%. Ο σίδηρος καταγράφει ποσοστά αναλύσεων μεγαλύτερα του 60% μόνο σε ορισμένα στάδια της επίπλευσης.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	i
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	2
ΝΙΚΕΛΙΟ .....	2
1.1 Γενικά στοιχεία για το νικέλιο .....	2
1.2 Πηγές Νικελίου .....	2
1.2.1 Θειούχα κοιτάσματα .....	2
1.2.2 Λατεριτικά κοιτάσματα.....	3
1.2.3 Ιζηματογενή κοιτάσματα.....	3
1.3 Εξαγωγική μεταλλουργία νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα.....	5
1.3.1 Πυρομεταλλουργική μέθοδος .....	5
1.3.2 Υδρομεταλλουργική μέθοδος .....	5
1.3.3 Παραγωγή νικελίου στην Ελλάδα.....	6
1.3.4 Περιγραφή πυρομεταλλουργικής μεθόδου της ΛΑΡΚΟ.....	7
1.4 Χρήσεις νικελίου .....	8
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ .....	10
2.1 Μέθοδοι Εμπλουτισμού .....	10
2.1.1 Θραύση .....	10
2.1.2 Λειοτρίβηση .....	11
2.1.3 Μαγνητικός διαχωρισμός .....	12
2.1.4 Επίπλευση .....	16
2.2 Μέθοδοι Ελέγχου Ποιότητας .....	18
2.2.1 Χημικές αναλύσεις.....	18
2.2.2 Περιθλασιμετρία ακτίνων-X .....	20
2.2.3 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	24
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ .....	24
3.1 Κοκκομετρία και χημικές αναλύσεις.....	24
3.2 Ορυκτολογική και μικροσκοπική ανάλυση δείγματος .....	25
3.3 Αποτελέσματα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) .....	28
3.4 Γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν την ορυκτολογική και μικροσκοπική εξέταση .....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	31
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	31
4.1. Πειραματική διαδικασία μαγνητικού διαχωρισμού και παρουσίαση αποτελεσμάτων .	31
4.1.1 Μαγνητικός διαχωρισμός κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm.....	33

4.1.2 Μαγνητικός διαχωρισμός κοκκομετρικού κλάσματος 0.2-1 mm.....	39
4.1.3 Μαγνητικός διαχωρισμός κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm .....	42
4.1.4 Μαγνητικός διαχωρισμός κοκκομετρικού κλάσματος -0.038 mm .....	47
4.1.5 Συμπεράσματα μαγνητικού διαχωρισμού .....	53
4.2 Επίπλευση .....	54
4.2.1 Πειραματική διαδικασία.....	54
4.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	55
4.2.3 Γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την επίπλευση.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° .....	68
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	68
5.1 Συμπεράσματα .....	68
5.2 Προτάσεις .....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1° .....	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2° .....	76

## **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΝΙΚΕΛΙΟ

#### 1.1 Γενικά στοιχεία για το νικέλιο

Το νικέλιο είναι το 5<sup>ο</sup> πιο κοινό στοιχείο της γης ανήκει στην πρώτη τριάδα της ομάδας VIII, μετά το σίδηρο (Fe) και το κοβάλτιο (Co), και πριν το χαλκό (Cu) από την ομάδα 1B. Έχει ατομικό αριθμό  $z=28$ , ατομικό βάρος 58.6934, σημείο τήξης 1450 °C και σημείο ζέσεως 2150 °C. Έχει πυκνότητα, σε στερεή μορφή, 8908 kg/m<sup>3</sup> και μοριακό όγκο 6.59cm<sup>3</sup> [d].

Το Ni έχει χρώμα αργυρόλευκο και κάτω από τους 385 βαθμούς είναι ελαφρώς μαγνητικό μέταλλο. Έχει σκληρότητα 7.12 κατά Mohs και είναι παρόμοια με αυτή του σιδήρου ή και σκληρότερο. Επίσης είναι ελατό και όλκιμο, ανθεκτικότερο του σιδήρου και αμετάβλητο στον αέρα ως συμπαγές. Είναι καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού και συγκεκριμένα έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0.142cal/cm/cm<sup>2</sup>/sec/°C και ηλεκτρική αγωγιμότητα 16 (Cu=100%). Στιλβωμένο παίρνει λαμπρή όψη. Διαλύεται δύσκολα στα οξέα εκτός από το νιτρικό οξύ.



Σχήμα 1.1 Κокκοποιημένο Ni (<http://www.oryktosploutos.net> 2010).

#### 1.2 Πηγές Νικελίου

Το νικέλιο προέρχεται από τρεις κατηγορίες κοιτασμάτων τα θειούχα τους λατερίτες και τα ιζηματογενή. Επίσης πηγή νικελίου αποτελούν τα παλαιομέταλλα scrap [10].

##### 1.2.1 Θειούχα κοιτάσματα

Τα θειούχα κοιτάσματα νικελίου αποτελούνται κυρίως από σιδηρονικελιούχα σουλφίδια. Το βασικό ορυκτό εκμετάλλευσης είναι ο πεντανδίτης (Ni,Fe)<sub>9</sub>S<sub>8</sub> και ο νικελιούχος πυρροτίτης (μακιναβίτης) (Fe,Ni)<sub>1+x</sub>S ( $x=0-0.07$ ). Επίσης αυτού του είδους τα κοιτάσματα υπάρχουν και σύνδρομα ορυκτά κοβαλτίου, χαλκού. Τα θειούχα κοιτάσματα αποτελούν το 40% της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου ωστόσο η εκμετάλλευσή τους

καθίσταται οικονομικά ασύμφορη λόγω του μεγάλου βάθους των εκμεταλλεύσεων [2]. Τέτοια κοιτάσματα απαντώνται στο Οντάριο του Καναδά κοιτάσμα Sudbury, στη Σοβιετική Ένωση το κοιτάσμα Norilsk, στη Γερμανία το κοιτάσμα Schneeberg. Τέτοιου είδους κοιτάσματα δεν παρουσιάζουν οικονομικό ενδιαφέρον στον Ελλαδικό χώρο [11].

### 1.2.2 Λατεριτικά κοιτάσματα

Οι λατερίτες προέρχονται από αποσάθρωση υπερβασικών πετρωμάτων τα οποία περιέχουν μικρό ποσοστό νικελίου [c]. Οι λατερίτες σχηματίζονται σε τροπικά έως υποτροπικά κλίματα με εναλλαγές ξηρών και υγρών περιόδων [12]. Λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας του σχηματισμού των λατεριτικών κοιτασμάτων οι σχηματισμοί παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές στη χημική και ορυκτολογική σύσταση. Γενικά τα λατεριτικά κοιτάσματα διακρίνονται στα λειμωνιτικά και στα πυριτικά. Τα λειμωνιτικά κοιτάσματα αποτελούνται κυρίως από οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου. Το νικέλιο βρίσκεται υπό μορφή στερεού διαλύματος στα οξείδια του σιδήρου. Επίσης αυτού του είδους τα κοιτάσματα έχουν μικρές συγκεντρώσεις μαγνησίου. Τα πυριτικά κοιτάσματα έχουν μεγάλες συγκεντρώσεις πυριτίου και μαγνησίου. Ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο αντικαθιστούν, μέσω ιονταλλαγών, το μαγνήσιο στα νέα ορυκτά που προκύπτουν από την αποσάθρωση του Ολιβίνη [3]. Σημαντικά κοιτάσματα βρίσκονται στη Νέα Καληδονία, στην Ινδονησία, στην Δυτική Αυστραλία στην Κούβα κ.α. [1].

### 1.2.3 Ιζηματογενή κοιτάσματα

Τα ιζηματογενή κοιτάσματα δημιουργήθηκαν από προϊόντα αποσάθρωσης και μεταφοράς του λατεριτικού υλικού απαντώνται σε κλειστές λεκάνες πλούσιες σε οργανικές ύλες και με αναγωγικές συνθήκες εμπλουτίζεται το μέταλλευμα σε νικέλιο. Οι κόνδυλοι μαγγανίου (Mn) περιέχουν κατά μέσο όρο 0,99% Ni [10].

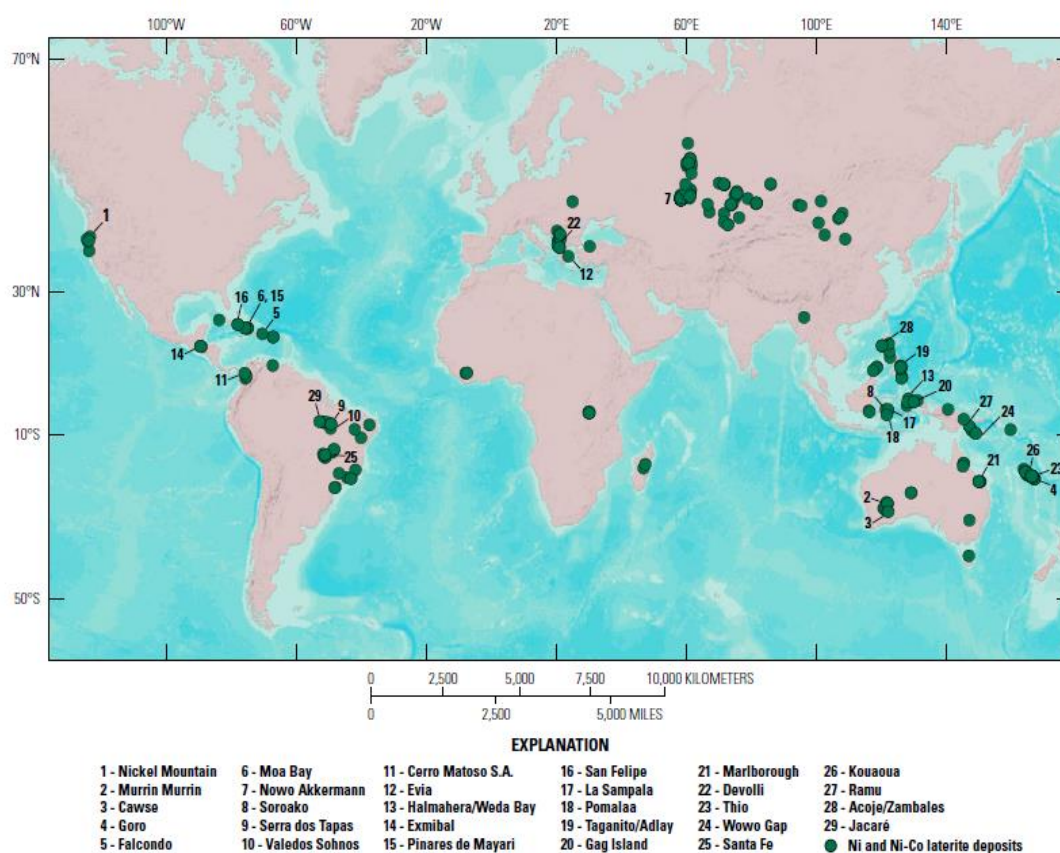
Πίνακας 1.1: Χημική ανάλυση λατεριτικού κοιτάσματος [a].

ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %											
Ni	Co	Fe	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Mn	As	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	H <sub>2</sub> O
1.00	0.06	32.5	33.0	2.8	1.1	0.4	0.002	6.0	3.0	0.02	4.5



Πίνακας 1.2: Παγκόσμια παραγωγή και αποθέματα [13].

Mine production			Reserves
	2012	2013	
United States	-	-	7100
Australia	215,000	230,000	20,000,000
Botswana	26,000	26,000	490,000
Brazil	109,000	140,000	7,500,000
Canada	220,000	220,000	3,300,000
China	89,800	91,000	3,000,000
Colombia	76,000	80,000	1,100,000
Cuba	71,000	72,000	5,500,000
Dominican Republic	21,700	24,000	970,000
Indonesia	290,000	320,000	3,900,000
Madagascar	5,900	22,000	1,600,000
New Caledonia	131,000	140,000	12,000,000
Philippines	270,000	330,000	1,100,000
Russia	267,000	270,000	6,100,000
South Africa	44,000	42,000	3,700,000
Other countries	103,000	120,000	4,600,000
World Total (Rounded)	1,940,000	2,100,000	75,000,000



Σχήμα 1.2: Χάρτης με τα παγκόσμια λατεριτικά κοιτάσματα (U.S. Geological Survey, 2013).

### 1.3 Εξαγωγική μεταλλουργία νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα

Λόγω της ποικιλομορφίας και της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα λατεριτικά κοιτάσματα καθώς επίσης και της απουσίας συγκεκριμένου νικελιοφόρου ορυκτού η εξαγωγή του νικελίου από το μετάλλευμα καθίσταται δύσκολη. Επίσης δυσκολίες παρουσιάζονται και στην ανάκτηση σύνδρομων ορυκτών που παρουσιάζουν οικονομικό ενδιαφέρον, όπως ο χρωμίτης, των ορυκτών του σιδήρου και του κοβαλτίου

Για αυτούς τους λόγους η βιομηχανία νικελίου χρησιμοποιεί διαφορετικούς τύπους εξαγωγικής μεταλλουργίας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος, με βασικές μεθόδους την πυρομεταλλουργία και την υδρομεταλλουργία [1].

#### 1.3.1 Πυρομεταλλουργική μέθοδος

Στα σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα που επεξεργάζονται με την πυρομεταλλουργική μέθοδο το νικέλιο και ο σίδηρος ανάγονται και σε ρευστή κατάσταση διαχωρίζονται από τη σκωρία.

Στα μικτά θειούχα μεταλλεύματα σιδήρου, νικελίου, χαλκού, η διαδικασία αποτελείται από την τήξη της matte και τη μεταλλαγή αυτής με σκοπό την απομάκρυνση του σιδήρου. Η matte μετά από την παραπάνω διαδικασία αποτελείται από 50% νικέλιο και 25% χαλκό. Για να επιτευχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές όπως:

- Τήξη της matte με  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  σε κάμινο ανάτηξης και δημιουργία δύο μη αναμίξιμων φάσεων στο τήγμα,  $\text{Cu}_2\text{S}$  στην επιφάνεια και  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  στον πυθμένα.
- Αργή ψύξη της matte για παραγωγή κρυστάλλων  $\text{Cu}_2\text{S}$  και εκφυλισμένης ευθηκτικής φάσης  $\beta - \text{Ni}_3\text{S}_2$ , η οποία σε περαιτέρω βραδεία ψύξη μετασχηματίζεται σε  $\alpha - \text{Ni}_3\text{S}_2$  αποβάλλοντας  $\text{Cu}_2\text{S}$ , που διαχέεται σε πλούσιους σε χαλκό κρυστάλλους. Ακολουθεί διαχωρισμός με θραύση, λειοτρίβηση και επίπλευση.
- Διεργασία καρβονυλίωσης, κατά την οποία η matte αφού στεροποιηθεί θραύεται, λειοτριβείται και υποβάλλεται σε οξειδωτική φρύξη, από όπου παράγεται οξειδίο του νικελίου. Ακολουθεί αναγωγική φρύξη σε περιστροφικό κλίβανο φωταερίου, στους  $400^\circ\text{C}$ . Το νικέλιο εξαερώνεται με μορφή  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  με έκθεση του σε  $\text{Co}$  στους  $50^\circ\text{C}$  και υψηλή πίεση, και αποσυντίθεται σε πύργο pellets παρασκευής νικελίου στους  $180^\circ\text{C}$  [1].

#### 1.3.2 Υδρομεταλλουργική μέθοδος

Τα μεταλλεύματα που επεξεργάζονται με υδρομεταλλουργική μέθοδο για την ανάκτηση νικελίου υπόκεινται σε εκχύλιση με αμμωνία ή με θειικό οξύ.

Τα μεταλλεύματα που υπόκεινται σε εκχύλιση με αμμωνία αρχικά προθερμαίνονται και υπόκεινται σε αναγωγή. Όταν το μετάλλευμα περιέχει αξιοποιήσιμες συγκεντρώσεις κοβαλτίου τότε η εκχύλιση πραγματοποιείται υπό πίεση. Η αμμωνία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διαλυτοποιεί το νικέλιο, το κοβάλτιο και το χαλκό δίνοντας αμμωνιακά σύμπλοκα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται υδρομεταλλουργικός διαχωρισμός και το νικέλιο ανακτάται με αναγωγή, του προϊόντος που έχει προκύψει από τον υδρομεταλλουργικό διαχωρισμό, υπό μορφή κόνεως σύμφωνα με τη μέθοδο Sherrit και Gordon.

Στα μεταλλεύματα που η επεξεργασία πραγματοποιείται με θειικό οξύ διαλυτοποιείται το νικέλιο και το κοβάλτιο σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αυξάνεται η κατανάλωση του αντιδραστηρίου όσο αυξάνεται και η περιεκτικότητα σε μαγνήσιο [1].

### 1.3.3 Παραγωγή νικελίου στην Ελλάδα

Η εκμετάλλευση των ελληνικών λατεριτικών κοιτασμάτων και η παραγωγή σιδηρονικελίου πραγματοποιείται από την εταιρεία ΛΑΡΚΟ Γ.Μ.Μ.Α.Ε. η ΛΑΡΚΟ διαθέτει μεταλλεία στον Άγιο Ιωάννη Λοκρίδος, στην Εύβοια και την Καστοριά, επίσης διαχειρίζεται και ένα ιδιόκτητο λιγνιτωρυχείο στα Σέρβια του νομού Κοζάνης. Για την παραγωγή του τελικού προϊόντος (κοκκοποιημένο σιδηρονικέλιο) διαθέτει μεταλλουργικό εργοστάσιο στη Λάρυμνα Φθιώτιδας.

Η Γενική Μεταλλευτική και Μεταλλουργική Ανώνυμη Εταιρεία «ΛΑΡΚΟ» ιδρύθηκε το 1963 από τον Πρόδρομο Αθανασιάδη Μποδοσάκη. Το 1966 ολοκληρώνεται η κατασκευή του εργοστασίου στη Λάρυμνα. Τα μεταλλεία της Εύβοιας μπαίνουν σε πλήρη εκμετάλλευση το 1969 και το 1972 προστίθενται δύο νέες ηλεκτρικές κάμινοι.

Το 1977 εγκαθίσταται η πρώτη σε μήκος μεταφορική ταινία στην Ευρώπη με μήκος 7,5 χλμ., ώστε να μειωθεί το κόστος μεταφοράς του μεταλλεύματος με φορτηγά αυτοκίνητα και ταυτόχρονα λόγω της υψομετρικής διαφοράς των μεταλλείων με την πλατεία αποθήκευσης παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία καταναλώνεται σε άλλες δραστηριότητες του μεταλλείου.

Οι δραστηριότητες της εταιρίας διακρίνονται ως ακολούθως:

- Μεταλλεία Αγ. Ιωάννη στη Βοιωτία, όπου γίνεται εξόρυξη μεταλλεύματος από υπόγειες και επιφανειακές εκμεταλλεύσεις και με χρήση ιδιόκτητου εξοπλισμού.
- Μεταλλεία Ευβοίας, όπου η εξόρυξη λατερίτη πραγματοποιείται μέσω επιφανειακής εκμετάλλευσης με χρήση ιδιόκτητου εξοπλισμού, επίσης λειτουργεί μονάδα εμπλουτισμού (μαγνητικός διαχωρισμός και βαρέα διάμεσα) με σκοπό τον εμπλουτισμό φτωχότερων κοιτασμάτων.
- Μεταλλεία Καστοριάς στα οποία γίνεται επιφανειακή εκμετάλλευση χρησιμοποιώντας εργολαβικό προσωπικό και εξοπλισμό.
- Λιγνιτωρυχείο Σερβίων στο Νομό Κοζάνης στο οποία γίνεται επιφανειακή εκμετάλλευση χρησιμοποιώντας εργολαβικό προσωπικό και εξοπλισμό.
- Μεταλλουργικό συγκρότημα Λάρυμνας στη Φθιώτιδα, όπου τα σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα επεξεργάζονται με πυρομεταλλουργική μέθοδο για παραγωγή σιδηρονικελίου περιεκτικότητας περίπου 25% σε νικέλιο. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου το μεταλλουργικό εργοστάσιο έχει τις εξής εγκαταστάσεις.
  - Πλατείες πρώτων υλών (μεταλλευμάτων, λιγνιτών, λιθάνθρακα και μαζούτ).
  - Εγκατάσταση ανάμιξης.
  - Τέσσερις περιστροφικές καμίνους συνολικής παραγωγής 480 t/h.
  - Πέντε ηλεκτρικές καμίνους ισχύος 173 MW.
  - Δύο μεταλλάκτες OBM 50t έκαστος.
  - Επίσης υπάρχουν και βοηθητικές εγκαταστάσεις όπως μονάδες ξήρης και υγρής αποκονίωσης, μονάδα πελλετοποίησης, κοκκοποίησης του

παραγόμενου σιδηρονικελίου, μονάδα θραύσης σκωρίας, μονάδα παραγωγής οξυγόνου και πλατείες αποθήκευσης του τελικού προϊόντος και της σκωρίας.

- Λιμάνι για τη διακίνηση μεταλλεύματος από την Εύβοια και διάθεση του τελικού προϊόντος στους καταναλωτές [10].

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η ΛΑΡΚΟ εκμεταλλεύεται και επεξεργάζεται κοιτάσματα τα οποία θεωρούνται από τα φτωχότερα στον κόσμο με μέση περιεκτικότητα 1% σε νικέλιο ωστόσο οι ελληνικοί λατερίτες έχουν μερικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλου είδους λατερίτες όπως:

- Χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας 4.5% έναντι 20%-30% άλλων λατεριτικών κοιτασμάτων.
- Χαμηλότερη απώλεια πύρωσης 9% έναντι 12%-20% άλλων λατεριτικών κοιτασμάτων.
- Χαμηλότερο οξείδιο του μαγνησίου (MgO) 3,5% έναντι 5%-35% άλλων λατεριτικών κοιτασμάτων [4].

Η ΛΑΡΚΟ τροφοδοτεί τις μεγαλύτερες Ευρωπαϊκές βιομηχανίες παραγωγής ανοξείδωτου χάλυβα όπως η Krupp, Thyssen, Avesta, Outkumpu. Η παραγωγή νικελίου της ΛΑΡΚΟ αντιστοιχεί στο 6-7% στην Ευρώπη και στο 1-2% παγκόσμια [a].

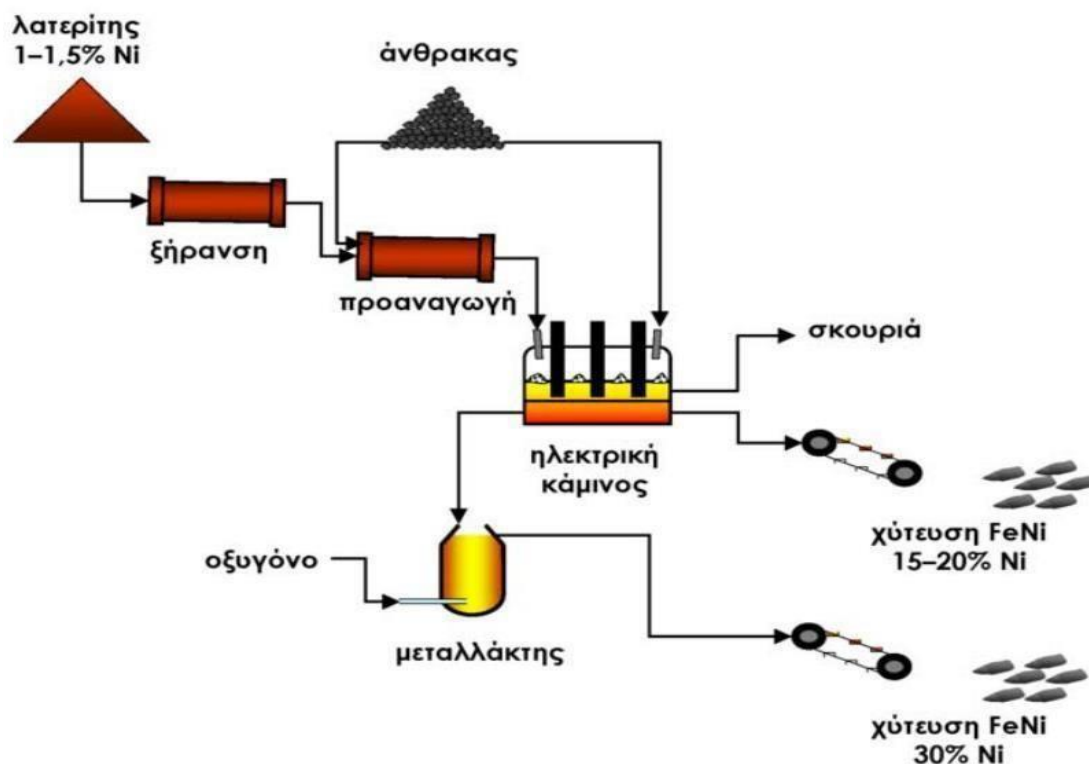
#### 1.3.4 Περιγραφή πυρομεταλλουργικής μεθόδου της ΛΑΡΚΟ

Η πυρομεταλλουργική μέθοδος που χρησιμοποιεί η ΛΑΡΚΟ είναι συνδυασμός προαναγωγικής φρύξης σε περιστροφική κάμινο και αναγωγική τήξη σε ηλεκτρική κάμινο. Το παραγόμενο εξευγενίζεται σε μεταλλάκτη με έμφυση οξυγόνου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια επεξεργασίας της πυρομεταλλουργικής μεθόδου που πραγματοποιούνται στο μεταλλουργικό εργοστάσιο της Λάρυμνας.

- Αρχικά γίνεται θραύση και ομογενοποίηση του μεταλλεύματος από τα μεταλλεία. Στη συνέχεια αναμιγνύεται το μέταλλευμα με στερεά καύσιμα. Στόχος της διαδικασίας είναι να δημιουργηθούν σωροί γνωστής και καθορισμένης ποιότητας σε όλοι τη μάζα τους.
- Έπειτα γίνεται θέρμανση του μεταλλεύματος στους 870 °C με μερική αναγωγή του μεταλλεύματος και του μεταλλουργικού μίγματος στην περιστροφική κάμινο κατ' αντιρροή της κίνησης του μεταλλουργικού μίγματος.
- Στη συνέχεια γίνεται αναγωγική θέρμανση και τήξη του μεταλλεύματος στους 1450 °C έως τους 1600 °C του προϊόντος εξαγωγής των περιστροφικών καμίνων. Το προϊόν των περιστροφικών καμίνων μεταφέρεται σε ηλεκτρικές καμίνους εμβαπτισμένου τόξου ανοικτού λουτρού με σκοπό την παραγωγή αναγωγή τους σε μεταλλικό σίδηρο και νικέλιο. Το προϊόν έχει περιεκτικότητα 12%-16%.
- Τέλος το τηγμένο κράμα σιδηρονικελίου μεταφέρεται σε μεταλλάκτες OBM όπου με εμφύσηση οξυγόνου και προσθήκη συλλιπάσματος ασβεστίτη παράγεται κοκκοποιημένο σιδηρονικέλιο περιεκτικότητας 18%-24%. Η θερμοκρασία στους μεταλλάκτες φτάνει μέχρι τους 1700 °C.
- Η παραγόμενη σκωρία που παράγεται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του μεταλλεύματος από τις ηλεκτρικές καμίνους καθώς επίσης και από τους μεταλλάκτες αποθηκεύεται και διατίθεται σε για διάφορους σκοπούς όπως αμμοβολή και παραγωγή ειδικού τύπου τσιμέντου.

Το τελικό προϊόν είναι κοκκοποιημένο σιδηρονικέλιο με περιεκτικότητα 18%-24% σε νικέλιο. Επίσης το τελικό προϊόν περιέχει 1,1% κοβάλτιο το οποίο δεν κοστολογείται

παρόλο που έχει το 30%-50% της αξία του νικελίου [4]. Η ΛΑΡΚΟ επεξεργάζεται 2500000 τόνους μεταλλεύματος το χρόνο παράγει 18000-20000 τόνους νικελίου [a].



Σχήμα 1.3: Παραγωγή σιδηρονικελίου από σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα, όπως γίνεται στο εργοστάσιο της Λάρκο (Λάρυμνα Φθιώτιδας) [1].

#### 1.4 Χρήσεις νικελίου

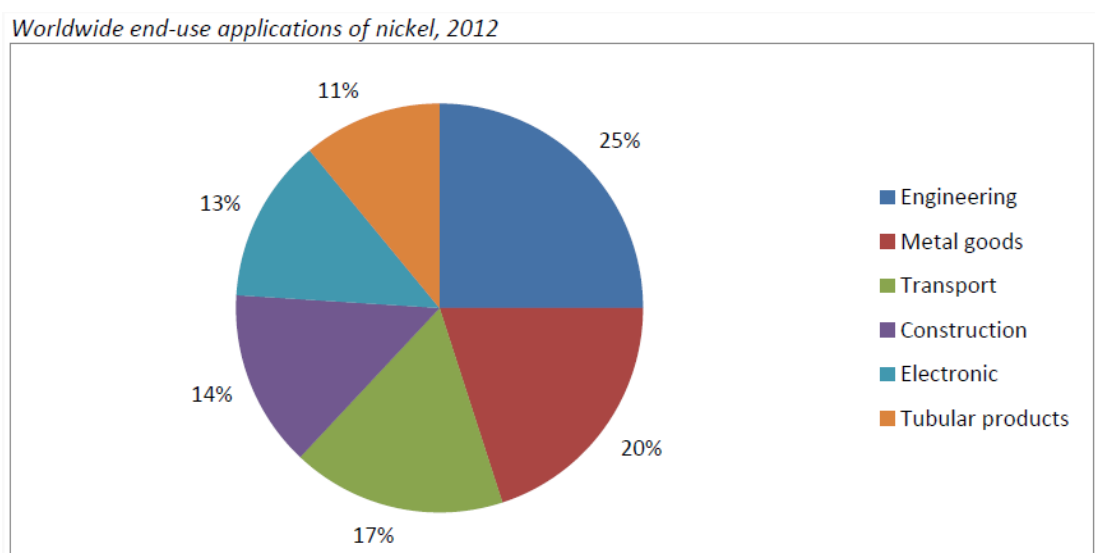
Οι χρήσεις του νικελίου προέρχονται από τις χαρακτηριστικές του ιδιότητες, όπως αντίσταση στη διάβρωση, ευπλαστότητα και αντοχή. Έτσι, μεγάλες ποσότητες νικελίου χρησιμοποιούνται για την παρασκευή νικελιοχάλυβων, οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή σιδηρών γεφυρών, καλωδίων, οπλισμού προεντεταμένου σκυροδέματος κ.λπ. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.5), η κυριότερη χρήση του είναι η παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα και το μεγαλύτερο κομμάτι της παραγωγής καταναλώνεται στη δημιουργία κραμάτων (υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο, χαλυβο-κράματα κατασκευών, χυτοσιδήρου και χάλυβα, χαλκού και ορειχάλκου).

Το νικέλιο χρησιμοποιείται ευρέως στην επινικέλωση, δηλαδή ως προστατευτική επικάλυψη επιφανειών μετάλλων ή κραμάτων, λόγω της αυξημένης αντοχής του στη διάβρωση, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί τη λαμπρότητά του. Το ανθρακικό νικέλιο χρησιμοποιείται στις επινικελώσεις και στην παρασκευή χρωμάτων κεραμικών και κραμάτων.

Ακόμα, χρησιμοποιείται στη βιομηχανία αεροπλάνων, στις βιομηχανίες ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών ειδών, στην κατασκευή τουρμπινών, σωλήνων ελαίου και φωταερίου, γεωργικών μηχανημάτων, πορσελάνης, στην κατασκευή νομισμάτων, μπαταριών, καταλυτών, στην υαλουργία, κλπ [2].



Σχήμα 1.4: Χρήσεις νικελίου (www.larco.gr, 2015).



Σχήμα 1.5: Χρήση νικελίου (<https://setis.ec.europa.eu>, 2016).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής και βάση των ιδιοτήτων των προς διαχωρισμό ορυκτών του δείγματος επιλέχθηκαν οι εξής μέθοδοι εμπλουτισμού: α) μαγνητικός διαχωρισμός και β) η επίπλευση. Με τις μεθόδους ελέγχου ποιότητας (Ατομική απορρόφηση, XRD, SEM) ελέγχθηκε το αποτέλεσμα των μεθόδων εμπλουτισμού.

#### 2.1 Μέθοδοι Εμπλουτισμού

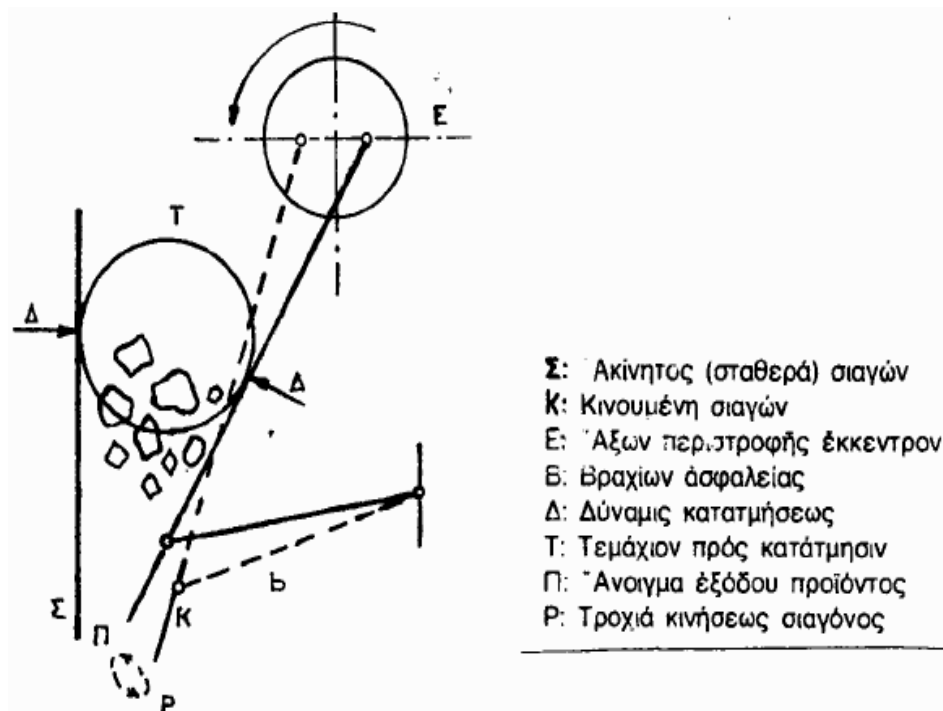
##### 2.1.1 Θραύση

Η θραύση περιλαμβάνει τα στάδια της κατάτμησης από το αρχικό μέγεθος μέχρι περίπου 10 mm έως 2 mm. Σκοπός της πρωτογενούς θραύσης είναι η ελάττωση του μεγέθους του εξορυσσόμενου υλικού που μπορεί να περιέχει όγκους μέχρι και ένα μέτρο, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί με μεταφορικές ταινίες. Στα επόμενα στάδια η κατάτμηση εξυπηρετεί τις προδιαγραφές χρήσης του προϊόντος, τις απαιτήσεις της διαδικασίας που ενδεχομένως ακολουθεί και τις ανάγκες αποδέσμευσης του υλικού. Όταν πρόκειται για μετάλλευμα που προορίζεται να υποστεί μια διαδικασία για το διαχωρισμό του χρήσιμου από το άχρηστο ορυκτό, θα πρέπει το μέγεθος να είναι τέτοιο ώστε να μη συνυπάρχουν το χρήσιμο με τα άχρηστα ορυκτά στον ίδιο κόκκο.

Για να σπάσουμε ένα σώμα πρέπει να καταβάλουμε δυνάμεις που να υπερβαίνουν τις δυνάμεις συνοχής του υλικού αυτού. Οι κυριότερες κατηγορίες δυνάμεων που εξασκούν οι μηχανές κατάτμησης είναι οι ακόλουθες:

- *Θλίψη*: Είναι η συνηθέστερη μορφή δύναμης που χρησιμοποιείται στην κατάτμηση και εφαρμόζεται δια της συμπίεσης των σωμάτων μεταξύ δύο επιφανειών. Η πίεση εξασκείται από τη μια επιφάνεια ενώ η άλλη μένει ακίνητη. Οι κυριότεροι τύποι μηχανών κατάτμησης με θλίψη είναι οι σιαγονωτοί σπαστήρες, οι γυροσκοπικοί και οι κωνικοί σπαστήρες.
- *Κρούση*: είναι η απλούστερη δύναμη κατάτμησης και εξασκείται με την απότομη πρόσκρουση τεμαχίου επί ταχέως κινούμενης επιφάνειας ή αντιστρόφως, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του τεμαχίου. Οι κυριότερες μηχανές κατάτμησης με κρούση είναι οι κρουστικοί περιστροφικοί σπαστήρες και εν μέρει οι σφυρόμυλοι, οι ραβδόμυλοι, οι σφαιρόμυλοι και οι μύλοι αυτογενούς λειοτρίβησης.
- *Τριβή*: είναι η δύναμη κατάτμησης που εφαρμόζεται όταν το υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων και αντιθέτως κινούμενων επιφανειών που δημιουργούν διατμητικές τάσεις μέσα στο σώμα και ολίσθηση σε εσωτερικές επιφάνειες του σώματος. Ο σφυρόμυλος θεωρείται ως η κυριότερη μηχανή κατάτμησης με τριβή. Άλλες τέτοιες μηχανές είναι οι σφαιρόμυλοι και οι ραβδόμυλοι.
- *Διάτμηση*: είναι κυρίως εφελκυστική δύναμη και έχει περιορισμένη εφαρμογή στην κατάτμηση και εν μέρει παρατηρείται στους σφυρόμυλους και τους οδοντωτούς κυλινδρόμυλους.

Οι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τις ανάγκες της θραύσης του υλικού ήταν ο σιαγονωτός σπαστήρας (Σχήμα 2.1) [5].



Σχήμα 2.1: Σχηματική διάταξη σιαγονωτού σπαστήρα απλού βραχίονα (Σταμπολιάδης, 2008).

### 2.1.2 Λειοτρίβηση

Η λειοτρίβηση διενεργείται εντός μηχανών, όπως είναι ο ραβδόμυλος και ο σφαιρόμυλος που στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Λειοτριβούν το μετάλλευμα δια πτώσεως και κύλισης των μέσων λειοτρίβησης που περιέχουν. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό κέλυφος που στηρίζεται στα δύο άκρα και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Μέσα στο κέλυφος υπάρχει ένα μόνιμο φορτίο από μεταλλικές ράβδους ή σφαίρες ή και κροκάλες, που βρίσκονται σε συνεχή κίνηση λόγω της περιστροφής του κελύφους του μύλου.

Κατά την περιστροφή του μύλου οι μεταλλικές ράβδοι ή τα άλλα μέσα λειοτρίβησης είτε ανυψώνονται μέχρι που πολλές από αυτές αρχίζουν να κυλούνται πάνω στις άλλες, είτε ανυψώνονται περισσότερο μέχρι του σημείου που πέφτουν ελεύθερα προς τα κάτω και κατακρημνίζονται ακολουθώντας μια παραβολική τροχιά (Σχήμα 2.2α). Η πτώση και το κατακρύλισμα των ράβδων ή των σφαιρών λειοτριβεί το μετάλλευμα που συνυπάρχει με αυτές μέσα στο μύλο. Οι κυριότερες δυνάμεις που ασκούνται στους κόκκους του μεταλλεύματος είναι οι δυνάμεις κρούσης, λόγω της ελεύθερης πτώσης των ράβδων και τριβής, λόγω της κύλισης των ράβδων μεταξύ τους.

Η ανύψωση μιας ράβδου παρασυρόμενης από την περιστροφική κίνηση του μύλου εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής. Η δύναμη που κρατάει τη σφαίρα επί του τυμπάνου είναι η φυγόκεντρος με διεύθυνση που περνάει από το κέντρο του τυμπάνου και της ράβδου και φορά προς τα έξω (Σχήμα 2.2β).

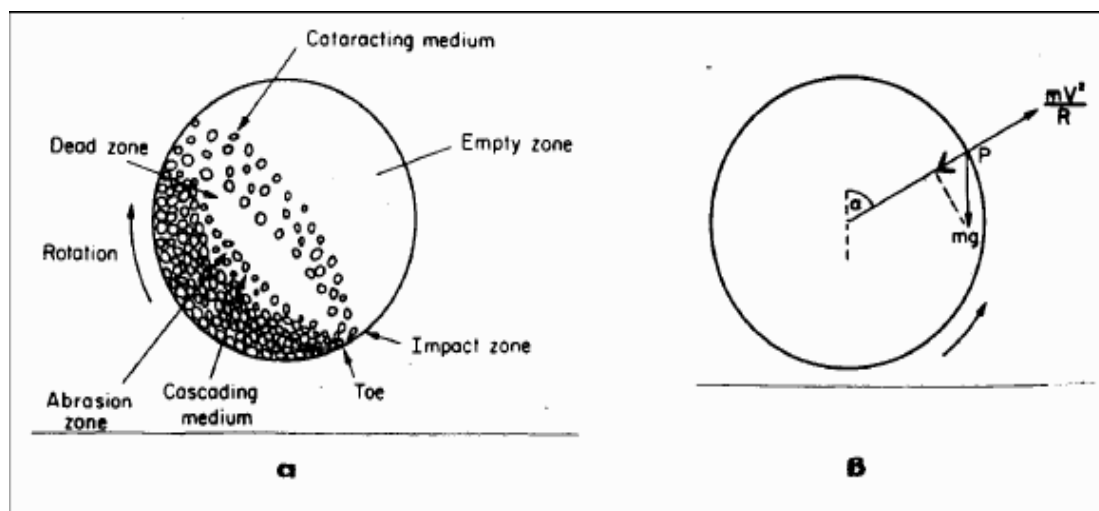
Το υψηλότερο σημείο στο οποίο μπορεί να φτάσει μία ράβδος κατά την περιστροφή του μύλου είναι η κορυφή του κελύφους, όπου η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής  $N_c$  δίνεται από τη Σχέση (2.1):

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \text{ (rpm)} \quad (2.1)$$



όπου το  $D$  σε  $m$ . Για συχνότητες μεγαλύτερες ή ίσες της  $N_c$  (γρήγορη περιστροφή) οι ράβδοι δεν πέφτουν και παραμένουν συνεχώς κολλημένοι στο κέλυφος του μύλου, οπότε δε γίνεται λειοτρίβηση μέσα στο μύλο και το κέλυφος φθείρεται. Συνήθως οι μύλοι περιστρέφονται με συχνότητα 60-80% της κρίσιμης συχνότητας  $N_c$ .

Σε μικρές συχνότητες περιστροφής δεν έχουμε ελεύθερη πτώση των ράβδων ή των σφαιρών του μύλου και απλά κυλινδρικοί η μία πάνω στην άλλη. Η κίνηση αυτή δεν είναι αποδοτική και δημιουργεί πολλά ψιλά. Σε κανονική λειτουργία του μύλου υπάρχει πτώση των μέσων λειοτρίβησης που δημιουργεί κρούσεις και κατάτμηση του μεταλλεύματος [5].



Σχήμα 2.2: α) Κίνηση φορτίου περιστρεφόμενου μύλου.

β) Δυνάμεις επί των μέσων λειοτρίβησης. (Σταμπολιάδης, 2008).

### 2.1.3 Μαγνητικός διαχωρισμός

Ο μαγνητικός διαχωρισμός είναι η μέθοδος εμπλουτισμού που εκμεταλλεύεται τη διαφορά στις μαγνητικές ιδιότητες των ορυκτών. Εφαρμόζεται για την ανάκτηση χρήσιμων μαγνητικών ορυκτών από τα στείρα μη μαγνητικά. Ο μαγνητικός διαχωρισμός επιτυγχάνεται με έλξη των μαγνητικών τεμαχίων από το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη και συγχρόνως την πρακτικά ανεπηρέαστη διέλευση των μη μαγνητικών διαμέσων του πεδίου αυτού. Τα υλικά διακρίνονται, ανάλογα με τη συμπεριφορά τους σε ένα μαγνητικό πεδίο, στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Σιδηρομαγνητικά:** η δύναμη έλξης αυτών των υλικών από τα μαγνητικά πεδία είναι πολύ μεγάλη. Είναι πολύ επιδεκτικά στις ελκτικές δυνάμεις και πολλά από αυτά παραμένουν μαγνητισμένα, όταν απομακρύνονται από το μαγνητικό πεδίο. Εμπλουτίζονται εύκολα με μαγνητικούς διαχωριστές χαμηλής έντασης.
- **Παραμαγνητικά:** είναι υλικά που έλκονται από τις γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου και οδεύουν προς τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου αυξάνει. Μπορούν να εμπλουτιστούν με μαγνητικούς διαχωριστές υψηλής έντασης.
- **Διαμαγνητικά:** είναι 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 πρακτικά δεν επηρεάζονται από το μαγνητικό διαχωρισμό [6].

Ο σίδηρος και το νικέλιο συγκαταλέγονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Μαγνητική συμπεριφορά στο μέταλλομά μας εμφανίζουν τα ορυκτά που περιέχουν σίδηρο,

όπως ο αιματίτης ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) και ο μαγνητίτης ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Στα μη μαγνητικά συγκαταλέγονται ο σερπεντίνης ( $\text{Mg}_6(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ), ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ) και ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ). Ωστόσο λόγω της μερικής αντικατάστασης του Mg με Fe ( $(\text{Mg,Fe})_6(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ), ο σερπεντίνης μπορεί να καταταχθεί στα σιδηρομαγνητικά υλικά.

Οι συσκευές στις οποίες πραγματοποιήθηκε ο μαγνητικός διαχωρισμός στην παρούσα εργασία είναι οι εξής:

- Ο ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής (Perm-Roll) (Σχήμα 2.3, 2.4). Πρόκειται για ένα μαγνητικό τύμπανο στο οποίο έχει προσαρτηθεί μία μεταφορική ταινία. Το υλικό τοποθετείται στο δονούμενο τροφοδότη, στον οποίο ρυθμίζεται η ένταση της δόνησης, και αυτός με τη δόνηση τροφοδοτεί τη μεταφορική ταινία με μονό στρώμα υλικού. Το υλικό που βρίσκεται στη μεταφορική ταινία διαχωρίζεται από το μαγνητικό τύμπανο.
- Ο ξηρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης (High Intensity Induced Roll Magnetic Separator MIIH της Carpco) (Σχήμα 2.5). Πρόκειται για ένα μαγνήτη ο οποίος χρησιμοποιεί ηλεκτρικό ρεύμα για να παράγει μαγνητικό πεδίο υψηλής έντασης. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται στον επαγωγικό μαγνήτη σε σχέση με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τη πηγή φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Το Σχήμα 2.6 πρόκυψε από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο. Ο επαγωγικός μαγνήτης έχει την δυνατότητα να μεταβάλλει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και να μετράται η αντίστοιχη ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται. Από το Σχήμα 2.6 παρατηρείται ότι από τα 2,5 Amperes όσο και να αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος η ένταση του μαγνητικού πεδίου δε μεταβάλλεται, παραμένει σταθερή. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου καθορίζει την καθαρότητα του συμπυκνώματος ή την ανάκτηση σε μέταλλο. Το ποσοστό του μαγνητικού συστατικού καθορίζει τη μαγνητική συμπεριφορά του ενδιαμέσου κλάσματος. Η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής μαγνητικού τυμπάνου δίνεται, και για τις δύο περιπτώσεις μαγνητών, από τη Σχέση (3.2):

$$Nc = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \text{ (Hertz)} \quad (2.2)$$

όπου Nc: κρίσιμη ταχύτητα (rpm)

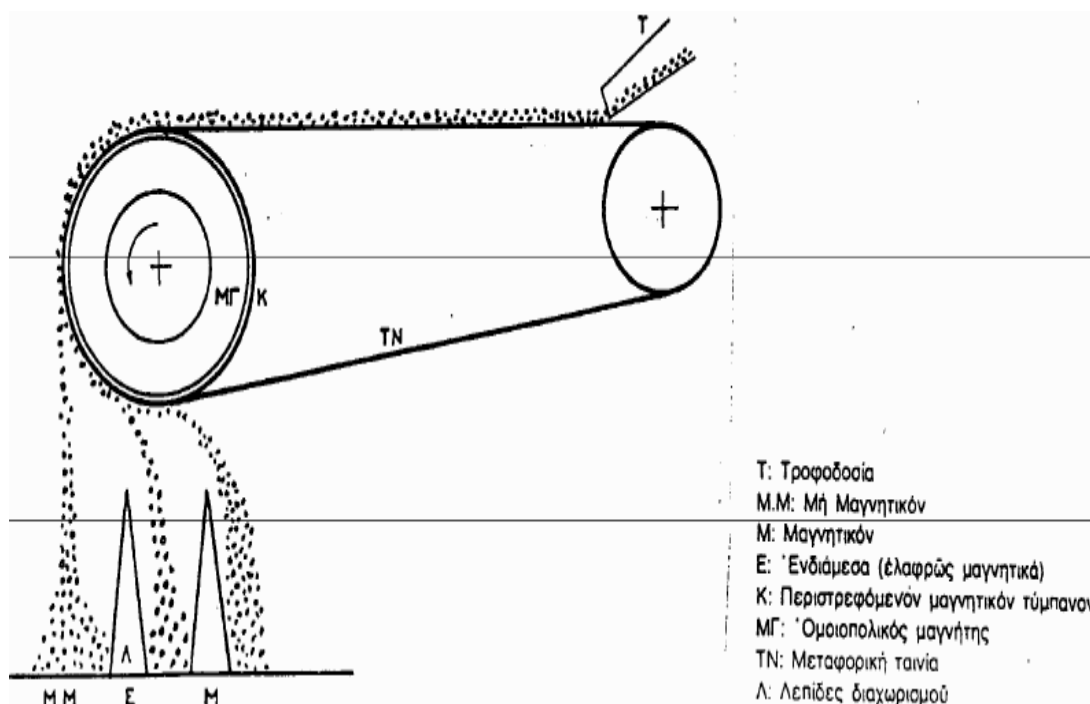
g: επιτάχυνση της βαρύτητας ( $\text{m/s}^2$ )

R: ακτίνα τυμπάνου (m).

- Ο υγρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής κλίσης (Σχήμα 2.7). Σε αυτό το είδος μαγνητών τοποθετείται ένα μέσο διαχωρισμού, το οποίο μπορεί να είναι μία μήτρα που περιέχει σιδερένιες μπίλιες ή ένα πλέγμα από σιδερένια σύρματα παράλληλα μεταξύ τους, μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ηλεκτρικό ρεύμα. Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου συγκλίνουν προς τις επαφές των μέσων διαχωρισμού και στην επιφάνειά τους δημιουργούνται μεγάλες κλίσεις του πεδίου με αποτέλεσμα την αύξηση της δύναμης έλξης των μαγνητικών κόκκων πάνω σε αυτά. Η τροφοδοσία του μαγνήτη γίνεται με μορφή πολυφού και σε μικρές δόσεις για να αποφευχθεί το φράξιμο των πόρων. Η απομάκρυνση του υλικού γίνεται σε δύο στάδια.

Αρχικά με έκπλυση με νερό του μέσου διαχωρισμού, και ενώ ο μαγνήτης είναι σε λειτουργία, απομακρύνεται το μη μαγνητικό προϊόν και συγκεντρώνεται ο πολφός από το κάτω μέρος του μέσου διαχωρισμού σε σκεύος συλλογής. Στη συνέχεια και αφού έχει τεθεί εκτός λειτουργίας ο μαγνήτης γίνεται έκπλυση, με νερό, του μέσου διαχωρισμού για να συλλεχθεί και το μαγνητικό

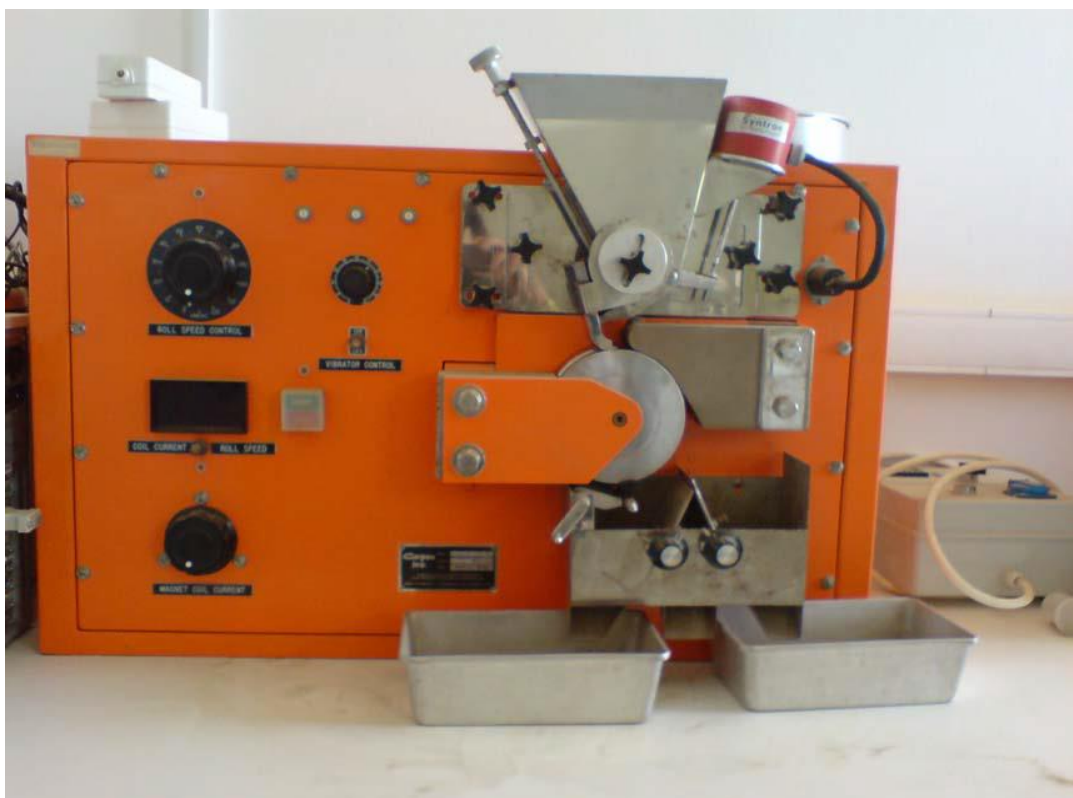
προϊόν. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Από το Σχήμα 2.8 να παρατηρείται ότι από τα 4 μέχρι τα 6.5 Amperes η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται λιγότερο σε σχέση με την περιοχή 0 έως 4 Amperes. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ως μέσο διαχωρισμού μπίλιες μεσαίου μεγέθους.



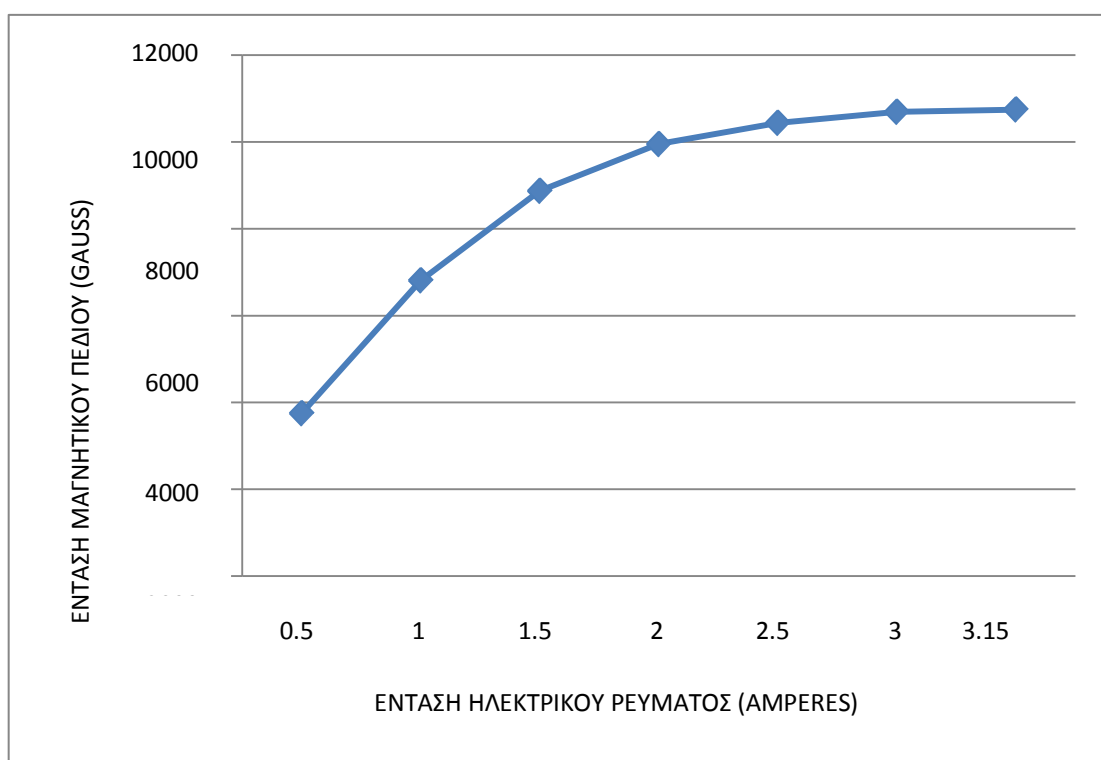
Σχήμα 2.3: Ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής (Σταμπολιάδης, 2008)



Σχήμα 2.4: Ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής του εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων.



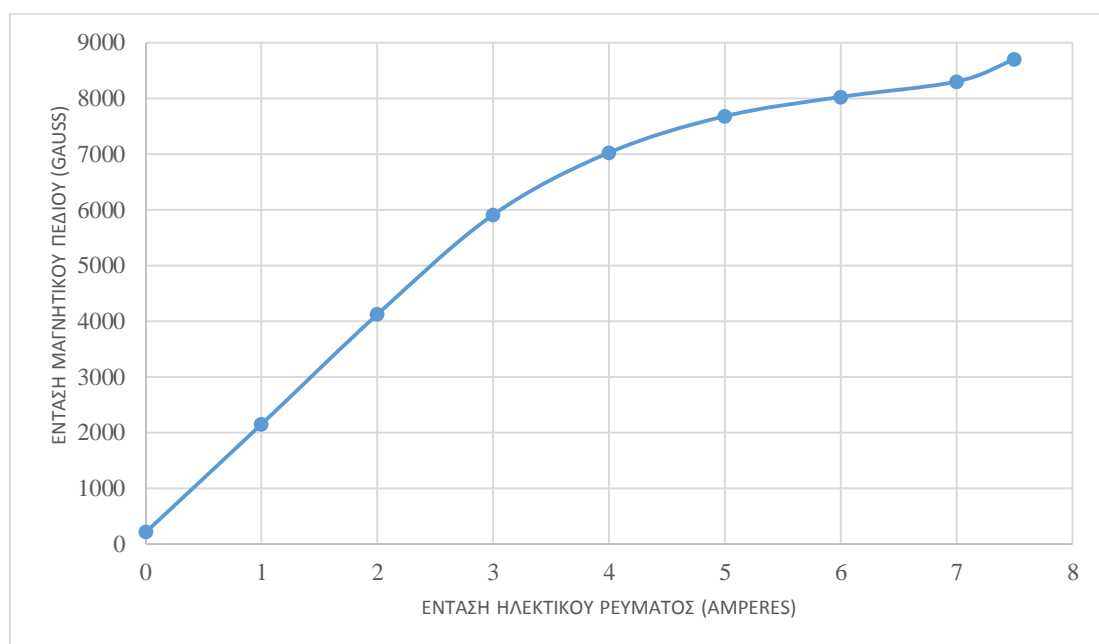
Σχήμα 2.5: Ξηρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης (High Intensity Induced Roll Magnetic Separator MIH της Carpco) του εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων.



Σχήμα 2.6: Ένταση μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του ηλεκτρικού ρεύματος για τον ξηρό μαγνητικό διαχωριστή υψηλής έντασης.



Σχήμα 2.7: Υγρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλού πεδίου κλίσης του εργαστήριου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων.



Σχήμα 2.8: Ένταση μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του ηλεκτρικού ρεύματος για τον υγρό μαγνητικό διαχωριστή υψηλής κλίσης.

### 2.1.4 Επίπλευση

Η επίπλευση είναι μια φυσικοχημική μέθοδος εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων, η οποία ανακαλύφθηκε τυχαία και χρησιμοποιείται από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Σήμερα, αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο με την οποία εμπλουτίζεται ο μεγαλύτερος όγκος των παραγόμενων ορυκτών και χρησιμοποιείται σε ευρεία κλίμακα αντικαθιστώντας τις βαρυτομετρικές μεθόδους. Αυτό οφείλεται στην εκλεκτικότητα που παρουσιάζει η επίπλευση στο διαχωρισμό ορυκτών της ίδιας κατηγορίας. Παράλληλα,

έδωσε λύση σε πολλές περιπτώσεις όπου η αποδέσμευση του χρήσιμου ορυκτού γίνεται σε πολύ μικρά μεγέθη, τα οποία οι άλλες μέθοδοι δεν μπορούν να επεξεργαστούν.

Το μέγεθος του, προς επίπλευση, μεταλλεύματος είναι συνήθως μικρότερο των 300μm και κατά κανόνα προέρχεται από υγρή λειοτριβήση της τροφοδοσίας. Άλλη απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου, εκτός από τη λειοτριβήση του μεταλλεύματος, είναι η δημιουργία κατάλληλου πολφού της επίπλευσης. Ο πολφός της επίπλευσης είναι το αιώρημα του λειοτριβημένου μεταλλεύματος με νερό και αποτελεί το μέσον εντός του οποίου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της επίπλευσης. Ο πολφός αυτός εισέρχεται στην κυψέλη (κελί) της επίπλευσης, εντός της οποίας υπάρχει ένας αναδευτήρας, ο οποίος κρατά τα στερεά σε αιώρηση. Με κατάλληλο σχεδιασμό του άξονα και του αναδευτήρα διοχετεύεται στον πολφό ατμοσφαιρικός αέρας υπό μορφή μικρών φυσαλίδων που είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή του φαινομένου. Συνεπώς, ο πολφός της επίπλευσης αποτελεί ένα σύστημα τριών φάσεων (υγρής, στερεάς και αέριας).

Στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η δημιουργία κατάλληλων συνθηκών που έχουν σκοπό να μετατρέψουν τις υδρόφιλες επιφάνειες ορισμένων κόκκων του λειοτριβημένου μεταλλεύματος σε υδρόφοβες. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με τη χημική δράση των αντιδραστηρίων της επίπλευσης. Συνεπώς, η επιλογή των κατάλληλων αντιδραστηρίων συντελεί στον εκλεκτικό χαρακτήρα αυτής της μετατροπής αφού δεν πραγματοποιείται αδιακρίτως σε όλα τα ορυκτά, παρά μόνο σε αυτά που η επιφάνειά τους ευνοεί την απορρόφηση του αντιδραστηρίου.

Οι κόκκοι του ορυκτού, που η επιφάνειά τους έχει καταστεί υδρόφοβη, προσκολλώνται στις φυσαλίδες και ανέρχονται στην επιφάνεια υπό την επίδραση της άνωσης. Η άνοδος στην επιφάνεια οφείλεται στη μείωση του ειδικού βάρους της συνένωσης του κόκκου του ορυκτού με τη φυσαλίδα αέρα κάτω από το ειδικό βάρος του αιωρήματος. Εκεί, δημιουργείται αφρός που περιέχει το επιπλεύσαν ορυκτό και απομακρύνεται με υπερχειλίση ή και με τη βοήθεια κατάλληλων πτερυγίων. Με αυτό τον τρόπο, γίνεται διαχωρισμός των χρήσιμων ορυκτών από τα συνυπάρχοντα άχρηστα που παραμένουν στην κυψέλη. Η λειτουργία της μεθόδου απεικονίζεται παραστατικά στην Σχήμα 2.9.

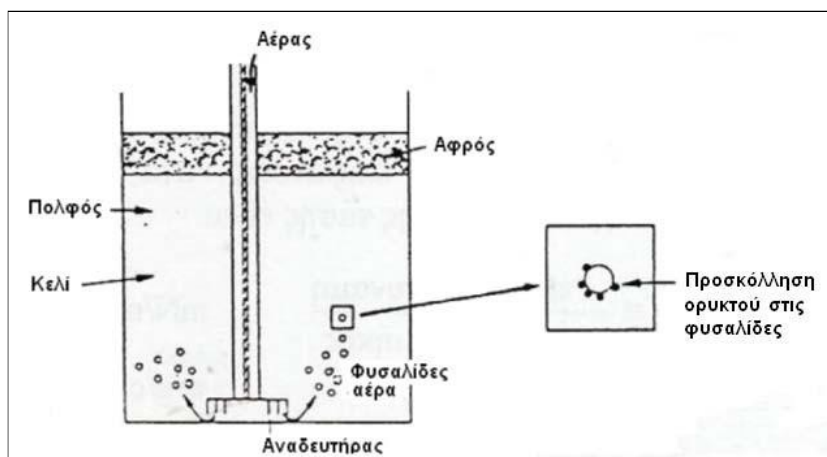
Σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται επίπλευση των άχρηστων ορυκτών και στην κυψέλη παραμένει το χρήσιμο μετάλλευμα. Η επίπλευση αυτή ονομάζεται ανάστροφη, όπως, για παράδειγμα, η επίπλευση των άχρηστων πυριτικών από το μετάλλευμα του λευκολίθου.

Για τον έλεγχο της μεθόδου της επίπλευσης απαιτείται η γνώση του μηχανισμού με τον οποίο οι επιφάνειες των διαφόρων ορυκτών γίνονται υδρόφοβες, ώστε να προσκολλώνται στις φυσαλίδες και να διαχωρίζονται από τα υπόλοιπα ορυκτά που η επιφάνειά τους παραμένει υδρόφιλη.

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες αντιδραστηρίων επίπλευσης:

1. Συλλέκτες: Πρόκειται για επιφανειακώς ενεργές ουσίες, οι οποίες μετατρέπουν σε υδρόφοβες τις επιφάνειες των ορυκτών που θέλουμε να επιπλεύσουν.
2. Αφριστικά αντιδραστήρια: Πρόκειται για επιφανειακώς ενεργές ουσίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται προκειμένου: α) να βοηθήσουν στη δημιουργία αφρού, β) να διατηρηθούν οι φυσαλίδες και να μη σκάσουν μόλις ανέβουν στην επιφάνεια του πολφού και γ) να συγκρατείται καλύτερα το μετάλλευμα από τις φυσαλίδες.
3. Ρυθμιστικά αντιδραστήρια: Πρόκειται για ουσίες οι οποίες αποσκοπούν στην καλύτερη επίπλευση, χρησιμοποιούμενες για διάφορους λόγους, ανά-

λογα με τις ιδιότητες τους (ρύθμιση του pH, ενίσχυση υδροφοβίας, διατήρηση υδροφιλίας κλπ) [6,7].

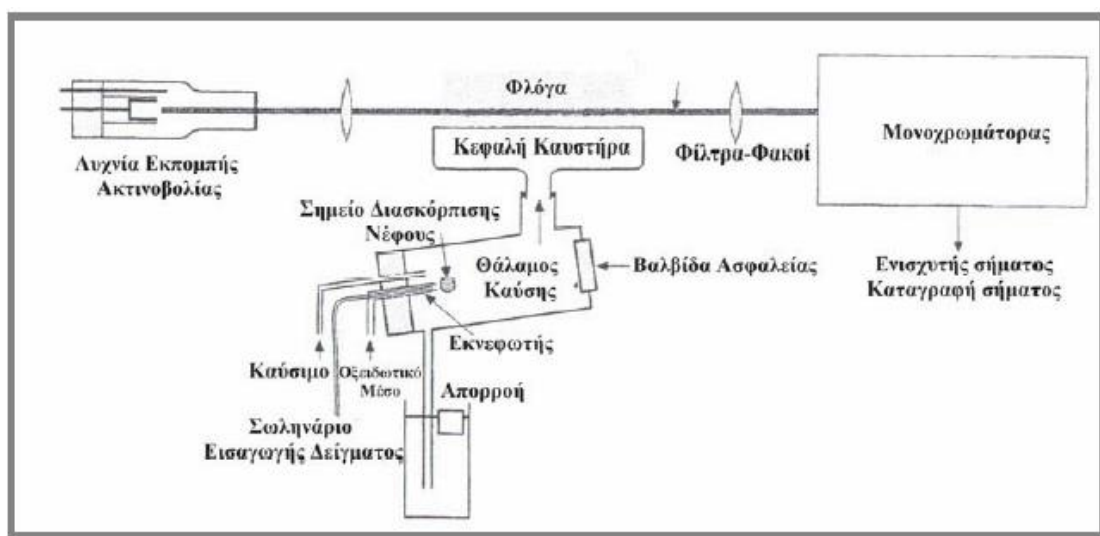


Σχήμα 2.9: Κελί επίπλευσης (Σταμπολιάδης, 2008).

## 2.2 Μέθοδοι Ελέγχου Ποιότητας

### 2.2.1 Χημικές αναλύσεις

Η φασματομετρία ατομικής απορρόφησης συγκαταλέγεται στις οπτικές μεθόδους ανάλυσης και το μοντέλο του εργαστηρίου είναι Elmer A Analyst 100 [b]. Η αρχή της μεθόδου περιλαμβάνει τη μέτρηση της απορροφημένης ακτινοβολίας από άτομα στη θεμελιώδη κατάσταση για το στοιχείο που εξετάζεται. Η διάταξη της μεθόδου περιλαμβάνει μία πηγή ακτινοβολίας, ένα κελί ατομοποίησης του δείγματος και ένα ανιχνευτή μονοχρώματα (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10: Διάταξη φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης (Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας, 1993).



Η πηγή της ακτινοβολίας αποτελείται συνήθως από μία κυλινδρική καθοδική λυχνία. Το εσωτερικό του κυλίνδρου αποτελείται από το στοιχείο προς ανίχνευση. Εφαρμόζοντας τάση στη λυχνία ιονίζουμε το αέριο που υπάρχει στο εσωτερικό της. Τα κατιόντα του αερίου κατευθύνονται προς την κάθοδο της λυχνίας όπου συγκρούονται με τα άτομα του προς ανίχνευση στοιχείου. Τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα τα άτομα από την κάθοδο να απομακρύνονται ιονισμένα και τελικά να εκπέμπουν ακτινοβολία (μήκους κύματος από ορατό έως υπεριώδες) η οποία είναι χαρακτηριστική για το στοιχείο που ανιχνεύουμε. Για κάθε στοιχείο που ανιχνεύουμε συνήθως απαιτείται διαφορετική λυχνία. Έχουν κατασκευαστεί λυχνίες με τις οποίες μπορούν να ανιχνευτούν περισσότερα από ένα διαφορετικά στοιχεία.

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη λυχνία είναι η ακτινοβολία που απαιτείται για να ιονίσει τα άτομα που παράγονται στο καυστήρα (ατομοποίηση). Τα άτομα απορροφούν την ακτινοβολία που απαιτείται για τη μετάπτωση από μία θεμελιώδη κατάσταση σε μία διεγερμένη. Η απορρόφηση είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των ατόμων του προς ανίχνευση στοιχείου και ακολουθεί το νόμο του Lambert-Beer Σχέση 2.3.

$$A = \log \frac{P_o}{P} = -\log T = \varepsilon * b * c \quad (2.3)$$

Όπου,

**A:** απορρόφηση της ακτινοβολίας από το δείγμα

**Po:** ισχύς της εξερχόμενης ακτινοβολίας

**T:** διαπερατότητα

**b:** απόσταση που διανύει η δέσμη της ακτινοβολίας

**ε:** μοριακή απορροφητικότητα

**c:** συγκέντρωση

Το ορατό φάσμα του περιβάλλοντος απομονώνεται ηλεκτρονικά. Η λυχνία εκπέμπει ακτινοβολία με ορισμένη συχνότητα (50-60 Hz) με την οποία είναι συγχρονισμένος ο ανιχνευτής ώστε να απορρίπτει τις ακτινοβολίες που δεν είναι στην ίδια συχνότητα και προέρχονται από το περιβάλλον. Το δείγμα περνάει μέσω του εκνεφωτή στο θάλαμο καύσης μαζί με το καύσιμο (ακετυλένιο) και το οξειδωτικό μέσο (αέρας ή N<sub>2</sub>O). Οι μεγαλύτερες σταγόνες δείγματος (πάνω από 5μm) πέφτουν στην απορροή, ενώ για την καλύτερη μέτρηση χρειάζονται το δυνατόν λεπτότερες σταγόνες.

Τη ροή του καυσίμου και του οξειδωτικού τη ρυθμίζουμε ανάλογα το στοιχείο που ανιχνεύουμε. Μερικά στοιχεία παρουσιάζουν καλύτερη ευαισθησία στην ανίχνευση όταν η φλόγα είναι οξειδωτική και εμφανίζεται με μπλε πυρήνα, ενώ άλλα στοιχεία απαιτούν αναγωγικές συνθήκες με τη φλόγα να παρουσιάζει λευκό φωτεινό πυρήνα. Το ύψος του καυστήρα είναι κρίσιμο και ρυθμίζεται ανιχνεύοντας ταυτόχρονα την απορρόφηση.

Για τα στοιχεία που χρειάζεται μεγαλύτερη θερμοκρασία φλόγας (Si, Al, Sr, κ.α.) χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό μέσο το πρωτοξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O). Με τη χρήση μίγματος ακετυλενίου-N<sub>2</sub>O χρησιμοποιείται καυστήρας με μικρότερο άνοιγμα (50 mm) σε σύγκριση με αυτόν που χρησιμοποιείται στο μίγμα του ακετυλενίου-αέρα (100 mm). Τα παραπάνω συμβαίνουν διότι το μίγμα ακετυλενίου-N<sub>2</sub>O παρουσιάζει μεγάλη ταχύτητα ανάφλεξης και ο μικρότερος καυστήρας εμποδίζει περιπτώσεις ανάφλεξης προς το εσωτερικό του θαλάμου καύσης (flashback).

Η υψηλή θερμοκρασία της φλόγας ιδιαίτερα όταν γίνεται χρήση του πρωτοξειδίου του αζώτου μπορεί να προκαλεί ιονισμό των ατόμων και τελικά οδηγεί σε υποε-



κτίμηση της ποσότητας του στοιχείου που μετράτε. Για τον έλεγχο του ιονισμού προσθέτουμε τον κατάλληλο ιονιστή ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cs^+$  κ.α.). Ο ιονιστής πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να έχει μικρότερο δυναμικό ιονισμού από το στοιχείο προς ανάλυση. Επιπλέον τα διαλύματα τα οποία εξετάζονται πρέπει να έχουν τα ίδια φυσικά χαρακτηριστικά με τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή της καμπύλης αναφοράς.

Τα παραπάνω είναι απαραίτητα ώστε οι αλληλοεπιδράσεις άλλων ιόντων να είναι ίδιες και στα προς εξέταση διαλύματα αλλά και στα πρότυπα διαλύματα. Ο έλεγχος των αλληλοεπιδράσεων μπορεί να γίνει είτε διαλέγοντας πρότυπα που μοιάζουν στις φυσικές ιδιότητες με το προς εξέταση δείγμα, ή αραιώνοντας τα δείγματά ή προσθέτοντας άλλα πρότυπα ώστε να πλησιάσουμε στις φυσικές ιδιότητες του δείγματος που εξετάζεται [8].

Η χημική ανάλυση του δείγματος παρέχει τη δυνατότητα της αναγνώρισης των οξειδίων που παρέχονται μέσα σε αυτό. Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη μέθοδο ατομικής απορρόφησης.

Ο τρόπος διεξαγωγής των αναλύσεων έγινε σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- Λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από το υλικό προς ανάλυση.
- Λειοτριβήση δείγματος σε μέγεθος  $-0.075\text{mm}$  στη συσκευή του πλανητικού μύλου.
- Λήψη  $0.1\text{g}$  δείγματος, τοποθέτησή του σε ποτήρι ζέσεως  $250\text{ml}$ .
- Διαλυτοποίηση δείγματος με προσθήκη στη φιάλη  $10\text{ ml}$  πυκνού  $\text{HNO}_3$ ,  $15\text{ ml}$  πυκνού  $\text{H}_2\text{SO}_4$  +  $15\text{ ml}$   $\text{H}_2\text{O}$  και  $20\text{ ml}$  πυκνού  $\text{HCl}$  και θέρμανσή του σε θερμαντική πλάκα μέχρι να εκλυθούν λευκοί ατμοί.
- Διήθηση σε ογκομετρική φιάλη των  $250\text{ml}$ .
- Κατάλληλη αραιώση και μέτρηση στην ατομική απορρόφηση των στοιχείων  $\text{Ni}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Co}$  συγκρίνοντας τα με πρότυπα των αντίστοιχων στοιχείων.
- Ξήρανση των αδιάλυτων του ηθμού στους  $50^\circ\text{C}$  για μία μέρα και λήψη του βάρους τους. Με συντελεστή περίπου  $0.85$  βρίσκεται αρκετά καλά το περιεχόμενο σε πυρίτιο ( $\text{SiO}_2$ ).

### 2.2.2 Περιθλασιμετρία ακτίνων-X

Με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων X είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση των γωνιών και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων X που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής σκόνης.

Το δείγμα βρίσκεται σε ένα μεταλλικό ή πλαστικό πλακίδιο με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζει επίπεδη επιφάνεια. Το πλακίδιο αυτό τοποθετείται στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου του περιθλασιμέτρου ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων X.

Ταυτόχρονα περιστρέφεται ο απαριθμητής με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και το επίπεδο του δείγματος με τη μισή τιμή της γωνιακής ταχύτητας του απαριθμητή. Η ταυτόχρονη μετατόπιση του απαριθμητή και η περιστροφή του δείγματος έχει σαν αποτέλεσμα ο πρώτος να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος με το 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, που προέρχονται από τη λυχνία.

Το φαινόμενο της περίθλασης ακτίνων X διέπεται από το νόμο του Bragg Σχέση 3.4:

$$n * \lambda = 2 * d * \sin\theta \quad (2.4)$$

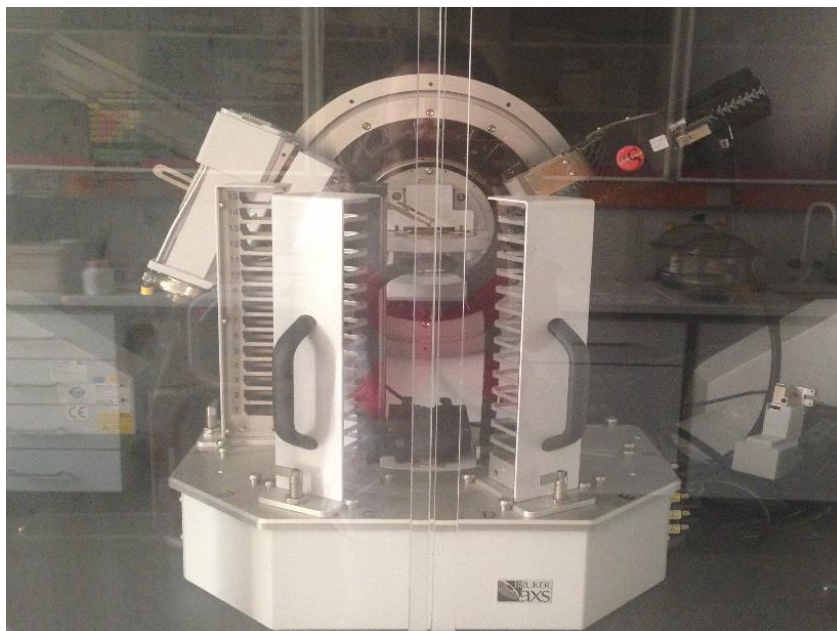
όπου,  $n$ : τάξη ανάκλασης.

$\lambda$ : μήκος κύματος.

$\theta$ : γωνία πρόσπτωσης.

$d$ : πλεγματική απόσταση των επιπέδων ανάκλασης του κρυστάλλου.

Στην περιθλασιμετρία ακτίνων X, το ζητούμενο μέγεθος είναι το  $d$ , γνωστό μέγεθος το  $\lambda$  και μετρούμενο μέγεθος το  $2\theta$  [9].



Σχήμα 2.11: Περιθλασίμετρο ακτίνων-X του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας.

Η προετοιμασία δειγμάτων γίνεται ως εξής:

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

### 2.2.3 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο, που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο, μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, ώστε να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια λόγω της κυματικής τους φύσης υπόκεινται σε εστίαση, όπως και τα φωτεινά κύματα, αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια (π.χ. κόκκος υλικού). Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με την οποία αλληλοεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες-X. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Έτσι, το SEM δίνει πληροφορίες, που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφάνειας. Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων-X, που δημιουργούνται στην επιφάνεια από

την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού. Επομένως, το SEM χρησιμοποιείται για την εξέταση μικροδομής στερεών δειγμάτων και για να δίνει εικόνα υψηλού βαθμού διείσδυσης.

Η λειτουργία του SEM στηρίζεται στις αλληλεπιδράσεις του προς εξέταση δείγματος και της προσπίπτουσας σε αυτό δέσμης ηλεκτρονίων. Οι βασικές διατάξεις που υπάρχουν στο μικροσκόπιο είναι το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το σύστημα πληροφοριών και τέλος το σύστημα κενού [g].

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.

## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

#### 3.1 Κοκκομετρία και χημικές αναλύσεις

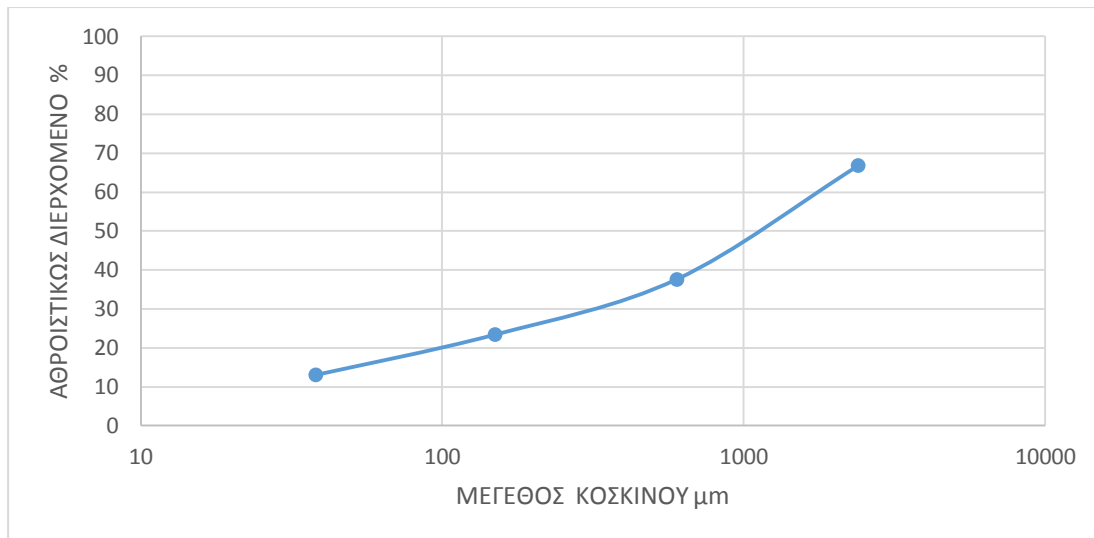
Το αρχικό δείγμα, βάρους 14 kg, ομογενοποιήθηκε και διαιρέθηκε με το διαχωριστή Jones. Στην συνέχεια αντιπροσωπευτικό δείγμα, βάρους 2,9 kg, κοσκινίστηκε. Τα αποτελέσματα με τα επιμέρους βάρη και τις χημικές αναλύσεις παρατίθενται στον Πίνακα 3.1. Από την κοκκομετρική κατανομή παρατηρείται ότι περίπου το 63% του αρχικού δείγματος είναι μεγαλύτερο των 600  $\mu\text{m}$  ενώ παρατηρείται ότι οι χημικές αναλύσεις του Ni είναι υψηλότερες στα χονδρότερα κλάσματα. Η περιεκτικότητα των οξειδίων του σιδήρου στο κοκκομετρικό κλάσμα -38  $\mu\text{m}$  είναι μικρότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα κοκκομετρικά κλάσματα ωστόσο η περιεκτικότητα του οξειδίου του πυριτίου και του ασβεστίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα υπόλοιπα κοκκομετρικά κλάσματα.

Πίνακας 3.1: Κοκκομετρική κατανομή και χημικές αναλύσεις του αρχικού δείγματος.

Κοκκομετρικό κλάσμα $\mu\text{m}$	Βάρος (g)	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %				
			Ni	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	CaO	Co
2400-4000	960.4	33.23	0.69	46.70	17.63	6.85	0.065
600-2400	842.8	29.16	0.69	45.61	18.69	6.41	0.065
150-600	410.2	14.19	0.62	41.12	17.91	5.93	0.065
38-150	299.9	10.38	0.64	48.51	16.46	7.26	0.063
0-38	376.9	13.04	0.61	31.02	24.69	10.30	0.057
Σύνολο	2890.2	100	0.66	43.73	18.78	7.08	0.06

Πίνακας 3.2: Αθροιστική διερχόμενη κατανομή και χημικές αναλύσεις του αρχικού δείγματος.

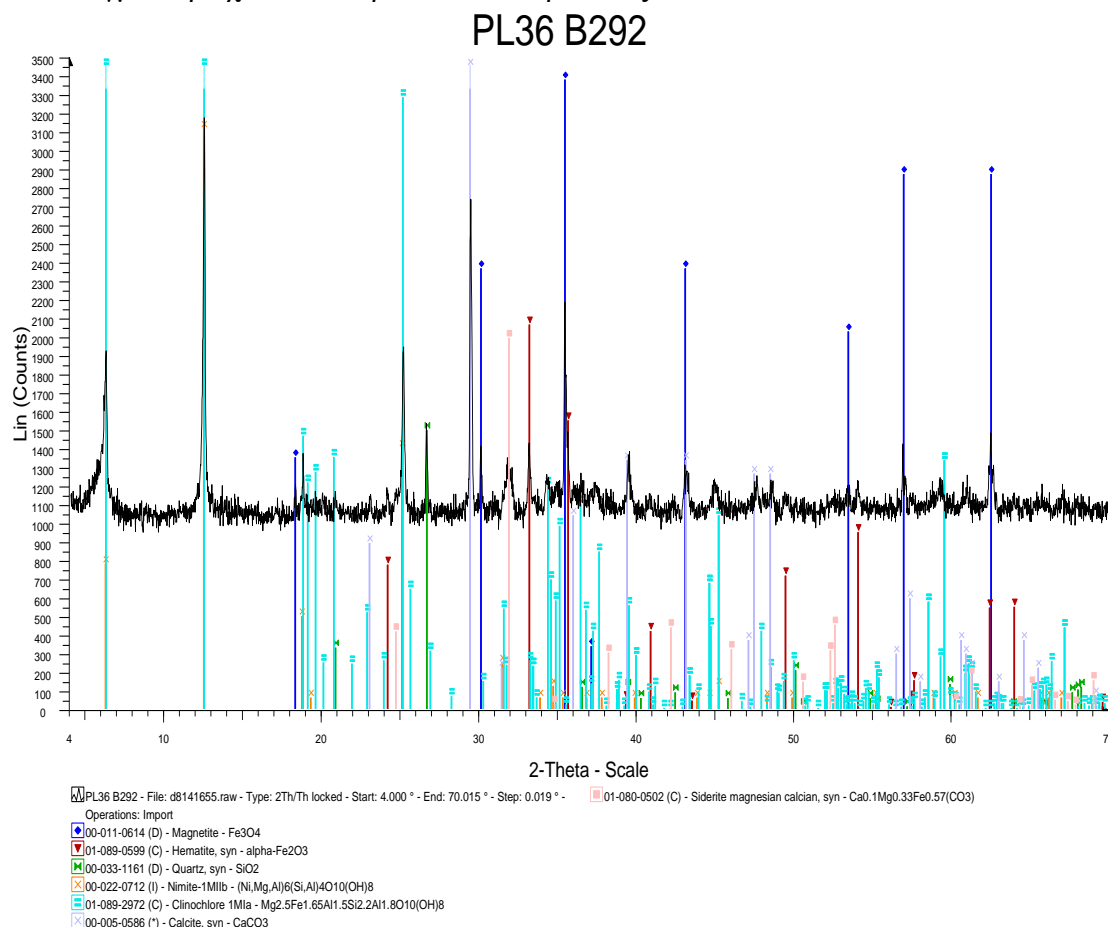
Άνοιγμα βροχής κόςκινου	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %				
		Ni	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	CaO	Co
2400	66.77	0.65	42.26	19.35	7.20	0.06
600	37.61	0.62	39.66	19.86	7.81	0.06
150	23.42	0.62	38.77	21.04	8.95	0.06
38	13.04	0.61	31.02	24.69	10.30	0.06



Σχήμα 3.1: Κατανομή αθροιστικά διερχόμενου βάρους (%) συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων.

### 3.2 Ορυκτολογική και μικροσκοπική ανάλυση δείγματος

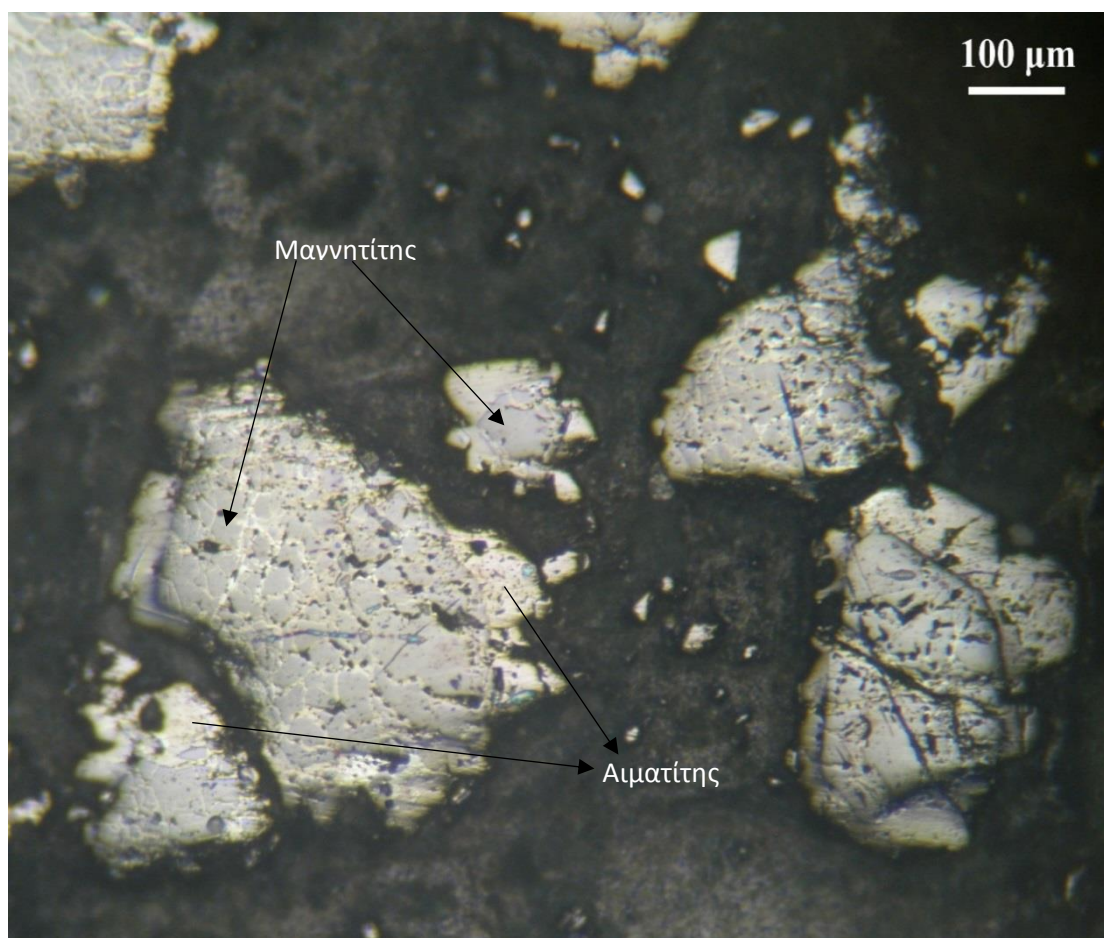
Από το ακτινοδιάγραμμα που ελήφθη με το περιθλασίμετρο (Σχήμα 3.2) προκύπτει ότι στο δείγμα περιέχονται τα ορυκτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.



Σχήμα 3.2: Ακτινοδιάγραμμα αρχικού υλικού.

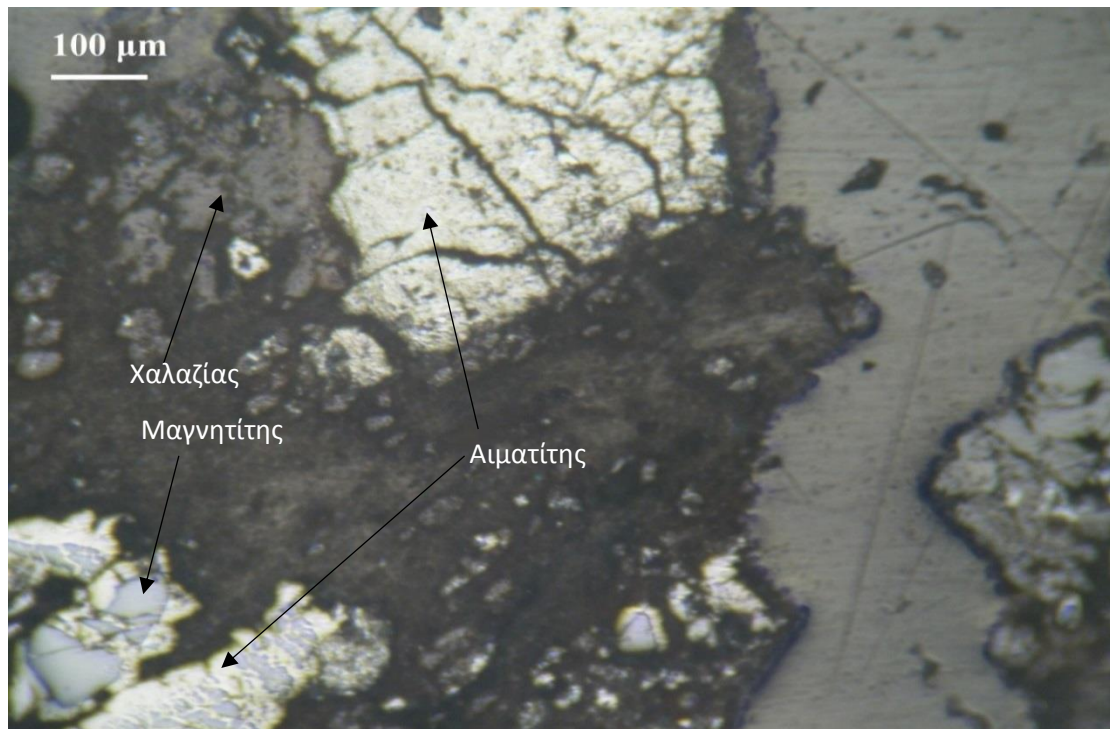
Πίνακας 3.3: Κατάλογος ορυκτών και χημικοί τύποι.

ΟΝΟΜΑ ΟΡΥΚΤΟΥ	ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ
Μαγνητίτης	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Αιματίτης	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Χαλαζίας	$\text{SiO}_2$
Νιμίτης	$(\text{Ni,Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Κλινόχλωρο	$\text{Mg}_{2.5}\text{Fe}_{1.65}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.2}\text{Al}_{1.8}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Ασβεστίτης	$\text{CaCO}_3$
Σιδηρίτης μαγνησιούχος ασβεστιούχος	$\text{Ca}_{0.1}\text{Mg}_{0.33}\text{Fe}_{0.57}(\text{CO}_3)$

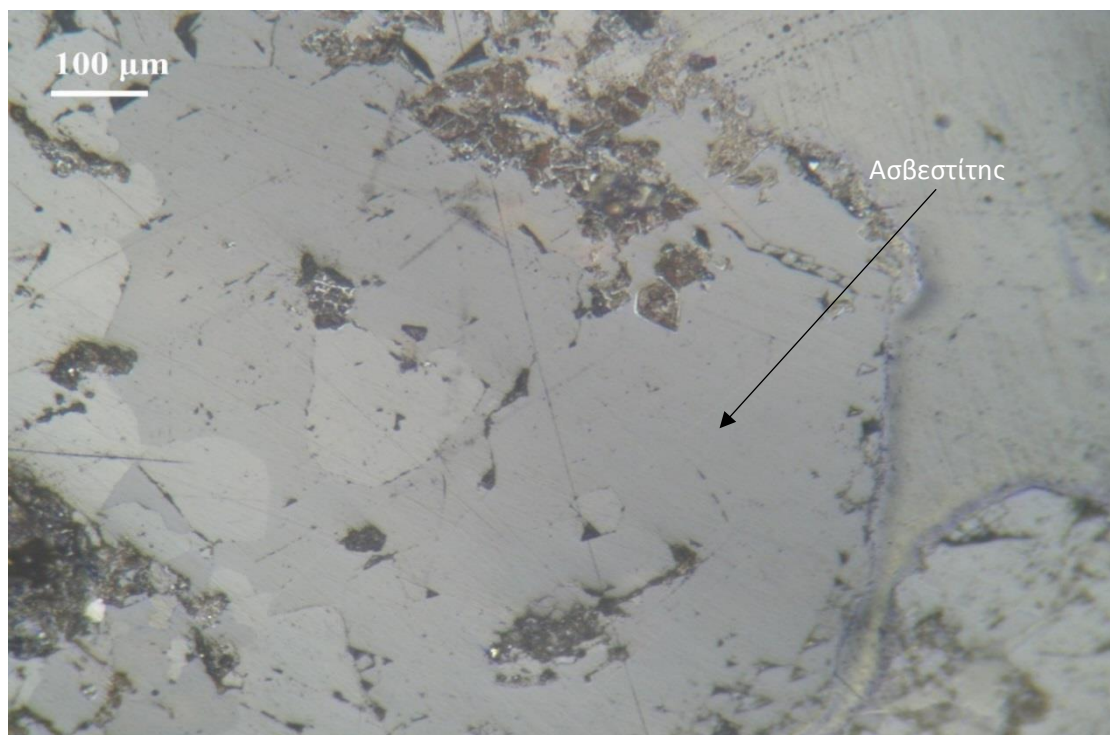


Σχήμα 3.3: Μαγνητικό 1. Κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm. Μη αποδεσμευμένοι κόκκοι μαγνητίτη και αιματίτη μέσα στο χλωριτικό συνδετικό υλικό του μεταλλεύματος.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.





Σχήμα 3.4: Μαγνητικό 2. Κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm. Μη αποδεσμευμένοι κόκκοι συνδετικού υλικού με μη αποδεσμευμένους κόκκους αιματίτη μαγνητίτη και χαλαζία.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.



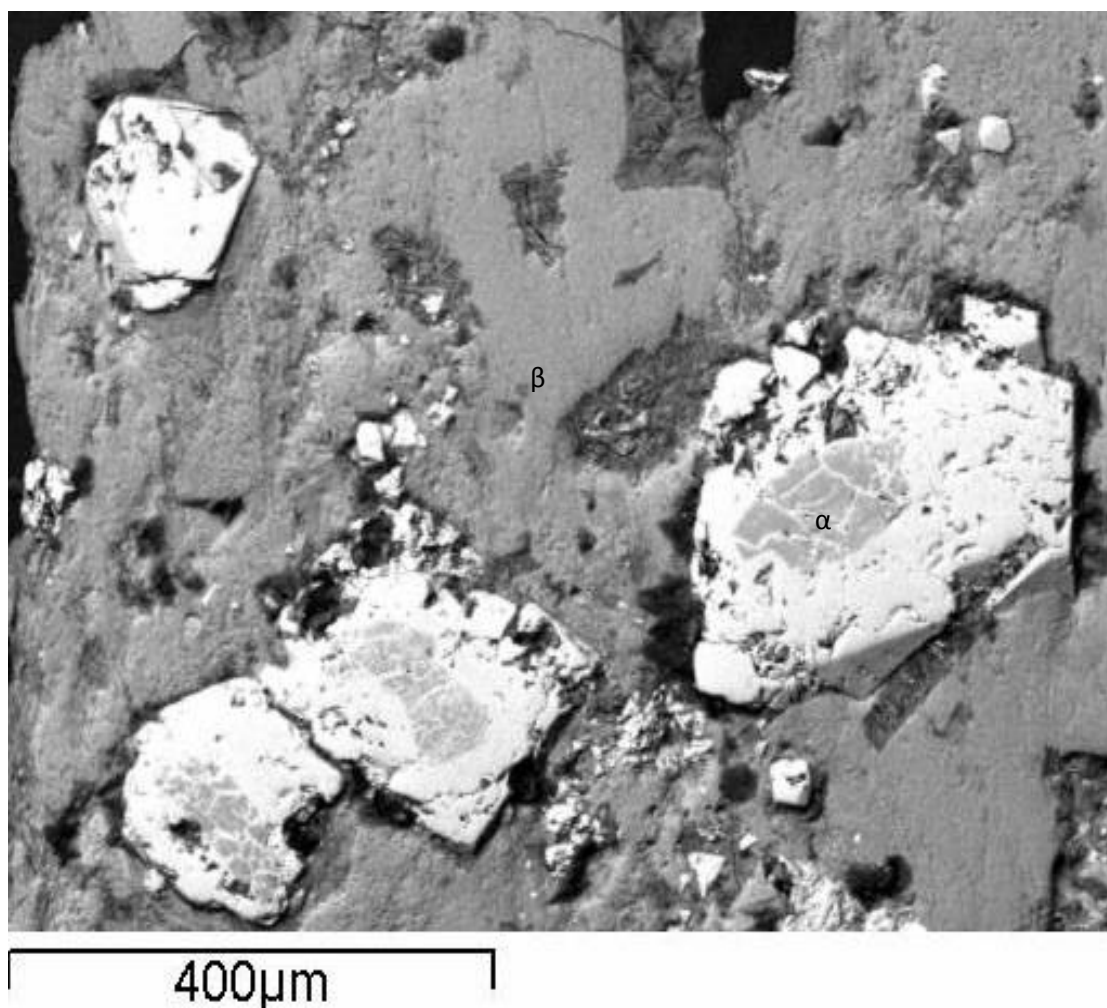
Σχήμα 3.5: Μη Μαγνητικό. Κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm. Κρύσταλλοι ασβεστίτη.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.



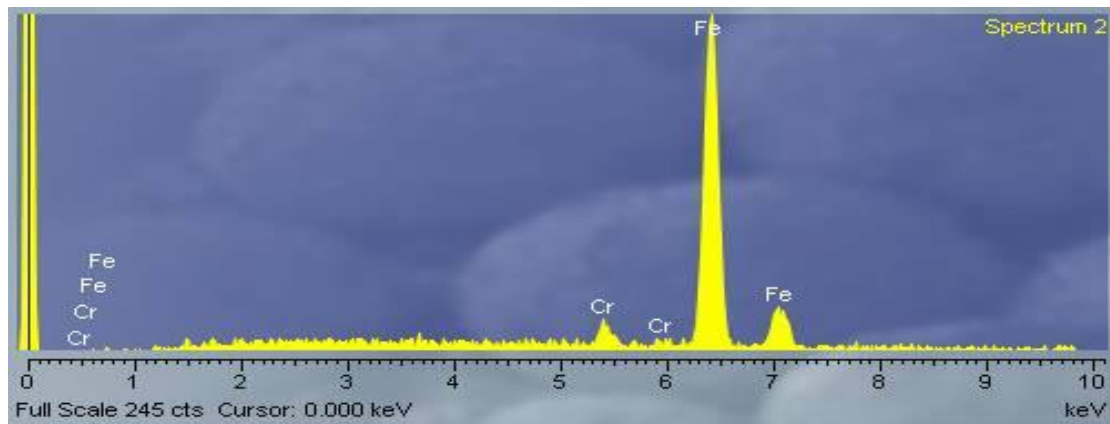
Από τις φωτογραφίες παρατηρείται ότι μέσα στη μάζα - συνδετικό υλικό υπάρχουν κόκκοι μαγνητίτη και αιματίτη. Η αποδέσμευση των κόκκων είναι ικανοποιητική όσον αφορά τους κόκκους μαγνητίτη αιματίτη με αυτούς των ανθρακικών ορυκτών.

### 3.3 Αποτελέσματα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)

Από τη σημειακή ανάλυση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης προέκυψε ότι οι κρύσταλλοι μαγνητίτη και αιματίτη δεν περιέχουν Ni. Το Ni περιέχεται στην συνδετική ύλη (matrix), η οποία είναι νικελιούχος χλωρίτης (νιμίτης). Τέλος η εμφάνιση νικελίου συνοδεύεται με υψηλότερες τιμές στην ανάλυση του μαγνησίου, του αργιλίου και του πυριτίου.

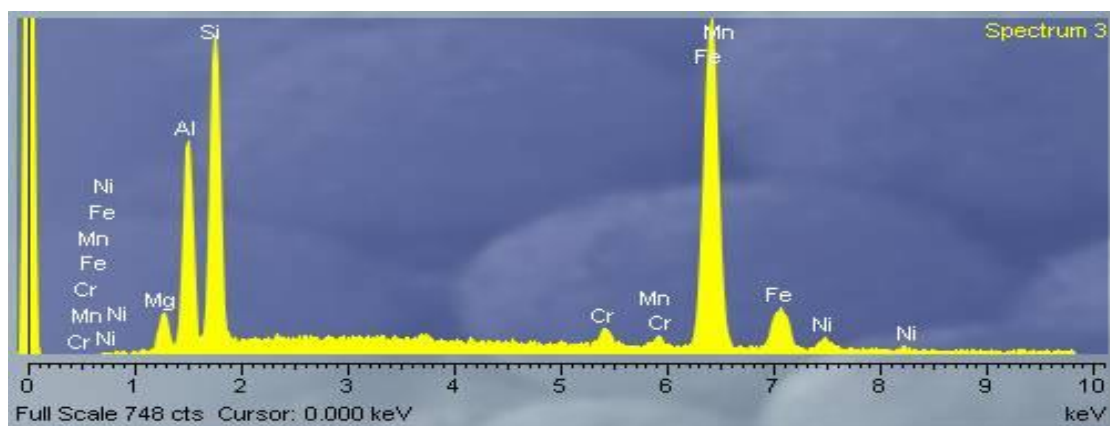


Σχήμα 3.6: Μαγνητικό 1. Κοκκομετρικό κλάσμα 1-4. Κόκκοι αιματίτη με υπολείμματα μαγνητίτη (B) ενσωματωμένα σε ένα συνδετικό υλικό από νικελιούχο χλωρίτη (νιμίτης) (A).



Σχήμα 3.7: Α) Μαγνητικό 1. Κοκκομετρικό κλάσμα 1-4.

Μικροφωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) και σημειακή στοιχειακή ανάλυση (EDS) σιδηρούχου κόκκου (α).



Σχήμα 3.7: Β) Μαγνητικό 1. Κοκκομετρικό κλάσμα 1-4.

Μικροφωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) και σημειακή στοιχειακή ανάλυση (EDS) συνδετικού υλικού (β).

### 3.4 Γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν την ορυκτολογική και μικροσκοπική εξέταση

Από το ακτινοδιάγραμμα και τις φωτογραφίες των στιλπνών τομών παρατηρείται ότι το δείγμα αποτελείται από ορυκτά του σιδήρου (αιματίτη, μαγνητίτη), ασβεστίτη, χαλαζία και χλωρίτη (κλινόχλωρο και νιμίτη). Τα σιδηρούχα ορυκτά είναι εύκολα διαχωρίσιμα από τα υπόλοιπα, δεδομένου ότι είναι αποδεσμευμένα, εάν περάσουν μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο. Ωστόσο εφαρμόζοντας διαφορετικής μαγνητικής έντασης πεδίο λαμβάνεται διαφορετικό προϊόν σε περιεκτικότητα σιδήρου λόγω της διαφορετικής περιεκτικότητας των κόκκων σε σίδηρο. Εξαιτίας αυτής της ιδιότητας επιλέχθηκε το μετάλλευμα να περάσει από ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο για να ανακτηθεί το ισχυρό μαγνητικό προϊόν και στην συνέχεια το απόρριμμα της παραπάνω διαδικασίας να περάσει από ένα ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο για να συλλεχθεί το δεύτερο μαγνητικό προϊόν και το μη μαγνητικό. Από την παραπάνω διαδικασία αναμένεται συλλεχθεί ένα συμπύκνωμα, από το ασθενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο θα αποτελείται κυρίως από μαγνητίτη και μπορεί να διατεθεί ως σιδηρομετάλλευμα εφ όσον η περιεκτικότητα των οξειδίων είναι μεγαλύτερη του 60%, ένα συμπύκνωμα, από το ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το οποίο θα αποτελείται από αιματίτη και χλωρίτη το οποίο θα διατεθεί ως νικελιούχο σιδηρομετάλλευμα εφ όσον η περιεκτικότητα του νικελίου είναι μεγαλύτερη του 1%,

και το μη μαγνητικό προϊόν το οποίο θα αποτελείται από οξείδια του πυριτίου και ανθρακικά.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

### **ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ**

Το δείγμα έσπασε στο σιαγονωτό σπαστήρα σε -4 mm και στη συνέχεια κοσκινίστηκε στα εξής κοκκομετρικά κλάσματα 1-4 mm, 0.2-1 mm, 0.038-0.2 mm, -0.038 mm στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές μαγνητικού εμπλουτισμού.

#### **4.1. Πειραματική διαδικασία μαγνητικού διαχωρισμού και παρουσίαση αποτελεσμάτων**

Ο μαγνητικός διαχωρισμός αποφασίστηκε να εφαρμοστεί διότι το μέταλλευμα περιέχει μαγνητικά ορυκτά τα οποία είναι εύκολα διαχωρίσιμα από τα μη μαγνητικά, χαλαζία, ασβεστίτης. Ωστόσο λόγω της διαφορετικής κοκκομετρίας του μεταλλεύματος και της μαγνητικής επιδεκτικότητας που παρουσιάζουν τα ορυκτά του σιδήρου η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικούς τύπους μαγνητών και με διαφορετική μαγνητική ένταση. Τα επιμέρους βάρη, των κοκκομετρικών κλασμάτων, και οι χημικές αναλύσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Κοκκομετρικά κλάσματα με τις χημικές αναλύσεις και την κατανομή τους.

ΤΡΟΦΗ ΜΑΓΝΗΤΩΝ			ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %										ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
Κοκκομετρι κό κλάσμα mm	Βάρος (g)	% Βάρος	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1-4	4397.7	57.72	0.67	39.67	14.11	7.51	0.061	17.69	7.55	11.98	5.89	6.08	58.12	58.31	54.77	57.23	57.34	53.63	57.23	50.53
0.2-1	1337.7	17.56	0.69	42.33	14.54	6.09	0.065	Δ/Μ	Δ/Μ	12.75	4.78	7.96	18.33	18.93	17.17	14.13	18.48	17.36	14.13	20.13
0.038-0.2	958.8	12.59	0.64	41.28	13.99	7.22	0.064	Δ/Μ	Δ/Μ	12.76	5.67	7.08	12.21	13.23	11.84	12.00	13.05	12.46	12.00	12.84
-0.038	924.2	12.13	0.62	30.86	19.88	10.38	0.056	14.93	6.75	17.59	8.15	9.44	11.35	9.53	16.22	16.63	11.13	16.56	16.63	16.49
<b>Σύνολο</b>	<b>7618</b>	<b>100</b>	<b>0.66</b>	<b>39.27</b>	<b>14.87</b>	<b>7.57</b>	<b>0.06</b>	<b>Δ/Μ</b>	<b>Δ/Μ</b>	<b>12.89</b>	<b>5.95</b>	<b>6.94</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Δ/Μ: Δεν μετρήθηκε.

Από τον Πίνακα 4.1 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για την τροφοδοσία των μαγνητών:

- Το 57% του βάρους του υλικού είναι από 1-4 mm.
- Το νικέλιο παρουσιάζει υψηλότερες συγκεντρώσεις στα χονδρότερα κλάσματα.
- Τα οξείδια του σιδήρου ισοκατανέμονται στα κοκκομετρικά κλάσματα 1-4 mm, 0.2-1 mm, 0.038-0.2 mm και στο κοκκομετρικό κλάσμα -0.038 mm παρουσιάζουν με μικρότερη περιεκτικότητα.
- Το οξείδιο του πυριτίου και το οξείδιο του ασβεστίου ισοκατανέμεται στα κοκκομετρικά κλάσματα 1-4 mm, 0.2-1 mm, 0.038-0.2 mm ενώ στο κοκκομετρικό κλάσμα -0.038 παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα.

#### **4.1.1 Μαγνητικός διαχωρισμός κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm**

##### **4.1.1.1 Διαδικασία διαχωρισμού και παρουσίαση αποτελεσμάτων**

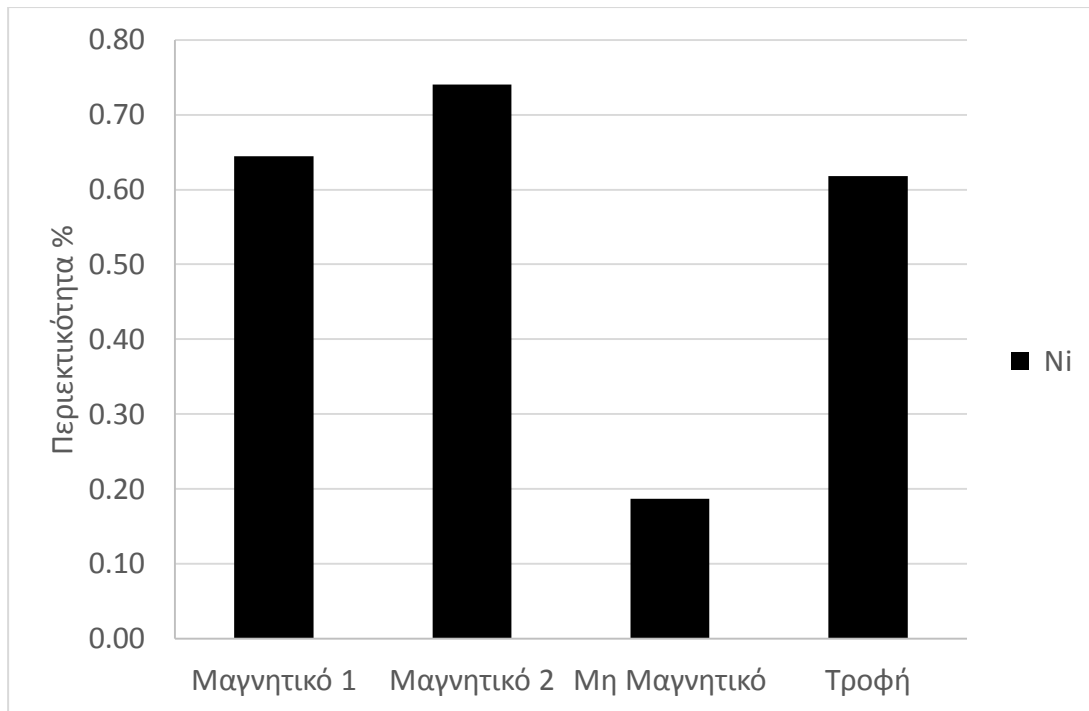
Στο κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm συλλέχθηκαν με το μαγνήτη χειρός το πολύ μαγνητικό κλάσμα (μαγνητικό 1). Στην συνέχεια το μη μαγνητικό προϊόν, του μαγνήτη χειρός χρησιμοποιήθηκε ως τροφή στον ταινιοφόρο μαγνητικό διαχωριστή (Perm-Roll). Πριν ξεκινήσει ο διαχωρισμός ρυθμίστηκε η θέση της λεπίδας, έτσι ώστε να περνάνε οριακά οι μη μαγνητικοί κόκκοι, καθώς επίσης οι στροφές περιστροφής του τυμπάνου και η συχνότητα δόνησης του τροφοδότη, έτσι ώστε να πέφτει μόνο στρώμα κόκκων πάνω στην ταινία του μαγνητικού τυμπάνου. Οι στροφές περιστροφής του τυμπάνου επιλέχθηκε να είναι 120 rpm. Από τη διαδικασία συλλέχθηκε το ενδιάμεσα μαγνητικό (μαγνητικό 2) και το απόρριμμα (μη μαγνητικό). Τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 και του αθροιστικώς μαγνητικού στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις.

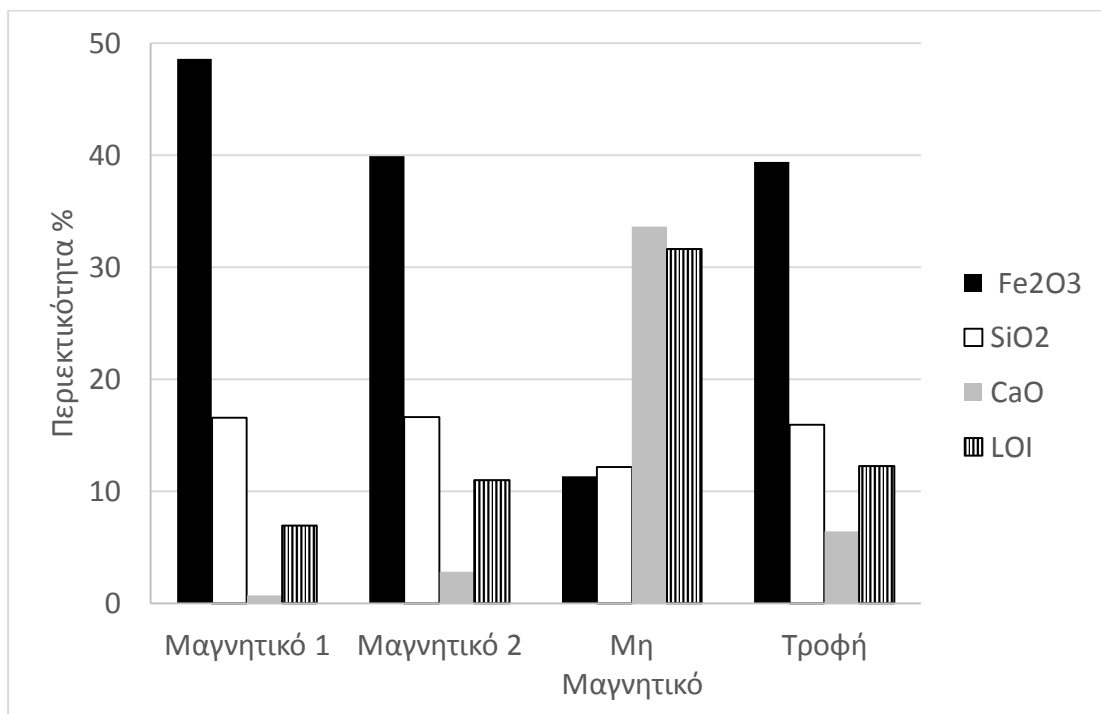
Κλάσμα mm	Προϊόν	Βάρος (g)	% Βάρο ς	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %										ΚΑΤΑΝΟΜΗ %									
				Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1-4	Μαγν 1	1877	42.79	0.64	48.60	16.56	0.70	0.068	17.09	9.40	6.95	0.55	6.40	44.62	52.74	44.42	4.65	47.69	41.35	53.29	24.21	4.65	37.8
	Μαγν 2	1866	42.54	0.74	39.90	16.64	2.80	0.067	21.40	7.47	10.98	2.20	8.78	50.96	43.04	44.39	18.56	46.48	51.47	42.14	38.03	18.56	51.6
	Μη Μαγν	643.3	14.67	0.19	11.35	12.16	33.64	0.024	8.66	2.35	31.62	26.44	5.18	4.42	4.22	11.19	76.79	5.82	7.18	4.57	37.76	76.79	10.5
	<b>Σύνολο</b>	<b>4386.3</b>	<b>100</b>	<b>0.62</b>	<b>39.43</b>	<b>15.95</b>	<b>6.43</b>	<b>0.061</b>	<b>17.68</b>	<b>7.55</b>	<b>12.28</b>	<b>5.05</b>	<b>7.23</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	100	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Πίνακας 4.3: Αθροιστικά αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις.

Κλάσμα mm	Προϊόν	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %										ΚΑΤΑΝΟΜΗ %									
			Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1-4	Αθροιστικ ώς μαγν	85.33	0.69	44.26	16.60	1.75	0.070	19.24	8.44	8.96	1.37	7.59	95.58	95.78	88.81	23.21	94.18	92.82	95.43	62.24	23.21	89.49
	Μη Μαγν	14.67	0.19	11.35	12.16	33.64	0.024	8.66	2.35	31.62	26.44	5.18	4.42	4.22	11.19	76.79	5.82	7.18	4.57	37.76	76.79	10.51
	<b>Σύνολο</b>	<b>100</b>	<b>0.62</b>	<b>39.43</b>	<b>15.95</b>	<b>6.43</b>	<b>0.061</b>	<b>17.68</b>	<b>7.55</b>	<b>12.28</b>	<b>5.05</b>	<b>7.23</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

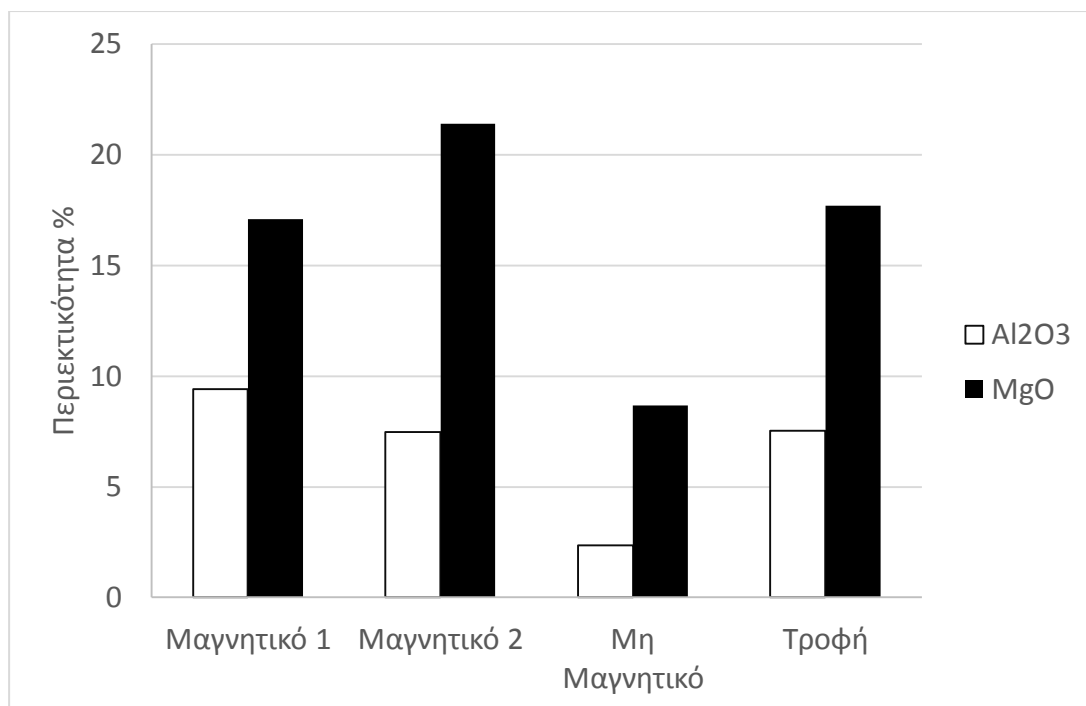


Σχήμα 4.1: Περιεκτικότητα (%) Ni στο κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm.



Σχήμα 4.2: Περιεκτικότητα (%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, LOI στο κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm.



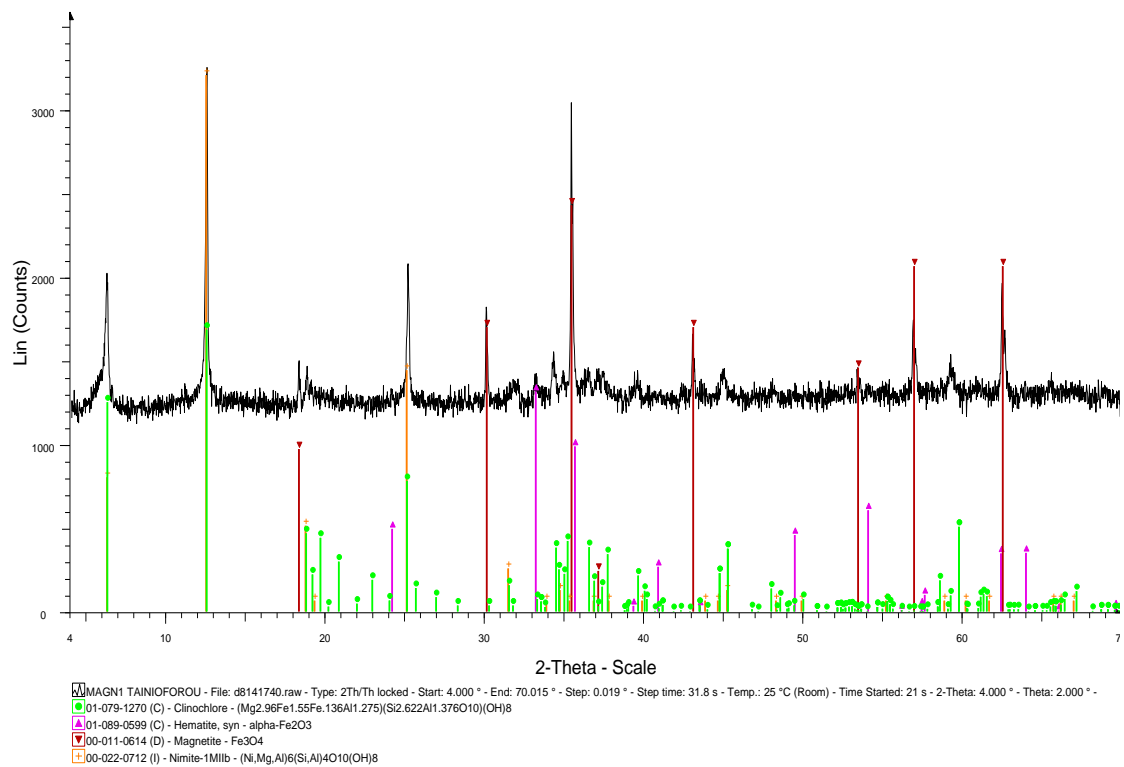


Σχήμα 4.3: Περιεκτικότητα (%) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO στο κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm.

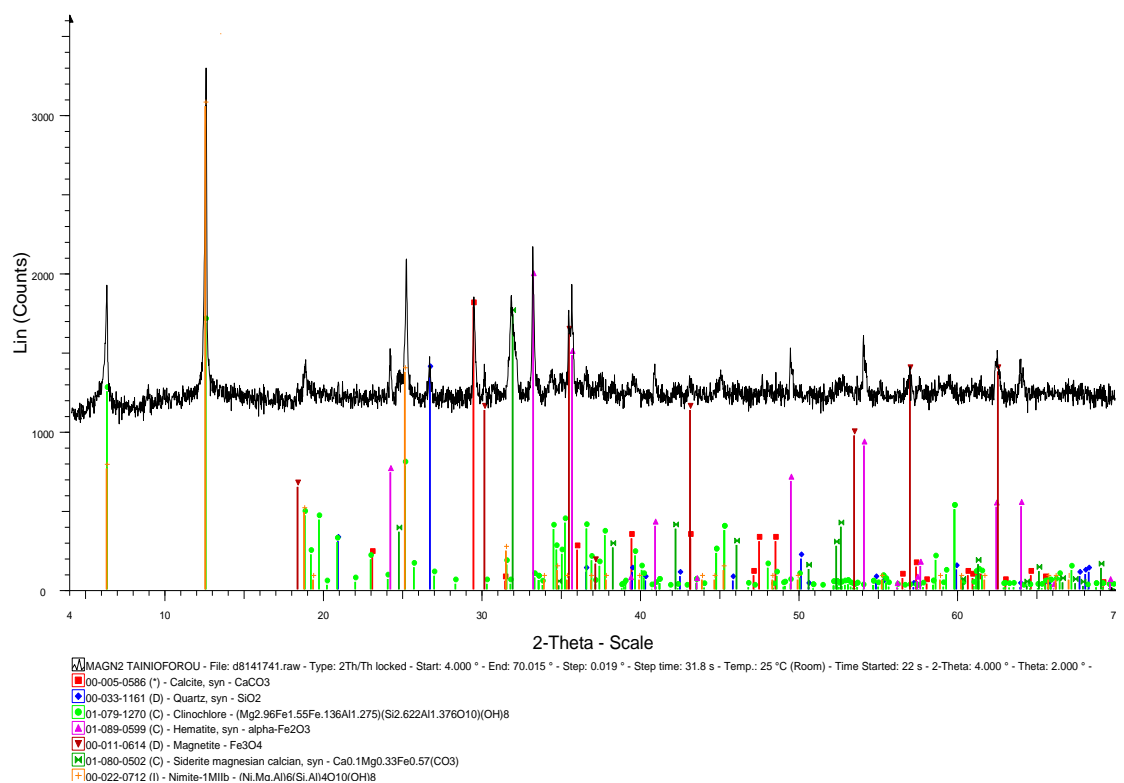
Από την παρατήρηση των Σχημάτων 4.1,4.2,4.3 προκύπτει ότι η υψηλότερη συγκέντρωση νικελίου, στο δεύτερο μαγνητικό κλάσμα, συνοδεύεται και από υψηλότερη συγκέντρωση σε μαγνήσιο. Το πρώτο μαγνητικό κλάσμα έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξείδια του σιδήρου.

#### 4.1.1.2 Αποτελέσματα ορυκτολογικής και μικροσκοπικής εξέτασης

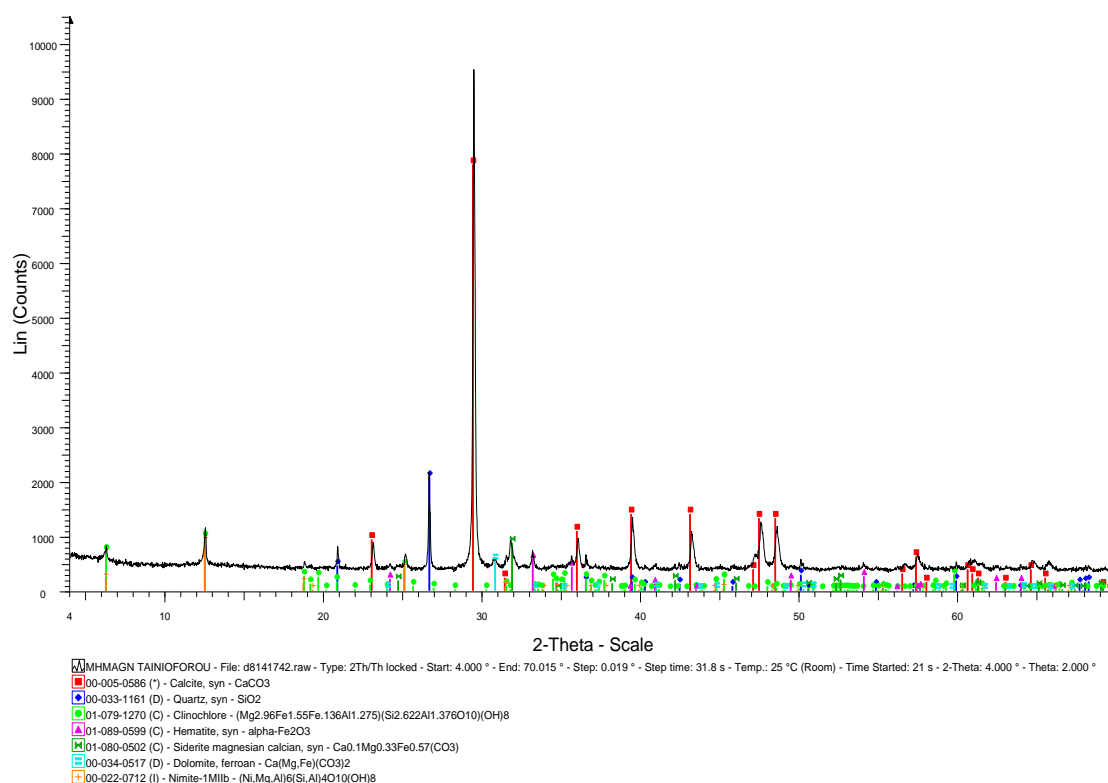
Ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν, με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων -X, σε όλα τα προϊόντα των μαγνητών των κοκκομετρικών κλασμάτων 1-4 mm, Στα Σχήματα 4.4, 4.5, 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης, που πραγματοποιήθηκαν με περιθλασίμετρο ακτίνων-X, των προϊόντων των μαγνητών για το κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm.



Σχήμα 4.4: Ακτινοδιάγραμμα μαγνητικού 1 κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm.



Σχήμα 4.5: Ακτινοδιάγραμμα μαγνητικού 2 κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm.



Σχήμα 4.6: Ακτινοδιάγραμμα Μη Μαγνητικού κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm.

Από τα ακτινοδιαγράμματα προκύπτει ότι:

- Το μαγνητικό 1 αποτελείται κυρίως από μαγνητίτη, αιματίτη, κλινόχλωρο και νιμίτη.
- Το μαγνητικό 2 αποτελείται από αιματίτη, μαγνητίτη κλινόχλωρο, νιμίτη και υπάρχουν εμφανίσεις οξειδίου του πυριτίου και ανθρακικών ορυκτών.
- Το μη μαγνητικό προϊόν αποτελείται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά και οξείδιο του πυριτίου. Υπάρχουν επίσης ίχνη αιματίτη.

Από την παρατήρηση των στιλπνών τομών που παρουσιάστηκαν στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο (Σχήμα 3.3, 3.4, 3.5) παρατηρείται ότι στο μαγνητικό 1 υπάρχουν κόκκοι μαγνητίτη, που εξαλλοιώνονται σε αιματίτη, μέσα σε χλωριτικό συνδετικό υλικό. Από την μικροσκοπική ανάλυση παρατηρείται ότι ο χλωρίτης δεν έχει αποδεσμευτεί από τους μεταλλικούς κόκκους. Στο μαγνητικό 2 παρατηρούνται περισσότεροι κόκκοι αιματίτη καθώς και χαλαζία ο οποίος δεν έχει αποδεσμευτεί από τα μεταλλικά ορυκτά και το χλωρίτη. Στην τομή του μη μαγνητικού προϊόντος παρατηρούνται ελεύθεροι κόκκοι χαλαζία και ασβεστίτη καθώς και εγκλείσματα συνδετικής ύλης και χαλαζία μέσα στους κόκκους ασβεστίτη.

#### 4.1.1.3 Συμπεράσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm

Από το μαγνητικό διαχωρισμό του κοκκομετρικού κλάσματος 1-4 mm προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το πρώτο μαγνητικό προϊόν παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα και κατανομή σε σίδηρο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πεδίο που εφαρμόστηκε

στο υλικό ήταν ασθενές, με αποτέλεσμα να διαχωριστούν μόνο οι ισχυρά μαγνητικά κόκκοι.

- Το Ni παρουσιάζει υψηλότερη συγκέντρωση και κατανομή στο δεύτερο μαγνητικό προϊόν. Την ίδια τάση παρουσιάζει και το MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Οι προαναφερθέν χημικές ενώσεις, μαζί με οξείδιο του σιδήρου, συντελούν στην δημιουργία του χλωρίτη, σε περίπτωση ύπαρξης νικελίου του νιμίτη. Λόγω του ότι ο χλωρίτης και ο νιμίτης δεν έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σιδήρου για να κατανεμηθούν στα μαγνητικά προϊόντα χρειάζεται να δημιουργηθεί υψηλής έντασης μαγνητικό πεδίο. Εξ αιτίας αυτού του γεγονότος το νικέλιο συγκεντρώθηκε στο δεύτερο μαγνητικό προϊόν.
- Η περιεκτικότητα του ανθρακικού ασβεστίου αυξάνεται από το πρώτο μαγνητικό προϊόν στο δεύτερο. Αυτό συμβαίνει διότι μέσα στους κόκκους του ανθρακικού ασβεστίου υπάρχουν εγκλείσματα σιδηρούχων ορυκτών τα οποία παρασύρονται από το ισχυρό μαγνητικό πεδίο.
- Από τον Πίνακα 4.3 προκύπτει ότι λαμβάνοντας ένα αθροιστικό συμπύκνωμα του πρώτου και του δεύτερου μαγνητικού προϊόντος το συμπύκνωμα έχει περιεκτικότητα 44.26 % οξείδιο του σιδήρου με αποτέλεσμα να μην είναι αξιοποιήσιμο για την παραγωγή σιδήρου καθώς επίσης δεν είναι κατάλληλο για την παραγωγή νικελίου καθώς το συμπύκνωμα έχει περιεκτικότητα 0.69%.

#### **4.1.2 Μαγνητικός διαχωρισμός κοκκομετρικού κλάσματος 0.2-1 mm**

##### **4.1.2.1 Διαδικασία διαχωρισμού και παρουσίαση αποτελεσμάτων**

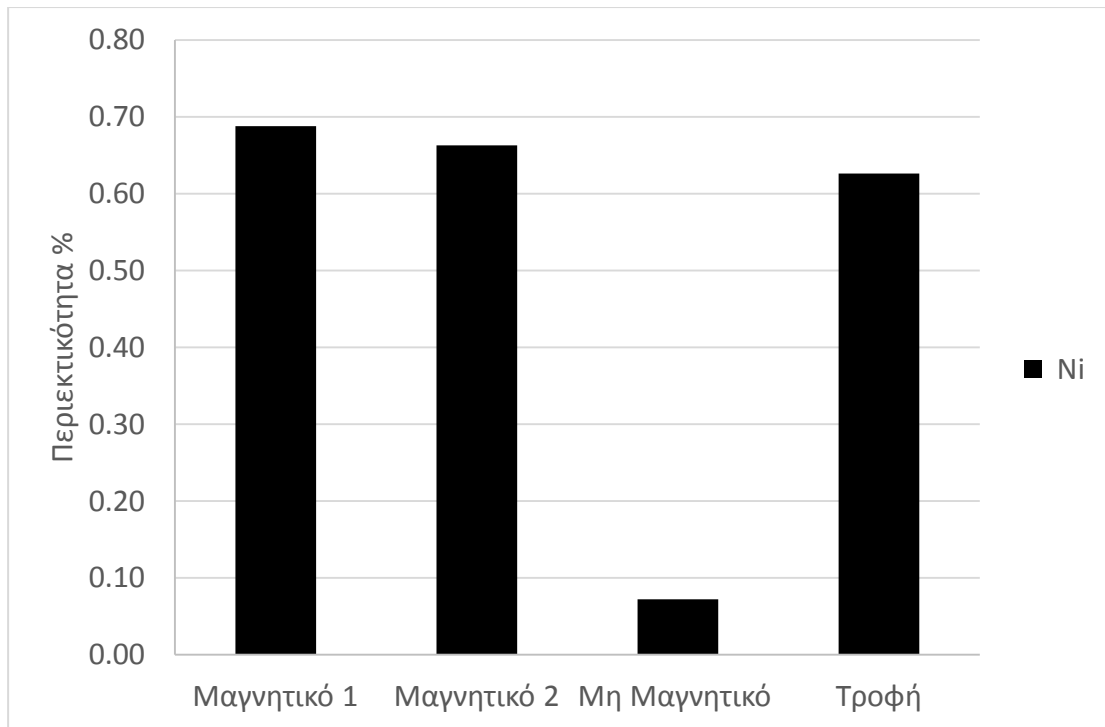
Το κοκκομετρικό κλάσμα 0.2-1 mm διαχωρίστηκε στον επαγωγικό μαγνητικό διαχωριστή υψηλής τάσης (High Intensity Induced Roll Magnetic Separator MIH 111-5 της Carpco). Αρχικά ρυθμίστηκε η θέση των λεπίδων διαχωρισμού, η ένταση της δόνησης και το άνοιγμα του τροφοδότη, έτσι ώστε πάνω στο τύμπανο διαχωρισμού να σχηματίζεται μονό στρώμα κόκκων. Πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικά πέρασματα διατηρώντας σταθερές τις στροφές περιστροφής του τυμπάνου, στις 120 rpm. Στο πρώτο πέρασμα συγκεντρώθηκε το πολύ μαγνητικό προϊόν (μαγνητικό 1), θέτοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου στα 500 Gauss. Το μη μαγνητικό προϊόν του πρώτου πέρασματος πέρασε σε πεδίο 11500 Gauss (3 A) και από αυτήν τη διαδικασία συλλέχθηκε το ενδιάμεσα μαγνητικό (μαγνητικό 2) και το απόρριμμα (μη μαγνητικό). Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού και στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα αθροιστικώς μαγνητικά.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 0.2-1 mm με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις.

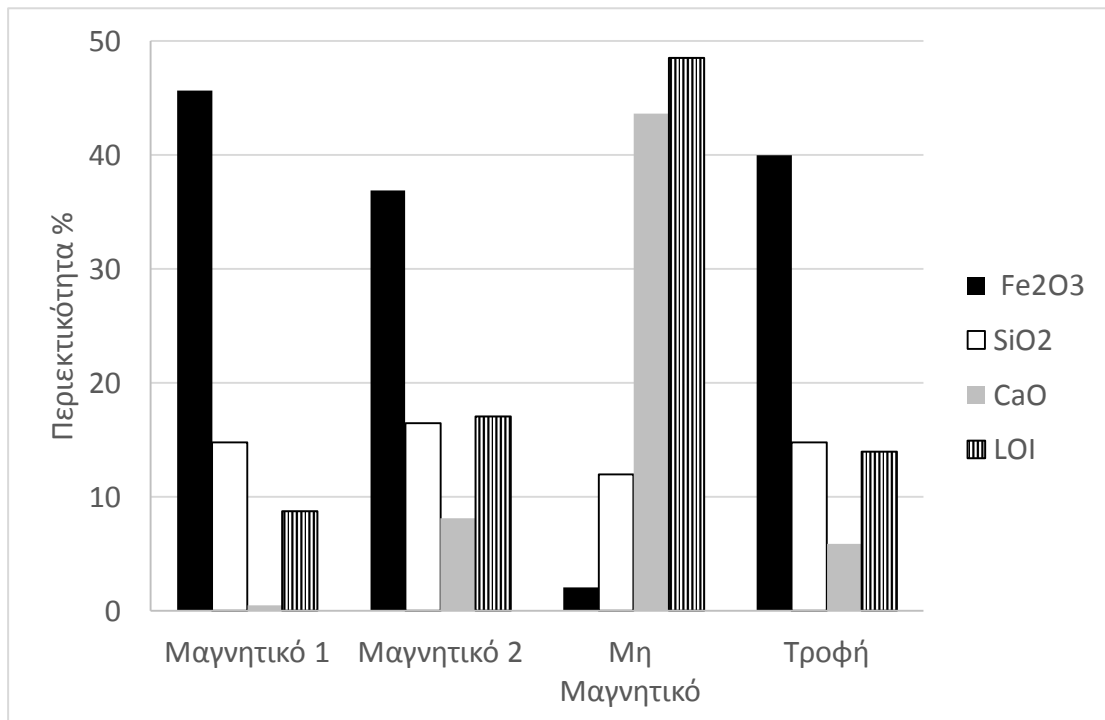
Κλάσμα mm	Προϊόν	Βάρος (g)	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
				Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
0.2-1	Μαγν 1	966.8	72.78	0.69	45.65	14.76	0.45	0.071	8.73	0.35	8.38	80.01	83.04	72.59	5.60	81.22	45.58	5.60	65.3
	Μαγν 2	237.2	17.86	0.66	36.91	16.44	8.13	0.058	17.06	6.39	10.67	18.91	16.47	19.83	24.76	16.14	21.84	24.76	20.4
	Μη Μαγν	124.4	9.36	0.07	2.07	11.98	43.62	0.018	48.51	34.28	14.23	1.08	0.49	7.58	69.64	2.65	32.58	69.64	14.2
	<b>Σύνολο</b>	<b>1328.4</b>	<b>100</b>	<b>0.63</b>	<b>40.00</b>	<b>14.80</b>	<b>5.87</b>	<b>0.064</b>	<b>13.94</b>	<b>4.61</b>	<b>9.33</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Πίνακας 4.5: Αθροιστικά αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 0.2-1 mm με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις.

Κλάσμα mm	Προϊόν	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
			Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
0.2-1	Αθροιστικ ώς μαγν	90.64	0.68	43.92	15.09	1.97	0.070	10.37	1.54	8.83	98.92	99.51	92.42	30.36	97.35	67.42	30.36	85.72
	Μη Μαγν	9.36	0.07	2.07	11.98	43.62	0.018	48.51	34.28	14.23	1.08	0.49	7.58	69.64	2.65	32.58	69.64	14.28
	<b>Σύνολο</b>	<b>100</b>	<b>0.63</b>	<b>40.00</b>	<b>14.80</b>	<b>5.87</b>	<b>0.064</b>	<b>13.94</b>	<b>4.61</b>	<b>9.33</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>



Σχήμα 4.7: Περιεκτικότητα (%) Ni στο κοκκομετρικό κλάσμα 0.2-1 mm.



Σχήμα 4.8: Περιεκτικότητα (%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, LOI στο κοκκομετρικό κλάσμα 0.2-1 mm.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 4.7, 4.8 καθώς και τον Πίνακα 4.4 προκύπτει ότι το νικέλιο παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη συγκέντρωση στο πρώτο μαγνητικό προϊόν στο συγκεκριμένο κοκκομετρικό κλάσμα. Μετρήσεις μαγνησίου και αργιλίου δεν πραγματοποιήθηκαν για να ελεγχθεί αν συνάδουν με αυτές του νικελίου. Από την κατανομή δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα γιατί επηρεάζονται από την κατανομή του βάρους.

#### 4.1.2.2 Αποτελέσματα μικροσκοπικής εξέτασης

Ορυκτολογικές αναλύσεις δεν πραγματοποιήθηκαν, με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων –Χ ωστόσο από τις φωτογραφίες που ελήφθησαν με το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, και παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α, παρατηρείται ότι η αποδέσμευση των μη μεταλλικών ορυκτών με τους μεταλλικούς είναι καλύτερη σε σύγκριση με το κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm. Στην τομή του πρώτου μαγνητικού προϊόντος παρατηρούνται ελεύθεροι κόκκοι μαγνητίτη που εξαλλοιώνονται σε αιματίτη καθώς επίσης και ελεύθεροι κόκκοι συνδετικού υλικού ωστόσο υπάρχουν και σύμμεκτοι κόκκοι συνδετικού υλικού με τα μεταλλικά ορυκτά. Στο δεύτερο μαγνητικό προϊόν παρατηρούνται κόκκοι αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη – μαγνητίτη και ασβεστίτη καθώς και συνδετικού υλικού με εγκλείσματα σιδηρούχων ορυκτών. Τέλος στο μη μαγνητικό προϊόν παρατηρούνται εγκλείσματα αιματίτη σε κόκκους ασβεστίτη.

#### 4.1.2.3 Συμπεράσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 0.2-1 mm

Από το μαγνητικό διαχωρισμό του κοκκομετρικού κλάσματος 0.2-1 mm προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η αποδέσμευση των κόκκων είναι καλύτερη σε σύγκριση με το κοκκομετρικό κλάσμα 1-4 mm.
- Το νικέλιο παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένη συγκέντρωση στο πρώτο μαγνητικό προϊόν.
- Τα οξειδία του σιδήρου συγκεντρώνονται στο πρώτο και στο δεύτερο μαγνητικό προϊόν, με ποσοστό 45% και 36% αντίστοιχα.
- Το SiO<sub>2</sub> παρουσιάζει υψηλότερες συγκεντρώσεις στα μαγνητικά προϊόντα από ότι στο μη μαγνητικό. Αυτό συμβαίνει διότι ο χλωρίτης, που περιέχει το νικέλιο, αποτελείται και από MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Ο ασβεστίτης συγκεντρώνεται στο μη μαγνητικό προϊόν ωστόσο λόγω τις μερικής αποδέσμευσης των ορυκτών στους κόκκους παρουσιάζει μικρή περιεκτικότητα και στο δεύτερο μαγνητικό προϊόν.
- Από τον Πίνακα 4.5 προκύπτει ότι αν ληφθεί ένα μαγνητικό προϊόν το συμπύκνωμα αυτό θα αποτελείται από 44% οξειδίων του σιδήρου και 0.68% νικέλιο με αποτέλεσμα το προϊόν να μην μπορεί να θεωρηθεί ούτε σιδηρομετάλλευμα ούτε νικελιούχο μετάλλευμα.

#### 4.1.3 Μαγνητικός διαχωρισμός κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm

##### 4.1.3.1 Διαδικασία διαχωρισμού και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Το κοκκομετρικό κλάσμα 0.038-0.2 mm διαχωρίστηκε στον υγρό μαγνητικό διαχωριστή. Για το λόγο αυτό παρασκευάστηκε πολφός και τροφοδοτήθηκε στη μήτρα του μαγνητικού διαχωρισμού χρησιμοποιώντας τις μεσαίες μπίλιες. Πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικά πέρασματα. Στο πρώτο πέρασμα, σε χαμηλή ένταση πεδίου 1000 Gauss (0.5 A), ανακτήθηκε το πολύ μαγνητικό (μαγνητικό 1) και το μη μαγνητικό. Το μη μαγνητικό χρησιμοποιήθηκε ως τροφή για το δεύτερο πέρασμα, όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου ήταν 8032 Gauss (6 A), και ανακτήθηκε το ενδιάμεσα μαγνητικό (μαγνητικό 2) και το απόρριμμα (μη μαγνητικό).

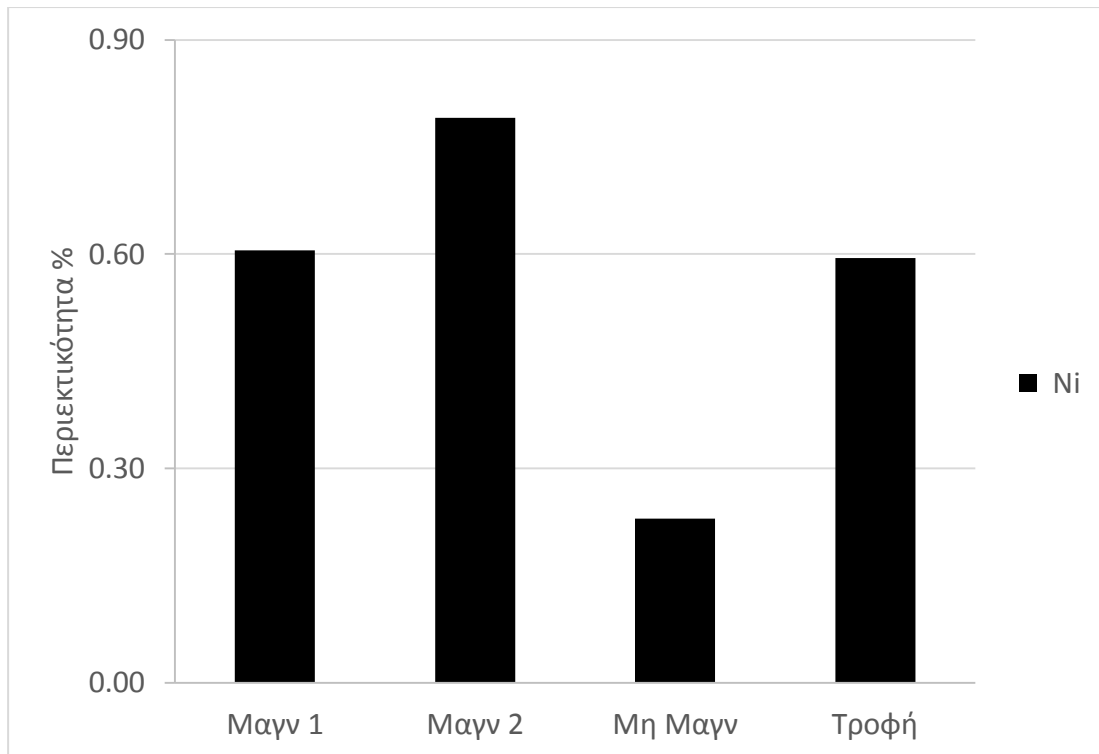
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις.

Κλάσμα mm	Προϊόν	Βάρος (g)	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
				Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
0.038-0.2	Μαγν 1	69.40	67.10	0.61	56.18	16.39	1.22	0.063	7.55	0.96	6.59	68.32	80.13	66.11	14.70	72.42	39.00	14.70	51.40
	Μαγν 2	20.78	20.09	0.79	37.73	17.36	4.64	0.064	16.73	3.64	13.09	26.74	16.11	20.97	16.68	22.00	25.88	16.68	30.58
	Μη Μαγν	13.25	12.81	0.23	13.79	16.77	29.92	0.025	35.60	23.51	12.09	4.95	3.76	12.92	68.62	5.58	35.12	68.62	18.02
	<b>Σύνολο</b>	<b>103.43</b>	<b>100</b>	<b>0.59</b>	<b>47.04</b>	<b>16.63</b>	<b>5.59</b>	<b>0.059</b>	<b>12.99</b>	<b>4.39</b>	<b>8.60</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

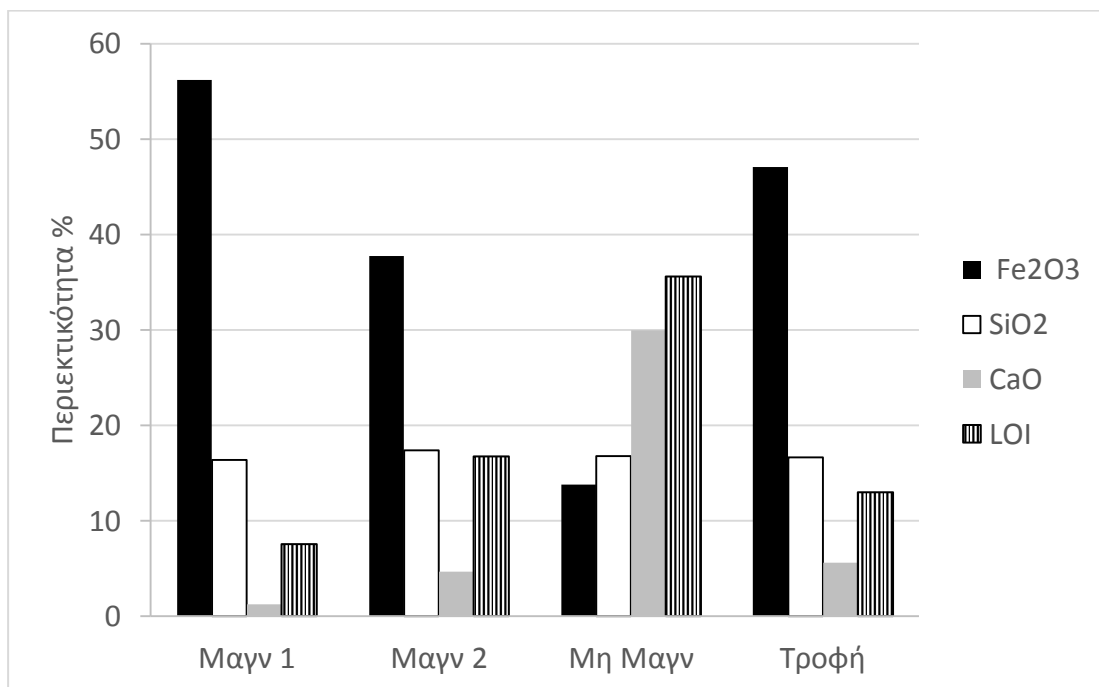
Πίνακας 4.7: Αθροιστικά αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις.

Κλάσμα mm	Προϊόν	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
			Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
0.038-0.2	Αθροιστικώ ς μαγν	87.19	0.65	51.93	16.61	2.01	0.060	9.66	1.58	8.08	95.05	96.24	87.08	31.38	94.42	64.88	31.38	81.98
	Μη Μαγν	12.81	0.23	13.79	16.77	29.92	0.030	35.60	23.51	12.09	4.95	3.76	12.92	68.62	5.58	35.12	68.62	18.02
	<b>Σύνολο</b>	<b>100</b>	<b>0.59</b>	<b>47.04</b>	<b>16.63</b>	<b>5.59</b>	<b>0.059</b>	<b>12.99</b>	<b>4.39</b>	<b>8.60</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>





Σχήμα 4.8: Περιεκτικότητα (%) Ni στο κοκκομετρικό κλάσμα 0.038-0.2 mm.

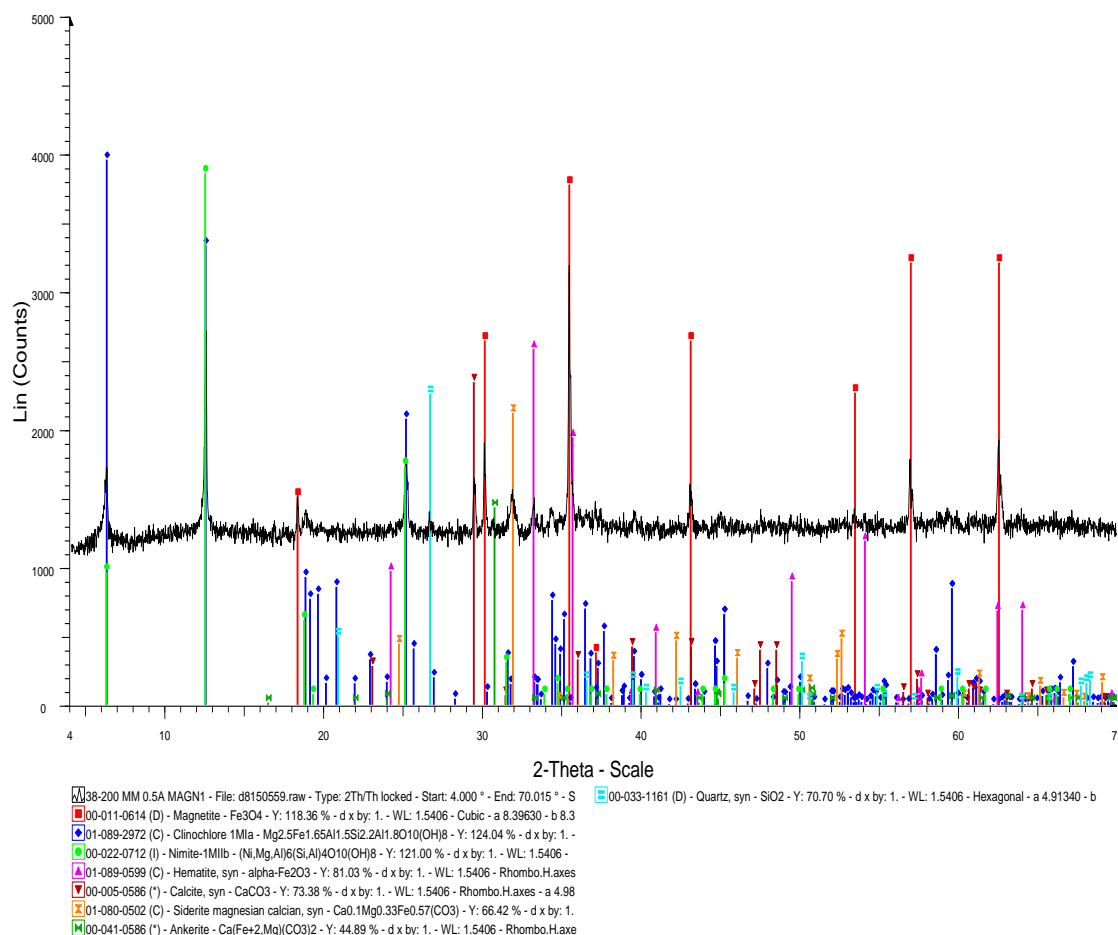


Σχήμα 4.9: Περιεκτικότητα Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, LOI στο κοκκομετρικό κλάσμα 0.038-0.2 mm.

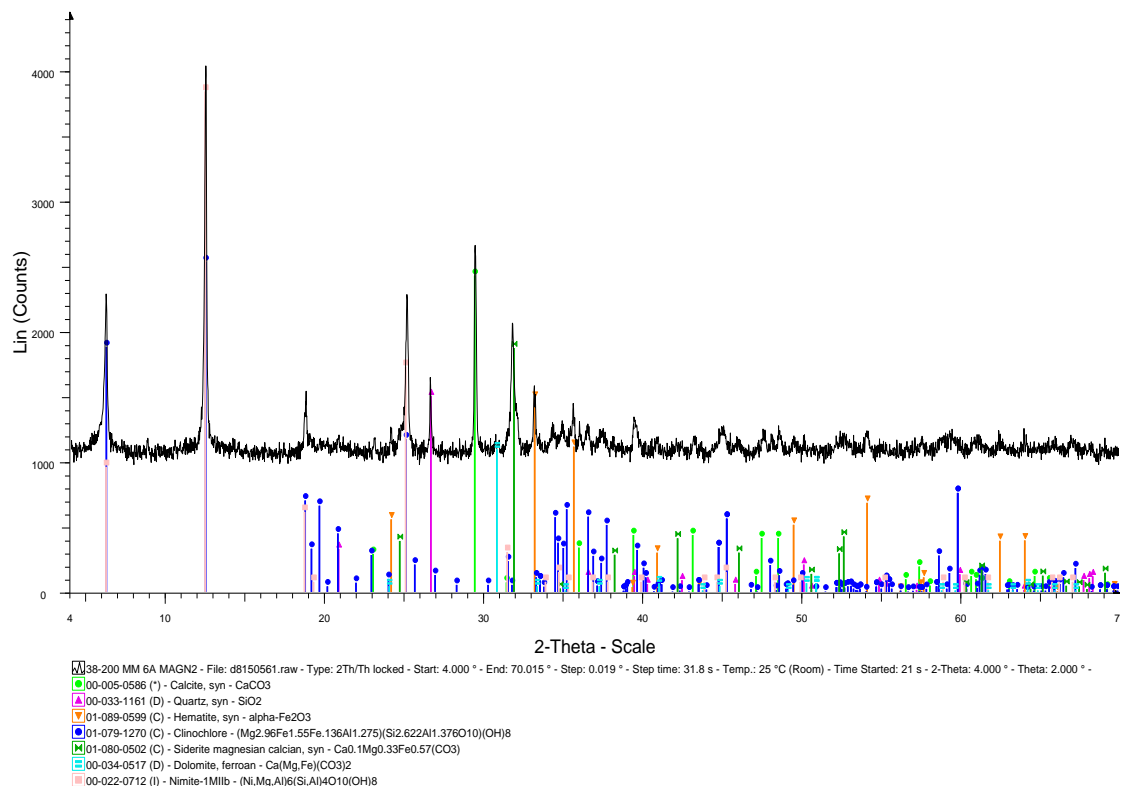
Από την παρατήρηση του Πίνακα 4.6 και Σχημάτων 4.8, 4.9 παρατηρείται ότι το νικέλιο συγκεντρώνεται στο δεύτερο μαγνητικό προϊόν ενώ τα οξείδια του σιδήρου στο πρώτο μαγνητικό. Το πυρίτιο ισοκατανέμεται σε όλα τα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού.

#### 4.1.3.2 Αποτελέσματα ορυκτολογικής και μικροσκοπικής εξέτασης

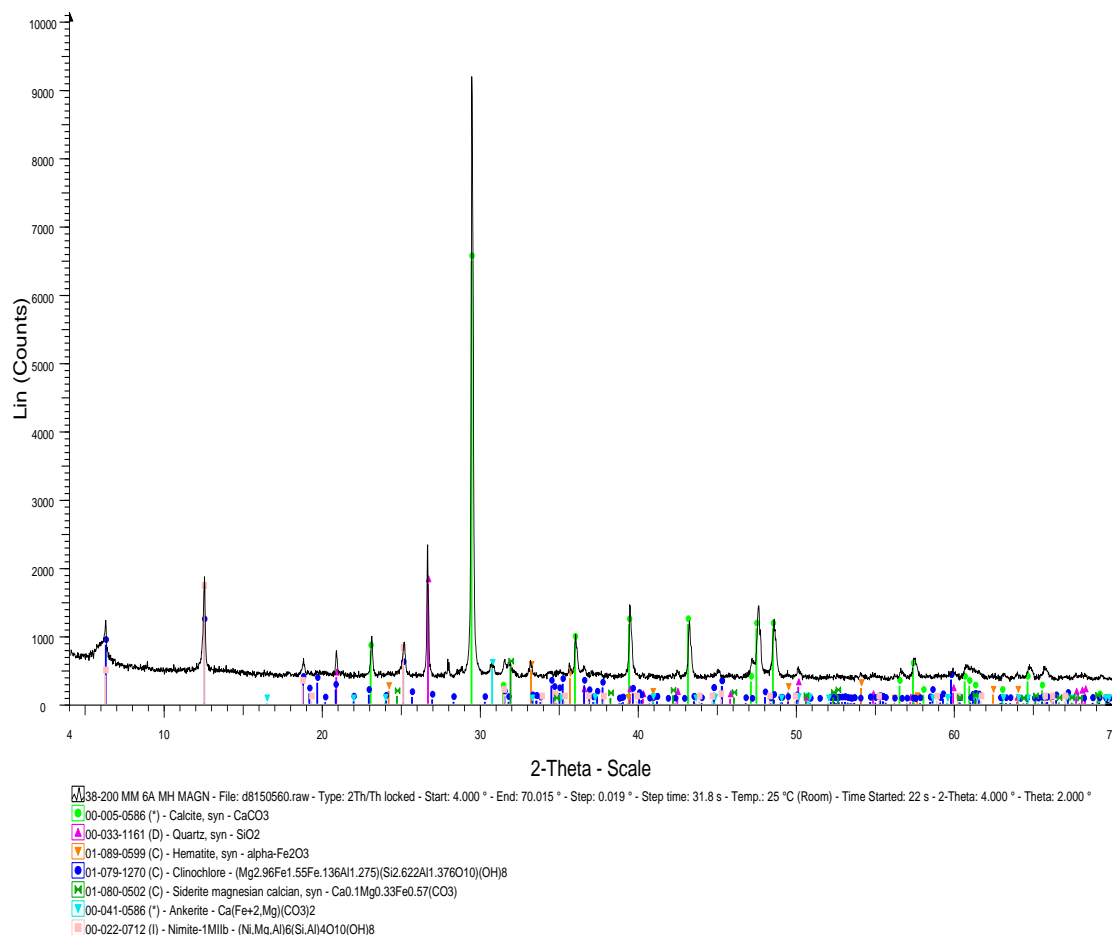
Ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν, με την μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων -X, σε όλα τα προϊόντα των μαγνητών των κοκκομετρικών κλασμάτων 0.038-0.2 mm. Στα Σχήματα 4.10, 4.11, 4.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης, που πραγματοποιήθηκαν με περιθλασίμετρο ακτίνων-X.



Σχήμα 4.10: Ακτινοδιάγραμμα μαγνητικού 1 κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm.



Σχήμα 4.11: Ακτινοδιάγραμμα μαγνητικού 2 κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm.



Σχήμα 4.12: Ακτινοδιάγραμμα Μη Μαγνητικού κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm.

Από τα ακτινοδιαγράμματα προκύπτει ότι:

- Το μαγνητικό 1 αποτελείται κυρίως από μαγνητίτη, αιματίτη, κλινόχλωρο και νιμίτη καθώς επίσης υπάρχει χαλαζίας.
- Το μαγνητικό 2 αποτελείται από αιματίτη, μαγνητίτη κλινόχλωρο, νιμίτη και υπάρχουν επίσης χαλαζίας και ανθρακικά ορυκτά.
- Το μη μαγνητικό προϊόν αποτελείται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά, χαλαζία και χλωρίτη. Επίσης υπάρχουν ίχνη αιματίτη.

Από την παρατήρηση των στιλπνών τομών, που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α, παρατηρούνται στο πρώτο μαγνητικό προϊόν μερικώς αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη-μαγνητίτη και μεμονωμένοι κόκκοι συνδετικού υλικού και ασβεστίτη. Στην τομή του δεύτερου μαγνητικού προϊόντος παρατηρούνται κόκκοι αιματίτη-μαγνητίτη μερικώς αποδεσμευμένοι και ελεύθεροι κόκκοι συνδετικού υλικού συχνά με εγκλείσματα σιδηρούχων ορυκτών. Τέλος η μη μαγνητική τομή αποτελείται από αποδεσμευμένους κόκκους συνδετικού υλικού, χαλαζία και ασβεστίτη.

#### **4.1.3.3 Συμπεράσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm**

Από το μαγνητικό διαχωρισμό του κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το νικέλιο παρουσιάζει υψηλότερη συγκέντρωση στο δεύτερο μαγνητικό προϊόν. Την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει το πυρίτιο και το νερό το οποίο είναι δείκτης του χλωρίτη αφού είναι το μόνο ορυκτό που έχει στο πλέγμα του κρυσταλλικό νερό.
- Τα οξείδια του σιδήρου παρουσιάζουν υψηλότερη συγκέντρωση στο πρώτο μαγνητικό προϊόν.
- Από τη μικροσκοπική εξέταση παρατηρείται ότι η αποδέσμευση των κόκκων είναι καλύτερη αφού υπάρχουν ελεύθεροι κόκκοι από τα ορυκτά.
- Από τον Πίνακα 4.7 προκύπτει ότι αν ληφθεί ένα αθροιστικό μαγνητικό προϊόν το συμπύκνωμα θα έχει περιεκτικότητα 52% σε οξείδια του σιδήρου και 0.65% νικέλιο.

#### **4.1.4 Μαγνητικός διαχωρισμός κοκκομετρικού κλάσματος -0.038 mm**

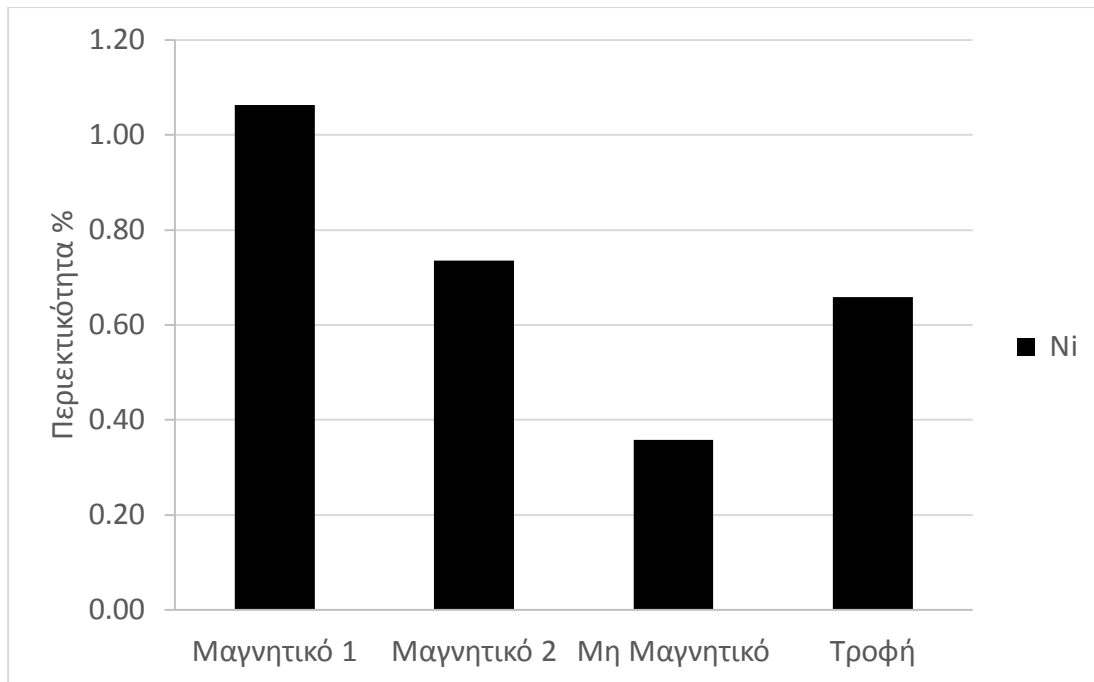
Το κοκκομετρικό κλάσμα -0.038 mm διαχωρίστηκε στον υγρό μαγνητικό διαχωριστή. Για το λόγο αυτό παρασκευάστηκε πολφός και τροφοδοτήθηκε στη μήτρα του μαγνητικού διαχωρισμού χρησιμοποιώντας τις μεσαίες μπίλιες. Πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικά πέρασμα. Στο πρώτο πέρασμα, σε χαμηλή ένταση πεδίου 3000 Gauss (1.5 A), ανακτήθηκε το πολύ μαγνητικό (μαγνητικό 1) και το μη μαγνητικό. Το μη μαγνητικό χρησιμοποιήθηκε ως τροφή για το δεύτερο πέρασμα, όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου ήταν 8032 Gauss (6 A), και ανακτήθηκε το ενδιάμεσα μαγνητικό (μαγνητικό 2) και το απόρριμμα (μη μαγνητικό).

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος -0.038 mm με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις.

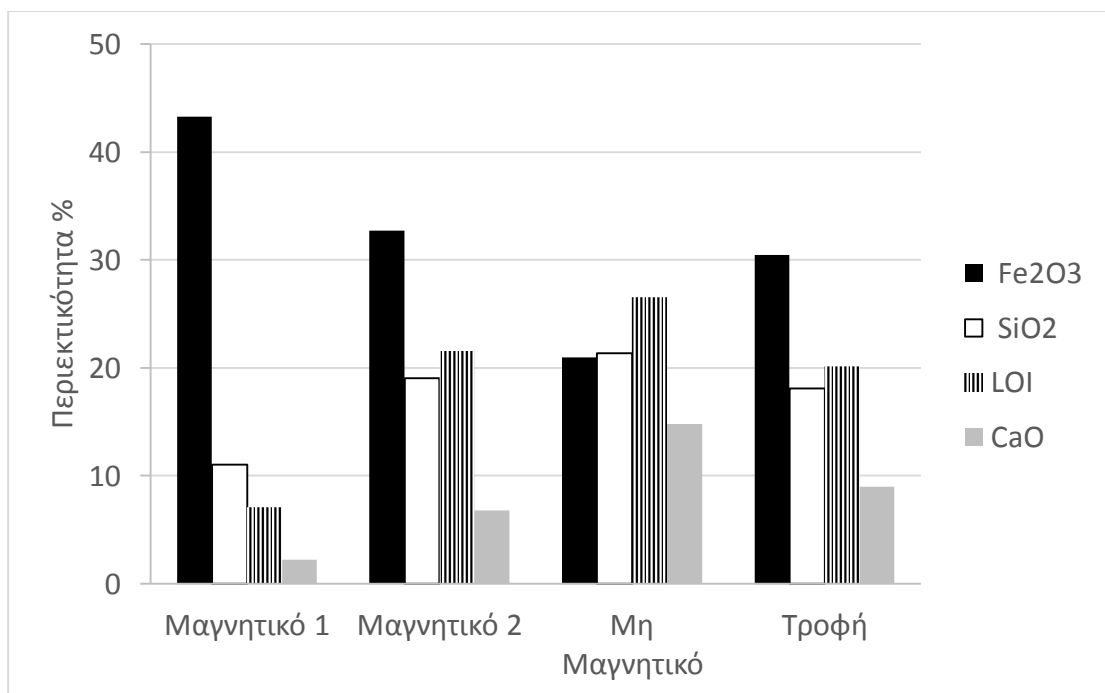
Κλάσμα α mm	Προϊόν	Βάρος (g)	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %										ΚΑΤΑΝΟΜΗ %									
				Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
-0.038	Μαγν 1	24.74	23.99	1.06	43.29	11.04	2.20	0.051	29.91	5.35	7.09	1.73	5.36	38.70	34.12	14.67	5.87	24.09	48.07	19.04	8.45	5.87	9.85
	Μαγν 2	36.10	35.01	0.74	32.72	19.04	6.82	0.057	15.39	3.68	21.55	5.36	16.20	39.07	37.64	36.90	26.56	39.34	36.09	19.09	37.49	26.56	43.4
	Μη Μαγν	42.28	41.00	0.36	20.97	21.34	14.81	0.045	5.77	10.18	26.53	11.63	14.90	22.23	28.25	48.43	67.56	36.57	15.84	61.88	54.06	67.56	46.7
	<b>Σύνολο</b>	<b>103.12</b>	<b>100</b>	<b>0.66</b>	<b>30.44</b>	<b>18.06</b>	<b>8.99</b>	<b>0.051</b>	<b>14.93</b>	<b>6.75</b>	<b>20.12</b>	<b>7.06</b>	<b>13.07</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Πίνακας 4.9: Αθροιστικά αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος -0.038mm με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις.

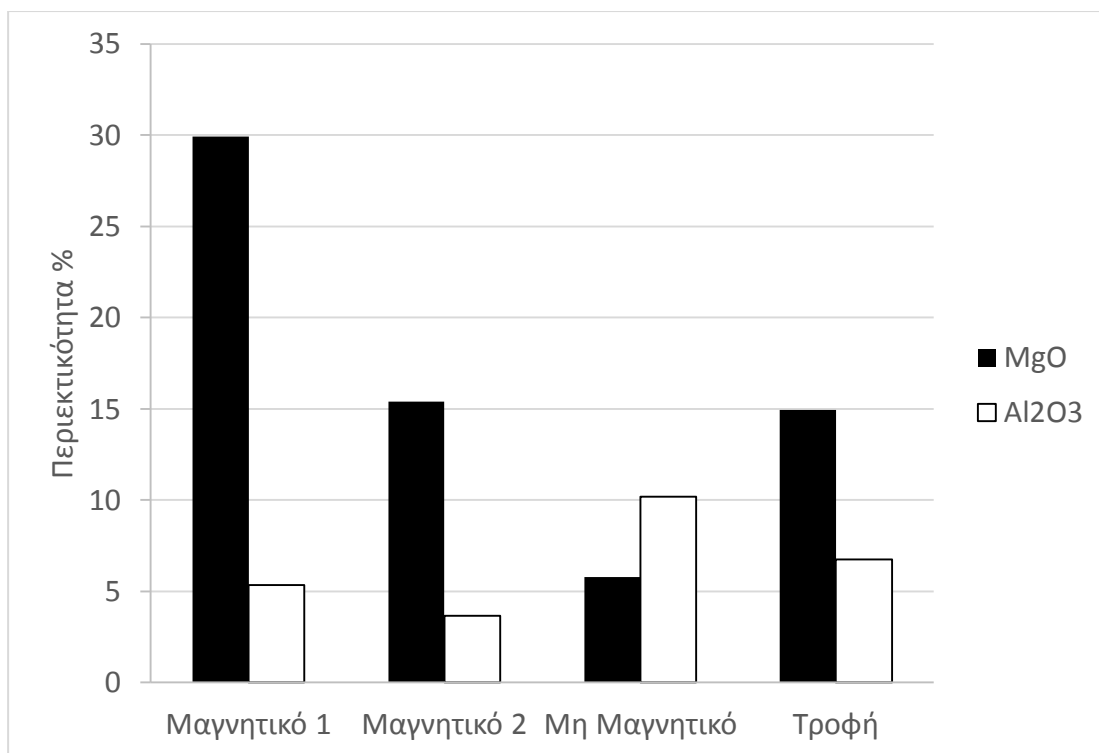
Κλάσμα mm	Προϊόν	% Βάρος	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %										ΚΑΤΑΝΟΜΗ %									
			Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
-0.038	Αθροιστικ ώς μαγν	59.00	0.87	37.02	15.79	4.94	0.054	21.3	4.36	15.67	3.88	11.79	77.77	71.75	51.57	32.44	63.43	84.16	38.12	45.94	32.44	53.24
	Μη Μαγν	41.00	0.36	20.97	21.34	14.81	0.045	5.77	10.18	26.53	11.63	14.90	22.23	28.25	48.43	67.56	36.57	15.84	61.88	54.06	67.56	46.76
	<b>Σύνολο</b>	<b>100</b>	<b>0.66</b>	<b>30.44</b>	<b>18.06</b>	<b>8.99</b>	<b>0.051</b>	<b>14.93</b>	<b>6.75</b>	<b>20.12</b>	<b>7.06</b>	<b>13.07</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>



Σχήμα 4.13: Περιεκτικότητα (%) Ni στο κοκκομετρικό κλάσμα -0.038 mm.



Σχήμα 4.14: Περιεκτικότητα (%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, LOI στο κοκκομετρικό κλάσμα -0.038 mm.

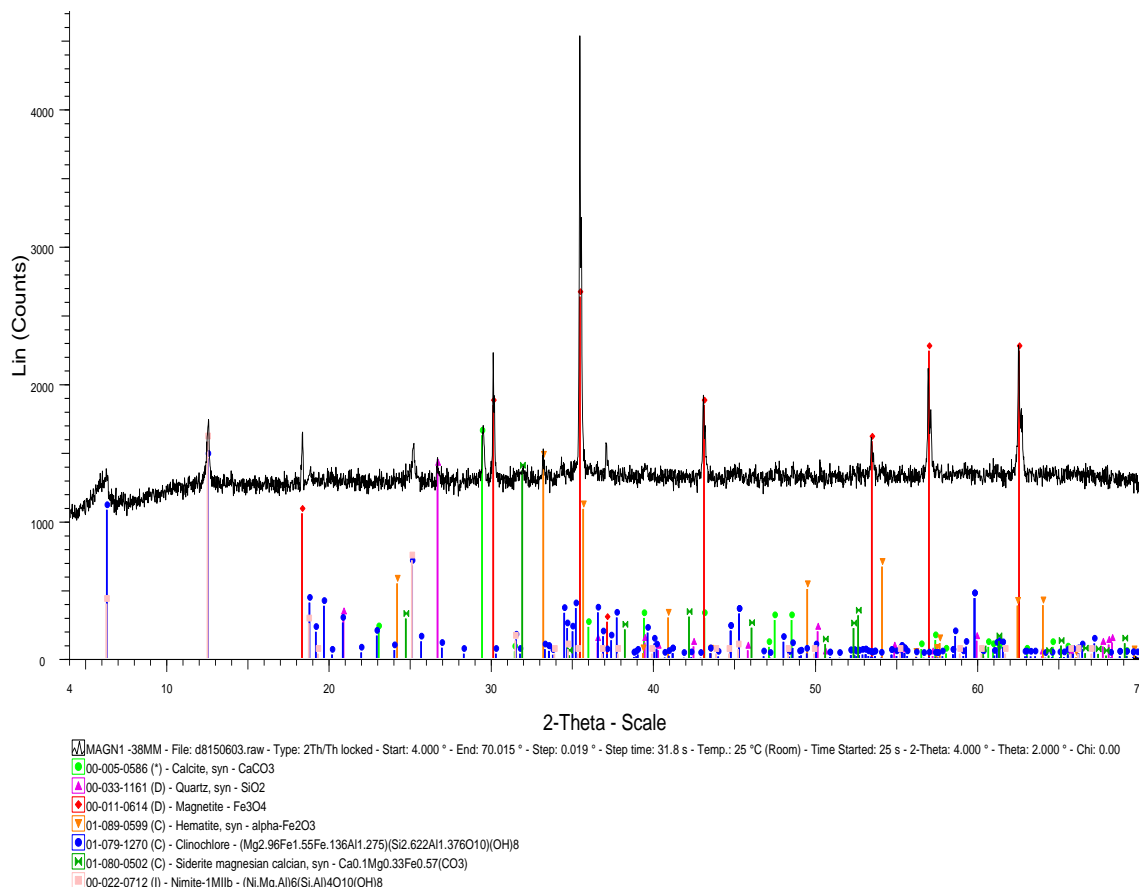


Σχήμα 4.15: Περιεκτικότητα (%) MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> στο κοκκομετρικό κλάσμα -0.038 mm.

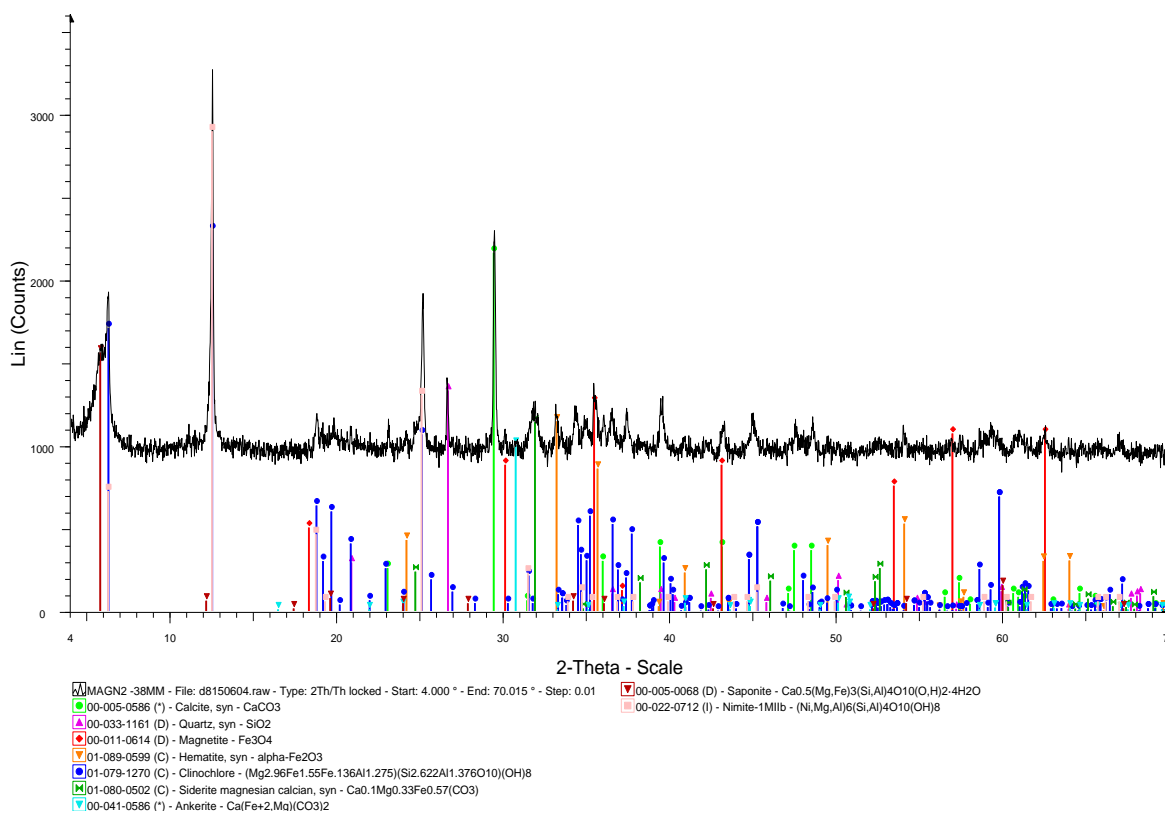
Από τα Σχήματα 4.12-4.13 παρατηρείται ότι το νικέλιο παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση στο πρώτο μαγνητικό προϊόν το ίδιο συμβαίνει και με το μαγνήσιο. Επίσης στο πρώτο μαγνητικό προϊόν παρατηρείται και υψηλότερη συγκέντρωση σε οξείδια του σιδήρου.

#### 4.1.4.2 Αποτελέσματα ορυκτολογικής και μικροσκοπικής εξέτασης

Ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν, με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων -X, σε όλα τα προϊόντα των μαγνητών του κοκκομετρικού κλάσματος -0.038 mm και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.16, 4.17, 4.18.

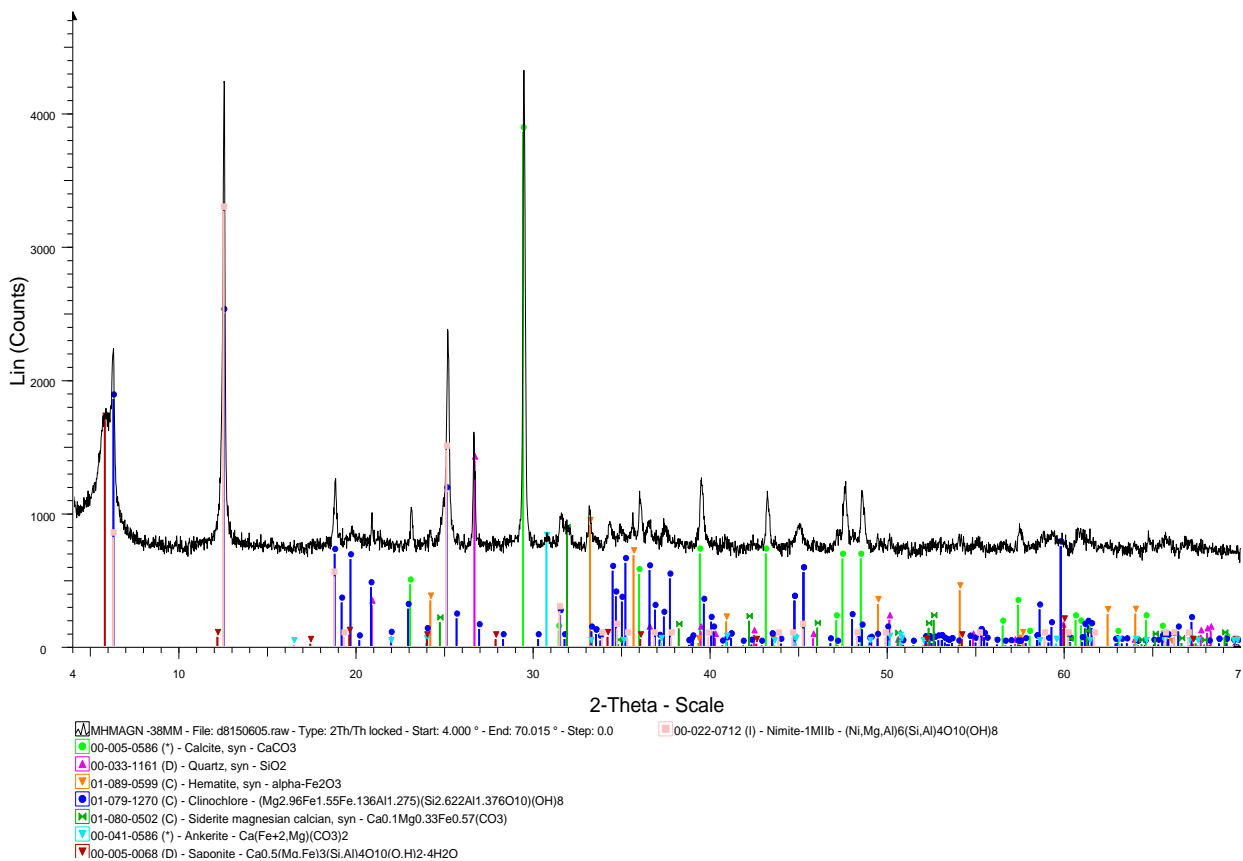


Σχήμα 4.16: Ακτινοδιάγραμμα Μαγνητικού 1 κοκκομετρικού κλάσματος -0,038 mm.



Σχήμα 4.17: Ακτινοδιάγραμμα Μαγνητικού 2 κοκκομετρικού κλάσματος -0,038 mm.





Σχήμα 4.18: Ακτινοδιάγραμμα Μη Μαγνητικού κοκκομετρικού κλάσματος -0,038 mm.

Από τα ακτινοδιαγράμματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το μαγνητικό 1 αποτελείται κυρίως από μαγνητίτη, αιματίτη, κλινόχλωρο και νιμίτη καθώς επίσης υπάρχουν εμφανίσεις χαλαζία και ανθρακικών ορυκτών.
- Το μαγνητικό 2 αποτελείται από κλινόχλωρο, νιμίτη, ανθρακικά ορυκτά, χαλαζία, σαπονίτη καθώς και αιματίτη, μαγνητίτη.
- Το μη μαγνητικό προϊόν αποτελείται κυρίως από ανθρακικά ορυκτά, κλινόχλωρο, νιμίτη, σαπονίτη, χαλαζία και αιματίτη.

Στιλπνές τομές δεν κατασκευάστηκαν για το συγκεκριμένο κοκκομετρικό κλάσμα λόγω τις πολύ μικρής κοκκομετρίας του, με αποτέλεσμα να μη γίνει ανάλυση με το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο.

#### 4.1.4.3 Συμπεράσματα μαγνητικού διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος -0.038 mm

Από το μαγνητικό διαχωρισμό του κοκκομετρικού κλάσματος -0.038 mm προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η κατανομή του βάρους είναι διαφορετική σε σύγκριση με τα προηγούμενα κοκκομετρικά κλάσματα.
- Η αποδόσμευση των μη μαγνητικών με τα μαγνητικά ορυκτά φαίνεται να έχει βελτιωθεί σε σύγκριση με τα προηγούμενα κοκκομετρικά κλάσματα. Αυτή η παρατήρηση προκύπτει από τον πίνακα των χημικών αναλύσεων (Πίνακας 4.8)

από τον οποίο παρατηρείται ότι το πυρίτιο είναι αρκετά μειωμένο στο πρώτο μαγνητικό σε σύγκριση με το δεύτερο μαγνητικό και το μη μαγνητικό προϊόν.

- Η συγκέντρωση του νικελίου στο πρώτο μαγνητικό προϊόν είναι 1.06%. Λόγω αυτής της συγκέντρωσης το συγκεκριμένο προϊόν μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή νικελίου με πυρομεταλλουργική μέθοδο.
- Τα οξειδία του σιδήρου παρουσιάζουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο πρώτο μαγνητικό προϊόν ωστόσο παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση και στο μη μαγνητικό προϊόν.
- Το μαγνήσιο παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση στο πρώτο μαγνητικό προϊόν γεγονός το οποίο αναμενόταν, αφού η εμφάνιση νικελίου συνοδεύεται με υψηλή εμφάνιση μαγνησίου.
- Από τον πίνακα που παρουσιάζονται τα αθροιστικά αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού (Πίνακας 4.9) παρατηρείται ότι αν ληφθεί ένα συμπύκνωμα, που αποτελείται από τα δύο μαγνητικά προϊόντα, τότε αυτό θα περιέχει 0.87% Ni.

#### 4.1.5 Συμπεράσματα μαγνητικού διαχωρισμού

Από τη διαδικασία του μαγνητικού εμπλουτισμού στα κοκκομετρικά κλάσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Από την κατανομή των βαρών των προϊόντων των μαγνητικών διαχωρισμών παρατηρείται ότι το υλικό περιέχει πολλά οξειδία του σιδήρου. Λόγω της κατανομής του βάρους, οι οποίες είναι ιδιαίτερα αυξημένες στα κοκκομετρικά κλάσματα 0.2-1 mm και 0.2-0.038 mm, τα στοιχεία κατανέμονται στο πρώτο μαγνητικό κλάσμα.
- Η αποδέσμευση του υλικού φαίνεται ότι βελτιώνεται με την ελάττωση του μεγέθους των κόκκων.
- Το νικέλιο δεν παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση από 1% στα δείγματα, εκτός από το πρώτο μαγνητικό προϊόν του κοκκομετρικού κλάσματος -38  $\mu\text{m}$  το οποίο αποτελεί το 24.99% του κοκκομετρικού κλάσματος.
- Τα οξειδία του σιδήρου κατανέμονται στο πρώτο μαγνητικό προϊόν ως επί το πλείστον, και στο δεύτερο. Ωστόσο στο κοκκομετρικό κλάσμα -38  $\mu\text{m}$  παρατηρείται στο μη μαγνητικό προϊόν συγκέντρωση οξειδίων του σιδήρου της τάξεως του 20%. Επίσης μόνο στο κοκκομετρικό κλάσμα 0.038-0.2 mm παρατηρείται συγκέντρωση οξειδίων του σιδήρου μεγαλύτερη του 50% που χρειάζεται ένα συμπύκνωμα για να εκμεταλλευτεί για τον περιεχόμενο σίδηρο.
- Το πυρίτιο ισοκατανέμεται σε όλα τα προϊόντα των κοκκομετρικών κλασμάτων αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πυρίτιο είναι στοιχείο του χλωρίτη και δεν αποδεσμεύεται εύκολα. Οι δοκιμές έδειξαν ότι υπάρχει ικανοποιητική μείωση του πυριτίου σε μαγνητικό προϊόν μόνο στο κοκκομετρικό κλάσμα -38  $\mu\text{m}$ .
- Το μαγνήσιο και το αργίλιο συγκεντρώνονται, όπου μετρήθηκαν, στα προϊόντα των μαγνητών που συγκεντρώνεται και το νικέλιο.
- Το ανθρακικό ασβέστιο συγκεντρώνεται στο μη μαγνητικό προϊόν.
- Η απώλεια πύρωσης (LOI) είναι μεγαλύτερη στα μη μαγνητικά προϊόντα των μαγνητικών διαχωρισμών. Στα μαγνητικά προϊόντα η απώλεια πύρωσης οφείλεται στο κρυσταλλικό νερό, που μπορεί να υπάρχει στα ορυκτά, αλλά και στην

αποδέσμευση του CO<sub>2</sub> από το ανθρακικό ασβέστιο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση κρυσταλλικό νερό περιέχει ο χλωρίτης που συγκεντρώνεται στα μαγνητικά προϊόντα ενώ η απώλεια πύρωσης στα μη μαγνητικά προϊόντα οφείλεται στο CO<sub>2</sub>.

- Το κοβάλτιο συγκεντρώνεται στα μαγνητικά προϊόντα.
- Από τα αθροιστικά αποτελέσματα δεν προκύπτει ότι κάποιο κοκκομετρικό κλάσμα μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή σιδήρου εκτός από το αθροιστικό μαγνητικό του κοκκομετρικού κλάσματος 0.038-0.2 mm το οποίο έχει περιεκτικότητα 52% και αποτελεί το 82% του βάρους του συγκεκριμένου κοκκομετρικού κλάσματος.

## 4.2 Επίπλευση

### 4.2.1 Πειραματική διαδικασία

Η μέθοδος της επίπλευσης επιλέχθηκε με στόχο το διαχωρισμό των σιδηρούχων ορυκτών από τον ελεύθερο χαλαζία για τα μαγνητικά προϊόντα των κοκκομετρικών κλασμάτων 1-4 mm και 0.2-1 mm και τη διερεύνηση δυνατότητας βελτίωσης των αποτελεσμάτων του μαγνητικού διαχωρισμού.

Για να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές της επίπλευσης το δείγμα έσπασε στο σφαιρόμυλο και κοσκινίστηκε στα 38 μm. Το +38 μm ξανατοποθετούταν στο μύλο για να λειοτριβηθεί. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι όλο το υλικό να γίνει -38 μm. Στην συνέχεια το υλικό ξηράθηκε και σε αντιπροσωπευτικό δείγμα πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10. Οι δοκιμές επίπλευσης πραγματοποιήθηκαν με τρία διαφορετικά αντιδραστήρια.

- Στην πρώτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η τεταρτοταγή αμίνη, ως συλλέκτης, με σκοπό την επίπλευση του χαλαζία (αντίστροφη επίπλευση).
- Στη δεύτερη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ο συλλέκτης AERO 726, με σκοπό την επίπλευση των σιδηρούχων ορυκτών.
- Στην τρίτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ο συλλέκτης AERO 6493, με σκοπό την επίπλευση των σιδηρούχων ορυκτών.

#### 4.2.1.1 Επίπλευση με τεταρτοταγή αμίνη

Για να πραγματοποιηθεί η επίπλευση χρησιμοποιήθηκε το αντιδραστήριο της τεταρτοταγούς αμίνης το οποίο αποτελούταν από 10 g αμίνης, 70 ml diesel και 3 ml πευκέλαιο. Μία δόση αντιδραστηρίου (3.5 ml) αντιστοιχεί σε 1kg αμίνης ανά τόνο μεταλλεύματος.

Στη συνέχεια δείγμα βάρους 500 g τοποθετήθηκε στην κυψέλη επίπλευσης και πληρώθηκε με νερό με σκοπό τη δημιουργία πολφού. Μετρήθηκε το pH του πολφού και στη συνέχεια τέθηκε σε λειτουργία ο αναδευτήρας με σκοπό τη διατήρηση της αιώρησης των στερεών. Το pH ρυθμίστηκε με τη χρήση θειικού οξέος και διατηρήθηκε στο 4, με σκοπό τη διατήρηση της αρνητικής φόρτισης του χαλαζία, και προστέθηκε μία δόση αντιδραστηρίου. Αφού προηγήθηκαν πέντε λεπτά χρόνου προοδοποίησης τέθηκε σε λειτουργία η διάχυση αέρα στην κυψέλη με σκοπό τη δημιουργία φυσαλίδων και την επίπλευση του υδρόφοβου χαλαζία. Ο χρόνος της επίπλευσης ήταν πέντε λεπτά. Η διαδικασία επαναλήφθηκε τέσσερις φορές και συλλέχθηκαν τέσσερα επιπλεύσαντα προϊόντα και ένα παραμένον. Τα δείγματα ζυγίστηκαν και αναλύθηκαν.

#### 4.2.1.2 Επίπλευση με AERO 726 και 6493

Για να πραγματοποιηθεί η επίπλευση με τα αντιδραστήρια AERO 726 και 6493 παρασκευάστηκε διάλυμα που περιείχε 10% αντιδραστήριο και το υπόλοιπο αποτελούταν από νερό. Στις συγκεκριμένες εφαρμογές δε χρειαζόταν προσθήκη αφριστικού αντιδραστήριου διότι οι συλλέκτες δρουν και ως αφριστικά αντιδραστήρια. Η αναλογία που ακολουθήθηκε ήταν 1kg ανά τόνο μεταλλεύματος.

Η υπόλοιπη διαδικασία είναι ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε στην τεταρτοταγή αμίνη. Το pH για το AERO 726 ρυθμίστηκε στο 6.5 και για το AERO 6493 ρυθμίστηκε στο 5. Συνολικά συλλέχθηκαν πέντε επιπλεύσαντα προϊόντα και ένα παραμένον και από τα δυο αντιδραστήρια.

#### 4.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο πίνακας 4.10 παρουσιάζει τη χημική ανάλυση της τροφής που χρησιμοποιήθηκε για την επίπλευση.

Πίνακας 4.10: Χημικές αναλύσεις τροφής επίπλευσης.

Δείγμα	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %							
	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Τροφή	0.64	59.79	18.04	1.68	0.06	8.85	1.62	7.23

Από τον Πίνακα 4.10 παρατηρείται ότι η τροφή δεν έχει εμπλουτιστεί σε Ni, παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν τα μαγνητικά προϊόντα των κοκκομετρικών κλασμάτων 1-4 mm και 0.2-1 mm, ωστόσο είναι εμπλουτισμένο ως προς τον σίδηρο. Το οξείδιο του πυριτίου παρουσιάζεται αυξημένο ενώ το οξείδιο του ασβεστίου είναι μειωμένο.

##### 4.2.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων τεταρτοταγούς αμίνης

Στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία της επίπλευσης και η κατανάλωση του αντιδραστήριου και στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιπλεύσεων της αμίνης.

Πίνακας 4.11: Χρόνος επίπλευσης και κατανάλωση αντιδραστήριου.

Στάδιο επίπλευσης	Κατανάλωση αντιδραστήριου kg/ton	Χρόνος προόδοποίησης (min)	Χρόνος επίπλευσης (min)
1ο	1	5	5
2ο	1	5	5
3ο	1	5	4
4ο	1	5	4.5
Παραμένον	-	-	-
Σύνολο	4	20	18.5

Πίνακας 4.12: Χημικές αναλύσεις στα προϊόντα της επίπλευσης με αντιδραστήριο την αμίνη.

Στάδιο επίπλευσης	Βάρος (g)	% Βάρος	Κατανάλωση αντιδραστηρίου kg/ton	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
				Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1 <sup>ο</sup>	65.52	13.40	1	0.75	52.47	23.00	2.10	0.07	11.54	1.65	9.89	14.74	11.99	17.91	20.75	13.11	16.86	20.75	16.35
2 <sup>ο</sup>	102.09	20.88	1	0.71	52.87	22.30	1.33	0.06	10.52	1.05	9.48	21.54	18.82	27.05	20.48	19.37	23.96	20.48	24.42
3 <sup>ο</sup>	34.91	7.14	1	0.64	55.07	17.85	1.57	0.07	9.97	1.23	8.74	6.68	6.70	7.40	8.26	6.89	7.76	8.26	7.70
4 <sup>ο</sup>	40.53	8.29	1	0.67	58.18	17.00	1.47	0.07	9.20	1.16	8.05	8.12	8.22	8.19	8.98	8.34	8.32	8.98	8.23
Παραμένον	245.90	50.29	-	0.67	63.29	13.50	1.12	0.07	7.86	0.88	6.98	48.91	54.27	39.45	41.53	52.29	43.09	41.53	43.30
<b>Σύνολο</b>	<b>488.95</b>	<b>100</b>	<b>4</b>	<b>0.69</b>	<b>58.65</b>	<b>17.21</b>	<b>1.36</b>	<b>0.07</b>	<b>9.17</b>	<b>1.07</b>	<b>8.10</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

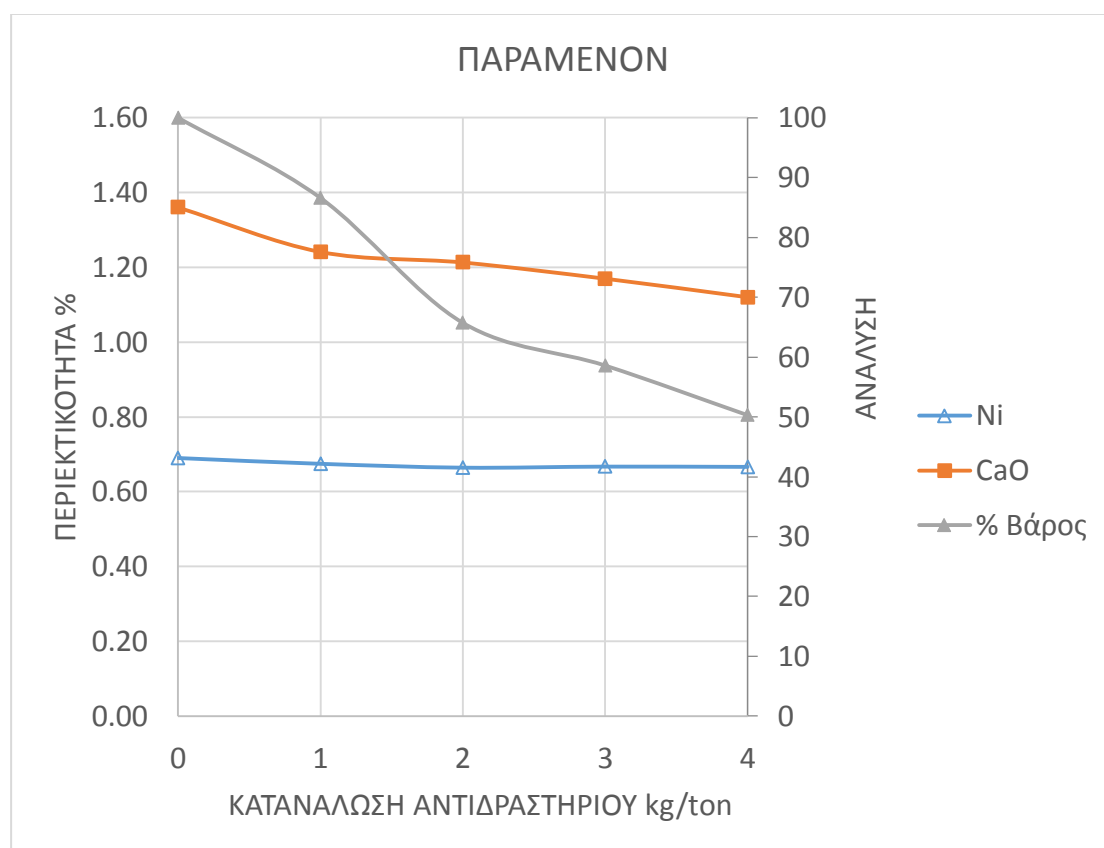
Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα αθροιστικού παραμένουτος αμίνης.

Στάδιο επίπλευσης	% Βάρος	Κατανάλωση αντιδραστηρίου kg/ton	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
			Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1 <sup>ο</sup>	86.60	1	0.67	59.61	16.32	1.24	0.07	8.80	0.98	7.83	85.26	88.01	82.09	79.25	86.89	83.14	79.25	83.65
2 <sup>ο</sup>	65.72	2	0.66	61.75	14.41	1.21	0.07	8.26	0.95	7.30	63.71	69.19	55.04	58.77	67.52	59.18	58.77	59.23
3 <sup>ο</sup>	58.58	3	0.67	62.56	14.00	1.17	0.07	8.05	0.92	7.13	57.03	62.49	47.63	50.52	60.63	51.41	50.52	51.53
4 <sup>ο</sup>	50.29	4	0.67	63.29	13.50	1.12	0.07	7.86	0.88	6.98	48.91	54.27	39.45	41.53	52.29	43.09	41.53	43.30

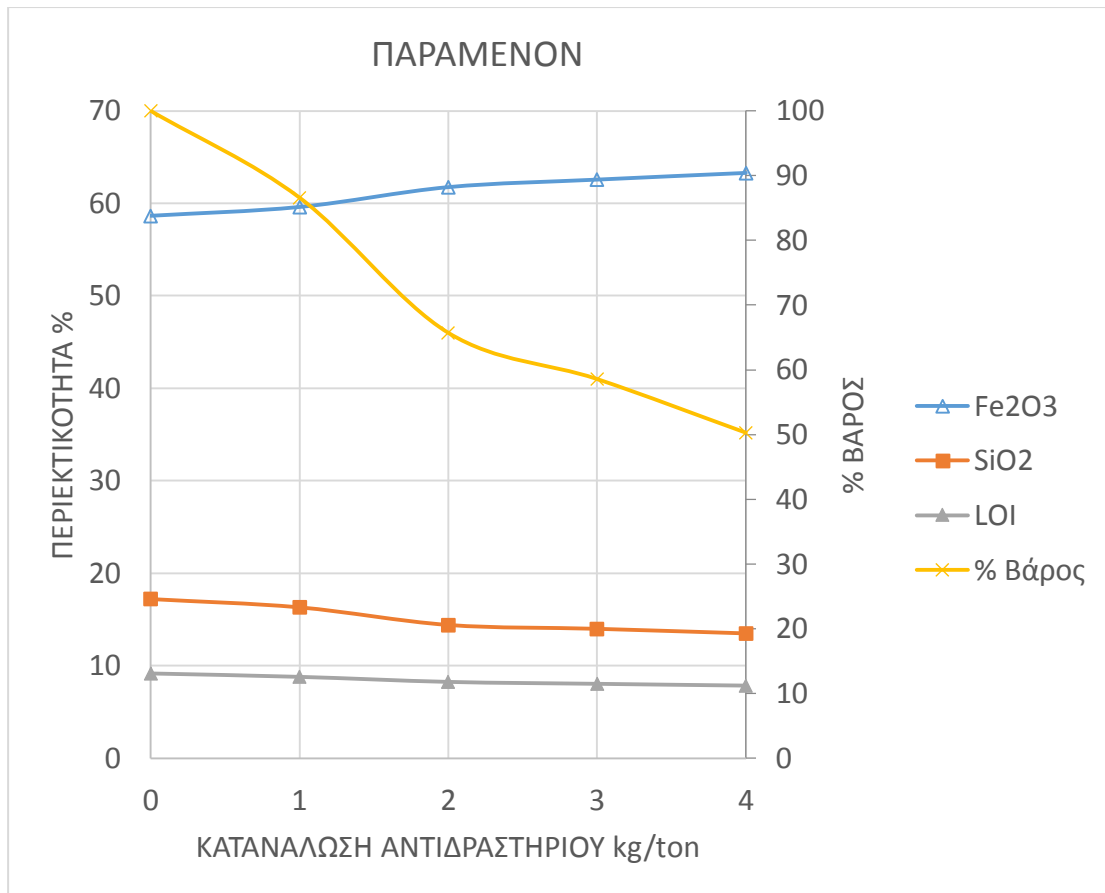
Από τον Πίνακα 4.12 παρατηρείται ότι το Ni εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο πρώτο στάδιο της επίπλευσης ωστόσο το συνολικό βάρος είναι μόνο το 13.4% της τροφής επίσης την κατανομή του Ni στα δείγματα ακολουθεί και η κατανομή του νερού. Η περιεκτικότητα των οξειδίων του σιδήρου αυξάνει καθώς προχωράει η διαδικασία και φτάνει μέχρι το 63.29% στο παραμένον. Το πυρίτιο κατανέμεται κυρίως στο παραμένον λόγω του αυξημένου ποσοστού του βάρους αλλά στο παραμένον εμφανίζει την μικρότερη τιμή συγκέντρωσης, γεγονός αναμενόμενο αφού με την αμίνη επιπλέουν τα πυριτικά ορυκτά.

Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αθροιστικού παραμένουτος προϊόντος. Παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα του Ni παραμένει ίδια όπως και του  $H_2O$ . Τα οξείδια του σιδήρου εμπλουτίζονται στο παραμένον και το πυρίτιο απομακρύνεται με την προσθήκη αμίνης στον πολφό.

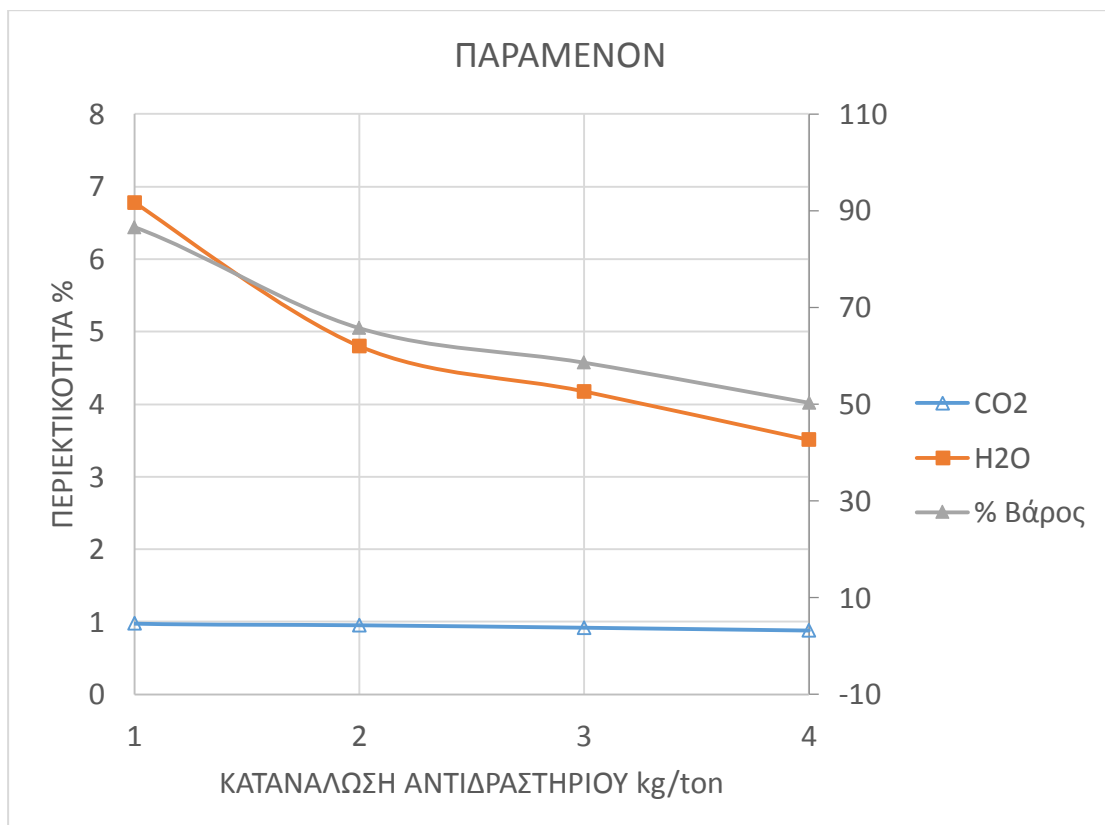
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της περιεκτικότητας των στοιχείων, του % βάρους συναρτήσει της κατανάλωσης του αθροιστικού παραμένουτος.



Σχήμα 4.19: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) Ni και CaO συναρτήσει της κατανάλωσης αμίνης.



Σχήμα 4.20: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> και LOI συναρτήσει της κατανάλωσης αμίνης.



Σχήμα 4.21: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O συναρτήσει της κατανάλωσης αμίνης.

#### 4.2.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων AERO 726

Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία της επίπλευσης και η κατανάλωση του αντιδραστηρίου και στον Πίνακα 4.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιπλεύσεων με το αντιδραστήριο AERO 726.

Πίνακας 4.14: Χρόνος επίπλευσης και κατανάλωση αντιδραστηρίου.

Στάδιο επίπλευσης	Κατανάλωση αντιδραστηρίου kg/ton	Χρόνος προοδοποίησης (min)	Χρόνος επίπλευσης (min)
1 <sup>ο</sup>	1	5	5
2 <sup>ο</sup>	1	5	5
3 <sup>ο</sup>	1	5	5
4 <sup>ο</sup>	1	5	4
5 <sup>ο</sup>	1	5	5.5
Παραμένον	-	-	-
Σύνολο	5	25	24.5



Πίνακας 4.15: Χημικές αναλύσεις στα προϊόντα της επίπλευσης με αντιδραστήριο το AERO 726.

Στάδιο επίπλευσης	Βάρος (g)	% Βάρος	Κατανάλωση αντιδραστηρίου kg/ton	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
				Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1°	89.18	18.32	1	0.71	53.22	19.33	1.85	0.07	10.59	1.45	9.14	18.85	16.32	20.22	36.01	18.75	22.08	36.01	20.80
2°	95.16	19.55	1	0.73	54.95	13.44	1.62	0.07	10.50	1.28	9.23	20.66	17.98	15.01	33.76	19.62	23.36	33.76	22.41
3°	89.00	18.29	1	0.60	62.42	19.60	0.85	0.06	8.88	0.67	8.21	15.83	19.10	20.47	16.61	17.48	18.48	16.61	18.65
4°	73.25	15.05	1	0.55	73.05	11.43	0.49	0.06	6.04	0.39	5.66	12.13	18.39	9.82	7.84	13.71	10.35	7.84	10.57
5°	77.21	15.86	1	0.49	68.67	20.90	0.13	0.06	7.14	0.10	7.04	11.19	18.23	18.94	2.13	14.67	12.89	2.13	13.88
Παραμέ νον	62.90	12.92	-	1.14	46.19	21.05	0.27	0.08	8.74	0.21	8.53	21.35	9.99	15.54	3.66	15.77	12.84	3.66	13.69
<b>Σύνολο</b>	<b>486.7</b>	<b>100</b>	<b>5</b>	<b>0.69</b>	<b>59.77</b>	<b>17.51</b>	<b>0.94</b>	<b>0.07</b>	<b>8.79</b>	<b>0.74</b>	<b>8.05</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

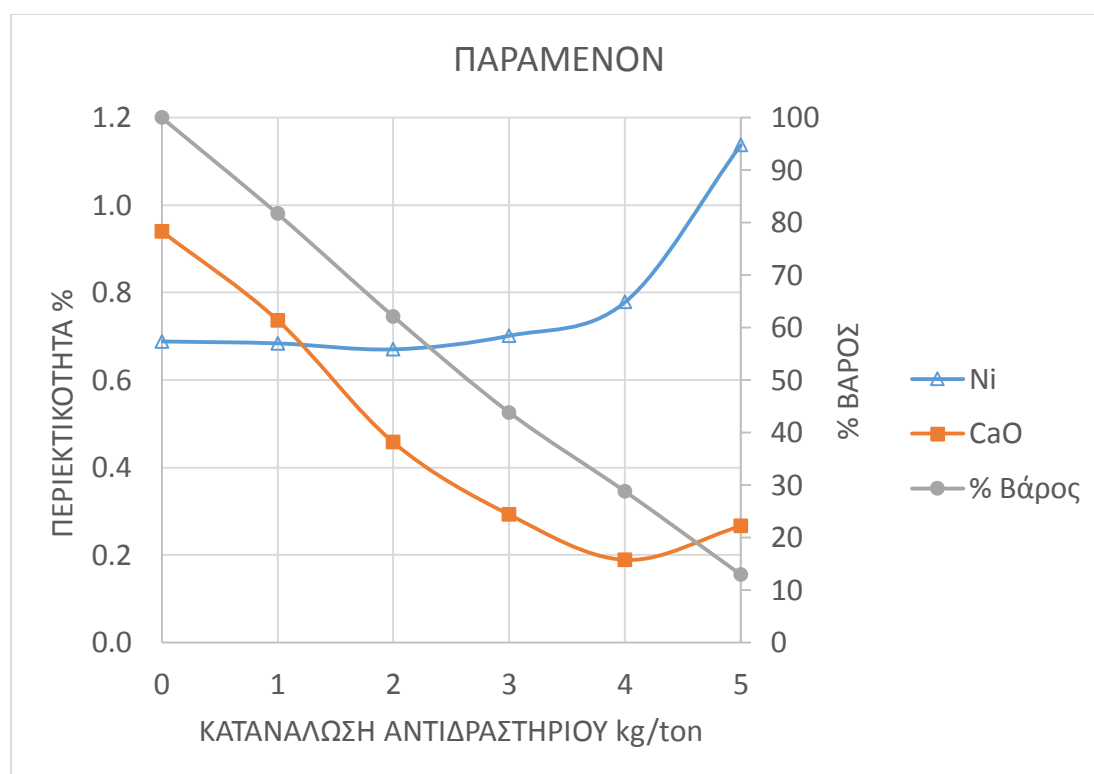
Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα αθροιστικού παραμένοντος AERO 726

Στάδιο επίπλευσης	% Βάρος	Κατανάλωση αντιδραστηρίου kg/ton	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
			Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1°	81.68	1	0.68	61.23	17.10	0.74	0.065	8.39	0.58	7.81	81.15	83.68	79.78	63.99	81.25	77.92	63.99	79.20
2°	62.12	2	0.67	63.21	18.25	0.46	0.065	7.72	0.36	7.36	60.50	65.71	64.76	30.23	61.62	54.56	30.23	56.79
3°	43.84	3	0.70	63.55	17.69	0.29	0.066	7.23	0.23	7.00	44.67	46.61	44.30	13.62	44.15	36.08	13.62	38.14
4°	28.79	4	0.78	58.58	20.97	0.19	0.069	7.86	0.15	7.71	32.54	28.22	34.47	5.78	30.44	25.74	5.78	27.57
5°	12.92	5	1.14	46.19	21.05	0.27	0.080	8.74	0.21	8.53	21.35	9.99	15.54	3.66	15.77	12.84	3.66	13.69

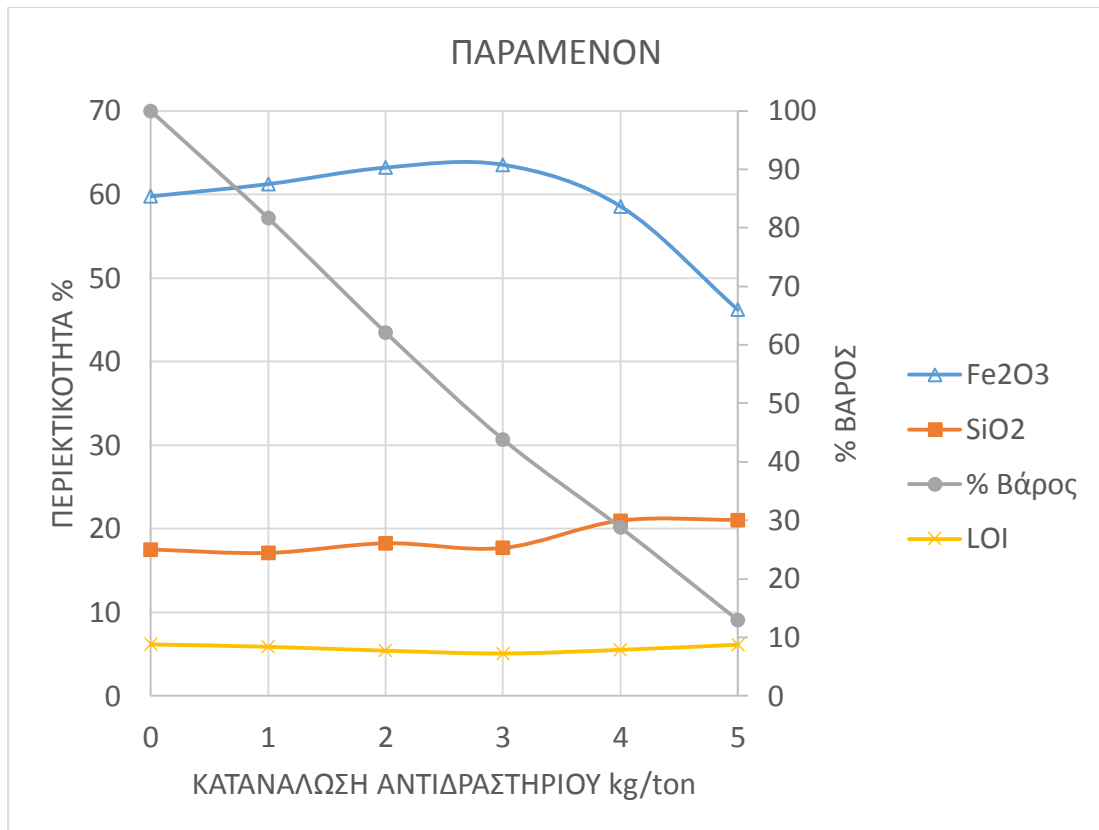
Από τον Πίνακα 4.15 παρατηρείται το ποσοστό βάρους μειώνεται καθώς προχωράει η διαδικασία. Επίσης η περιεκτικότητα και η κατανομή Ni μειώνεται καθώς προστίθεται αντιδραστήριο. Την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και το H<sub>2</sub>O. Στο παραμένον ωστόσο παρουσιάζεται η υψηλότερη συγκέντρωση νικελίου, 1.14%, αλλά αποτελεί μόλις το 13% της τροφής. Τα οξείδια σιδήρου κατανέμονται στα επιπλεύσαντα προϊόντα γεγονός το οποίο αναμένετε αφού με το συγκεκριμένο αντιδραστήριο επιπλέουν τα σιδηρούχα ορυκτά.

Στον Πίνακα 4.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του παραμένοντος προϊόντος. Παρατηρείται ότι οι περιεκτικότητες του Ni, H<sub>2</sub>O, Co και πυριτίου αυξάνονται. Η περιεκτικότητα οξειδίων σιδήρου όπως και του οξειδίου του ασβεστίου μειώνεται

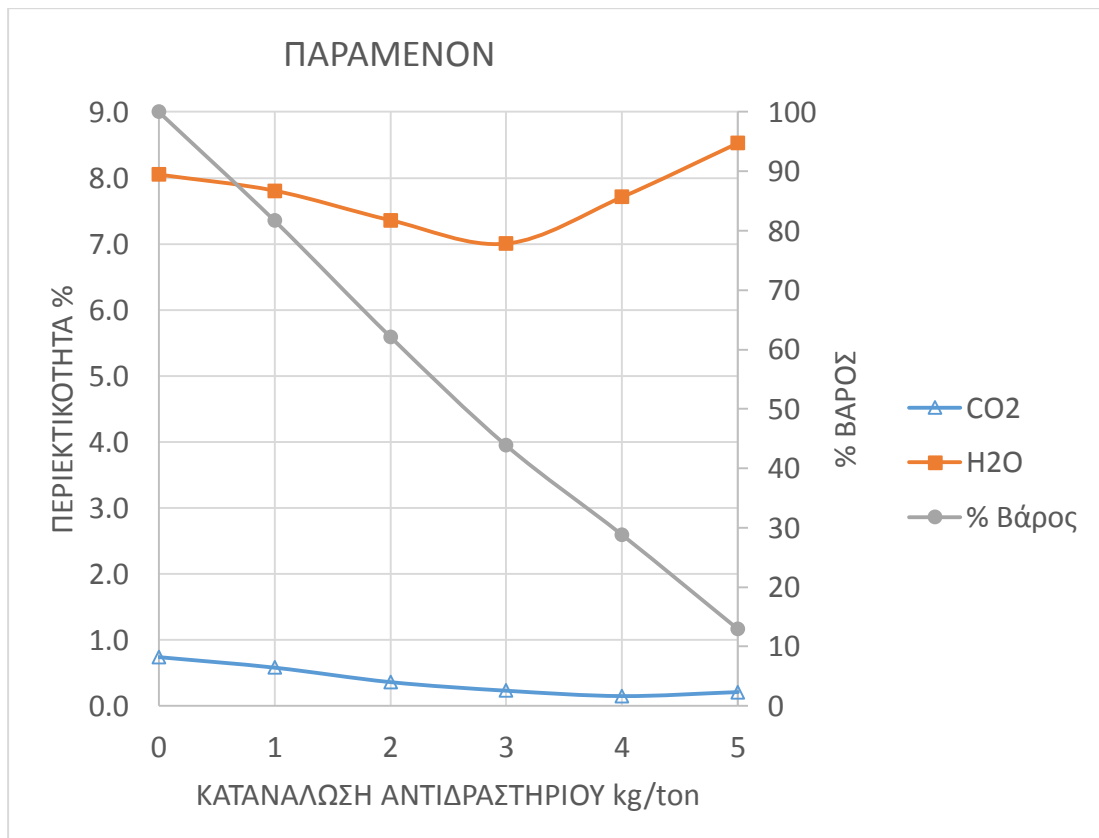
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της περιεκτικότητας των στοιχείων, του % βάρους συναρτήσει της κατανάλωσης αντιδραστηρίου του αθροιστικού παραμένοντος.



Σχήμα 4.22: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) Ni και CaO συναρτήσει της κατανάλωσης του ΑΕΡΟ 726.



Σχήμα 4.23: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> και LOI συναρτήσει της κατανάλωσης του AERO 726.



Σχήμα 4.24: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O συναρτήσει της κατανάλωσης του AERO 726.

#### 4.2.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων AERO 6493

Στον Πίνακα 4.17 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία της επίπλευσης και η κατανάλωση του αντιδραστηρίου. Στον Πίνακα 4.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιπλεύσεων με το αντιδραστήριο AERO 6493.

Πίνακας 4.17: Χρόνος επίπλευσης και κατανάλωση αντιδραστηρίου.

Στάδιο επίπλευσης	Κατανάλωση αντιδραστηρίου kg/ton	Χρόνος προοδοποίησης (min)	Χρόνος επίπλευσης (min)
1 <sup>ο</sup>	1	5	4
2 <sup>ο</sup>	1	5	4
3 <sup>ο</sup>	1	5	5
4 <sup>ο</sup>	1	5	4
5 <sup>ο</sup>	1	5	5
Παραμένον	-	-	-
Σύνολο	5	25	22

Πίνακας 4.18: Χημικές αναλύσεις στα προϊόντα της επίπλευσης με αντιδραστήριο το AERO 6493.

Στάδιο επίπλευσης	Βάρος (g)	% Βάρος	Κατανάλωση αντιδραστηρίου kg/ton	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
				Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1°	85.00	17.22	1	0.73	53.92	19.54	1.54	0.07	10.36	1.21	9.15	17.88	15.65	18.08	20.47	17.81	19.64	20.47	19.54
2°	58.00	11.75	1	0.74	53.60	21.74	1.09	0.07	10.44	0.85	9.58	12.38	10.62	13.73	9.87	12.56	13.50	9.87	13.96
3°	64.70	13.11	1	0.65	58.58	19.20	1.68	0.06	9.74	1.32	8.41	12.09	12.94	13.52	17.05	12.53	14.05	17.05	13.67
4°	77.70	15.74	1	0.46	74.77	14.86	0.64	0.06	5.79	0.50	5.29	10.18	19.84	12.57	7.80	13.53	10.04	7.80	10.32
5°	59.00	11.95	1	0.53	72.40	14.78	1.01	0.06	7.55	0.79	6.76	8.97	14.59	9.49	9.31	10.75	9.93	9.31	10.01
Παραμένον	149.20	30.23	-	0.90	51.75	20.08	1.52	0.07	9.87	1.19	8.67	38.50	26.37	32.61	35.50	32.82	32.83	35.50	32.49
<b>Σύνολο</b>	<b>493.60</b>	<b>100</b>	<b>5</b>	<b>0.70</b>	<b>59.33</b>	<b>18.61</b>	<b>1.29</b>	<b>0.07</b>	<b>9.08</b>	<b>1.02</b>	<b>8.07</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

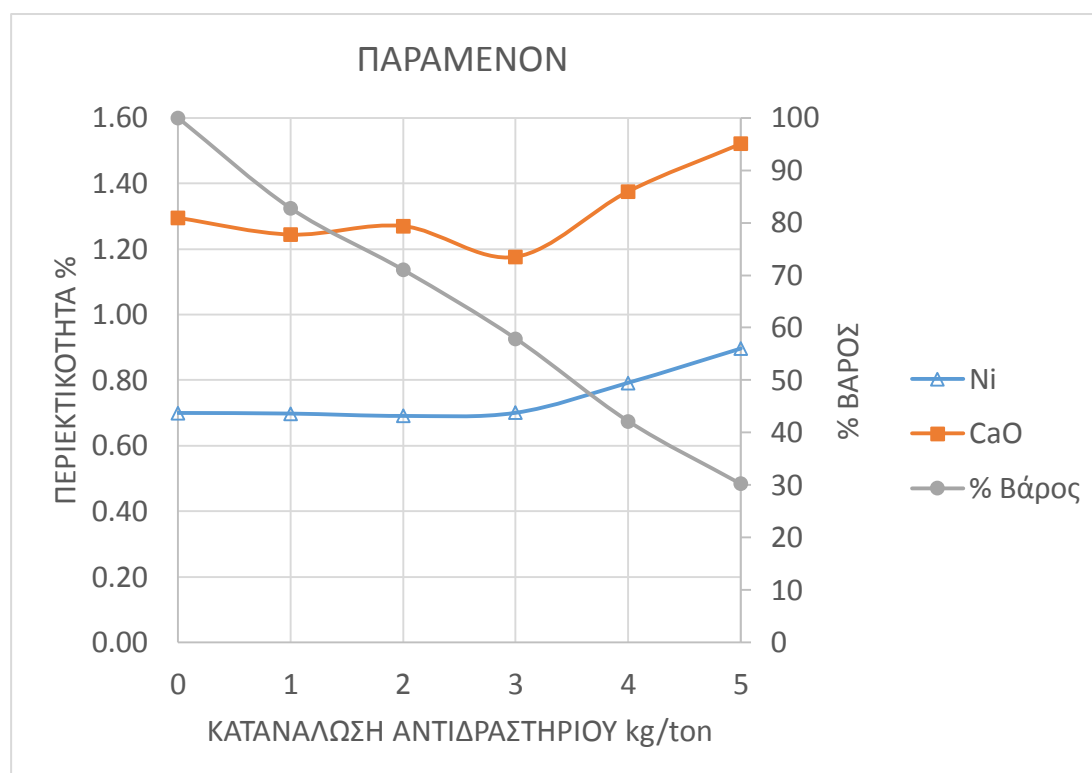
Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα αθροιστικού παραμένοντος AERO 6493.

Στάδιο επίπλευσης	% Βάρος	Κατανάλωση αντιδραστηρίου kg/ton	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ %								ΚΑΤΑΝΟΜΗ %							
			Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Co	LOI	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1°	82.78	1	0.70	60.46	18.42	1.24	0.07	8.82	0.98	7.84	82.12	84.35	81.92	79.53	82.19	80.36	79.53	80.46
2°	71.03	2	0.69	61.59	17.87	1.27	0.06	8.55	1.00	7.55	69.74	73.73	68.19	69.66	69.63	66.85	69.66	66.50
3°	57.92	3	0.70	62.27	17.57	1.18	0.07	8.28	0.92	7.36	57.65	60.79	54.67	52.61	57.10	52.80	52.61	52.83
4°	42.18	4	0.79	57.60	18.58	1.38	0.07	9.21	1.08	8.13	47.48	40.95	42.10	44.81	43.57	42.76	44.81	42.51
5°	30.23	5	0.90	51.75	20.08	1.52	0.07	9.87	1.19	8.67	38.50	26.37	32.61	35.50	32.82	32.83	35.50	32.49

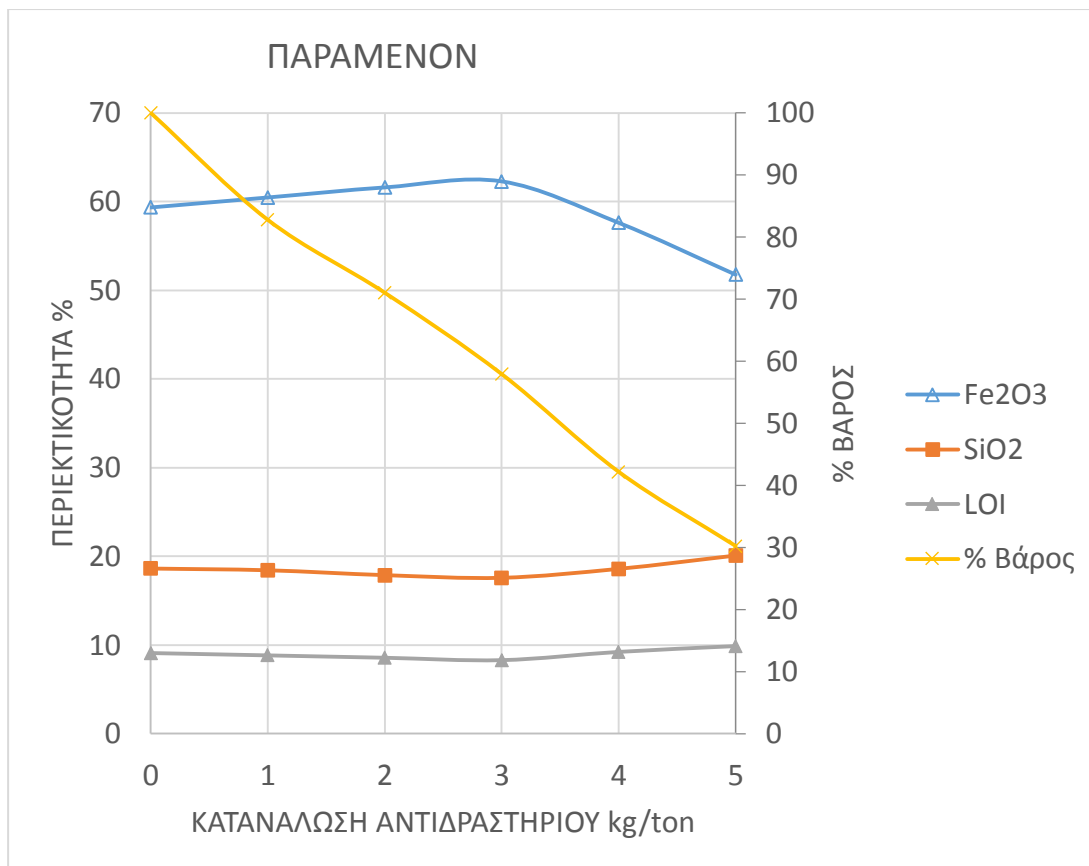
Από τον Πίνακα 4.18 παρατηρείται το Ni συγκεντρώνεται πρωτίστως στο παραμένον και δευτερευόντως στα δύο πρώτα στάδια της επίπλευσης. Την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και το H<sub>2</sub>O. Η κατανομή του Ni και του H<sub>2</sub>O μειώνεται καθώς προστίθεται αντιδραστήριο. Τα οξείδια σιδήρου κατανέμονται στα επιπλεύσαντα προϊόντα γεγονός το οποίο αναμένετε αφού με το συγκεκριμένο αντιδραστήριο επιπλέουν τα σιδηρούχα ορυκτά.

Στον Πίνακα 4.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αθροιστικού παραμένουτος προϊόντος. Παρατηρείται η περιεκτικότητα του Ni αρχικά παραμένει σταθερή και στην συνέχεια αυξάνεται. Το H<sub>2</sub>O και το πυρίτιο εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές στα κλάσματα όπου το Ni έχει υψηλές τιμές. Τέλος η περιεκτικότητα των οξειδίων του σιδήρου αυξάνεται μέχρι το πέμπτο αθροιστικό παραμένον και στην συνέχεια μειώνεται.

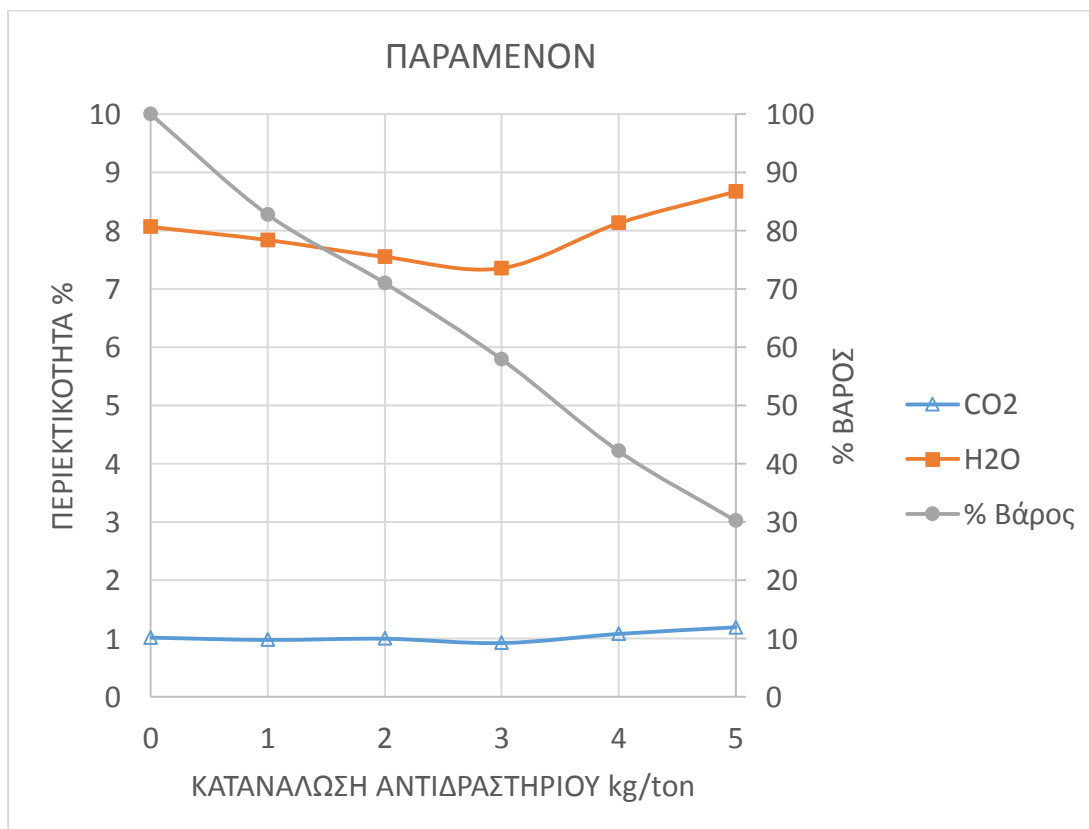
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της περιεκτικότητας των στοιχείων, του % βάρους συναρτήσει της κατανάλωσης του αντιδραστηρίου του παραμένουτος.



Σχήμα 4.25: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) Ni και CaO συναρτήσει της κατανάλωσης του AERO 6493.



Σχήμα 4.26: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> και LOI συναρτήσει της κατανάλωσης του AERO 6493.



Σχήμα 4.27: % Βάρος και περιεκτικότητα (%) CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O συναρτήσει της κατανάλωσης του AERO 6493.

#### 4.2.3 Γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την επίπλευση

Από τις δοκιμές με επίπλευση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Από τους Πίνακες 4.12, 4.13, 4.15, 4.16, 4.18, 4.19 παρατηρείται ότι η επίπλευση δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο αφορά τον εμπλουτισμό Ni. Στην αμίνη συγκεκριμένα το Ni φαίνεται να έχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στο πρώτο στάδιο της επίπλευσης αλλά αθροιστικά ισοκατανέμεται. Στην επίπλευση με το αντιδραστήριο AERO 726 το Ni φαίνεται να ισοκατανέμεται αλλά παρουσιάζει, στο παραμένον κλάσμα, συγκέντρωση 1.14%, ωστόσο αυτό αποτελεί μόνο το 13% της τροφής. Στην επίπλευση με το αντιδραστήριο AERO 6493 το Ni παρουσιάζει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στα δύο πρώτα στάδια της επίπλευσης και στο παραμένον.
- Τα οξείδια του σιδήρου παρουσιάζουν μειωμένες τιμές στις συγκεντρώσεις στα κλάσματα που εμφανίζονται αυξημένες τιμές οι συγκεντρώσεις του Ni. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι έχει βελτιωθεί η αποδέσμευση του χλωρίτη από το μαγνητίτη και τον αιματίτη.
- Το πυρίτιο χρησιμοποιώντας την αμίνη ως αντιδραστήριο η συγκέντρωση βαίνει μειούμενη καθώς εξελίσσεται η διαδικασία της επίπλευσης με προσθήκη αντιδραστήριου. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η αμίνη επιπλέει τα πυριτικά ορυκτά. Στην επίπλευση που χρησιμοποιήθηκε το αντιδραστήριο 726 το πυρίτιο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στο παραμένον κλάσμα όπου και παρουσιάζεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση Ni. Στην επίπλευση που χρησιμοποιήθηκε το αντιδραστήριο AERO 6493 οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στα κλάσματα τα οποία δεν έχουν ψηλές συγκεντρώσεις Ni.
- Το οξείδιο του ασβεστίου στην επίπλευση με αντιδραστήριο την αμίνη κατανέμεται στο παραμένον κλάσμα. Στην επίπλευση με αντιδραστήριο το AERO 726 η συγκέντρωση βαίνει μειούμενη και στην επίπλευση με αντιδραστήριο το AERO 6493 κατανέμεται κυρίως στο πρώτο στάδιο της επίπλευσης και στο παραμένον.
- Το Co ισοκατανέμεται στις επιπλεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν τα αντιδραστήρια της αμίνης και το AERO 6493 και παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση στην επίπλευση με αντιδραστήριο AERO 726.
- Η κατανομή του H<sub>2</sub>O ακολουθεί την κατανομή του Ni. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού ο νιμίτης είναι το μόνο ορυκτό που περιέχει στο πλέγμα του H<sub>2</sub>O.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### 5.1 Συμπεράσματα

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις δοκιμές εμπλουτισμού καθώς και από τη μικροσκοπική παρατήρηση είναι ότι το μέταλλευμα δεν μπορεί να εμπλουτιστεί, με τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν, σε νικέλιο πάνω από 1% στο σύνολο του γεγονός που το καθιστά οικονομικά ασύμφορο για παραγωγή νικελίου με πυρομεταλλουργική μέθοδο.

Συγκεκριμένα από τις δοκιμές του μαγνητικού εμπλουτισμού προέκυψε ότι γίνεται:

Καλός διαχωρισμός των μαγνητικών ορυκτών, μαγνητίτη, αιματίτη, χλωρίτη, με των μη μαγνητικών ορυκτών, χαλάζια και των ανθρακικών. Ωστόσο δεν επιτυγχάνεται στο σύνολο των προϊόντων ανάλυση νικελίου μεγαλύτερη από 1%, που ήταν ο στόχος της παρούσας εργασίας, εκτός από το πρώτο μαγνητικό προϊόν του κοκκομετρικού κλάσματος -0.038 mm το οποίο αποτελεί το 24% του συγκεκριμένου κοκκομετρικού κλάσματος. Τα οξειδία του σιδήρου, κατανέμονται στα μαγνητικά προϊόντα χωρίς όμως και έχουν ανάλυση σε σίδηρο μεγαλύτερη του 50%.

Το οξείδιο του πυριτίου εμφανίζεται σε όλα τα προϊόντα των μαγνητικών διαχωρισμών και παρουσιάζει, στα περισσότερα προϊόντα, μεγαλύτερη ανάλυση εκεί που παρουσιάζει και το νικέλιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νικέλιο περιέχεται στο χλωρίτη με αποτέλεσμα να μην είναι διαχωρίσιμα.

Το κοβάλτιο αν και κατανέμεται στα μαγνητικά προϊόντα δεν παρουσιάζει εκμεταλλεύσιμη περιεκτικότητα.

Από τις δοκιμές που έγιναν με την επίπλευση προέκυψε ότι το μέταλλευμα δεν εμπλουτίζεται σε νικέλιο στο σύνολο του. Στη συνέχεια παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές.

Οι αναλύσεις του νικελίου κυμάνθηκαν κάτω από το 1% σε όλα τα προϊόντα της επίπλευσης με όλα τα αντιδραστήρια. Εξαιρέση αποτελεί το παραμένον του αντιδραστήριου 726 το οποίο είχε ανάλυση 1.14% ωστόσο αποτελεί το 12.92% του βάρους της δοκιμής.

Τα οξειδία του σιδήρου παρουσιάζουν μεγαλύτερες αναλύσεις του 60% σε ορισμένα μόνο στάδια της επίπλευσης, όπως στο 3<sup>ο</sup> και στο 4<sup>ο</sup> στάδιο της επίπλευσης με αντιδραστήριο το AERO 726 και στο 4<sup>ο</sup> και στο 5<sup>ο</sup> στάδιο της επίπλευσης με αντιδραστήριο το AERO 6493.

Το οξείδιο του πυριτίου, ως επί το πλείστον, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές ανάλυσης στα στάδια τα οποία παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές ανάλυσης στο νικέλιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νικέλιο και το πυρίτιο αποτελούν συστατικά του χλωρίτη (νιμίτη).

## 5.2 Προτάσεις

Όπως προαναφέρθηκε το νικέλιο βρίσκεται στη συνδετική ύλη των κόκκων που αποτελείται από χλωρίτη. Λόγω του ότι δεν επιτεύχθηκε συμπύκνωμα με ικανοποιητικό βάρος και περιεκτικότητα προτείνεται να ανακτηθεί το περιεχόμενο νικέλιο με τη μέθοδο της εκχύλισης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αρβανιτάκη Χ.Α (2015). “Ανάκτηση Ni από φτωχό λατεριτικό μετάλλευμα με τη μέθοδο της εκχύλισης”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [2] Παναγιωταρά Ε.Μ. (2008). “Εμπλουτισμός λατερίτη με φυσικές και χημικές διεργασίες”, ”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [3] Κουτσαυτάκης Σ. (2011). “Προσδιορισμός βέλτιστων συνθηκών για την ποσοτική ανάκτηση σιδήρου (Fe) από σκωρία βιομηχανίας σιδηρονικελίου”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [4] Κομνίτσας Κ. (2010). “Μεταλλουργικές Διεργασίες”, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [5] Σταμπολιάδης Η. (2008). “Μηχανική των Τεμαχιδίων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [6] Σταμπολιάδης Η. (2008). “Εμπλουτισμός Των Μεταλλευμάτων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [7] Φραγκίσκος, Α & Σ. Κατράκης (1979). "Εισαγωγή εις τον Εμπλουτισμόν των Μεταλλευμάτων και Βιομηχανικών Ορυκτών", Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
- [8] Φασματοσκοπία Ατομικής Απορρόφησης, (1993), Σημειώσεις Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [9] Κωστάκης Γ (1988). “Κεφάλαια ακτινοσκοπίας των κρυστάλλων”, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [10] Γκουτζιούπα Κ. (2015). “Αξιολόγηση ποιοτικών χαρακτηριστικών και διερεύνηση εμπλουτισσιμότητας του νικελιούχου σιδηρομεταλλεύματος του κοιτάσματος Αγίου Αθανασίου (Καστοριά)”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [11] Τσιρίγκας Σ. (2008). “Κατανομή ταξινόμησης και ψηφιακή χαρτογράφηση κοιτασμάτων – ορυχείων στον ελληνικό χώρο”, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [12] Θεοδωρίκας Σ. (2010). “Ορυκτολογία Πετρολογία 3η Έκδοση”, Εκδόσεις Ερωδιός, Θεσσαλονίκη.
- [13] Erin Marsh, Eric Anderson, and Floyd Gray (2013) “Nickel-Cobalt Laterites—A Deposit Model” U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

[a] <http://www.larco.gr>

[b] <http://www.mred.tuc.gr/p0132011.htm>

[c] <http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/metalleytika-orykta/127-lateritis>

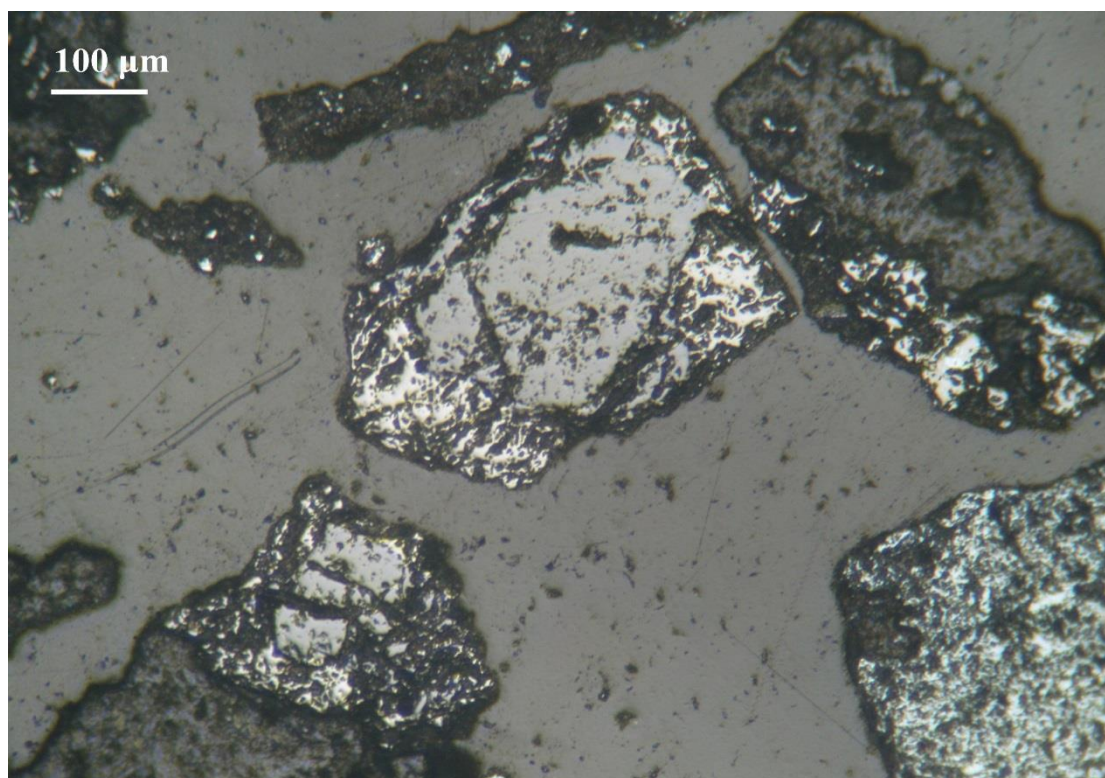
[d] <http://www.encyclopedia.com/science-andtechnology/chemistry/compounds-and-elements/nickel>

[e] <http://www.oryktosploutos.net>

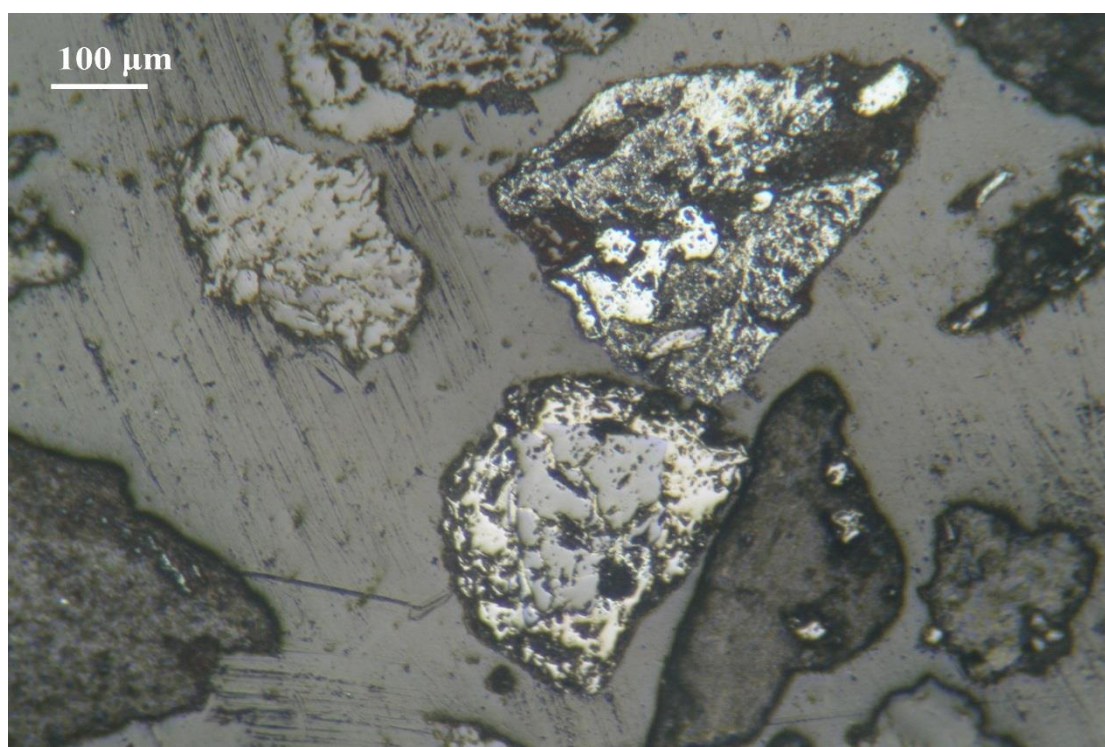
[g] <http://www.ntua.gr>

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1<sup>ο</sup>**

ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΙΛΠΝΩΝ ΤΟΜΩΝ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

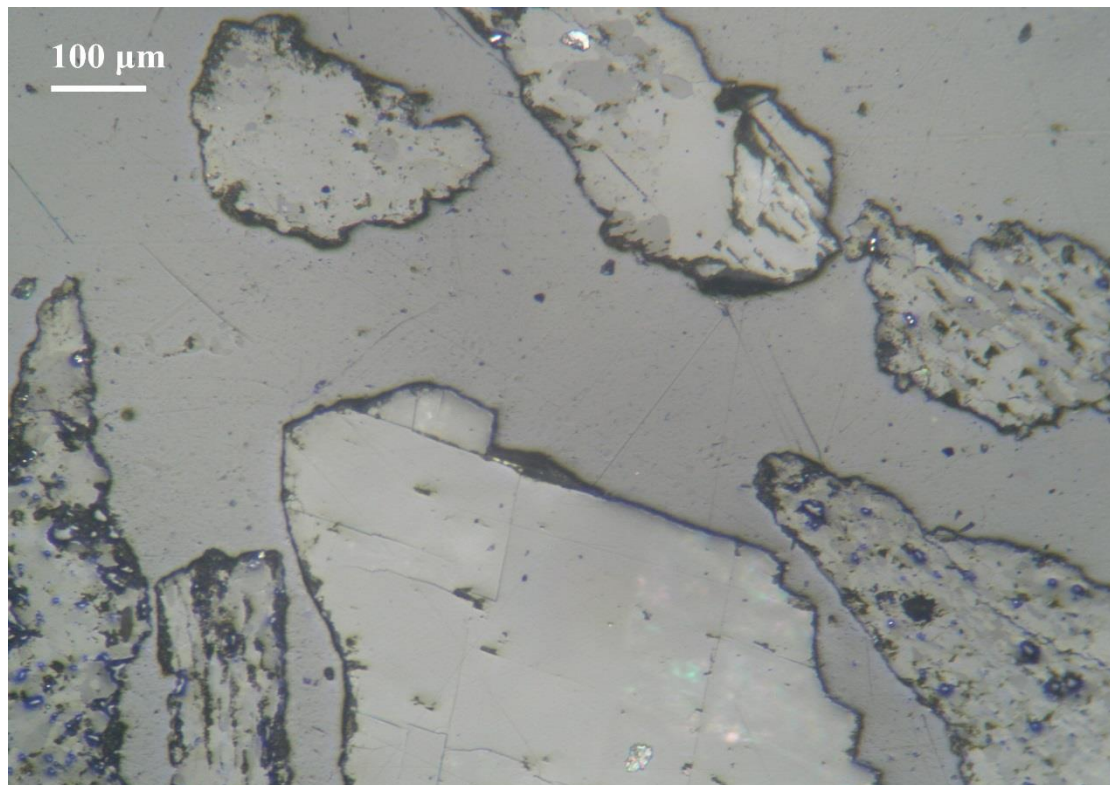


Σχήμα Π1.1: Μερικώς αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη- μαγνητίτη και συνδετικού υλικού.  
Μαγνητικό 1. Κοκκομετρικό κλάσμα 0.2-1 mm.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.

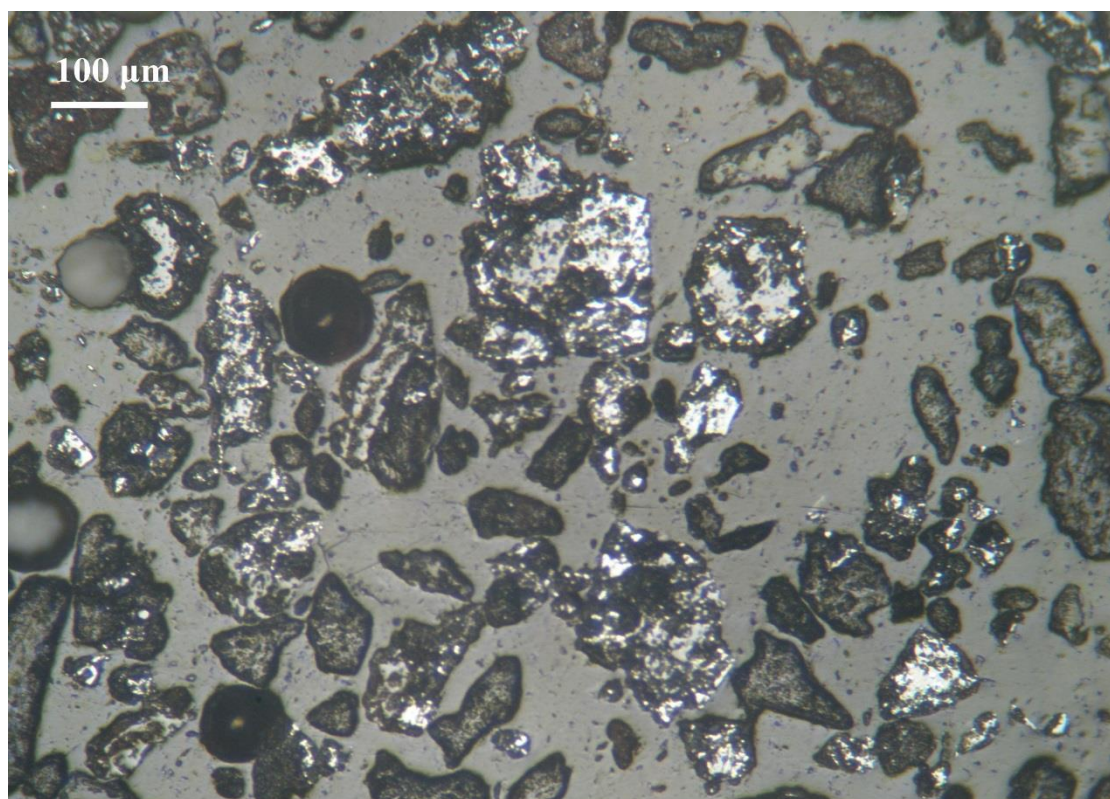


Σχήμα Π1.2: Αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη – μαγνητίτη και ασβεστίτη καθώς και συνδετικού υλικού με εγκλείσματα σιδηρούχων ορυκτών.  
Μαγνητικό 2. Κοκκομετρικό κλάσμα 0.2-1 mm.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.



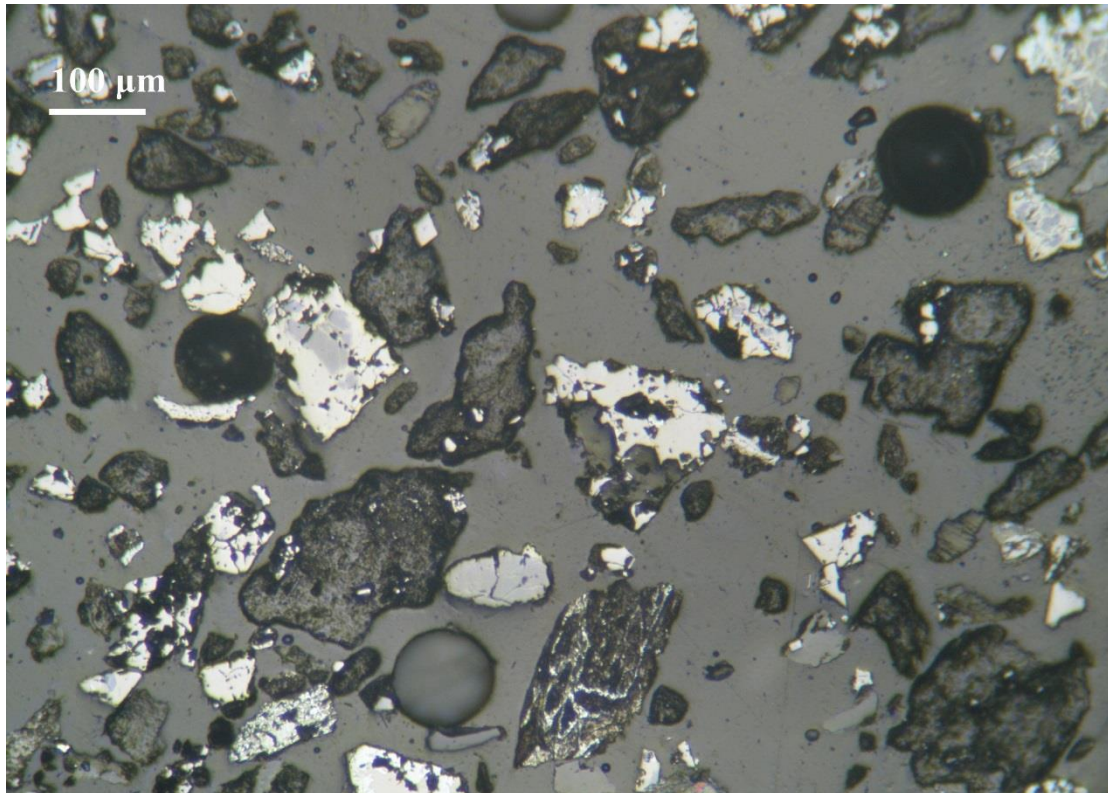


Σχήμα Π1.3: Αποδεσμευμένοι κόκκοι ασβεστίτη.  
Μη Μαγνητικό. Κοκκομετρικό κλάσμα 0.2-1 mm.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.

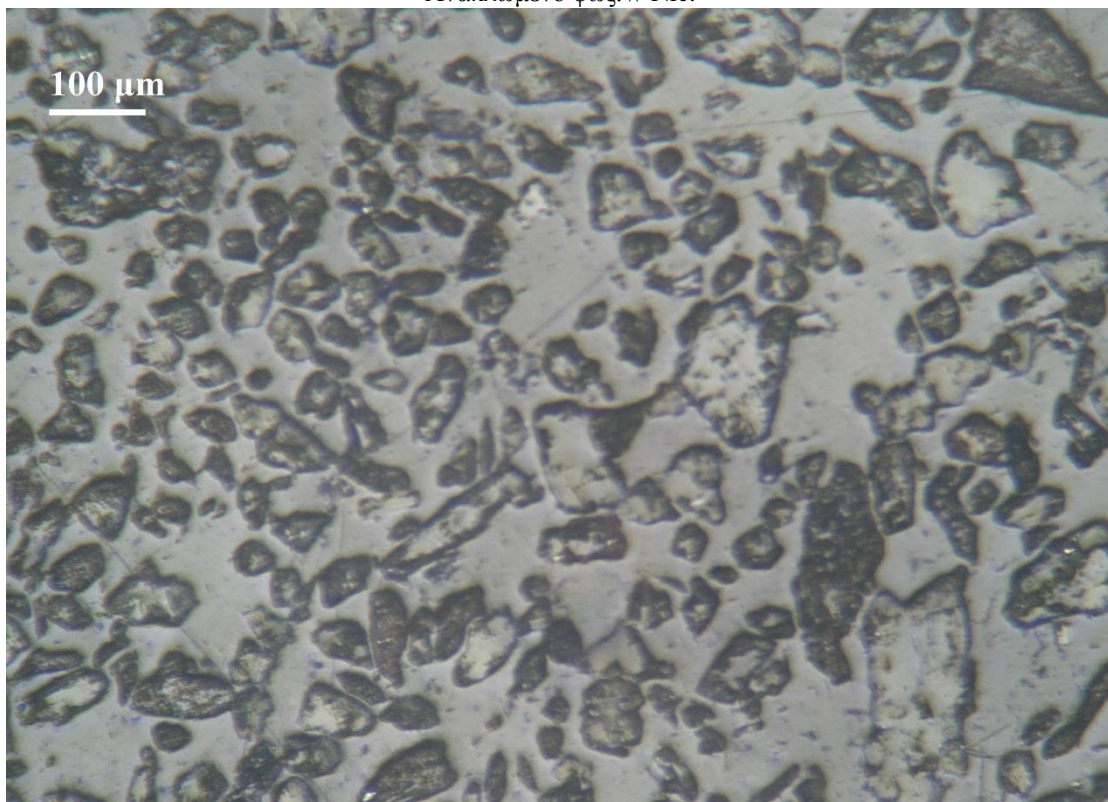


Σχήμα Π1.4: Μερικώς αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη-μαγνητίτη και μεμονωμένοι κόκκοι συνδετικού υλικού και ασβεστίτη.  
Μαγνητικό 1. Κοκκομετρικό κλάσμα 0.038-0.2 mm.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.





Σχήμα Π1.5: Μερικώς αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη-μαγνητίτη και μεμονωμένοι κόκκοι συνδετικού υλικού συχνά με εγκλείσματα σιδηρούχων ορυκτών.  
Μαγνητικό2. Κοκκομετρικό κλάσμα 0.038-0.2 mm.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.



Σχήμα Π1.6: Αποδεσμευμένοι κόκκοι συνδετικού υλικού, ασβεστίτη και χαλαζία.  
Μη Μαγνητικού Κοκκομετρικό κλάσμα 0.038-0.2 mm.  
Ανακλώμενο φως. // Nic.



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2<sup>ο</sup>**

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ MOD SIM ACADEMIC.**

