



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ



ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΑΜΙΝΩΝ ΤΗΣ Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΑΝΝΑ Δ. ΣΑΚΑΡΟΓΛΟΥ

Επιβλέπων:

Γεώργιος Αναστασάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Αθήνα, Ιούλιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΝΙΚΕΛΙΟΥ
ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΑΜΙΝΩΝ
ΤΗΣ Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ**

ΜΑΡΙΑΝΝΑ Δ. ΣΑΚΑΡΟΓΛΟΥ

Επιβλέπων:

Γεώργιος Αναστασάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Αθήνα, Ιούλιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΝΙΚΕΛΙΟΥ
ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΑΜΙΝΩΝ
ΤΗΣ Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ**

ΜΑΡΙΑΝΝΑ Δ. ΣΑΚΑΡΟΓΛΟΥ

Επιβλέπων: Γεώργιος Αναστασάκης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις

.../.../20...

Γεώργιος Αναστασάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Στυλιανή Αγατζίνη-Λεονάρδου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Κωνσταντίνος Τσακαλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....

Μαριάννα Δ. Σακάρου

Copyright © Μαριάννα Δ. Σακάρου, 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αφιερώνεται,
στην οικογένειά μου,
σε όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα
και σε όλους τους επίμονους αγωνιστές του σήμερα...

...Κι ἂν εἶσαι στὸ σκαλὶ τὸ πρῶτο, πρέπει
ναῖσαι ὑπερήφανος κ' εὐτοχισμένος.
Ἐδῶ ποὺ ἔφθασες, λίγο δὲν εἶναι ·
τόσο ποὺ ἔκαμες, μεγάλη δόξα.
Κι αὐτὸ ἀκόμη τὸ σκαλὶ τὸ πρῶτο
πολὸ ἀπὸ τὸν κοινὸ τὸν κόσμον ἀπέχει.

«Τὸ Πρῶτο Σκαλὶ» (στ. 12-17)

Κωνσταντῖνος Π. Καβάφης, 1863-1933

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, η υλοποίηση της οποίας ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2015, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων, της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ολοκλήρωσή της, τον Ιούλιο του ίδιου έτους, σημαίνει το τέλος της πενταετούς φοίτησής μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών. Νιώθω μεγάλη υπερηφάνεια και τιμή που υπήρξα μέλος αυτού του ιστορικού Ιδρύματος.

Η εργασία αποτελεί μία εργαστηριακή έρευνα πάνω στην δυνατότητα ανάκτησης του νικελίου από τη σκουριά των ηλεκτροκαμίνων της εταιρείας Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ.

Βρισκόμενη στον τελευταίο σταθμό ενός σχεδόν πενταετούς ταξιδιού, που είχε καθοριστικό ρόλο τόσο για την επιστημονική μου κατάρτιση όσο και για την διαμόρφωση στοιχείων της προσωπικότητάς μου, αισθάνομαι την αδήριτη ανάγκη να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου κ. Γεώργιο Αναστασάκη, Καθηγητή του Τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, αναθέτοντας ένα τόσο σημαντικό θέμα. Η καθοδήγηση και οι πολύτιμες συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας είχαν καταλυτική επίδραση στην εξέλιξη και ολοκλήρωσή της. Το ενδιαφέρον και η στήριξη που έδειξε αρκετές φορές σε δικές μου ιδέες με έκαναν να αισθάνομαι την ευθύνη της επιστήμης, στην οποία μαθήτευα τόσα χρόνια.

Ευχαριστώ τον κ. Ηλία Σαμμά, ΙΔΑΧ στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων, για την ιδιαίτερα πολύτιμη βοήθειά του σε θέματα που προέκυψαν κατά τη χρήση του εξοπλισμού του εργαστηρίου.

Ευχαριστώ την κα Αγατζίνη - Λεονάρδου Στυλιανή, Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., για τις πολύτιμες συμβουλές της, βάσει της πολυετούς εμπειρίας της στην μεταλλουργική κατεργασία λατεριτικών μεταλλευμάτων προς εξαγωγή νικελίου. Περισσότερο όμως, νιώθω την ανάγκη να την ευχαριστήσω για την ανθρώπινη παρουσία της και τον τρόπο με τον οποίο συνέβαλε, δίνοντάς μου τα απαραίτητα όχι μόνο επιστημονικά,

αλλά και ανθρωπιστικά στοιχεία που μου έδωσαν τη δύναμη να δουλεύω και να επιδιώκω αδιάκοπα ένα καλύτερο μέλλον, κάνοντάς με ταυτόχρονα να νιώθω αληθινό μέλος του ιδρύματος.

Ευχαριστώ πολύ τον κ. Πέτρο Τσακριδίδη, Δρ. Χημικό Μηχανικό, για την πραγματοποίηση της ορυκτολογικής ανάλυσης με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων Χ (XRD), καθώς και της ανάλυσης του δείγματος με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, SEM).

Ευχαριστώ πολύ τη διεύθυνση της εταιρείας ΛΑΡΚΟ της περιόδου 2014-2015, πιο συγκεκριμένα τον Διευθυντή του Εργοστασίου κ. Γεώργιο Βαλωμένο και τον Διευθυντή του Χημείου κ. Θαλασσινό Τσελεμάρκο, για την αποστολή των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές, την πληροφόρηση και την ταχύτητα αποστολής των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων.

Σε αυτό το σημείο, ευχαριστώ τους υπεύθυνους χημικούς αλλά και τους εργαζόμενους στο Χημείο της ΛΑΡΚΟ για την πολύτιμη συνεισφορά τους στην έγκαιρη πραγματοποίηση όλων των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να ολοκληρωθεί η διπλωματική μου εργασία.

Η πολύτιμη βοήθειά τους συνετέλεσε στον ορθό σχεδιασμό των δοκιμών, με στόχο την πιθανή εφαρμογή των συμπερασμάτων σε βιομηχανικό επίπεδο αλλά και στην έγκαιρη ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους μηχανικούς παραγωγής της εταιρείας ΛΑΡΚΟ, με τους οποίους είχα χρήσιμες και κατατοπιστικές συνομιλίες σχετικά με το θέμα μου κατά τη διάρκεια όλων αυτών των μηνών εκπόνησης της εργασίας μου. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Ευάγγελο Στεφόπουλο, Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργό, που, παρά τα καθημερινά προβλήματα και απαιτήσεις της παραγωγής, έβρισκε τον χρόνο και είχε τη θέληση να ακούσει τους προβληματισμούς μου.

Το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου, για την υποστήριξη που παρείχε σε όλες μου τις προσπάθειες, καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής, τόσο σε ψυχικό όσο και σε υλικό επίπεδο. Σε ένα κόσμο ανθρωπιστικής κρίσης κατάφερε να μου κοινωνήσει τις ηθικές αξίες, εκείνες που με έκαναν να μη σταματώ να προσπαθώ για το καλύτερο στη ζωή μου, με μόνο εφόδιο την επιμονή μου και την τιμιότητά μου. Χωρίς την αδιάκοπη στήριξη, την κατανόηση και τις θυσίες τους, τίποτα δε θα ήταν εφικτό.

Τέλος, με ιδιαίτερη θερμότητα επιθυμώ να ευχαριστήσω τους φίλους μου, γιατί όχι μόνο με βοήθησαν να μη χάσω τον εαυτό μου στην αναζήτηση του δρόμου μου, αλλά αποτέλεσαν την καλύτερη συντροφιά σε όλες τις στιγμές που περάσαμε μαζί. Αν δεν υπήρχαν εκείνοι, όλα αυτά τα χρόνια θα ήταν άδεια και άχρωμα.

Μαριάννα Σακάρογλου

Αθήνα, Ιούλιος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην ανάκτηση του νικελίου σε δείγμα σκουριάς των ηλεκτροκαμίνων της εταιρείας Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ με περιεκτικότητα σε νικέλιο (Ni) 0,12%. Αρχικά έγινε ορυκτολογική μελέτη της σκουριάς και στη συνέχεια διερευνήθηκε η δυνατότητα ανάκτησης του περιεχόμενου νικελίου με μαγνητικό διαχωρισμό.

Από πλευράς παραγόντων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του διαχωρισμού, σε πρώτη φάση διερευνήθηκε η επίδραση της κοκκομετρίας. Οι δοκιμές του μαγνητικού διαχωρισμού έγιναν χρησιμοποιώντας μόνιμο μαγνήτη ή ηλεκτρομαγνήτη. Στη συνέχεια, μελετήθηκε η ένταση μαγνητικού πεδίου του μαγνητικού διαχωριστή. Συνεπώς, στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε μαγνητικός διαχωριστής με ηλεκτρομαγνήτη, η ένταση του μαγνητικού πεδίου καθορίζεται από την ένταση του ρεύματος. Στην παρούσα εργασία οι δοκιμές του μαγνητικού διαχωρισμού έγιναν σε δύο διαφορετικές τιμές έντασης, μια χαμηλή (0,5A) και μια υψηλή (1A). Στις δοκιμές με μόνιμο μαγνήτη (χειρός), διερευνήθηκε η επίδραση της απόστασης από το στρώμα του υλικού, δεδομένου ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου καθορίζεται από την απόσταση του μαγνήτη από το προς διαχωρισμό υλικό. Εκτός των παραπάνω διερευνήθηκε η επίδραση και άλλων παραγόντων που παρεμβαίνουν κατά τον διαχωρισμό, όπως το πάχος του στρώματος του τροφοδοτούμενου υλικού και το ποσοστό της υγρασίας. Τέλος διερευνήθηκε η επίδραση της ελάττωσης του μεγέθους της σκουριάς στο αποτέλεσμα του διαχωρισμού.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις χημικές αναλύσεις των διαφόρων κοκκομετρικών κλασμάτων έδειξαν ότι τα χονδρομερή κλάσματα έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νικέλιο σε σχέση με τα λεπτομερέστερα. Πιο συγκεκριμένα, τα τεμάχια με μέγεθος -8,00 +2,80mm έχουν περιεκτικότητα 0,84% σε νικέλιο. Σχετικά με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, στον μαγνητικό διαχωριστή υψηλής έντασης που χρησιμοποιήθηκε, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, ακόμη κι αν τα ποσοστά της ανάκτησης ήταν πάνω από 90%, δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση των προϊόντων σε νικέλιο ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η περιεκτικότητα των μαγνητικών προϊόντων σε νικέλιο ήταν αρκετά χαμηλή, καθώς κυμαινόταν κάτω από το 0,10%. Αντίθετα, στα δείγματα που χρησιμοποιήθηκε μόνιμος μαγνήτης

χειρός και στην ελάχιστη απόσταση από την τροφοδοσία, οι τιμές τόσο της ανάκτησης όσο και της περιεκτικότητας ήταν πολύ υψηλές. Μεγαλύτερη ήταν αυτή που παρατηρήθηκε στο κοκκομετρικό κλάσμα $-8,00 +4,70\text{mm}$ με περιεκτικότητα του μαγνητικού προϊόντος 1,31% Ni και ανάκτηση πάνω από 97%. Αναφορικά με το πάχος του στρώματος του υλικού, ο μαγνητικός διαχωρισμός οδήγησε σε υψηλότερη ανάκτηση στην περίπτωση του μονοτεμαχιακού στρώματος. Επιπλέον, η θραύση του υλικού δεν επιφέρει αύξηση της ανάκτησης. Τέλος, μικρή αύξηση του ποσοστού υγρασίας στα περισσότερα λεπτομερή τεμάχια (κάτω από τα 2,80mm) φαίνεται να δίνει ελαφρά βελτιωμένα αποτελέσματα αλλά απαιτείται λεπτομερέστερη διερεύνηση της επίδρασης της υγρασίας για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Η εργασία αυτή αποτελεί διερεύνηση της δυνατότητας ανάκτησης νικελίου της σκουριάς των ηλεκτροκαμίνων της εταιρείας Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ και μελέτη των παραγόντων που την επηρεάζουν. Παραμένει δε ανοιχτή για μελλοντική έρευνα και προσαρμογή σε βιομηχανικό επίπεδο με σκοπό τη βελτιστοποίηση αυτών στις εγκαταστάσεις μαγνητικού εμπλουτισμού στο μεταλλουργικό εργοστάσιο της Λάρυμνας.

ABSTRACT

The present Diploma Thesis deals with the nickel recovery from electric arc furnace slag with 0,12% Ni, which originated from the metallurgical plant of G.M.M. S.A. LARCO. After mineralogical examination, the recovery of nickel from the slag was attempted by applying magnetic separation.

The effect of the following parameters was studied: grain size, magnetic field intensity, thickness of slag layer, and moisture content. In the current study, tests were carried out using a hand-magnet or high intensity magnetic separator (HIMS). In the case of hand-magnet, the magnetic field intensity was regulated by changing the distance of the magnet from the material. In the case of HIMS, tests were carried out at two levels of electric current intensity, e.g. at a low level of 0.5 and a high-level of 1A. Finally, there was investigated the effect size reduction of the slag.

The chemical analysis of the sieve fractions clearly shows that nickel content in the coarser particles is higher than that in the finer. More specifically, the nickel content of the particles with size $-8.00+2.80\text{mm}$ is 0,84% Ni. In respect to HIMS, the results show that the magnetic products are characterized by low nickel content and high recovery (higher than 90%). Also, there was observed no significant difference between magnetic and non-magnetic products as regards their grade while, in some cases, the nickel content was low enough, not exceeding 0.10% Ni. On the contrary, tests with hand-magnet at the minimum separation distance resulted in products of both high grade (higher than 1% Ni) and recovery. Best results were obtained for the sieve fraction $-8.00 +4.70\text{mm}$, with the grade of the magnetic product reaching 1.31% Ni and the recovery exceeding 97%. In respect to the layer thickness of the slag, better results as concerns recovery are obtained at a monolayer separation. Also, the size reduction of the material didn't improve nickel recovery. Finally, small increase of the moisture content in the finer particles of the feed (below 2.80mm) seems to result in slightly better results, but, for safe conclusions, more detailed investigation of moisture effect is necessary.

The current Diploma Thesis investigates the possibility to recover nickel from the electric furnace slag from the metallurgical plant of G.M.M. S.A. LARCO Ferronickel

Co. by studying the effect of the process determining factors. Tests were carried out at lab-scale level; further testing at industrial level have to be carried out aiming at the optimization of the process.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	iv
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων.....	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Ευρετήριο Εικόνων	xiii

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1^ο - Νικέλιο	1
1.1. Εισαγωγή – Το Νικέλιο μέσα στους αιώνες	1
1.2. Ιδιότητες Νικελίου	2
1.3. Το Νικέλιο ως πολύτιμο μέταλλο	3
1.4. Παγκόσμια παραγωγή Νικελίου.....	4
1.5. Χρήσεις Νικελίου	5
1.6. Τιμή Νικελίου.....	7
1.7. Πηγές Νικελίου	9
Κεφάλαιο 2^ο - Λατεριτικά Μεταλλεύματα.....	10
2.1. Εισαγωγή	10
2.2. Παγκόσμια αποθέματα λατεριτών	11
2.3. Τα ελληνικά νικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα.....	12
2.3.1. Λατεριτικά μεταλλεύματα της ζώνης Ανατολικής Ελλάδας	12
2.3.2. Λατεριτικό μέταλλευμα της Καστοριάς	13
2.4. Μεταλλουργικές μέθοδοι για παραγωγή Νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα	14
2.5. Παραγωγή σιδηρονικελίου από την εκμετάλλευση των ελληνικών νικελιούχων λατεριτών	17
Κεφάλαιο 3^ο - Μαγνητικός Εμπλουτισμός	21
3.1. Γενικές αρχές και μηχανισμός λειτουργίας.....	21
3.2. Ταξινόμηση των υλικών ανάλογα με τη μαγνητικότητα.....	21
3.3. Το μαγνητικό πεδίο στον εμπλουτισμό	25

3.4. Μαγνητικοί διαχωριστές	26
3.5. Μαγνητικός εμπλουτισμός ΛΑΡΚΟ	28
3.5.1. Γενικές Πληροφορίες.....	28
3.5.2. Περιγραφή της υφιστάμενης διαδικασίας μαγνητικού εμπλουτισμού σκουριάς Η/Κ στο ΣΕΛ.....	28
Πειραματικό Μέρος	
Κεφάλαιο 4^ο - Πειραματική Διαδικασία.....	32
4.1. Εισαγωγή	32
4.2. Περιγραφή του υλικού.....	32
4.3. Δειγματοληψία.....	35
4.4. Ταξινόμηση.....	36
4.5. Μαγνητικός Διαχωρισμός	40
4.5.1. Επίδραση κοκκομετρίας	41
4.5.2. Επίδραση απόστασης μαγνήτη και του πάχους του τροφοδοτούμενου υλικού.....	48
4.5.2.1. Επίδραση απόστασης μαγνήτη.....	52
4.5.2.2. Επίδραση πάχους στρώματος	55
4.5.3. Επίδραση ελάττωσης μεγέθους και ποσοστού υγρασίας.....	58
4.5.3.1. Επίδραση ελάττωσης μεγέθους	61
4.5.3.2. Επίδραση υγρασίας.....	61
Κεφάλαιο 5^ο - Γενικά Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προτάσεις.....	63
5.1. Συμπεράσματα	63
5.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	65
Βιβλιογραφία	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1. Παγκόσμια παραγωγή νικελίου για το 2013	4
Σχήμα 1.2. Σχηματική παράσταση των χρήσεων του νικελίου.....	5
Σχήμα 1.3. Τιμή και αποθέματα νικελίου για την περίοδο 1991-2011	7
Σχήμα 1.4. Τιμή νικελίου την τελευταία πενταετία	8
Σχήμα 1.5. Τιμή νικελίου για το πρώτο εξάμηνο του 2015	8
Σχήμα 2.1. Διαγράμματα ροής των βιομηχανικών μεθόδων κατεργασίας των λατεριτικών μεταλλευμάτων.....	15
Σχήμα 2.2. Μεταλλεία νικελιούχων λατεριτών και λιγνιτωρυχείο της εταιρείας ΛΑΡΚΟ Γ.Μ.Μ.Α.Ε.	18
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής της παραγωγικής διαδικασίας της ΛΑΡΚΟ.....	19
Σχήμα 3.1. Σχηματικό διάγραμμα διαχείρισης κοκκοποιημένης σκουριάς Η/Κ	30
Σχήμα 3.2. Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης μαγνητικού εμπλουτισμού των νέων γραφείων.....	31
Σχήμα 4.1. Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης XRD.....	33
Σχήμα 4.2. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας της δειγματοληψίας με τη συσκευή διχοτόμησης.....	36
Σχήμα 4.3. % Αθροιστική κατανομή του Νι σε σχέση με την κοκκομετρία	40
Σχήμα 4.4. Περιεκτικότητα νικελίου στα προϊόντα μαγνητικού διαχωρισμού	45
Σχήμα 4.5. Ανάκτησης νικελίου στα προϊόντα μαγνητικού διαχωρισμού	46
Σχήμα 4.6. Επί τοις εκατό ποσοστού των βαρών για τα μαγνητικά προϊόντα.....	47
Σχήμα 4.7. Επί τοις εκατό ποσοστού των βαρών για τα μη μαγνητικά προϊόντα	48
Σχήμα 4.8. Ακολουθία διαδικασίας στις δοκιμές διαφορετικής απόστασης του μαγνήτη	52
Σχήμα 4.9. Περιεκτικότητα νικελίου συναρτήσει της απόστασης του μαγνήτη από την τροφοδοσία.....	53

Σχήμα 4.10. Επί τοις εκατό κατανομή νικελίου για κάθε προϊόν στις διάφορες θέσεις του μαγνήτη	54
Σχήμα 4.11. Επί τοις εκατό ποσοστό βαρών για κάθε προϊόν στις δοκιμές διαφορετική απόστασης του μαγνήτη	54
Σχήμα 4.12. Περιεκτικότητας νικελίου στα προϊόντα μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με το πάχος της τροφοδοσίας του υλικού	56
Σχήμα 4.13. Ανάκτηση νικελίου στα προϊόντα μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με το πάχος της τροφοδοσίας του υλικού	56
Σχήμα 4.14. Βάρος προϊόντων σε συνάρτηση με το πάχος του στρώματος της τροφοδοσίας υλικού	57
Σχήμα 4.15. Περιεκτικότητα νικελίου – Υγρασία 7,96%	62

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Παραγωγοί πρωτογενούς νικελίου ανά τον κόσμο.....	16
Πίνακας 3.1. Ομάδες μαγνητικής συμπεριφοράς υλικών.....	24
Πίνακας 4.1. Χημική ανάλυση αρχικού δείγματος	35
Πίνακας 4.2. Κοκκομετρική ανάλυση υλικού.....	38
Πίνακας 4.3. Χημική ανάλυση υλικού ανά κοκκομετρικό κλάσμα	
Πίνακας 4.4. Ανάλυση των χαρακτηρισμών των δειγμάτων από τον Α' κύκλο δοκιμών.....	42
Πίνακας 4.5. Χημική ανάλυση υλικού ανά κλάσμα έπειτα από μαγνητικό διαχωρισμό σε διαφορετικές εντάσεις	43
Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού διαφορετικής κοκκομετρίας και έντασης.....	44
Πίνακας 4.7. Ανάλυση των χαρακτηρισμών των δειγμάτων από τον Β' κύκλο δοκιμών.....	50
Πίνακας 4.8. Χημική ανάλυση Β' κύκλου δειγμάτων.....	51
Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με την απόσταση του μαγνήτη.....	56
Πίνακας 4.10. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με το πάχος της τροφοδοσίας υλικού	55
Πίνακας 4.11. Ανάλυση των χαρακτηρισμών των δειγμάτων από τον Γ' κύκλο δοκιμών.....	59
Πίνακας 4.12. Χημική ανάλυση Γ' κύκλου δειγμάτων.....	60
Πίνακας 4.13. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού έπειτα από θραύση του υλικού σε μέγεθος 1,40mm	61
Πίνακας 4.14. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με υγρασία τροφοδοσίας 7,96%.....	61
Πίνακας 5.1. Συγκεντρωτική παρουσίαση συμπερασμάτων	65

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1. Κατανομή ηλεκτρονίων του νικελίου	1
Εικόνα 1.2. Καθαρό νικέλιο	2
Εικόνα 1.3. Πετλανδίτης	3
Εικόνα 2.1. Λατερίτης	10
Εικόνα 2.2. Παγκόσμια αποθέματα λατεριτών ως 2011	11
Εικόνα 4.1. Άμορφη φάση (εικόνα από το SEM)	34
Εικόνα 4.2. Σπινέλιος (εικόνα από το SEM)	34
Εικόνα 4.3. Κόκκος FeNi (εικόνα από το SEM)	34
Εικόνα 4.4. Συσκευή δειγματοληψίας.....	36
Εικόνα 4.5. Συσκευή δονούμενων κοσκίνων.....	37
Εικόνα 4.6. Ξηρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης	41
Εικόνα 4.7. Μαγνήτης χειρός σε ρυθμιζόμενης απόστασης τράπεζα	49
Εικόνα 4.8. Μόνιμος μαγνήτης και υλικό στη μεταφορική ταινία	50
Εικόνα 4.9. Κωνικός θραυστήρας	58

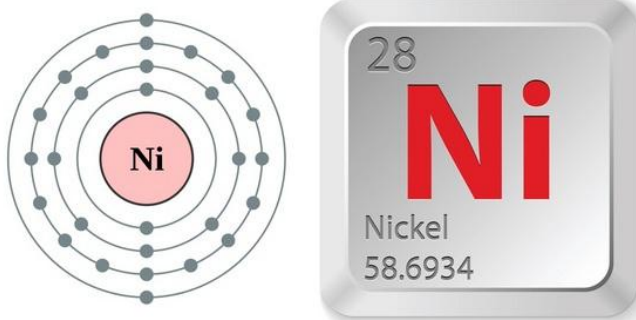
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΝΙΚΕΛΙΟ

1.1. Εισαγωγή - Το Νικέλιο μέσα στους αιώνες

Το νικέλιο (Ni), είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό $Z = 28$, ατομικό βάρος 58,69, ειδικό βάρος στους $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $8,5\text{ g/cm}^3$, ειδική θερμότητα στους $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ $0,1034$, σημείο τήξεως στους $1.453\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σημείο ζέσεως $2.150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Χαρακτηρίζεται ως αργυρόλευκο μέταλλο. Στον Περιοδικό Πίνακα των στοιχείων εμφανίζεται στην κατηγορία των στοιχείων μεταπτώσεως και παρουσιάζει τυπικές μεταλλικές ιδιότητες. Αποτελεί ένα από τα τρία σιδηρομαγνητικά μέταλλα: σίδηρος, κοβάλτιο και νικέλιο, τα οποία επίσης ανήκουν στα στοιχεία μεταπτώσεως. Είναι συστατικό στοιχείο των μεταλλικών μετεωριτών σε ποσοστό περίπου 15%.



Εικόνα 1.1. Κατανομή ηλεκτρονίων του νικελίου

Πάνω από 2000 χρόνια πριν, ένα κράμα Νικελίου ήταν γνωστό στους Κινέζους. Ωστόσο, η εξαγωγή του καθαρού μετάλλου πραγματοποιήθηκε μόνο πριν 200 χρόνια. Στη Γερμανία περί τα τέλη του 17ου αιώνα χρησιμοποιείτο ένα βαρύ κοκκινωπό - καφέ μέταλλευμα προκειμένου να χρωματιστεί πράσινο το γυαλί. Οι Σάξωνες πίστευαν ότι ήταν μέταλλευμα του χαλκού, όμως κάθε προσπάθεια για την

απομόνωση του χαλκού από αυτό έπεφτε στο κενό. Για αυτό, το μέταλλο ονομάστηκε «Kupfernickel», δηλαδή χαλκός του διαβόλου.



Εικόνα 1.2. Καθαρό νικέλιο

Γύρω στο 1751 ένα νέο μέταλλο, το οποίο προερχόταν από ένα ορυχείο κοβαλτίου στο Helsingland της Σουηδίας, υπήρξε αντικείμενο έρευνας του Cronstedt, ο οποίος υπέβαλε σε φρύξη τους πράσινους κρυστάλλους, που κάλυπταν το μέταλλο. Το αποτέλεσμα ήταν η λήψη ενός οξειδίου, το οποίο μετά από αναγωγή έδωσε ένα λευκό, σκληρό και εύθραυστο μέταλλο, που δεν έμοιαζε με το χαλκό. Έπειτα από μια ακολουθία μελετών, αποδείχθηκε από τον Cronstedt ότι το νέο μέταλλο ήταν η κύρια βάση στο Kupfernickel και πρότεινε γι' αυτό το όνομα «Nickel». Στη συνέχεια το 1775 παρασκευάστηκε από τον Bergmann το πρώτο δείγμα καθαρού νικελίου και το 1805 ο Richter και άλλοι περιέγραψαν τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες θέτοντας έτσι τα θεμέλια για την ανάπτυξη της μεταλλουργικής βιομηχανίας (Mellor, 1936).

1.2. Ιδιότητες Νικελίου

Το καθαρό νικέλιο έχει πολύ καλές ιδιότητες:

- σκληρό
- όλκιμο
- υψηλή αντίσταση στη θερμοκρασία
- υψηλή αντίσταση στη διάβρωση
- υψηλή αντίσταση στη χάραξη

Σημαντικές φυσικές ιδιότητες του Νικελίου είναι η μαγνητική συμπεριφορά και η αντοχή του σε μεγάλες πιέσεις. Σε ορισμένο θερμοκρασιακό εύρος είναι ανθεκτικό στη διάβρωση στον αέρα, το θαλασσινό νερό και τα μη-οξειδωτικά οξέα. Μία άλλη σημαντική ιδιότητα του νικελίου είναι η ανθεκτικότητά του όσον αφορά τη διάβρωση από τα αλκάλια. Είναι καλός καταλύτης.

Από χημικής άποψης, το νικέλιο εμφανίζει μεγάλη συγγένεια με το σίδηρο, το κοβάλτιο και το χαλκό. Μία από τις βασικές του ιδιότητες είναι η ικανότητα να αντιδρά άμεσα με το μονοξείδιο του άνθρακα για να σχηματίσει ένα σύνθετο καρβονύλιο $[\text{Ni}(\text{CO})_4]$, ονομασία κατά IUPAC: tetracarbonylnickel], το οποίο είναι ιδιαίτερα πτητικό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1.3. Το Νικέλιο ως πολύτιμο μέταλλο

Το νικέλιο υπάρχει στο στερεό φλοιό της Γης σε ποσοστό 0,016% μέχρι τα 10 μίλια βάθος. Σε σχέση με τη διάδοσή του κατατάσσεται ως το 24^ο στοιχείο στη σειρά εμφάνισης και το συνολικό ποσοστό του είναι μεγαλύτερο από του χαλκού, του ψευδαργύρου και του μολύβδου αθροιστικά. Ωστόσο, υπάρχουν σχετικά λίγα γνωστά αποθέματα νικελίου για συμφέρουσα εκμετάλλευση. Τα μεταλλεύματά του χωρίζονται σε σουλφίδια, οξειδία, πυριτικά και αρσενικούχα άλατα.

Ένα από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα νικελίου στον κόσμο είναι στο Sudbury του Οντάριο. Σε αυτό, το κύριο μέταλλευμα νικελίου είναι ο πεντλανδίτης $(\text{FeNi})_9\text{S}_8$. Παρόμοια κοιτάσματα υπάρχουν στη Νότια Αφρική, την Ε.Σ.Σ.Δ. και τη Μινεσότα.

Το όριο εκμετάλλευσης του νικελίου είναι να βρίσκεται σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 0,5%.



Εικόνα 1.3. Πεντλανδίτης

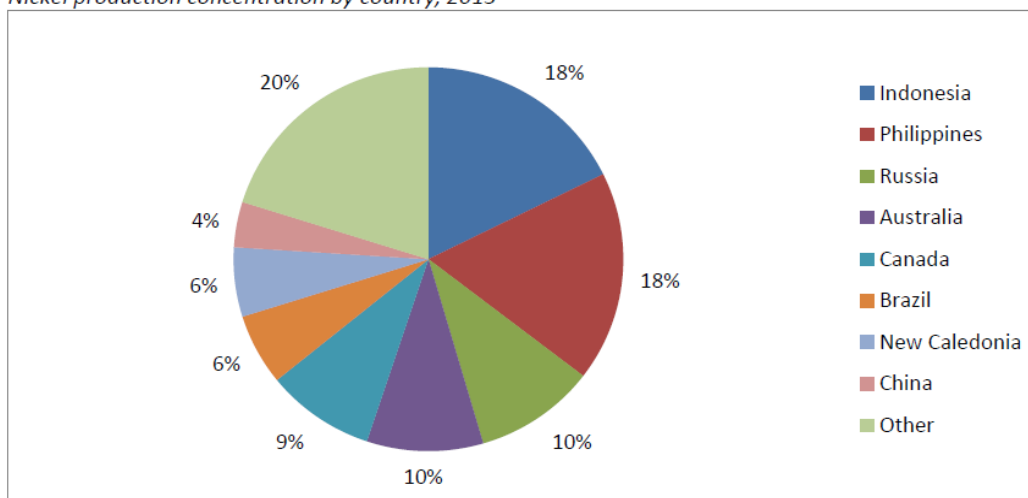
Η μεγάλη σημασία του ως πολύτιμου μετάλλου έγκειται στο γεγονός ότι κατά τη χρήση του ως στοιχείου κραμάτωσης με άλλα στοιχεία, αυξάνει ακόμη περισσότερο την αντοχή, τη σκληρότητα και την αντίσταση στη διάβρωση του κράματος σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος. Οι επιλογές για την αντικατάσταση του νικελίου είναι πολύ περιορισμένες, οποιαδήποτε υποκατάσταση τελικά οδηγεί σε μείωση της απόδοσης καθιστώντας τη χρήση του νικελίου απαραίτητη.

1.4. Παγκόσμια παραγωγή Νικελίου

Σύμφωνα με στοιχεία του U.S. Geological Survey, η συντριπτική πλειοψηφία των αποθεμάτων νικελίου βρίσκονται έξω από την Ευρώπη, κυρίως στην Ωκεανία (Αυστραλία και Νέα Καληδονία), την Αμερική (κυρίως την Βραζιλία, την Κούβα και τον Καναδά) και τη Ρωσία. Ωστόσο, τα αποθέματα στη Νέα Καληδονία είναι μέρος της γαλλικής επικράτειας.

Η παγκόσμια παραγωγή των ορυχείων νικελίου έχει σχεδόν διπλασιαστεί κατά την τελευταία δεκαετία. Το 2013, παρήχθησαν περίπου 2.500.000 τόννοι. Οι μεγαλύτεροι παραγωγοί νικελίου για το 2013, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1 (U.S. Geological Survey, 2014) ήταν η Ινδονησία και οι Φιλιππίνες (από κοιτάσματα νικελιούχων λατεριτών), ακολουθούμενη από τη Ρωσία, την Αυστραλία και τον Καναδά (από θειούχα μεταλλεύματα νικελίου). Η πρόσφατη επιβολή ενός νόμου που απαγορεύει τις εξαγωγές μεταλλεύματος νικελίου από την Ινδονησία είναι πιθανό να προκαλέσει σημαντική διατάραξη της αγοράς νικελίου παγκοσμίως.

Nickel production concentration by country, 2013

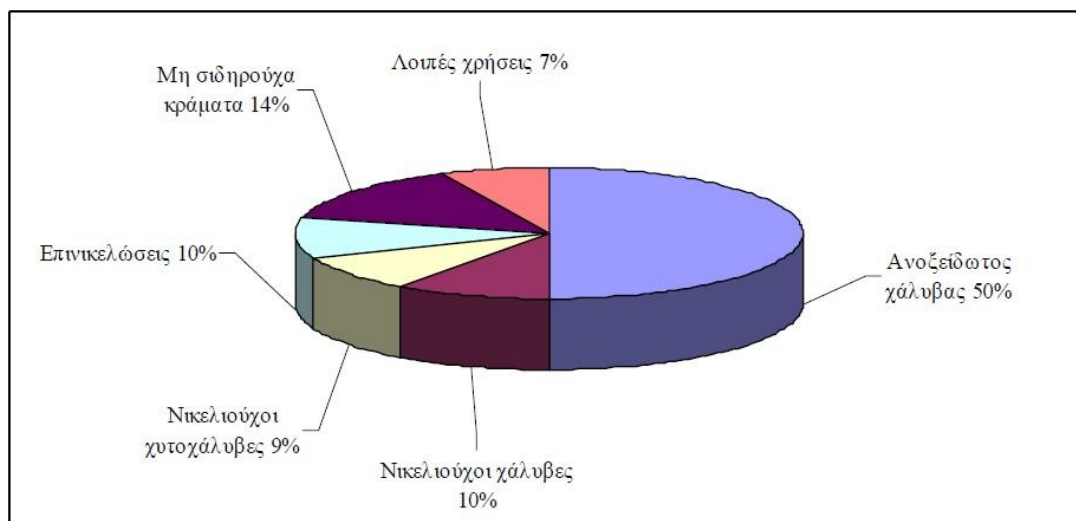


Source: USGS (2014), Mineral Commodity Summaries

Σχήμα 1.1. Παγκόσμια παραγωγή νικελίου για το 2013

1.5. Χρήσεις Νικελίου

Το νικέλιο είναι ζωτικής σημασίας υλικό στη σύγχρονη τεχνολογία. Η πλέον γνωστή από πολύ παλιά εφαρμογή του νικελίου ήταν για την παραγωγή νομισμάτων. Νομίσματα που κόπηκαν πριν από 2220 χρόνια στο Αφγανιστάν περιείχαν 20% Ni, ενώ παμπάλαια ορειχάλκινα αντικείμενα της ανατολής περιείχαν 2% Ni. Σήμερα, είναι γνωστές πάνω από 300.000 χρήσεις του νικελίου. Η βασικότερη όλων είναι η χρήση του στην παραγωγή ανοξειδωτού χάλυβα, όπου καταναλώνεται περίπου το 50% της παραγωγής του όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2 (Ζευγώλης, 2000). Ένα ποσοστό 10%, περίπου, απορροφάται στην παραγωγή χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε Ni. Η βιομηχανία μη σιδηρούχων κραμάτων με βάση το Ni, τον χαλκό (Cu) και το κοβάλτιο (Co) καταναλώνει το 20%. Ένα 8% καταναλώνεται στην παραγωγή χυτών τεμαχίων χάλυβα και η υπόλοιπη παραγωγή αξιοποιείται στη χημική βιομηχανία, όπου η επινικέλωση απορροφά περίπου το 10%. Η ηλεκτρολυτική επικάλυψη του χάλυβα με νικέλιο καθιστά τις επιφάνειες ανθεκτικές στη διάβρωση. Καταλύτες νικελίου χρησιμοποιούνται στην αεριοποίηση του άνθρακα, στην υδρογόνωση ακόρεστων οργανικών ενώσεων και άλλες χρήσεις, όπως οι μπαταρίες Ni-Cd, τα χρώματα και τα κεραμικά.



Σχήμα 1.2. Σχηματική παράσταση των χρήσεων του νικελίου (Ζευγώλης 2000)

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το κράμα νικελίου με τιτάνιο, το Nitinol. Από Nitinol κατασκευάζονται επίσης ακριβοί σκελετοί γυαλιών, που είναι πολύ εύκαμπτοι και δεν παραμορφώνονται καθόλου, αφού επανέρχονται αυτόματα στην

αρχική τους κατάσταση, χωρίς θέρμανση, ακόμη κι όταν τους έχουμε συστρέψει (Kauffman and Mayo, 1993).

Το νικέλιο εμφανίζεται και με άλλες μορφές. Υπό τη μορφή κρυστάλλων πολύ μικρών διαστάσεων (νανοκρυστάλλοι) γίνεται με υπερπλαστικό, έπειτα από θέρμανση, αποκτώντας μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες αυτές με της τσίχλας. Επίσης, σε κατάσταση λεπτού διαμερισμού, μπορεί να πάρει τη μορφή μαύρης σκόνης που απορροφά μεγάλες ποσότητες υδρογόνου. Στη μορφή αυτή χρησιμοποιείται ως καταλύτης στις υδρογονώσεις ακόρεστων οργανικών ενώσεων, όπως είναι τα φυτικά έλαια, που με την πρόσληψη υδρογόνου μετατρέπονται σε μαγειρικά λίπη. (Betteridge, 1984).

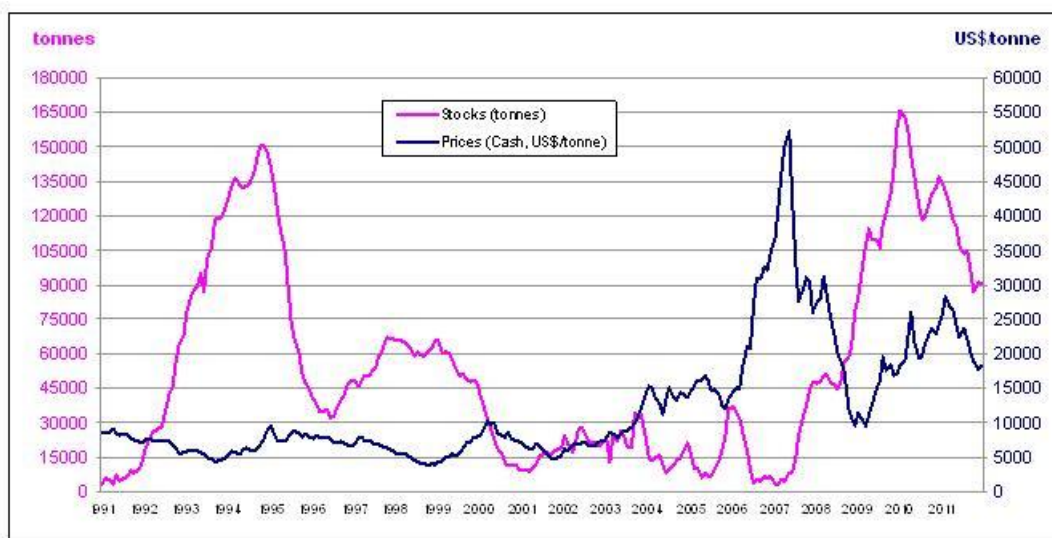
Η μεγάλη ποικιλία των τελικών προϊόντων του πρωτογενούς νικελίου προκύπτει ως αποτέλεσμα της αντίστοιχης ποικιλίας των βιομηχανικών μεθόδων κατεργασίας των νικελιούχων ορυκτών πρώτων υλών προς εξαγωγή του νικελίου. Ως εκ τούτου, τα τελικά προϊόντα διακρίνονται στις δύο ακόλουθες κατηγορίες:

- ❖ *Κατηγορία I: προϊόντα με περιεκτικότητα Ni 99% ή περισσότερο.*
 - Κάθοδοι νικελίου (περίπου 99,96% Ni).
 - Pellets νικελίου. Παράγονται κυρίως κατά τη μέθοδο της καρβονυλίωσης.
 - Σκόνη νικελίου. Παράγεται κατά τη μέθοδο της αμμωνιακής εκχύλισης (μέθοδος Sherrit).
 - Μπρικέττες νικελίου.
 - Ροδέλες.
- ❖ *Κατηγορία II: προϊόντα με περιεκτικότητα Ni μικρότερη από 99% .*
 - Σιδηρονικέλιο (20-29% Ni με εξαίρεση την Nirron Mining με Fe-Ni 60% Ni, περίπου).
 - Οξειδίο του νικελίου-sinter (75-90% Ni).

Όσο οι ανάγκες της σύγχρονης ζωής αυξάνονται και οι χρήσεις του νικελίου γίνονται ακόμη περισσότερο καινοτόμες, η ζήτηση του νικελίου θα συνεχίσει να έχει αυξανόμενη τάση. Με αποδεδειγμένη την ανοδική πορεία του, το σιδηρονικέλιο θα αναμένεται να διαδραματίσει εξ ίσου ή ακόμα και πιο σημαντικό ρόλο στις μελλοντικές κοινωνίες από ότι σήμερα.

1.6. Τιμή Νικελίου

Η τιμή τον νικελίου παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα κατά τα τελευταία σαράντα χρόνια. Το διάγραμμα του Σχήματος 1.3 πραγματεύεται την τιμή τον νικελίου σε ονομαστικές αξίες κατά τη χρονική περίοδο 1991-2011. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 υπήρξε μια κορύφωση της τιμής τον νικελίου. Κατά το πρώτο εξάμηνο του 1990 η οικονομική κατάρρευση των χωρών της Ανατολικής Ευρώπης, οδήγησε σε αύξηση της εξαγωγής τον νικελίου. Η αύξηση αυτή συνετέλεσε στην πτώση των τιμών τον νικελίου σε σχέση με το κόστος παραγωγής του στις χώρες της Δυτικής Ευρώπης.



Σχήμα 1.3. Τιμή και αποθέματα νικελίου για την περίοδο 1991-2011, πηγή International Nickel Study Group

Όσον αφορά την τελευταία πενταετία, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 1.4, η τιμή του νικελίου, με εξαίρεση την περίοδο 2010-2011, ακολουθεί μάλλον καθοδική πορεία, η οποία όμως κυμαίνεται με μικρές αποκλίσεις γύρω στις 15.000 δολάρια ο τόννος. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα (Σχήμα 1.3), μέχρι το 2003 η τιμή τον νικελίου παρέμεινε κάτω από 10.000 δολάρια ανά τόννο. Η τιμή έφτασε τα 14.000 δολάρια ανά τόννο το 2005 και στη συνέχεια μειώθηκε έως το 2006. Στη συνέχεια, το Μάιο του 2007 αποτυπώνεται η αύξηση της τιμής κατά μέσο όρο στα 52.179 δολάρια ανά τόννο, σε μια περίοδο υψηλής ζήτησης νικελίου στην Ασία για παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα, καθώς και μιας περιόδου μικρής διακοπής στην προμήθεια νικελίου λόγω απεργιών στον Καναδά. Έπειτα, οι τιμές τον νικελίου μειώθηκαν. Στις αρχές τον 2009, οι τιμές τον νικελίου αυξήθηκαν στα 24.103 δολάρια ανά τόνο μέχρι το τέλος τον 2010.



Σχήμα 1.4. Τιμή νικελίου την τελευταία πενταετία, πηγή InfoMine.com



Σχήμα 1.5. Τιμή Νικελίου για το πρώτο εξάμηνο του 2015, πηγή InfoMine.com

Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 1.5, το πρώτο εξάμηνο του 2015 η τιμή του νικελίου είναι ακόμη χαμηλότερη, καθώς κυμαίνεται μεταξύ των 13.000-14.0000 δολαρίων ο τόννος.

1.7. Πηγές Νικελίου

Το νικέλιο προέρχεται από δύο τύπους κοιτασμάτων (Ορφανουδάκη – Μανουσάκη, 2005) :

- Από τους **λατερίτες** (οξειδωμένα μεταλλεύματα), που συνεισφέρουν κατά 60% στην παγκόσμια παραγωγή νικελίου. Οι σημαντικότερες χώρες παραγωγής νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα είναι οι: Ρωσία, Αλβανία, Ελλάδα, Αυστραλία, Νέα Καληδονία και Κούβα.

-Από **θειούχα** κοιτάσματα (σουλφίδια), τα οποία προσφέρουν το υπόλοιπο 40% στην παγκόσμια παραγωγή. Η σύσταση των θειούχων κοιτασμάτων αποτελείται από τα ορυκτά πυροτίτη ($Fe_{1-x}S$), πεντλανδίτη $(FeNi)_9S_8$, χαλκοπυρίτη ($CuFeS_2$) και μαγνητίτη (Fe_3O_4), με τον πεντλανδίτη να είναι το κύριο ορυκτό του νικελίου. Οι κυριότερες χώρες παραγωγής νικελίου από θειούχα κοιτάσματα είναι οι: Καναδάς, Αυστραλία, Ρωσία, Ν. Αφρική, Κίνα και Η.Π.Α.

Επικρατέστερη θέση στην εξόρυξη και παραγωγή νικελίου μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα κατείχαν τα θειούχα κοιτάσματα. Το 1950 προήλθε το 90% της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου από θειούχα κοιτάσματα. Από τη δεκαετία του '50, με τις νέες μεταλλουργικές μεθόδους που πια εφαρμόζονταν, σημειώνεται αύξηση στην εξόρυξη και εκμετάλλευση κοιτασμάτων νικελιούχων λατεριτών. Έτσι το 1975 μόνο το 55% της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου ήταν από θειούχα κοιτάσματα και σήμερα η παραγωγή νικελίου από θειούχα κοιτάσματα καταλαμβάνει περίπου το 40%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΛΑΤΕΡΙΤΙΚΑ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΑ

2.1. Εισαγωγή

Τα λατεριτικά μεταλλεύματα αποτελούν για περισσότερο από έναν αιώνα βασική ορυκτή πρώτη ύλη για την εξαγωγή του νικελίου, ξεκινώντας από την εξόρυξη και εκμετάλλευση των λατεριτικών κοιτασμάτων της Νέας Καληδονίας στα τέλη του 19ου αιώνα προς εξαγωγή του λεγόμενου «λευκού μετάλλου (alliage blanc)» (Dalvi et al., 2004). Ο όρος λατερίτης χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Άγγλο F.H. Buchanan, όταν σε μια περιοδεία στην επαρχία Kerala της Ινδίας παρατήρησε εμφανίσεις ενός γαιώδους πετρώματος με χρώμα κοκκινωπό - κεραμιδι και ονόμασε το πέτρωμα αυτό λατερίτη, από την λατινική λέξη later που σημαίνει κεραμιδί (Unesco - IUGS, 1979).



Εικόνα 2.1. Λατερίτης

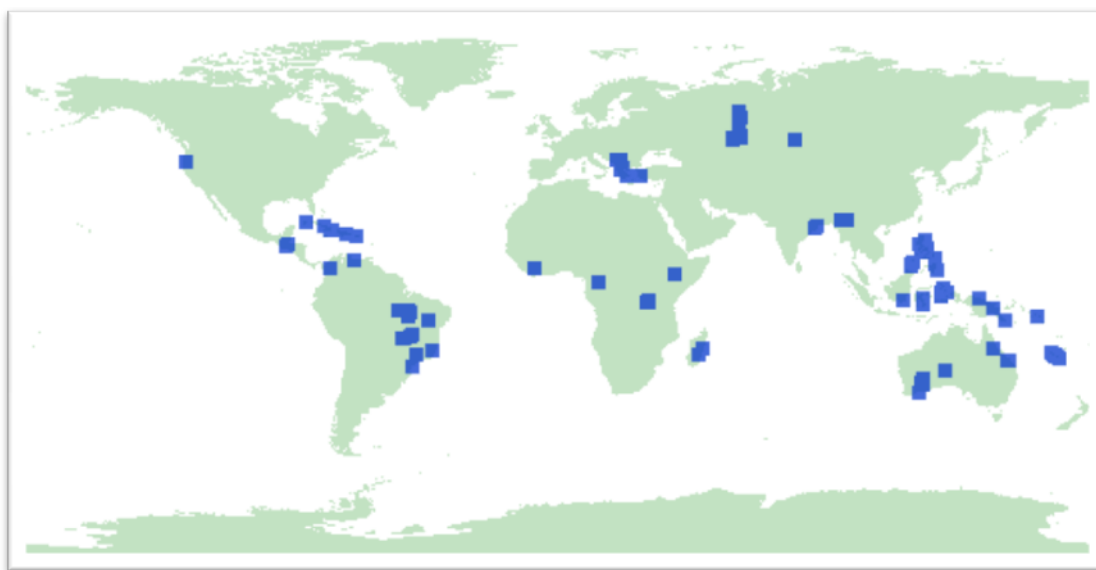
Στο διεθνές συνέδριο των μεθόδων λατεριτίωσης που έγινε στο Trivandrum της Ινδίας το 1979, ο W. Schellmann πρότεινε τον εξής ορισμό για τους λατερίτες: *Λατερίτες ονομάζονται τα προϊόντα εκείνα της έντονης αποσάθρωσης πετρωμάτων, των οποίων οι περιεκτικότητες σε σίδηρο και αργίλιο είναι μεγαλύτερες από τις περιεκτικότητες των προϊόντων καολινιτίωσης και τα οποία αποτελούνται κύρια από καολινίτη, γκαιτίτη, αιματίτη, γυψίτη και χαλαζία.*

Εκτοτε, ένας μεγάλος αριθμός από ορισμούς έχει δοθεί για τα λατεριτικά μεταλλεύματα από τους διάφορους ερευνητές, οι οποίοι έχουν ως κοινό

χαρακτηριστικό το γεγονός ότι αναφέρονται στις γεωλογικές συνθήκες σχηματισμού καθώς και την ορυκτολογική σύσταση του μεταλλεύματος. Ένας από αυτούς είναι και ο ακόλουθος (Ζευγώλης, 2000):

Λατερίτης είναι το προϊόν της επιτόπου χημικής αποσάθρωσης πυριτικών πετρωμάτων, η οποία γίνεται σε θερμά και υγρά κλίματα με την ενέργεια του διεισδύοντος ύδατος, οπότε και προκύπτουν αποθέματα πλούσια σε οξείδια σιδήρου και αλουμινίου.

2.2. Παγκόσμια αποθέματα λατεριτών



Εικόνα 2.2. Παγκόσμια αποθέματα λατεριτών ως 2011 (U.S. Geological Survey, 2014)

Όπως φαίνεται και στον χάρτη της Εικόνας 2.2 από το U.S. Geological Survey, η πλειοψηφία των αποθεμάτων νικελιούχων λατεριτών απαντώνται σε περιοχές βόρεια και νότια του ισημερινού. Αυτές οι περιοχές βρίσκονται σε θερμά, τροπικά περιβάλλοντα, όπου η χημική και μηχανική αποσάθρωση ευδοκιμούν. Αυτό εξηγεί γιατί η πλειοψηφία των αποθέσεων νικελιούχων λατεριτών βρίσκεται στη Νέα Καληδονία, Δυτική Αυστραλία, την Ινδονησία και τη Νότια Αμερική (Ashcroft, 2014). Στη Νέα Καληδονία εντοπίζεται το 21% των νικελιούχων λατεριτών στον κόσμο, ακολουθούμενη από την Αυστραλία (20%), τις Φιλιππίνες (17%) και την Ινδονησία (12%). Μερικές αποθέσεις, ωστόσο, υπάρχουν έξω από αυτή την τροπική ζώνη, συμπεριλαμβανομένων εκείνων στο Όρεγκον των ΗΠΑ και στα Ουράλια Όρη της Ρωσίας.

2.3. Τα ελληνικά νικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα

Οι σιδηρονικελιούχοι λατερίτες στον Ελληνικό χώρο σχηματίστηκαν κατά κύριο λόγο από τη λατεριτική αποσάθρωση πετρωμάτων περιδοιτικού τύπου, τα προϊόντα της οποίας μεταφέρθηκαν στη θάλασσα όπου και αποτέθηκαν, δίδοντας κατ' αυτό τον τρόπο αλλόχθονα λατεριτικά κοιτάσματα. Επί τόπου (in situ) επιφανειακές εμφανίσεις παρουσιάζονται μόνο στην περιοχή της Καστοριάς, πάνω από σερπεντινωμένους χαρτοβουργίτες (Μπόσκος κ.α., 2000).

Οι Ελληνικοί λατερίτες βρίσκονται κατά κύριο λόγο στη Ζώνη Ανατολικής Ελλάδας (Εύβοια και Λοκρίδα) καθώς και στην Καστοριά (Β. Ελλάδα). Αντιπροσωπεύουν το 90% των αποθεμάτων Νι της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

2.3.1. Λατεριτικά μεταλλεύματα της ζώνης Ανατολικής Ελλάδας

Τα σιδηρονικελιούχα λατεριτικά μεταλλεύματα σε Εύβοια και Λοκρίδα σχηματίστηκαν κατά την απόθεση αυτών ως χημικών - κλασικών ιζημάτων. Κατά κύριο λόγο, οι υποκείμενοι των λατεριτικών μεταλλευμάτων σχηματισμοί είναι λατεριτιωμένοι οφιόλιθοι, σερπεντινωμένοι λερζόλιθοι ή και καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι Ιουραϊκής ηλικίας. Οι υπερκείμενοι λιθολογικοί μετασχηματισμοί είναι ως επί το πλείστον ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού (Μπόσκος κ.α., 2000).

Μελέτη των ορυκτολογικών και χημικών αναλύσεων σε αντιπροσωπευτικά δείγματα λατεριτών της Ζώνης Ανατολικής Ελλάδας έδειξαν ότι η ορυκτολογική τους σύσταση κατά κύριο λόγο έχει ως εξής:

- 1) Αιματίτης (Fe_2O_3) και χαλαζίας (SiO_2): Αποτελούν τα βασικότερα ορυκτολογικά συστατικά των νικελιούχων μεταλλευμάτων. Η αναλογία αιματίτη/χαλαζία ποικίλει από περιοχή σε περιοχή ή από σημείο σε σημείο στο ίδιο κοιτάσμα.
- 2) Νικελιούχος χλωρίτης $(\text{Mg,Ni,Al,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$: Συμμετέχει κατά κύριο λόγο στη συνδετική ύλη του μεταλλεύματος και δευτερευόντως στους πηλολίθους. Αποτελεί τη βασική ορυκτολογική φάση, στην οποία ενδομείται το νικέλιο, σε ποσοστό περίπου 77%. Ακολουθεί ο αιματίτης, ο οποίος συμβάλλει μόνο στο 18% της μεταλλοφορίας του νικελίου. Επιπρόσθετα, ανιχνεύθηκαν κατά την ορυκτολογική εξέταση των δειγμάτων της ίδιας προέλευσης και ορισμένα άλλα νικελιούχα ορυκτά, με σύσταση και δομή

ανάλογη με αυτή του νικελιούχου χλωρίτη, όπως ο νεπουΐτης $[(\text{Ni},\text{Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ και ο τακοβίτης $[(\text{Ni}_5\text{Al}_4\text{O}_2(\text{OH})_86\text{H}_2\text{O}]$.

- 3) Τα κυριότερα από τα δευτερεύοντα ορυκτολογικά συστατικά των λατεριτικών μεταλλευμάτων είναι ο χρωμίτης (Cr_2O_3) και ο ασβεστίτης (CaCO_3).

2.3.2. Λατεριτικό μέταλλευμα της Καστοριάς

Το σιδηρονικελιούχο μέταλλευμα της Καστοριάς έχει ως υποκείμενο λιθολογικό σχηματισμό αποσαθρωμένο σερπεντινωμένο περιδοτίτη. Είναι κατά κύριο λόγο μέταλλευμα συμπαγούς τύπου και κατά περίπτωση πηλολιθικού. Τα υπερβασικά πετρώματα, τα οποία υπόκεινται άμεσα του μεταλλεύματος, έχουν υποστεί έντονη αποσάθρωση και είναι εμπλουτισμένα σε σίδηρο και νικέλιο. Σχηματίζουν έτσι τη σαπρολιθική ζώνη, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του υποκείμενου μητρικού πετρώματος και του υπερκείμενου λατερίτη σε ένα λατεριτικό προφίλ.

Αντίστοιχη ορυκτολογική μελέτη δειγμάτων λατερίτη Καστοριάς με αυτή των λατεριτών της Ζώνης Ανατολικής Ελλάδας έδειξε ότι βασικά ορυκτολογικά του συστατικά είναι τα ακόλουθα:

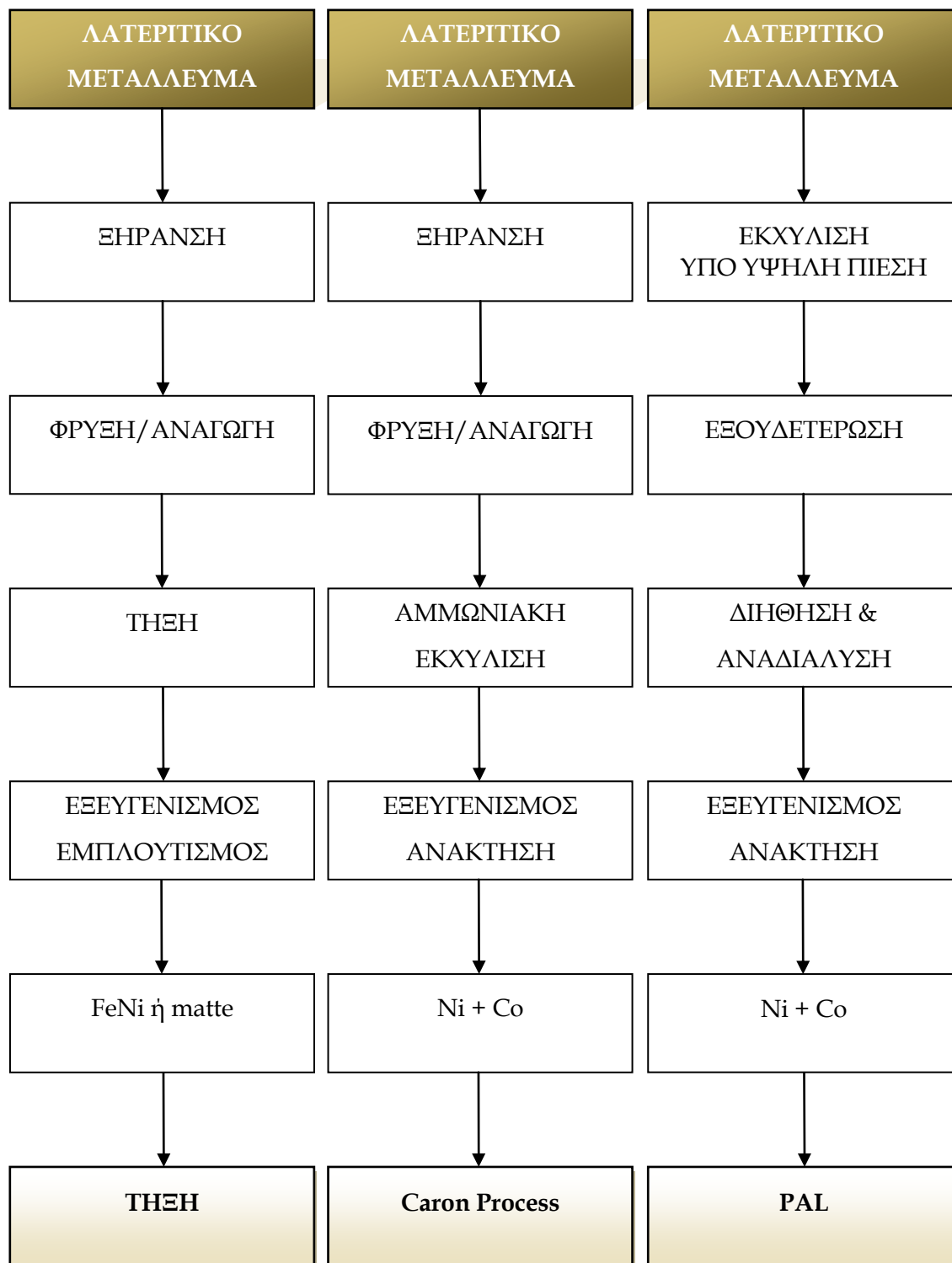
- 1) Χαλαζίας και ασβεστίτης
- 2) Γκαϊτίτης ($\alpha - \text{FeOOH}$): Αποτελεί την κύρια ορυκτολογική φάση του σιδήρου, σε αντίθεση με τα αιματιτικού τύπου λατεριτικά μεταλλεύματα Εύβοιας και Λοκρίδας. Πολύ μικρές ποσότητες νικελίου ανιχνεύτηκαν μέσω μικροανάλυσης στο πλέγμα του (Μπόσκος κ.α., 2000). Πολύ μικρή περιεκτικότητα των φάσεων του γκαϊτίτη σε νικέλιο προκύπτει και από διεθνείς βιβλιογραφικές αναφορές (Nath et al., 1997).
- 3) Σερπεντίνης ($(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ni})_6\text{Si}_4\text{O}_{12}(\text{OH})_6$): Αποτελεί, όπως και τα ορυκτά της ομάδας των σεπεχλωριτών, την κύρια ορυκτολογική φάση, στην οποία ενδομείται το νικέλιο, σε ποσοστό άνω του 80%. Τα ορυκτά της ομάδας των σεπεχλωριτών (αμεισίτης, γκριναλίτης, κροστενδίτης, χαμοσίτης) είναι φυλλοπιριτικά, με κρυσταλλική δομή όμοια με εκείνη του σερπεντίνη και χημική σύσταση ανάλογη με εκείνη των χλωριτών.
- 4) Ο χρωμίτης, είναι το βασικότερο από τα δευτερεύοντα ορυκτά του μεταλλεύματος.

Η μικροκρυσταλλικότητα γενικότερα των ορυκτολογικών φάσεων στους Ελληνικούς νικελιούχους λατερίτες είναι καθοριστικής σημασίας παράγοντας, ο οποίος καθιστά εξαιρετικά δύσκολο το διαχωρισμό με φυσικές μεθόδους των νικελιούχων ορυκτολογικών φάσεων από τις υπόλοιπες.

2.4. Μεταλλουργικές μέθοδοι για παραγωγή νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα

Δύο είναι οι γενικές μέθοδοι κατεργασίας των λατεριτικών μεταλλευμάτων προς εξαγωγή νικελιούχων προϊόντων (Diaz et al., 1988), τα γενικευμένα διαγράμματα ροής των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1:

- 1) Πυρομεταλλουργικές: i) τήξη προς παραγωγή matte και ii) τήξη προς παραγωγή σιδηρονικελίου.
- 2) Υδρομεταλλουργικές: i) αναγωγική φρύξη και εκχύλιση με αμμωνία προς παραγωγή οξειδίου του νικελίου (The Caron Process) και ii) εκχύλιση με θειικό οξύ σε αυτόκλειστα υπό πίεση (μέθοδος Pressure Acid Leaching, PAL).



Σχήμα 2.1. Διαγράμματα ροής των βιομηχανικών μεθόδων κατεργασίας των λατεριτικών μεταλλευμάτων

Εκμετάλλευση νικελιούχων κοιτασμάτων πραγματοποιείται σε 22 χώρες παγκοσμίως (Ζευγώλης, 2000). Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται το σύνολο των παραγωγών

εταιρειών πρωτογενούς νικελίου ανά τον κόσμο, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το 1940 έως και το 2004 (Dalvi et al., 2004)

Πίνακας 2.1. Παραγωγοί πρωτογενούς νικελίου ανά τον κόσμο (Dalvi et al., 2004)

Μονάδα Λειτουργίας	Εταιρεία	Χώρα	Προϊόν	Διεργασία
Doniambo	SLN/Eramet SMM/Nippon	N. Καληδονία	Fe-Ni	Τήξη
Hyuga	Steel/Mitsui	Ιαπωνία	Fe-Ni	Τήξη
Oheyama	Nippon Yakin Kogyo	Ιαπωνία	Fe-Ni	Krupp-Renn
Hachinohe	Pacific Metal Co	Ιαπωνία	Fe-Ni	Τήξη
Saganosaki	Nippon Mining Co	Ιαπωνία	Fe-Ni	Τήξη
Ufaley		Ρωσία	Fe-Ni	Τήξη
Yuzuralnickel		Ρωσία	Fe-Ni	Τήξη
Riddle	Hanna Mining Co/Cominco	Η.Π.Α.	Fe-Ni	Τήξη
Morro Do Niquel	Morro Do Niquel SA	Βραζιλία	Fe-Ni	Τήξη
Larymna	Larco	Ελλάς	Fe-Ni	Τήξη
Nicaro	Freeport	Κούβα	NiO	Caron
Moa Bay	Freeport Sulfur	Κούβα	Σουλφίδια	HPAL
Bonao	Falconbridge	Δομηνικανή Δημοκρατία	Fe-Ni	Τήξη
Exmibal	Inco	Γουατεμάλα	Matte	Τήξη
Pomalaa	P.T Aneka Tambang	Ινδονησία	Fe-Ni	Τήξη
Επέκταση			Fe-Ni	
Sorowako	P.T Inco/Inco	Ινδονησία	Matte	Τήξη
Επέκταση			Matte	
Surigao	Marinduque/Freeport	Φιλιππίνες	Μπρικέττες	Caron
Greenvavel Yabulu	Freeportl Metals Expl	Αυστραλία	Μπρικέττες	Caron
Debottlencked	QNI/BHP-Bi11iton		Μπρικέτες	
Godemin	Anglo American	Βραζιλία	Fe-Ni	Τήξη
Niquelandia/Sau Pao1o	Votorantiml Tocantins	Βραζιλία	Electro Ni	Caron
Gerra Matoso	(Hanna/Billiton)	Κολομβία	Fe-Ni	Τήξη
Επέκταση	QNUBHP-Billiton		Fe-Ni	
Kosovo	SAP-Kosova	Πρ. Γιουγκοσλαβία	Fe-Ni	Τήξη

Punta Gorda	Union & I Nickel	Κούβα	Οξειδία του Ni	Caron
Murrin Murrin	Anaconda Nickel	Αυστραλία	Μπρικετες	HPAL
Gawse	Centaur	Αυστραλία	Electro Ni	HPAL
Bulong	Resolute/Preston Resources	Αυστραλία	Electro Ni	HPAL
Lorna de Niquel	Anglo American	Βενεζουέλα	Fe-Ni	Τήξη

Το είδος της τροφοδοτούμενης λατεριτικής πρώτης ύλης, με βάση κατά κύριο λόγο τον ορυκτολογικό χαρακτήρα αυτής, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα επιλογής της ακολουθούμενης βιομηχανικής μεθόδου κατεργασίας. Υπάρχει μια γενική διαπίστωση ότι οι λατερίτες λειμωνιτικού τύπου είναι περισσότερο κατάλληλοι για υδρομεταλλουργική κατεργασία ενώ οι λατερίτες γαρνιεριτικού τύπου για πυρομεταλλουργική κατεργασία (Dalvi et al., 2004). Ένας από τους βασικούς παράγοντες καθορισμού του κόστους μιας μεθόδου κατεργασίας είναι οι ενεργειακές απαιτήσεις. Σε αυτό το σημείο υπεισέρχεται εντονότερα το θέμα του είδους της πρώτης ύλης καθώς και οι απαιτήσεις κεφαλαίων για πάγιο εξοπλισμό. Ιδίως στην περίπτωση της πυρομεταλλουργικής μεθόδου κατεργασίας λατεριτών, οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι αρκετά υψηλές, δεδομένου ότι θα πρέπει αφενός να απομακρυνθεί όλη η υγρασία και το κρυσταλλικό νερό της πρώτης ύλης και αφετέρου να ακολουθήσει φρύξη, τήξη και αναγωγή προς διαχωρισμό της μεταλλικής φάσης από τη σκωρία σε θερμοκρασίες έως και 1600°C περίπου.

2.5. Παραγωγή σιδηρονικελίου από την εκμετάλλευση των ελληνικών νικελιούχων λατεριτών

Η εξαγωγή σιδηρονικελίου με κατεργασία των Ελληνικών νικελιούχων λατεριτικών μεταλλευμάτων πραγματοποιείται με τη μέθοδο ΛΑΡΚΟ, η οποία αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου Μούσουλου για την παραγωγή Fe-Ni (LM Process) (Μούσουλος, 1973). Η τελευταία τροποποιήθηκε και βελτιώθηκε από Έλληνες τεχνικούς καθ' όλη τη διάρκεια της -πάνω από 40 ετών- λειτουργίας του εργοστασίου. Η εκμετάλλευση των λατεριτικών κοιτασμάτων και η παραγωγή σιδηρονικελίου πραγματοποιείται από την εταιρεία ελληνικών συμφερόντων ΛΑΡΚΟ Γ.Μ.Μ.Α.Ε., η οποία διαθέτει ιδιόκτητα μεταλλεία στην Εύβοια, τον Αγ. Ιωάννη Λοκρίδος και την Καστοριά, ενώ επίσης κατέχει και ιδιόκτητο λιγνιτωρυχείο

στα Σέρβια του Νομού Κοζάνης (Σχήμα 2.2). Η ΛΑΡΚΟ Γ.Μ.Μ.Α.Ε., μια από τις μεγαλύτερες μεταλλουργικές βιομηχανίες της χώρας και από τις μεγαλύτερες του είδους στην Ευρώπη, παραμένει ο μοναδικός παραγωγός νικελίου στην Ε.Ε. από εγχώρια μεταλλεύματα.

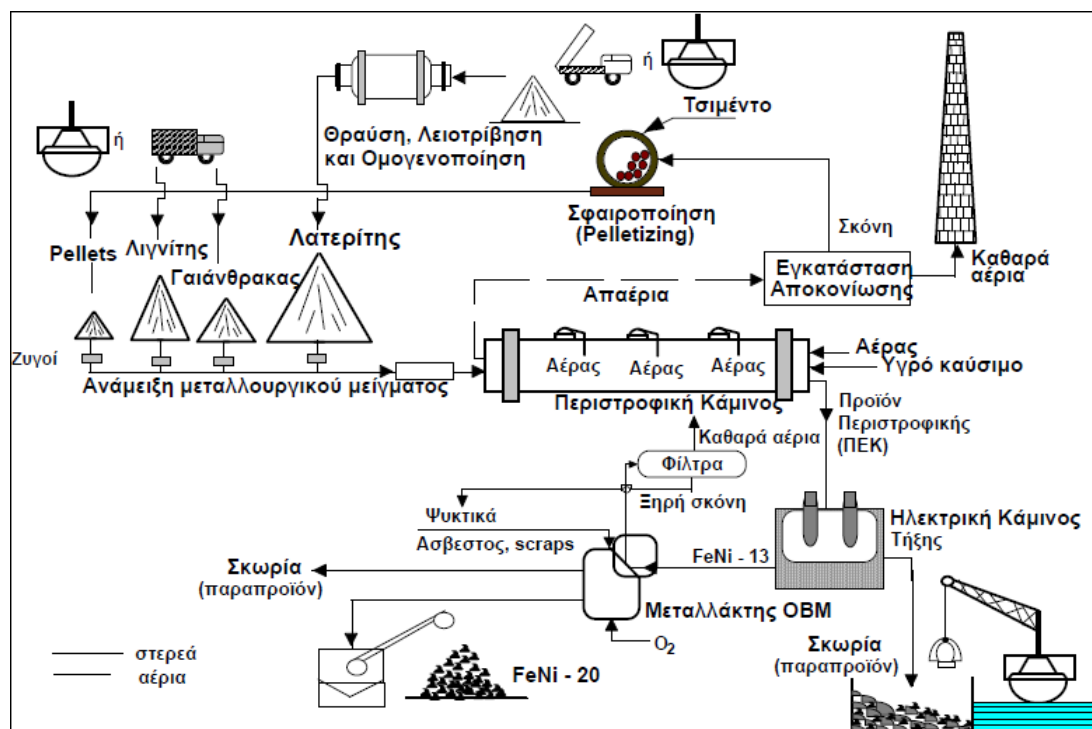


Σχήμα 2.2. Μεταλλεία νικελιούχων λατεριτών και λιγνιτωρυχείο της εταιρείας ΛΑΡΚΟ Γ.Μ.Μ.Α.Ε.

Η παραγωγική διαδικασία που ακολουθείται στο μεταλλουργικό εργοστάσιο είναι καθαρά πυρομεταλλουργική και περιλαμβάνει τα παρακάτω τέσσερα στάδια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3:

- Ανάμειξη των μεταλλευμάτων σε συγκεκριμένη αναλογία με στερεά καύσιμα και συσσωματωμένη σκόνη από τα απαέρια των περιστροφικών καμίνων για τη διαμόρφωση κατάλληλου μεταλλουργικού μίγματος.
- Ξήρανση, προθέρμανση και ελεγχόμενη αναγωγή των οξειδίων σιδήρου και νικελίου σε περιστροφικές κάμινους (Π/Κ) μέχρι τους 900°C.

- Αναγωγική τήξη του προϊόντος των περιστροφικών καμίνων σε ηλεκτρικές καμίνους (H/K) εμβαπτισμένου τόξου για παραγωγή χαμηλής περιεκτικότητας πρωτογενούς σιδηρονικελίου (~15% Ni).
- Εμπλουτισμός σε νικέλιο, εξευγενισμός του παραχθέντος σιδηρονικελίου σε μεταλλάκτες τύπου O.B.M. και κοκκοποίηση του τελικού προϊόντος περιεκτικότητας 20-30 % Ni.



Σχήμα 2.3. Διάγραμμα ροής της παραγωγικής διαδικασίας της ΛΑΡΚΟ

Το βασικό προϊόν της παραγωγικής διαδικασίας είναι το κοκκοποιημένο FeNi, περιεκτικότητας σε νικέλιο περίπου 22%, ενώ παραπροϊόντα αποτελούν οι παραγόμενες σκωρίες από τις ηλεκτροκαμίνους (H/K) και τους μεταλλάκτες OBM. Η καθαρότητα του κράματος του FeNi 22% (P=0,015%, S=0,04% και C=0,02%), η αυξημένη περιεκτικότητά του σε Fe (75-80%), η περιεκτικότητά του σε Co (περίπου 1,1%) που δεν κοστολογείται (αξίας ίσης με το 30-50% της αξίας του νικελίου) και η κοκκοποιημένη μορφή στην οποία διατίθεται καθιστούν το ελληνικό σιδηρονικέλιο από τις πιο ελκυστικές πρώτες ύλες στην μεταλλουργία παραγωγής ανοξειδωτων χαλύβων, που απορροφά το 50% της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου.

Κατά την παραγωγή 1t Ni με FeNi 22% παράγονται περίπου 100t κοκκοποιημένης σκωρίας, που για μέση παραγωγή 20.000t Ni/y αντιστοιχεί σε 2.000.000t/y. Από την ποσότητα αυτή περίπου 300.000t/y απορροφούνται από την ελληνική τσιμεντοβιομηχανία κατά κύριο λόγο ως μετρίως ποζολανικό υλικό και ύστερα ως σιδηρούχο υλικό προσθήκης, 100.000 t/y διατίθεται σε εγχώριες βιοτεχνίες για παραγωγή υλικού αμμοβολής ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία, ενώ η υπόλοιπη ποσότητα αποτίθεται, αφού μεταφερθεί από τη Λάρυμνα με φορτηγά, στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο απόθεσης σκουριάς, στη θέση Λιάβδα σε απόσταση 8 περίπου χιλιομέτρων από τις εγκαταστάσεις μεταλλουργίας του εργοστασίου.

Η ποσότητα της σιδηρούχου σκωρίας που παράγεται (περιεκτικότητα 60% σε Fe) από τους μεταλλάκτες OBM ανέρχεται σε περίπου 86.000 t/y. Η σκωρία αυτή θραύεται στα -5 mm και οδηγείται σε ειδική εγκατάσταση μαγνητικού διαχωρισμού για την ανάκτηση με ηλεκτρομαγνήτες του περιεχόμενου σε αυτή FeNi, το οποίο στη συνέχεια ανακυκλώνεται στους μεταλλάκτες OBM μαζί με τα άλλα scraps της παραγωγικής διαδικασίας, με σκοπό τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Το μη μαγνητικό προϊόν της θραυσμένης σκωρίας, εξαιτίας του μεγάλου ειδικού βάρους της (περίπου 4,5g/cm³), διατίθεται εξ'ολοκλήρου στο εξωτερικό για υποθαλάσσιες κατασκευές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ

3.1. Γενικές αρχές και μηχανισμός λειτουργίας

Με την ανάπτυξη των μεθόδων εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων ή ορυκτών και με την συνεχή έρευνα των φυσικοχημικών ιδιοτήτων ως μέσο εμπλουτισμού τους, διαπιστώθηκε ότι η μαγνητικότητα ή μη αυτών ήταν ικανό στοιχείο διαχωρισμού δύο ανομοιομαγνητικών ορυκτών.

Μέχρι του τέλους του αιώνα ήταν γνωστά δύο μαγνητικά ορυκτά, ο μαγνητίτης και ο πυρροτίτης.

Η συνεχής όμως έρευνα απέδειξε ότι και άλλα ορυκτά, όπως ο λειμονίτης και ο σιδηρίτης, μετά από αναγωγική φρόξη, αποκτούσαν μαγνητικές ιδιότητες.

Παρόλα αυτά μόνο το 1895 ο Wetherill στο Franklin του New Jersey εφάρμοσε στην πράξη εντονότερα μαγνητικά πεδία και πέτυχε το διαχωρισμό μετρίως μαγνητικών μεταλλευμάτων.

Ο μαγνητικός διαχωρισμός είναι η μέθοδος εμπλουτισμού που εκμεταλλεύεται τη διαφορά στις μαγνητικές ιδιότητες των ορυκτών. Εφαρμόζεται για την ανάκτηση χρήσιμων μαγνητικών ορυκτών από μη μαγνητικά, στείρα ορυκτά. Έτσι, ο μηχανισμός λειτουργίας του μαγνητικού εμπλουτισμού περιγράφεται ως εξής (Φραγκίσκος, 1995):

Ο μαγνητικός εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων ή ορυκτών πετυχαίνεται με την έλξη των μαγνητικών τεμαχίων από μαγνητικό πηνίο ενός μαγνήτη και τη σύγχρονη και ανεπηρέαστη διέλευση των μη μαγνητικών μέσα από το πεδίο του.

3.2. Ταξινόμηση υλικών ανάλογα με τη μαγνητικότητα

Από γενική άποψη, ανάλογα με τη συμπεριφορά των διαφόρων υλικών σ' ένα μαγνητικό πεδίο, διακρίνονται πέντε κύριες κατηγορίες:

A. διαμαγνητικά υλικά

B. παραμαγνητικά υλικά

Γ. σιδηρομαγνητικά υλικά

Δ. αντισιδηρομαγνητικά υλικά

E. σιδηριμαγνητικά υλικά

Τα διαμαγνητικά υλικά δεν έχουν προϋπάρχουσα μαγνητική ροπή. Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και της έντασης του μαγνητικού πεδίου, απωθούν τις γραμμές επαγωγής του μαγνητικού πεδίου και απωθούνται από σημεία μαγνητικών πεδίων μεγάλης έντασης.

Παραμαγνητικά είναι το Li, K, Na, Al, Mn, Pt, Pd, Cd, U και οι ενώσεις όπως CuCl_2 , NiSO_4 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ή $\alpha\text{-FeOOH}$ (γκαιτίτης), $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ή $\gamma\text{-FeOOH}$ (λεπδοκροκίτης), $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ κ.λπ.

Τα παραμαγνητικά υλικά έχουν προϋπάρχουσα μαγνητική ροπή και θετική μικρή μαγνητική επιδεκτικότητα, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία και είναι ανεξάρτητη από την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Σιδηρομαγνητικά είναι ο Fe, το Ni, Co, Dy και τα κράματά τους, κυρίως του Fe με τον C, Si, Ni, Ce, Pt, Pd, Hg, του Ni με το Co, Mn, Zn, Mo και Co με Cr, Al, Mo και Hg. Επίσης, σιδηρομαγνητικά είναι ο $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (μαγεμίτης), οι ενώσεις FeS και Fe_3C .

Τα σιδηρομαγνητικά έχουν μεγάλη προϋπάρχουσα μαγνητική ροπή και μεγάλη θετική μαγνητική επιδεκτικότητα (μέχρι 10^6 φορές μεγαλύτερη από τα παραμαγνητικά υλικά), η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία (ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας) και την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Τα αντισιδηρομαγνητικά δεν έχουν προϋπάρχουσα μαγνητική ροπή. Τέτοια υλικά αποτελούν οι ενώσεις MnF_2 , MnO_2 , FeF_2 , FeCl_2 , FeO , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (ανάλογα με τη μέθοδο παρασκευής), Ti_2O_3 , TiCl_3 , VO_2 , Cr_2O_3 , CoO , NiO , $\text{CuCl}\cdot\text{H}_2\text{O}$, Fe_2TiO_4 κ.λπ.

Τα σιδηριμαγνητικά υπάγονται στις ουσίες που έχουν το ίδιο ιόν με δύο σθένη, όπως π.χ. ο μαγνητίτης ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) ή και $\text{AO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ όπου $\text{A}=\text{Fe}$, Mn, Cu, Ni, Mg, Zn και Cd. Τα σιδηριμαγνητικά έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τα σιδηρομαγνητικά με επιπλέον μόνιμη αρχική μαγνήτιση και εξάρτηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας από τη θερμοκρασία.

Για τη μεταλλευτική τεχνολογία, τα μεταλλεύματα ή ορυκτά, ανάλογα με τη συμπεριφορά τους σε ένα μαγνητικό πεδίο, κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες, οι οποίες είναι (Φραγκίσκος, 1995):

1. Ισχυρά μαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά. Τα ορυκτά αυτά έλκονται από έναν συνήθη μόνιμο μαγνήτη
2. Ελαφρά μαγνητικά τα οποία έλκονται ύστερα από την εφαρμογή ισχυρού μαγνητικού πεδίου με ηλεκτρομαγνήτες
3. Μη μαγνητικά ή διαμαγνητικά υλικά

Πίνακας 3.1. Ομάδες μαγνητικής συμπεριφοράς υλικών

Ισχυρά μαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά	Ελαφρά μαγνητικά ή παραμαγνητικά	Ελαφρά μαγνητικά ανάλογα με την περιεκτικότητα Fe, Ni κ.α.	Μη μαγνητικά ή διαμαγνητικά		
Σίδηρος Νικέλιο Λευκόχρυσος Σιδηρονικέλιο Μαγνητίτης Τιτανιομαγνήτης Πυροτίτης Πεντανδίτης Μαρτίτης Μαρματίτης Πεφρ/νος σιδηροπυρίτης Πεφρ/νος σιδηρίτης Πεφρ/νος Ανγκερίτης Πεφρ/νος Χαλκοπυρίτης Πεφρ/νος Μαρκασίτης Πεφρ/νος Fe-Μαγνησίτης Ιμηνίτης Ζιρκόνιο	Fe Αιματίτης Λειμονίτης Ωόλιθοι Σιδηρίτης Ανκερίτης Χαμοσίτης Θουρινγκίτης Χαλκοσιδηρότης Χαλκοπυρίτης Mn Πυρολουσίτης Ψιλομέλας Μπραουνίτης Μαγγανίτης Χαουομανίτης Ροδοχροσίτης Ροδονίτης Sb-Ni Αντιμονιούχο Νικέλιο Ta-Nb-Ce Κολουμβίτης Νιοβίτης Τονταλίτης Υτριοκολομβίτης Σαμαροκίτης Ευξενίτης Μοναζίτης Τουρνερίτης Ti Ιμηνίτης Ιμενορουτίλιο Υτριοτιτανίτης Ψευδομπρουκίτης Wo Βολφραμίτης Φερμπερίτης Χουμπνερίτης	Co-Ni Ανναμπεργίτης Ζαρατίτης Μιλλερίτης Ni-σιδηροπυρίτης Μπουοσενίτης Πολυδυμίτης Co-Ni-Σιδηροπυρίτης Cu-Fe Βορνίτης Cr-Co Χρωμίτης Ερυθρίτης Σφαιροκοβαλίτης Λιννείτης Fe Αμφιβολίτης Μαρμαρυγίας Γρανάτης Πυρόξενος Σπινέλιος Ολιβίνης Σερπεντίνης	Fe Αρσενοπυρίτης Ολιβίνης Περιδοτίτης Χρυσολίνης Σιδηροπυρίτης Μαρκασίνης Φρανκλινίτης Co-Ni Δαναίτης Βιλλουαμίτης Co Κοβαλτίνης Σαφλορίτης Σμαλτίτης Ni Γαρνιερίτης Ρομελομπερκίτης Χλοανθίτης Νικελίνης Ουλμανίτης Pt Σπεριλίτης Sn Στανίτης Sn-Σιδηροπυρίτης U Ουρανίτης Κλεβείτης Πισουρανίτης	Αργεντίτης Τοπάζιον Κρυολίτης Κορούνδιον Ρουμπίνιον Ζάπφειρος Βωζίτης Σιλιμανίτης Βαρύτης Βιτερίτης Αδάμας Λιθάνθρακας Γραφίτης Ανθρακοκορούνδιο Απατίτης Κυπρίτης Χαλκοσίτης Μαλαχίτης Εναργίτης Φθορίτης Λευκίτης Ποτάσα Σποδόχρουν Αμιαντος Υπεροθενής Τάλκης Μαγνησίτης Δολομίτης Καολινίτης Σερπεντίνης Αντιγορίτης Μολυβδανίτης Νεφελίνης Λιθάργυρος Γαληνίτης Αγγλεισίτης	Ζιρκενίτης Κερουσίτης Ζαλαζίας Χαλκηδόνιος Αμέθυστος Άστριος Κασσιτερίτης Τελλουρίτης Ρουτίλιον Ανατάσης Οκταεδρίτης Τουγγσίτης Σεελίτης Σφαλερίτης Βουρσίτης Σμιθσονίτης Βιλλεμίτης Ζενοίτης Καλαμίνα Ζιρκόνιο Αμφιβολίτης Κεροσίλβη Ολιβίνης Μαρμαρυγίας Γρανάτης Πυρόξενος Σπινέλιος Ζεόλιθος

3.3. Το μαγνητικό πεδίο στον εμπλουτισμό

Στον εμπλουτισμό μεταλλευμάτων, η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου εξετάζεται, όπως είναι φυσικό, σε ομάδα κινούμενων τεμαχίων. Εξετάζεται επομένως η μεταξύ τους αλληλεπίδραση και η συμπεριφορά τους κατά τη διέλευση μέσα από τις μαγνητικές γραμμές. Η εισαγωγή τεμαχίων μεταλλεύματος μέσα σε μαγνητικό πεδίο και η διέλευση των μαγνητικών γραμμών από αυτά τα καθιστά μαγνήτες που προσανατολίζονται σύμφωνα με τη θέση των αντίστοιχων πόλων. Έτσι δημιουργείται μια αμοιβαία έλξη του ενός προς το άλλο και το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζεται πλήρως από συσσωματωμένα τεμάχια κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών (Φραγκίσκος, 1995).

Το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη σχηματίζεται μεταξύ των δύο πόλων. Οι πόλοι έχουν ίσες απόλυτες τιμές δύναμης με αντίθετα σημεία. Οι ετερόνυμοι πόλοι έλκονται και οι ομώνυμοι απωθούνται. Η έλξη ή απώθηση εκφράζεται ποσοτικά με τον τύπο:

$$F = \frac{1}{\mu} \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

όπου:

F , η δύναμη έλξης ή απώθησης

m_1 και m_2 , οι μαγνητικές ποσότητες των πόλων

d , η απόσταση μεταξύ των πόλων και

μ , μια σταθερή που εξαρτάται από το μέσον

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει τον νόμο του Coulomb και υπολογίζει τη δύναμη που επενεργούν αμοιβαία δύο μαγνητικοί πόλοι. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη του γινομένου των ποσοτήτων του μαγνητισμού και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασής τους.

Η σταθερά μ αποτελεί τη μαγνητική διαπερατότητα. Είναι μονάδα για το κενό, λίγο μεγαλύτερη ή μικρότερη για τα περισσότερα υλικά και σημαντικά μεγάλη για τα σιδηρομαγνητικά.

3.4. Μαγνητικοί διαχωριστές

Οι μαγνητικοί διαχωριστές είναι μηχανές με τις οποίες πετυχαίνεται η συνεχής απομάκρυνση των μαγνητικών από τα μη μαγνητικά τεμάχια και η λήψη των αντίστοιχων προϊόντων.

Όπως σε κάθε μηχανή εμπλουτισμού, έτσι και στους μαγνητικούς διαχωριστές λαμβάνονται υπόψη ορισμένα απαραίτητα στοιχεία για την αποδοτική τους λειτουργία. Τα στοιχεία αυτά είναι:

1. Δημιουργία κατάλληλου συγκλίνοντος μαγνητικού πεδίου
2. Ευχερής ρύθμιση της έντασης του πεδίου
3. Ομαλή τροφοδότηση των τεμαχίων του μεταλλεύματος είτε σε μορφή λεπτού στρώματος είτε σε συνεχή μονοτεμαχιακή γραμμή
4. Έλεγχος της ταχύτητας διέλευσης των τεμαχίων μέσα από το μαγνητικό πεδίο
5. Αποφυγή (ή και διόρθωση) της παγίδευσης μη μαγνητικών τεμαχίων μεταξύ ή μέσα στα μαγνητικά συσσωματώματα
6. Μέριμνα, αν είναι απαραίτητη, για τη λήψη ενδιάμεσου προϊόντος
7. Περιορισμός στο ελάχιστο των κινούμενων (φθειρόμενων) εξαρτημάτων της μηχανής

Οι παγιδεύσεις μη μαγνητικών υλικών μέσα στα μαγνητικά συσσωματώματα είναι ιδιαίτερα σοβαρές, από την άποψη της ποιότητας του συμπυκνώματος στους διαχωριστές που λειτουργούν σε μεγάλη ένταση πεδίου, ξηρό περιβάλλον και τροφοδοτούνται με μικρομερή τεμαχίδια ισχυρών μαγνητικών ιδιοτήτων. Οι παγιδεύσεις, βέβαια, περιορίζονται σημαντικά, όταν τα τεμάχια είναι χονδρομερή και ταξινομημένα σε κοκκομετρικά κλάσματα.

Αυτό κύρια οφείλεται στο ότι:

1. Το υλικό στρωματώνεται σε πάχος ενός ή το πολύ 2 τεμαχίων
2. Τα χονδρομερή τεμάχια δεν παγιδεύονται με την ίδια ευχέρεια που συμβαίνει στα μικρομερή
3. Τα συσσωματώματα καταστρέφονται λίγο πριν να εγκαταλείψουν το μαγνητικό πεδίο (εξαιτίας μεγαλύτερου βάρους) και ελευθερώνουν τα παγιδευμένα μη μαγνητικά τεμάχια

Οι μαγνητικοί διαχωριστές διαιρούνται σε δύο κατηγορίες :

- Μαγνητικοί διαχωριστές με μόνιμους μαγνήτες
- Μαγνητικοί διαχωριστές με ηλεκτρομαγνήτες

Το πεδίο των μόνιμων μαγνητών είναι σχετικά χαμηλής (μέχρι μέτριας) έντασης, της τάξης των 1300-1500 Gauss. Τελευταία, κατασκευάστηκαν μόνιμοι μαγνήτες μέχρι 5000 Gauss. Τα στοιχεία από τους ηλεκτρομαγνητικούς διαχωριστές είναι τα ηλεκτρομαγνητικά πηνία. Η σχεδίαση του πυρήνα - πηνίου και η τάση του ρεύματος ρυθμίζουν την ένταση του πεδίου, που μπορεί να φθάσει μέχρι 25000 Gauss.

Οι μαγνητικοί διαχωριστές κατατάσσονται σε ομάδες ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν, δηλαδή σε μαγνητικούς διαχωριστές για ξηρό και υγρό περιβάλλον αντίστοιχα.

Πέρα από αυτό, ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των μαγνητικών τεμαχίων, οι μαγνητικοί διαχωριστές διακρίνονται σε ορισμένους βασικούς τύπους. Ο τρόπος αυτός καθορίζει την αρχή λειτουργίας τους και είναι:

- Αρχή συγκράτησης των μαγνητικών τεμαχίων
- Αρχή έλξης των μαγνητικών τεμαχίων
- Αρχή ανύψωσης μαγνητικών τεμαχίων
- Αρχή επικόλλησης

Ανεξάρτητα από τα παραπάνω, οι μαγνητικοί διαχωριστές διακρίνονται σε χαμηλής και υψηλής έντασης, ανάλογα με την ένταση του μαγνητικού πεδίου που πραγματοποιούν κατά την εφαρμογή τους (Φραγκίσκος, 1995).

3.5. Μαγνητικός Εμπλουτισμός ΛΑΡΚΟ

3.5.1. Γενικές πληροφορίες

Στο Μεταλλουργικό Εργοστάσιο στη Λάρουνα (ΣΕΛ) της Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ, πραγματοποιείται μέθοδος μαγνητικού διαχωρισμού σε σκωρία ηλεκτροκαμίνων (H/K) για την ανάκτηση του περιεχόμενου σε αυτή νικελίου. Οι κύριες κατηγορίες μαγνητικών διαχωριστών που χρησιμοποιούνται είναι αυτές με ηλεκτρομαγνήτες σε διασταυρούμενες ταινίες.

Το τμήμα Προπαρασκευής και Διακίνησης των Πρώτων Υλών είναι υπεύθυνο για τον μαγνητικό καθαρισμό της σκουριάς των H/K.

Η παρούσα μέθοδος διαχωρισμού που ακολουθείται, έχει ως σκοπό την επιλεκτική ανάκτηση του νικελίου, με τη μορφή σιδηρονικελίου (FeNi), από την σκωρία H/K, του οποίου η παρουσία στη σκωρία οφείλεται σε μηχανικές απώλειες.

3.5.2. Περιγραφή της υφιστάμενης διαδικασίας μαγνητικού εμπλουτισμού σκουριάς H/K στο ΣΕΛ

Η κοκκοποιημένη σκουριά των H/K του ΣΕΛ συγκεντρώνεται, μέσω υπόγειων καναλιών, κατά 99% και 1% κ.β. αντιστοίχως εντός της παλαιάς και νέας δεξαμενής κοκκοποίησης. Από το σύνολο της παραγόμενης σήμερα σκουριάς (σύμφωνα με πληροφορίες από Τεχνική Έκθεση του Αρχείου της ΛΑΡΚΟ):

- 1) το 30-40% κ.β. με τη βοήθεια μεταφορικής ταινίας μεταφέρεται άνευ επεξεργασίας και φορτώνεται σε οχήματα για μεταφορά στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο απόθεσης σκουριάς στη θέση Λιάβδα
- 2) το 60-70% κ.β. μεταφέρεται στα παρακείμενα σιλό τροφοδοσίας της μεγάλης εγκατάστασης μαγνητικού εμπλουτισμού κοκκοποιημένης σκουριάς H/K.

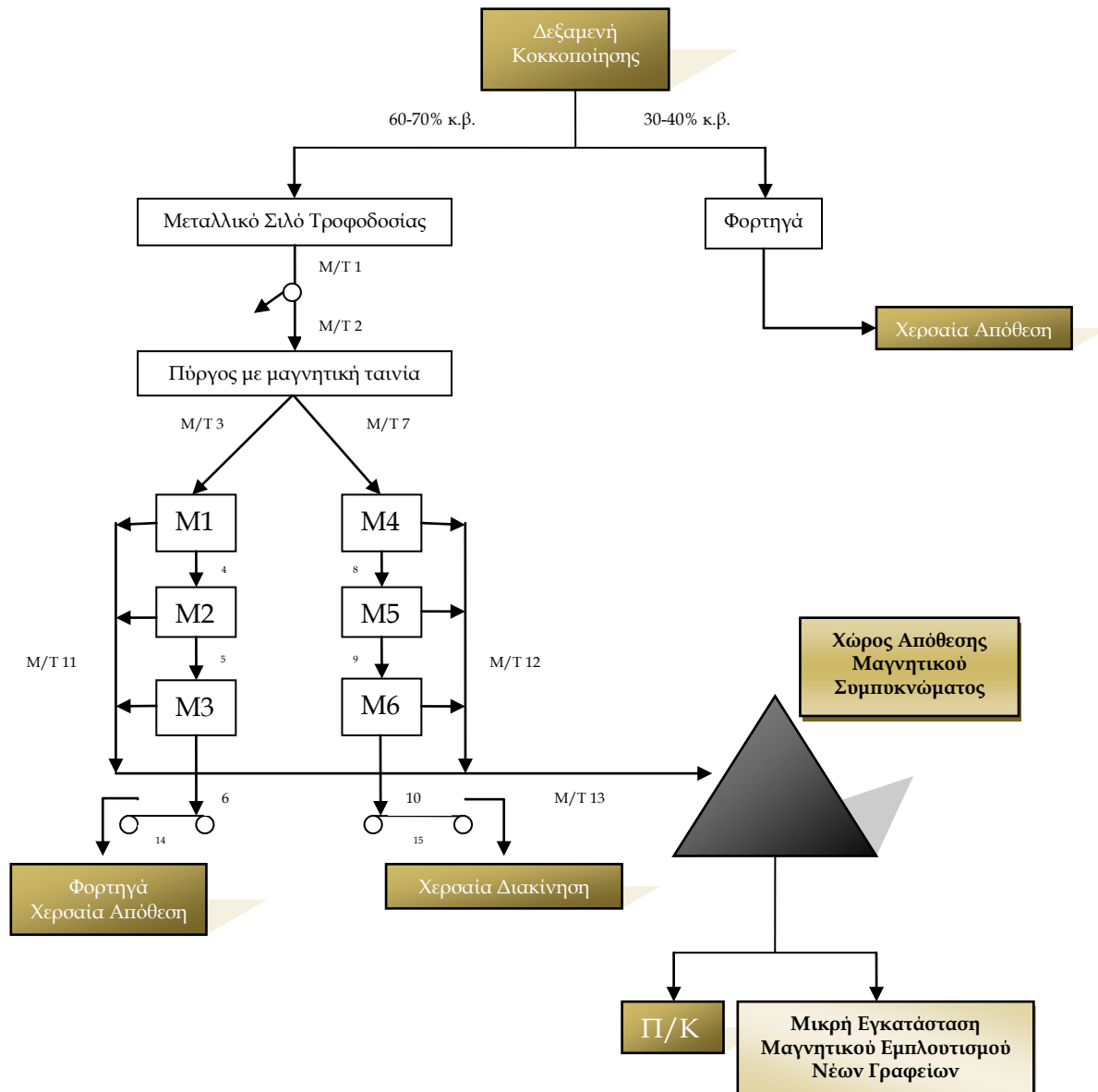
Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.1., η κοκκοποιημένη σκουριά H/K από τα μεταλλικά σιλό τροφοδοσίας της δεξαμενής κοκκοποίησης οδηγείται προς τη μεγάλη εγκατάσταση μαγνητικού εμπλουτισμού με τις μεταφορικές ταινίες 1 και 2. Μεταξύ των M/T1 και M/T2 υπάρχει δυνατότητα παράκαμψης και απόθεσης της κοκκοποιημένης σκουριάς στην παρακείμενη μικρή πλατεία της δεξαμενής κοκκοποίησης. Η M/T2 φέρει στην κεφαλή της αναρτημένη μαγνητική ταινία για

τον προκαταρκτικό μαγνητικό εμπλουτισμό της κοκκοποιημένης σκουριάς και ανάκτηση τοχόν μεταλλικών αντικειμένων (scraps).

Στη συνέχεια μέσω δίδυμου οχετού, η παροχή της κοκκοποιημένης σκουριάς χωρίζεται σε δύο μέρη και το κάθε μέρος υφίσταται μαγνητικό εμπλουτισμό τριών διαδοχικών σταδίων μέσω μεταφορικών ταινιών που φέρουν στην κεφαλή τους μαγνητικά τύμπανα (Σχήμα 3.1. M1-M2-M3 και M4-M5-M6).

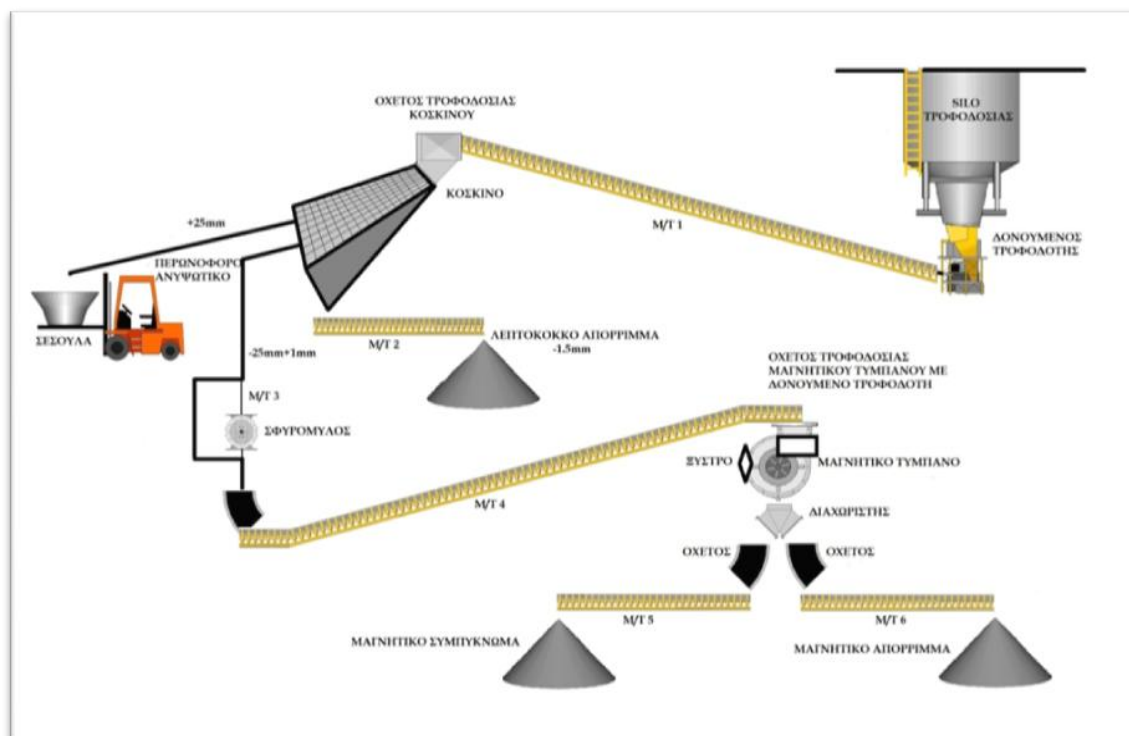
Το μαγνητικό απόρριμμα του τελικού σταδίου αποθηκεύεται προσωρινά στα τοιμεντένια σιλό της εγκατάστασης. Από εκεί οδηγείται είτε σε φορτηγά προς απόθεση ή διατίθεται σε βιοτεχνίες για την παραγωγή υλικού αμμοβολής.

Το μαγνητικό συμπόκνωμα όλων των σταδίων μεταφέρεται μέσω των μεταφορικών ταινιών (Σχήμα 3.1. M/T11, M/T12, M/T13) σε σωρό, από όπου είτε τροφοδοτείται απ' ευθείας στις περιστροφικές καμίνους (Π/Κ), είτε στην εγκατάσταση εμπλουτισμού που βρίσκεται στα νέα γραφεία για περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 3.1. Σχηματικό διάγραμμα διαχείρισης κοκκοποιημένης σκουριάς Η/Κ

Η εγκατάσταση μαγνητικού εμπλουτισμού στην περιοχή των νέων γραφείων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2., διαθέτει αρχικό στάδιο κοσκίνισης και στη συνέχεια διαδοχικά στάδια λεπτομερούς θραύσης και μαγνητικού εμπλουτισμού για την επεξεργασία του αδρομερούς κλάσματος της κοσκίνισης, με τελικά προϊόντα λεπτόκκοκο απόρριμμα, μη μαγνητικό απόρριμμα και μαγνητικό συμπόκνωμα.



Σχήμα 3.2. Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης μαγνητικού εμπλουτισμού των νέων γραφείων

Στην εν λόγω εγκατάσταση υφίσταται σήμερα επεξεργασία το παραγόμενο μαγνητικό συμπόκνωμα από την μεγάλη εγκατάσταση μαγνητικού εμπλουτισμού καθώς και εκείνο του τριβείου της σκουριάς των μεταλλακτών τύπου ΟΒΜ.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Πειραματική Διαδικασία

4.1. Εισαγωγή

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας στοχεύει στην ανάκτηση του νικελίου που περιέχεται στη σκουρία ηλεκτροκαμίνων του μεταλλουργικού εργοστασίου της ΛΑΡΚΟ με την μέθοδο του μαγνητικού διαχωρισμού. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αποσκοπεί στην μελέτη των κυριότερων παραμέτρων που επηρεάζουν την διαδικασία του μαγνητικού διαχωρισμού, όπως η κοκκομετρία, η ένταση του μαγνητικού πεδίου, το πάχος του τροφοδοτούμενου για τον διαχωρισμό στρώματος και το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας. Για τον χαρακτηρισμό του δείγματος πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων-Χ (XRD), ανάλυση του δείγματος με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, SEM) στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και χημικές αναλύσεις στο τμήμα του Χημείου της ΣΕΛ ΛΑΡΚΟ.

4.2. Περιγραφή του υλικού

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι σκουριά ηλεκτροκαμίνων από το μεταλλουργικό εργοστάσιο της Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ, με αρχικό βάρος 40 kg περίπου. Έπειτα από δειγματοληψία, ελήφθησαν δύο αντιπροσωπευτικά δείγματα, βάρους 3 κιλών περίπου το κάθε ένα, που χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα για την προετοιμασία και ανάλυση του υλικού και για την πραγματοποίηση των δοκιμών μαγνητικού διαχωρισμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι, εκτός από τις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού με μεταβλητή το ποσοστό υγρασίας, οι υπόλοιπες δοκιμές έγιναν στις ίδιες συνθήκες υγρασίας με αυτές του διαχωρισμού στο εργοστάσιο. Για

αυτόν τον λόγο, τα δείγματα διατηρήθηκαν κλειστά σε πλαστικές σακούλες προκειμένου να αποφευχθεί η ελάττωση του ποσοστού υγρασίας.

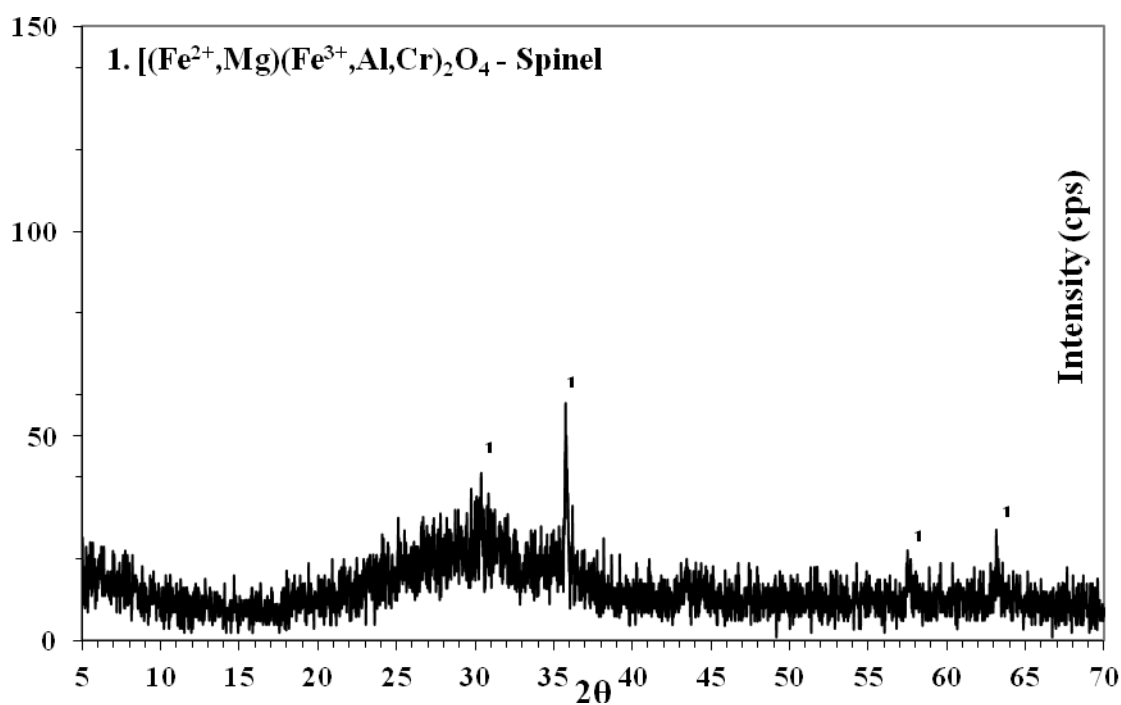
Από τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης με τη μέθοδο της περιθλασης ακτινών Χ (XRD) (Σχήμα 4.1) και την ανάλυση του δείγματος με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) (Εικόνες 4.1, 4.2, 4.3) προκύπτει ότι:

1. Ανιχνεύονται τρεις **βασικές φάσεις**

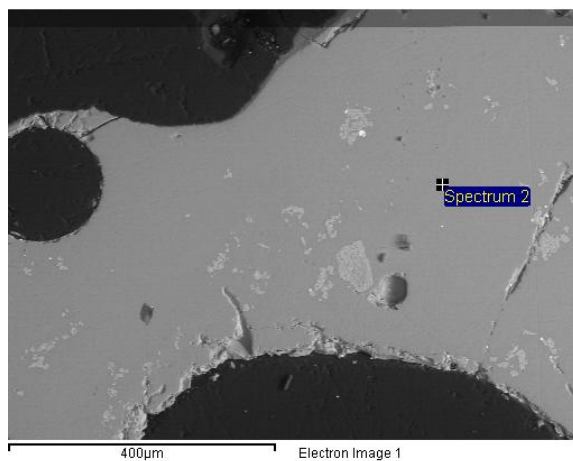
- Α. Άμορφη
- Β. Σπινέλιοι
- Εγκλωβισμένο μεταλλικό FeNi

2. Νικέλιο υπάρχει μόνο στη μεταλλική φάση. Δεν ανιχνεύεται σε καμία άλλη φάση.

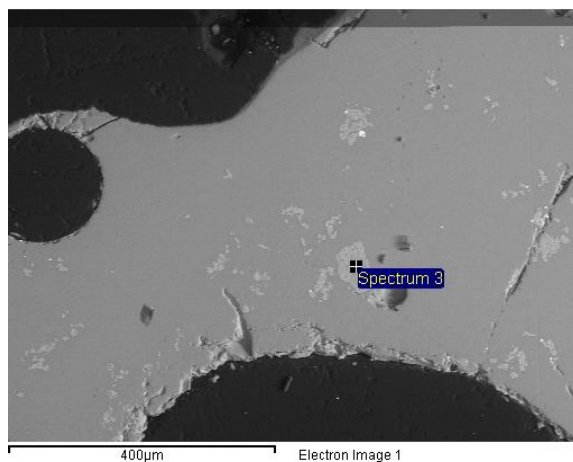
3. Το Cr συγκεντρώνεται κυρίως στους σπινέλιους.



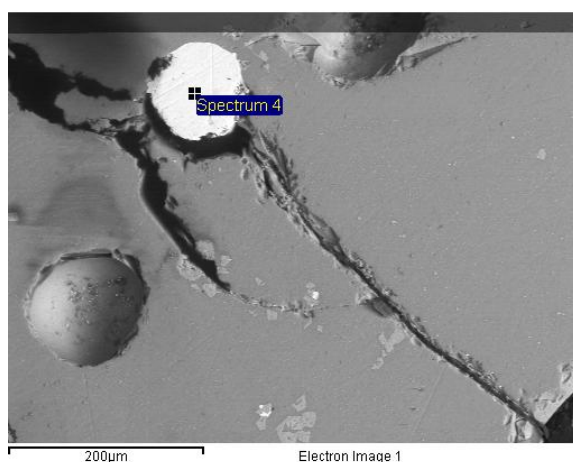
Σχήμα 4.1. Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης XRD



Εικόνα 4.1. Άμορφη φάση



Εικόνα 4.2. Σπινέλιος



Εικόνα 4.3. Κόκκος FeNi

Από την χημική ανάλυση του δείγματος, όπως αυτή παρατίθεται στον Πίνακα 4.1, παρατηρούμε ότι η αρχική περιεκτικότητα του δείγματος σε νικέλιο ήταν μόνο 0,12%, δηλαδή αρκετά χαμηλή.

Πίνακας 4.1. Χημική ανάλυση αρχικού δείγματος (πηγή ΧΗΜΕΙΟ ΣΕΛ)

ΔΕΙΓΜΑ ΣΚΟΥΡΙΑΣ ΑΠΟ ΤΑΙΝΙΑ	
ΣΤΟΙΧΕΙΟ/ΕΝΩΣΗ	ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ (%)
C	0,20
S	0,16
FeO	32,50
Fe ₂ O ₃	4,03
Fet	28,08
Ni	0,12
Co	0,02
SiO ₂	38,85
CaO	4,95
MgO	8,49
Al ₂ O ₃	6,92
Cr ₂ O ₃	3,10
MnO	0,34
CuO	0,03
ZnO	0,07
ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	4,25

4.3. Δειγματοληψία

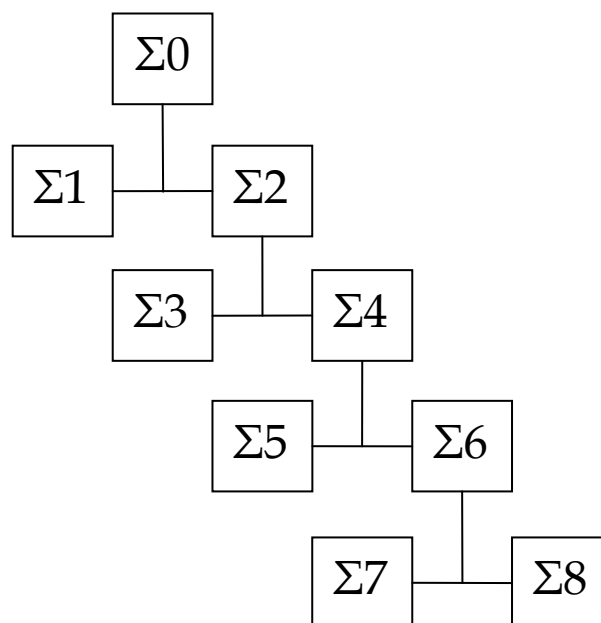
Από το αρχικό δείγμα σκουριάς των ηλεκτροκαμίνων επιλέχθηκαν μικρότερες ποσότητες για την πειραματική διαδικασία.

Με την συσκευή δειγματοληψίας (Εικόνα 4.4) του εργαστηρίου Εμπλουτισμού έγινε διχοτόμηση του δείγματος 4 φορές κατά την ακολουθία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.

Το βάρος των τελικών κλασμάτων που προέκυψαν ήταν: Σ7 = 2,79 kg και Σ8 = 3,03 kg.



Εικόνα 4.4. Συσκευή δειγματοληψίας



Σχήμα 4.2. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας της δειγματοληψίας

4.4. Ταξινόμηση

Για τον διαχωρισμό των τεμαχίων του υλικού κατά μέγεθος χρησιμοποιούνται τα κόσκινα. Το βιομηχανικό κόσκινο είναι ένα φίλτρο μεγεθών τεμαχίων, το οποίο αφήνει να περάσει το υλικό που έχει μέγεθος μικρότερο από το άνοιγμα των βροχίδων. Το υλικό που περνάει από τα ανοίγματα του πλέγματος χαρακτηρίζεται

ως διερχόμενο, ενώ αυτό που δεν περνάει, ως παραμένον. Από την κοσκίνιση προκύπτουν τα κοκκομετρικά κλάσματα, στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού.

Το δείγμα ταξινομήθηκε σε κοκκομετρικά κλάσματα προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή εκλεκτική συγκέντρωση νικελίου σε κάποιο (ή κάποια) κοκκομετρικό κλάσμα. Η ταξινόμηση στα κοκκομετρικά κλάσματα έγινε μέσω της συσκευής με δονούμενα κόσκινα (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5. Συσκευή δονούμενων κοσκίνων

Τα κοκκομετρικά κλάσματα στα οποία ταξινομήθηκε το δείγμα ήταν τα ακόλουθα:

- +8mm
- -8mm+4,70mm
- -4,70mm+2,80mm
- -2,80mm+1,40mm
- -1,40mm+1,18mm
- -1,18mm+0,60mm
- -0,60mm+0,30mm
- -0,30mm+0,15mm
- -0,15mm

Έπειτα, τα παραπάνω κοκκομετρικά κλάσματα που προέκυψαν από το δείγμα¹ δόθηκαν στο ΧΗΜΕΙΟ ΣΕΛ για χημική ανάλυση. Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής και χημικής ανάλυσης παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.2 και 4.3.

Πίνακας 4.2. Κοκκομετρική ανάλυση υλικού

Κοκκομετρικά κλάσματα (mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Ni (%)	Κατανομή Ni (%)	Αθροιστική κατανομή Ni (%)
+ 8,00 mm	10,36	2,40	0,39	4,94	4,94
- 8,00 +4,70 mm	21,94	5,08	0,84	22,64	27,58
-4,70 +2,80 mm	26,03	6,03	0,84	26,98	54,56
-2,80 +1,40 mm	64,08	14,84	0,22	17,43	71,99
-1,40 +1,18 mm	65,08	15,07	0,10	8,32	80,31
-1,18 +0,60 mm	76,95	17,82	0,07	7,07	87,38
-0,60 +0,30 mm	72,93	16,89	0,06	5,69	93,07
-0,30 +0,15 mm	72,81	16,86	0,06	5,43	98,49
- 0,15 mm	21,63	5,01	0,06	1,51	
Περιεκτικότητα Δείγματος	431,81	100,00	0,19	100,00	
Υγρασία	3,93%				

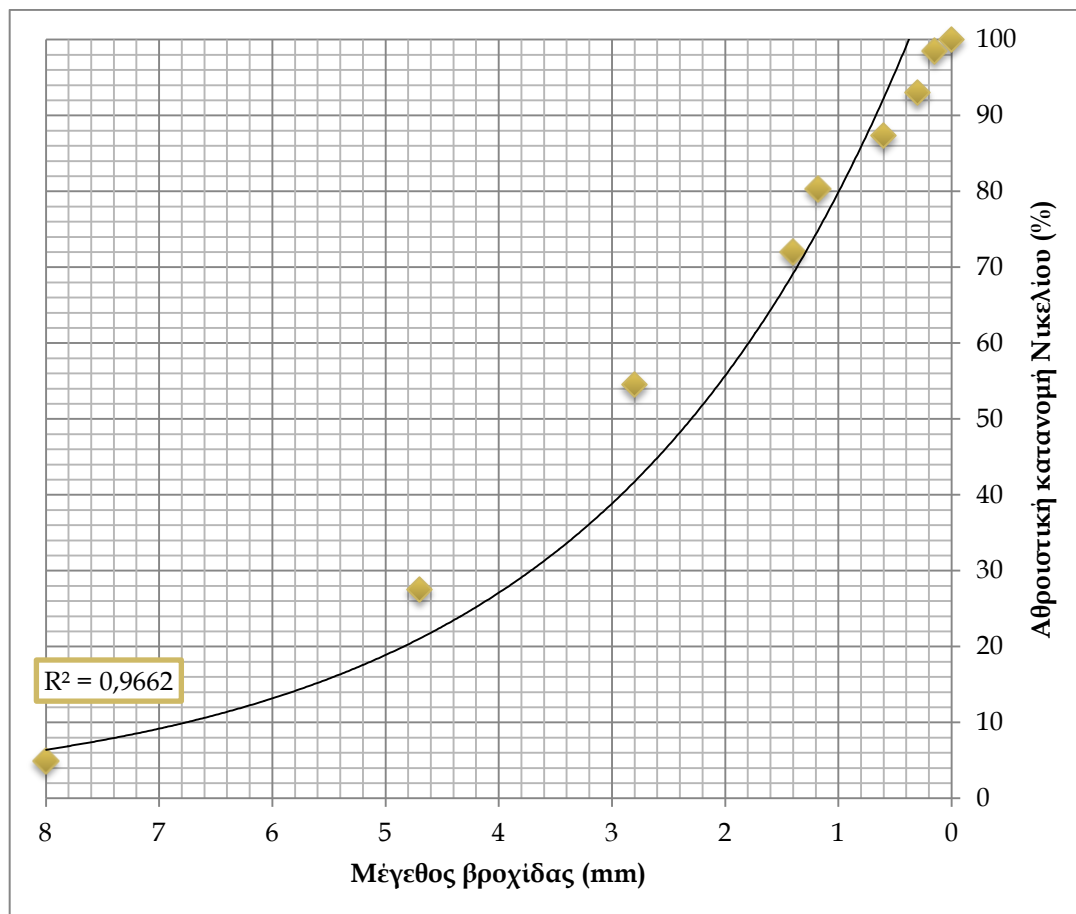
Με βάση τον Πίνακα 4.2 εξάγεται το συμπέρασμα πως τα μεγαλύτερα ποσοστά νικελίου συγκεντρώνονται αθροιστικά στις μεγαλύτερες κοκκομετρίες. Απόδειξη είναι πως μέχρι το 1,18mm του υλικού συγκεντρώνεται το 80% του νικελίου που περιέχεται στην τροφοδοσία. Εκτός αυτού, με βάση την ανωτέρω χημική ανάλυση, στα περισσότερα χονδρομερή τεμάχια του υλικού, η περιεκτικότητα του νικελίου είναι υψηλότερη.

¹Πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία με τη μέθοδο του σταυρού σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα που προέκυψε προκειμένου να σταλούν για ανάλυση μικρότερες ποσότητες δείγματος

Πίνακας 4.3. Χημική ανάλυση υλικού ανά κοκκομετρικό κλάσμα

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΚΟΥΡΙΑΣ ΑΝΑ ΚΛΑΣΜΑ															
	C	S	FeO	Fe ₂ O ₃	Fet	Ni	Co	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	ZnO	ΣΥΝΟΛΟ
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
+ 8,00 mm	6,680	0,365	31,60	1,43	25,56	0,39	0,038	43,56	3,77	4,28	4,80	2,41	0,25	0,08	0,10	96,10
- 8,00 +4,70 mm	2,320	0,244	37,70	1,62	30,44	0,84	0,056	36,71	4,32	6,58	5,67	3,17	0,28	0,08	0,10	96,27
-4,70 +2,80 mm	1,010	0,244	38,10	1,92	30,96	0,84	0,053	36,11	4,87	6,41	6,19	3,47	0,30	0,08	0,10	95,66
-2,80 +1,40 mm	0,420	0,247	33,60	2,12	27,60	0,22	0,029	39,71	5,39	7,43	6,76	3,17	0,32	0,09	0,10	94,63
-1,40 +1,18 mm	0,230	0,248	33,20	1,88	27,12	0,10	0,021	40,39	5,58	7,43	6,89	3,19	0,33	0,09	0,10	95,16
-1,18 +0,60 mm	0,100	0,244	33,45	2,00	27,40	0,07	0,020	40,05	5,69	7,36	6,94	3,19	0,33	0,09	0,10	94,89
-0,60 +0,30 mm	0,050	0,249	33,20	1,65	26,96	0,06	0,020	40,56	5,74	7,23	7,04	3,17	0,33	0,12	0,10	95,72
-0,30 +0,15 mm	0,120	0,252	33,80	1,04	27,00	0,06	0,019	41,16	5,58	7,16	7,00	3,06	0,33	0,11	0,10	97,31
- 0,15 mm	0,740	0,481	32,90	0,95	26,24	0,06	0,018	41,33	5,65	7,03	7,30	2,55	0,33	0,10	0,12	97,46

Από τον Πίνακα 4.2 προκύπτει το Σχήμα 4.3, στο οποίο φαίνεται η αθροιστική κατανομή του νικελίου του δείγματος σε σχέση με την κοκκομετρία.



Σχήμα 4.3. % Αθροιστική κατανομή του Ni σε σχέση με την κοκκομετρία

4.5. Μαγνητικός Διαχωρισμός

Οι δοκιμές του μαγνητικού διαχωρισμού που πραγματοποιήθηκαν ακολούθησαν 3 κύκλους πειραμάτων.

Ο πρώτος κύκλος περιελάμβανε τις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, σε διαφορετικές εντάσεις. Ο δεύτερος, δοκιμές με διαφορετικό πάχος στρώματος υλικού και απόσταση του μαγνήτη από την τροφοδοσία. Ο τρίτος, την συμπεριφορά υλικού έπειτα από θραύση των πιο χονδρομερών τεμαχίων και το ποσοστό υγρασίας στα πιο λεπτομερή τεμάχια.

Επομένως, οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- κοκκομετρία
- ένταση μαγνητικού πεδίου
- απόσταση του μαγνήτη από την τροφοδοσία
- πάχος στρώματος τροφοδοτούμενου υλικού
- θραύση του υλικού
- ποσοστό υγρασίας

4.5.1. Επίδραση κοκκομετρίας

Για να διερευνηθεί η επίδραση της κοκκομετρίας στο αποτέλεσμα του μαγνητικού διαχωρισμού, αντιπροσωπευτικό δείγμα από το αρχικό υλικό χωρίστηκε σε διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα με κοσκίνιση και, στη συνέχεια, το κάθε κοκκομετρικό κλάσμα υποβλήθηκε σε μαγνητικό διαχωρισμό σε συγκεκριμένες συνθήκες. Στα μεγαλύτερα κοκκομετρικά κλάσματα, μέχρι δηλαδή τα 2,80mm, χρησιμοποιήθηκε ως μαγνητικός διαχωριστής ο μαγνήτης χειρός. Αυτό συμβαίνει, γιατί διαπιστώθηκε κατά τη διαδικασία των πειραμάτων ότι τα πιο χονδρομερή κλάσματα εμφάνιζαν μεγάλη μαγνητικότητα, με αποτέλεσμα η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου υψηλής έντασης να επιτογχάνει την λήψη μαγνητικού προϊόντος με μεγάλο βάρος αλλά με μικρή περιεκτικότητα σε νικέλιο σε σχέση με την αρχική. Στα κλάσματα κάτω από τα 2,80mm, χρησιμοποιήθηκε ξηρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης, Type 138 T-C3M σε δύο διαφορετικές εντάσεις ρεύματος, 0,5 και 1 Ampère.



Εικόνα 4.6. Ξηρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των προϊόντων από τις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού σχετικά με την κοκκομετρία, την ένταση και τον μαγνητικό

διαχωριστή που χρησιμοποιήθηκε ενώ στον Πίνακα 4.6 δίνεται η χημική ανάλυσή τους.

Πίνακας 4.4. Ανάλυση των χαρακτηρισμών των δειγμάτων από τον Α' κύκλο δοκιμών

Προϊόν	Κοκκομετρικό Κλάσμα	Μαγνητικότητα	Ένταση	Μαγνητικός Διαχωριστής
I _M	+8mm	Μαγνητικό		Μαγνήτης Χειρός
I _{MM}	+8mm	Μη Μαγνητικό		
II _M	- 8,00 +4,70 mm	Μαγνητικό		
II _{MM}	- 8,00 +4,70 mm	Μη Μαγνητικό		Μαγνήτης Χειρός
III _M	-4,70 +2,80 mm	Μαγνητικό		
III _{MM}	-4,70 +2,80 mm	Μη Μαγνητικό		
IV _{M1}	-2,80 +1,40 mm	Μαγνητικό	0,5 Ampère (Χαμηλή)	Ξηρός Μ.Δ. Υψηλής Έντασης
IV _{MM1}	-2,80 +1,40 mm	Μη Μαγνητικό		
IV _{M2}	-2,80 +1,40 mm	Μαγνητικό	1 Ampère (Υψηλή)	Ξηρός Μ.Δ. Υψηλής Έντασης
IV _{MM2}	-2,80 +1,40 mm	Μη Μαγνητικό		
V _{M1}	-1,40 +1,18 mm	Μαγνητικό	0,5 Ampère (Χαμηλή)	Ξηρός Μ.Δ. Υψηλής Έντασης
V _{MM1}	-1,40 +1,18 mm	Μη Μαγνητικό		
V _{M2}	-1,40 +1,18 mm	Μαγνητικό	1 Ampère (Υψηλή)	Ξηρός Μ.Δ. Υψηλής Έντασης
V _{MM2}	-1,40 +1,18 mm	Μη Μαγνητικό		
VI _{M1}	-1,18 +0,60 mm	Μαγνητικό	0,5 Ampère (Χαμηλή)	Ξηρός Μ.Δ. Υψηλής Έντασης
VI _{MM1}	-1,18 +0,60 mm	Μη Μαγνητικό		
VI _{M2}	-1,18 +0,60 mm	Μαγνητικό	1 Ampère (Υψηλή)	Ξηρός Μ.Δ. Υψηλής Έντασης
VI _{MM2}	-1,18 +0,60 mm	Μη Μαγνητικό		
VII _M	-0,60 +0,30 mm	Μαγνητικό	0,5 Ampère (Χαμηλή)	Ξηρός Μ.Δ. Υψηλής Έντασης
VII _{MM}	-0,60 +0,30 mm	Μη Μαγνητικό		

Πίνακας 4.5. Χημική ανάλυση υλικού ανά κλάσμα έπειτα από μαγνητικό διαχωρισμό σε διαφορετικές εντάσεις

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΚΟΥΡΙΑΣ ΑΝΑ ΚΛΑΣΜΑ															
	C	S	FeO	Fe ₂ O ₃	Fet	Ni	Co	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	ZnO	ΣΥΝΟΛΟ
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
I _M	0,255	0,082	32,29	14,10	34,96	1,15	0,072	32,09	2,65	7,89	5,22	3,82	0,29	0,05	0,09	100,06
I _{MM}	12,800	0,579	3,47	23,54	19,16	0,13	0,022	42,70	3,14	5,41	4,49	3,07	0,22	0,08	0,08	99,72
II _M	0,074	0,172	41,17	2,23	33,56	1,31	0,082	32,00	4,07	9,42	5,69	3,27	0,27	0,05	0,08	99,89
II _{MM}	8,656	0,476	7,22	20,34	19,84	0,07	0,019	43,21	3,55	8,49	5,07	2,34	0,24	0,05	0,08	99,82
III _M	0,072	0,016	39,10	4,19	33,32	1,12	0,070	33,72	4,87	7,16	5,94	3,16	0,30	0,06	0,10	91,22
III _{MM}	0,182	0,068	33,05	6,45	30,20	0,10	0,026	36,71	5,40	8,03	6,39	2,78	0,33	0,06	0,10	85,07
IV _{M1}	0,137	0,230	34,74	1,37	27,96	0,56	0,040	36,45	4,89	10,68	6,59	3,43	0,33	0,05	0,08	99,57
IV _{MM1}	0,26	0,193	32,42	2,17	26,72	0,06	0,020	39,11	5,12	10,35	6,56	3,06	0,32	0,05	0,08	99,76
IV _{M2}	0,22	0,233	33,19	3,03	27,92	0,14	0,021	37,65	4,99	10,41	6,34	3,13	0,34	0,04	0,08	99,83
IV _{MM2}	0,68	0,230	32,42	1,94	26,56	0,05	0,018	40,13	5,10	9,62	6,31	2,95	0,34	0,09	0,08	99,97
V _{M1}	0,167	0,231	32,68	1,60	26,52	0,16	0,025	38,42	4,93	10,81	6,90	3,29	0,34	0,05	0,08	99,68
V _{MM1}	0,13	0,184	32,42	1,26	26,08	0,08	0,018	39,36	5,19	11,21	6,65	2,99	0,35	0,05	0,08	99,97
V _{M2}	0,17	0,200	32,68	2,63	27,24	0,07	0,019	38,68	4,99	10,21	6,40	3,11	0,34	0,04	0,08	99,63
V _{MM2}	0,71	0,250	32,55	0,31	25,52	0,06	0,016	38,85	5,12	12,20	6,36	2,99	0,35	0,07	0,08	99,92
VI _{M1}	0,085	0,229	32,81	1,97	26,88	0,10	0,021	38,59	5,18	10,48	6,66	3,14	0,33	0,10	0,08	99,78
VI _{MM1}	0,09	0,234	32,55	1,91	26,64	0,08	0,018	39,71	5,15	9,95	6,54	3,10	0,35	0,04	0,08	99,80
VI _{M2}	0,12	0,212	32,93	2,35	27,24	0,07	0,017	39,71	5,05	9,49	6,39	3,03	0,34	0,05	0,08	99,83
VI _{MM2}	0,21	0,244	32,93	1,43	26,60	0,06	0,019	39,53	5,07	10,41	6,38	3,13	0,35	0,05	0,08	99,91
VII _M	0,155	0,234	32,29	1,63	26,24	0,07	0,019	38,59	5,38	11,21	6,87	3,05	0,33	0,07	0,08	99,99
VII _{MM}	0,22	0,232	32,68	1,54	26,48	0,09	0,020	39,53	5,04	10,48	6,50	2,89	0,33	0,07	0,08	99,70

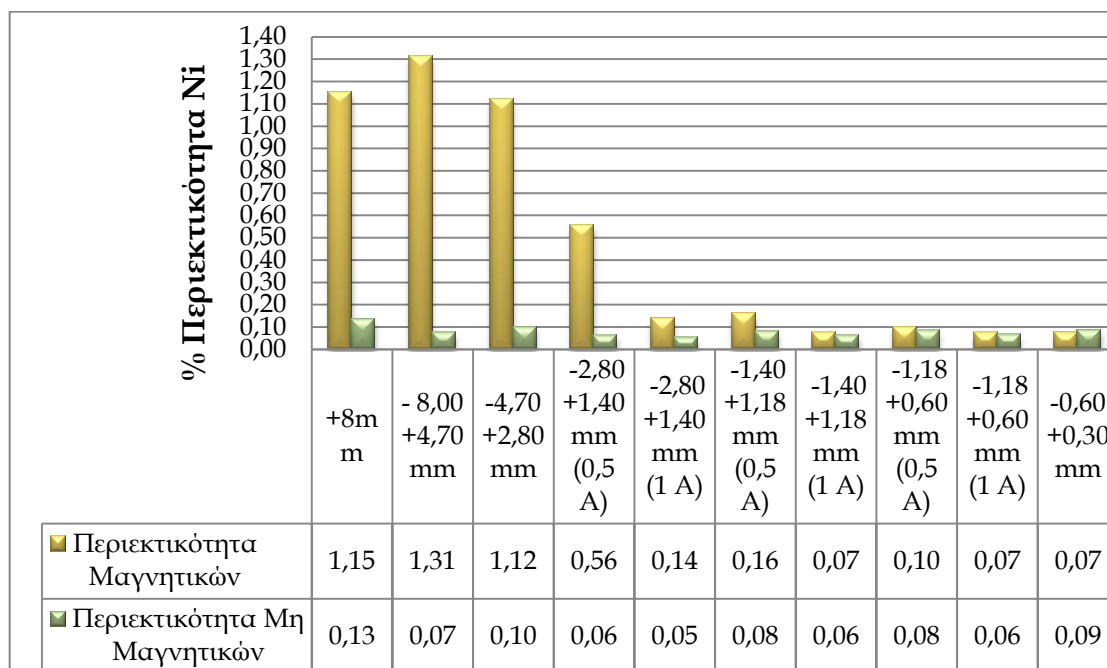
Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 4.5 προκύπτει ο Πίνακας 4.6, ο οποίος παρουσιάζει το βάρος, την περιεκτικότητα και την ανάκτηση σε νικέλιο των προϊόντων κάθε δοκιμής μαγνητικού διαχωρισμού.

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού διαφορετικής κοκκομετρίας και έντασης

Κοκκομετρικό Κλάσμα	Προϊόν	Βάρος (%)	Περιεκτικότητα σε Ni (%)	% Ανάκτηση Ni
+8mm	I _M	35,39	1,15	82,40
	I _{MM}	64,61	0,13	17,60
	Τροφοδοσία	100,00	1,29	100,00
-8,00+4,70mm	II _M	65,92	1,31	97,18
	II _{MM}	34,08	0,07	2,82
	Τροφοδοσία	100,00	1,39	100,00
-4,70+2,80mm	III _M	47,98	1,12	91,17
	III _{MM}	52,02	0,10	8,83
	Τροφοδοσία	100,00	0,59	100,00
-2,80+1,40mm	IV _{M1}	15,36	0,56	61,93
	IV _{MM1}	84,64	0,06	38,07
	Τροφοδοσία	100,00	0,62	100,00
-2,80+1,40mm	IV _{M2}	90,08	0,14	95,96
	IV _{MM2}	9,92	0,05	4,04
	Τροφοδοσία	100,00	0,19	100,00
-1,40+1,18mm	V _{M1}	14,30	0,16	24,92
	V _{MM1}	85,70	0,08	75,08
	Τροφοδοσία	100,00	0,24	100,00
-1,40+1,18mm	V _{M2}	95,41	0,07	96,19
	V _{MM2}	4,59	0,06	3,81
	Τροφοδοσία	100,00	0,14	100,00
-1,18+0,60mm	VI _{M1}	18,15	0,10	21,39
	VI _{MM1}	81,85	0,08	78,61
	Τροφοδοσία	100,00	0,18	100,00
-1,18+0,60mm	VI _{M2}	97,11	0,07	97,51
	VI _{MM2}	2,89	0,06	2,49
	Τροφοδοσία	100,00	0,14	100,00
-0,60+0,30mm	VII _M	57,34	0,07	53,44
	VII _{MM}	42,66	0,09	46,56
	Τροφοδοσία	100,00	0,16	100,00

Από τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού σχετικά με την κοκκομετρία και την ένταση του μαγνητικού διαχωριστή κατασκευάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζονται στα Σχήματα 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7 αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.4, παρουσιάζεται η περιεκτικότητα του νικελίου στα μαγνητικά και μη μαγνητικά προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, με χαμηλή και υψηλή ένταση, για τα κλάσματα $-2,80 +1,40$ mm, $-1,40 +1,18$ mm και $-1,18 +0,60$ mm.



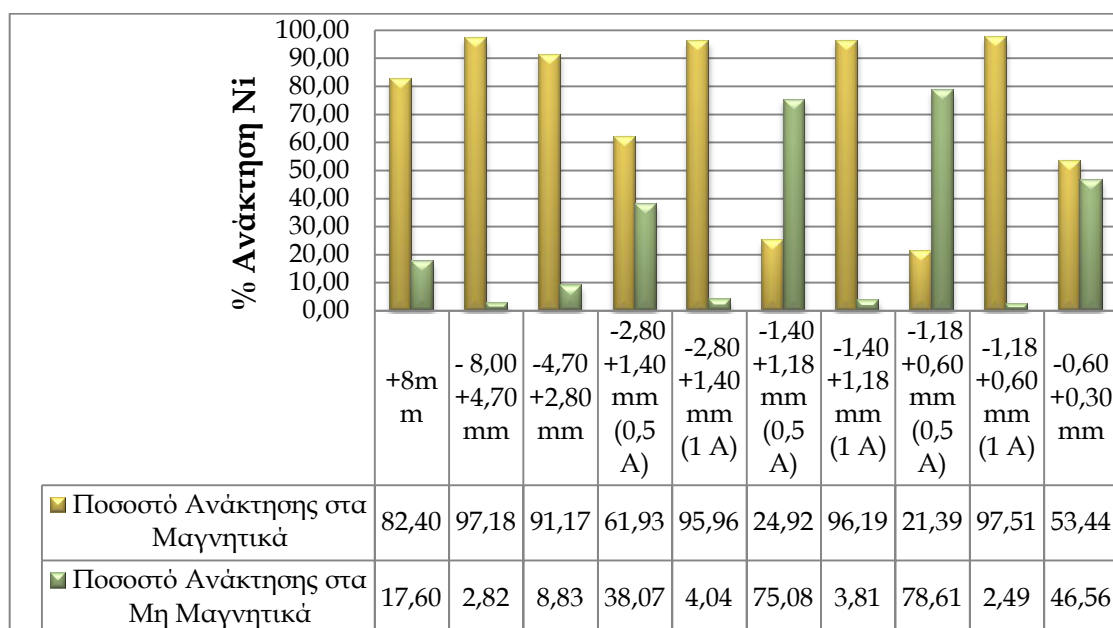
Σχήμα 4.4. Περιεκτικότητα νικελίου στα προϊόντα μαγνητικού διαχωρισμού

Παρατηρείται φθίνουσα πορεία της περιεκτικότητας σε νικέλιο για τα μαγνητικά, η οποία εμφανίζεται να είναι μεγαλύτερη για τα μεγαλύτερου μεγέθους κοκκομετρικά κλάσματα.

Αντίθετα, για τα μικρότερου μεγέθους κοκκομετρικά κλάσματα η περιεκτικότητα μαγνητικών και μη μαγνητικών προϊόντων σε νικέλιο είναι περίπου η ίδια. Σε όλα τα μη μαγνητικά προϊόντα η περιεκτικότητα σε νικέλιο διατηρείται σταθερά χαμηλή. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού διαφορετικής έντασης στο ίδιο κοκκομετρικό κλάσμα, παρατηρείται πως στην χαμηλή ένταση, η περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με αυτήν που

αντιστοιχεί στην υψηλή ένταση (κοκκομετρικά κλάσματα $-2,80 +1,40$ mm, $-1,40 +1,18$ mm και $-1,18 +0,60$ mm).

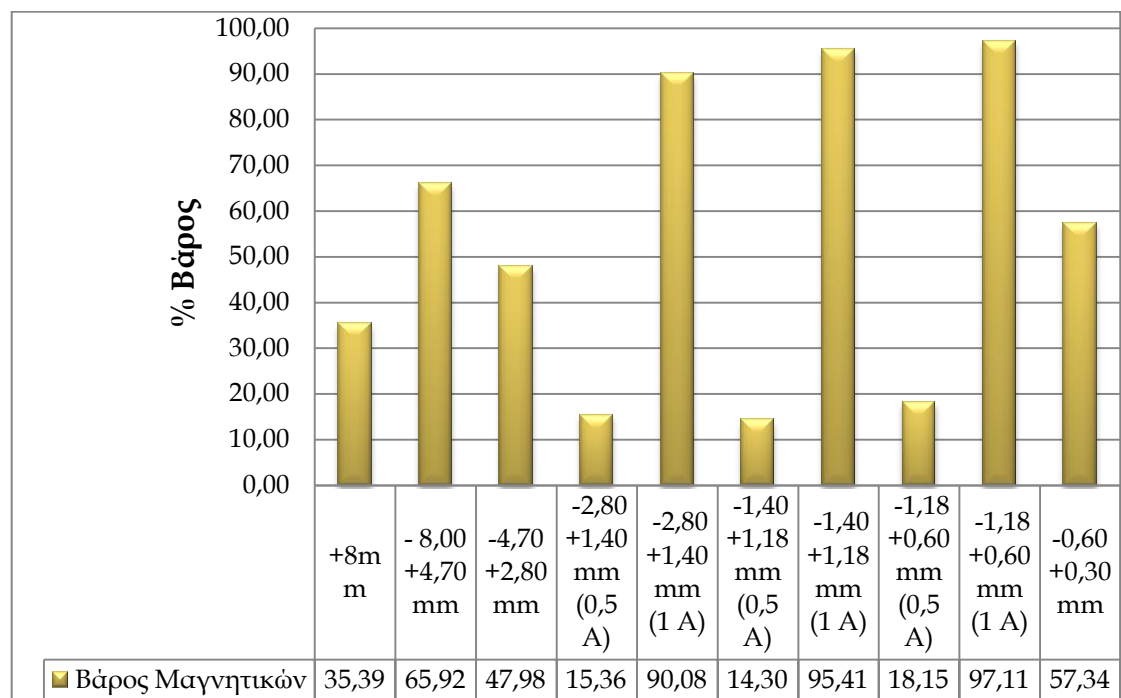
Ακολουθώντας όμοιο συλλογισμό, κατασκευάστηκε το διάγραμμα που παρατίθεται παρακάτω ως Σχήμα 4.6. Σε αυτό παρουσιάζεται η επί τοις εκατό ανάκτηση του νικελίου στα μαγνητικά και μη μαγνητικά προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα και με χαμηλή και υψηλή ένταση για τα κλάσματα $-2,80 +1,40$ mm, $-1,40 +1,18$ mm και $-1,18 +0,60$ mm.



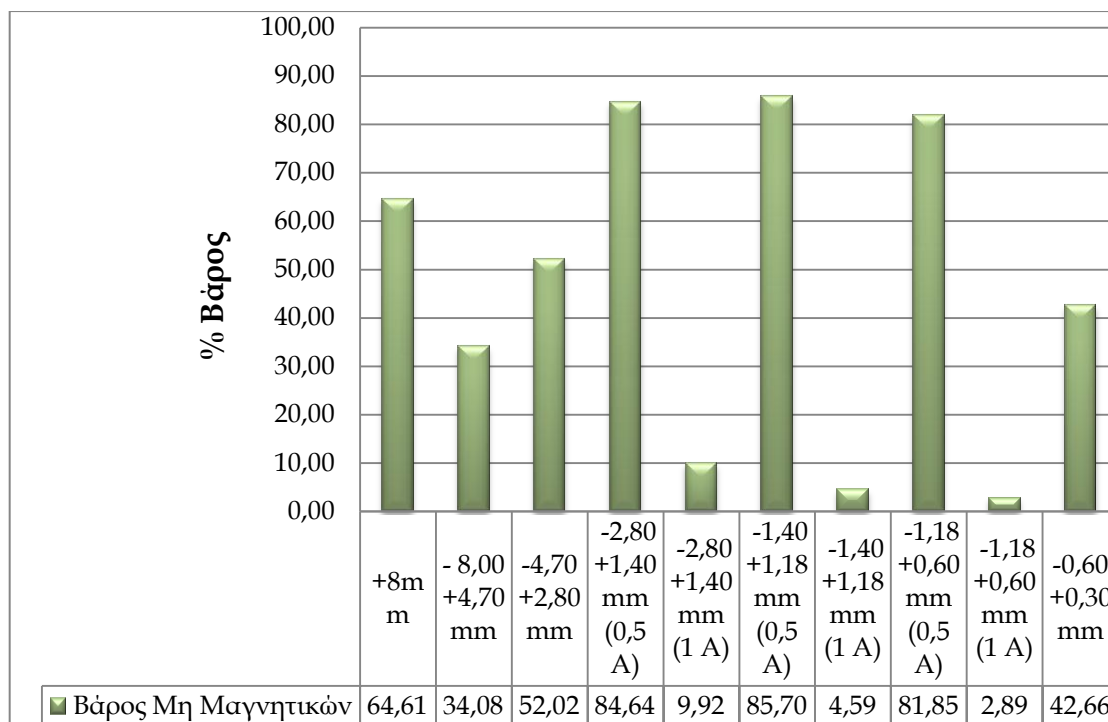
Σχήμα 4.5. Ανάκτηση νικελίου στα προϊόντα μαγνητικού διαχωρισμού

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 4.5) παρατηρείται πως στις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού που χρησιμοποιήθηκε μαγνήτης χειρός ως μαγνητικός διαχωριστής η ανάκτηση είναι πολύ υψηλή. Μάλιστα σε αυτές τις δοκιμές, όπως παρατηρήθηκε στο Σχήμα 4.4, η περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι επίσης πολύ υψηλή. Στις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού διαφορετικών εντάσεων (στα κοκκομετρικά κλάσματα $-2,80 +1,40$ mm, $-1,40 +1,18$ mm και $-1,18 +0,60$ mm) σημειώνεται πως όσο υψηλότερη είναι η ένταση, τόσο υψηλότερη είναι και η ανάκτηση. Όμως, σε αυτά τα προϊόντα, η περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι πιο χαμηλή (κλάσμα $-2,80+1,40$ mm) έως αμελητέα για τα υπόλοιπα.

Όσον αφορά στα ποσοστά βάρους, στα Σχήματα 4.6 και 4.7 εμφανίζεται αντίστοιχα το επί τοις εκατό ποσοστό των βαρών για τα μαγνητικά και μη μαγνητικά προϊόντα του διαχωρισμού. Στις δοκιμές με διαφορετική ένταση μαγνητικού πεδίου, δηλαδή στα κοκκομετρικά κλάσματα -2,80 +1,40 mm, -1,40 +1,18 mm και -1,18 +0,60 mm παρατηρείται πως όσο υψηλότερη είναι η ένταση τόσο αυξάνεται το ποσοστό βάρους των μαγνητικών. Μολονότι στις πιο χαμηλές εντάσεις υπάρχει μικρότερο ποσοστό βάρους, η περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι υψηλότερη.



Σχήμα 4.6. Επί τοις εκατό ποσοστό των βαρών για τα μαγνητικά προϊόντα



Σχήμα 4.7. Επί τοις εκατό ποσοστό των βαρών για τα μη μαγνητικά προϊόντα

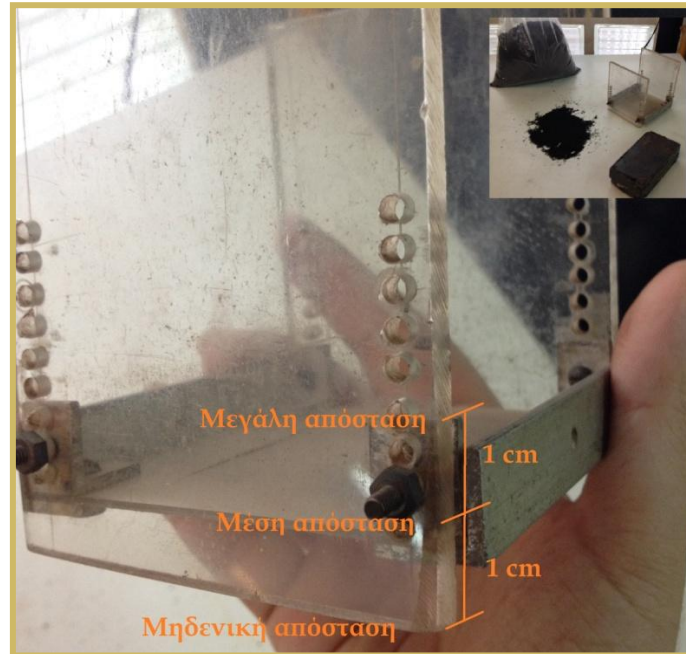
4.5.2. Επίδραση απόστασης του μαγνήτη και του πάχους του τροφοδοτούμενου υλικού

Σε αυτό το στάδιο των δοκιμών μαγνητικού διαχωρισμού, διερευνήθηκε με τη χρήση του μαγνήτη χειρός η επίδραση στο αποτέλεσμα του διαχωρισμού i) της απόστασης του μαγνήτη από το υλικό που επρόκειτο να διαχωριστεί και ii) του πάχους του τροφοδοτούμενου υλικού.

Στις δοκιμές με μεταβλητή την απόσταση του μαγνήτη από το τροφοδοτούμενο υλικό, χρησιμοποιήθηκαν τα κοκκομετρικά κλάσματα -8,0+4,70mm, -4,70+2,80mm, -2,80+1,40mm και -1,40+1,18mm της αρχικής κοκκομετρίας. Η συγκεκριμένη κοκκομετρία καλύπτει περίπου το 80% του συνόλου της σκουριάς. Πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός με χρήση του μαγνήτη χειρός και τη βοήθεια ειδικής τράπεζας μικρού μεγέθους, στην οποία υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της απόστασης του μαγνήτη από το υλικό.

Αυτές οι δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού ήταν τρεις. Η πρώτη έγινε σε μηδενική απόσταση, ουσιαστικά ο μαγνητικός διαχωρισμός μέσω του μαγνήτη χειρός ήταν σχεδόν εξ επαφής. Σε αυτή την δοκιμή δεν χρησιμοποιήθηκε η τράπεζα. Η δεύτερη (αναφερόμενη στην εργασία ως «μέση») ήταν σε μικρή απόσταση από το υλικό,

δηλαδή σε απόσταση ένα εκατοστό περίπου και η Τρίτη (αναφερόμενη στην εργασία ως «μεγάλη») σε απόσταση δύο εκατοστών.



Εικόνα 4.7. Μαγνήτης χείρως σε ρυθμιζόμενης απόστασης τράπεζα

Στις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού που αφορούσαν το πάχος του στρώματος του υλικού, επιλέχθηκε το κλάσμα $-2,80 +1,40\text{mm}$, όπου με βάση τις χημικές αναλύσεις που προηγήθηκαν, η περιεκτικότητα σε νικέλιο ήταν αρχικά μέτρια (0,22% Ni) και έπειτα από τον μαγνητικό διαχωρισμό χαμηλής έντασης, μέση (0,56% Ni).

Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η δυνατότητα μαγνητικού διαχωρισμού με μέγιστο πάχος στρώματος υλικού, τη μία 4mm και την άλλη 2,80mm δηλαδή σε στρώμα υλικού με πάχος λίγο κάτω από μισό εκατοστό και σε μονοτεμαχιακό τροφοδοτούμενο υλικό (αφού το επιλεγέν κλάσμα για αυτές τις δοκιμές ήταν το $-2,80 +1,40\text{mm}$) αντίστοιχα.

Πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός με σταθερό μόνιμο μαγνήτη ενώ το υλικό περνούσε κάτω από αυτόν με την μεταφορική ταινία του μαγνητικού διαχωριστή υψηλής έντασης, με μηδενική ένταση ρεύματος.



Εικόνα 4.8. Μόνιμος μαγνήτης και υλικό στη μεταφορική ταινία

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι χαρακτηρισμοί των δειγμάτων από τις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού σχετικά με την απόσταση του μαγνήτη και το πάχος του τροφοδοτούμενου υλικού.

Πίνακας 4.7. Ανάλυση των χαρακτηρισμών δειγμάτων από τον Β' κύκλο δοκιμών

	Προϊόν	Μαγνητικότητα	Μαγνητικός Διαχωριστής
Δοκιμές Απόστασης	M ₃	Μαγνητικό	Μαγνήτης χειρός σε ρυθμιζόμενης απόστασης τράπεζα
Μηδενική Απόσταση	MM ₁	Μη Μαγνητικό	
Μέση Απόσταση	MM ₂	Μη Μαγνητικό	
Μεγάλης Απόσταση	MM ₃	Μη Μαγνητικό	
σε πάχος στρώματος 4,00mm	M _B	Μαγνητικό	Μόνιμος Μαγνήτης και υλικό στη μεταφορική ταινία
	MM _B	Μη Μαγνητικό	
σε πάχος στρώματος 2,80mm	M _Γ	Μαγνητικό	
	MM _Γ	Μη Μαγνητικό	

Πίνακας 4.8. Χημική ανάλυση Β' κύκλου δειγμάτων

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΚΟΥΡΙΑΣ ΑΝΑ ΚΛΑΣΜΑ															
	C	S	FeO	Fe ₂ O ₃	Fet	Ni	Co	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	ZnO	ΣΥΝΟΛΟ
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
M_B	0,207	0,182	42,85	3,39	35,68	1,48	0,087	25,16	4,78	12,60	5,67	2,92	0,34	0,06	0,10	93,35
MM_B	0,112	0,096	33,20	4,57	29,00	0,09	0,020	38,17	5,38	8,03	6,82	2,67	0,36	0,05	0,09	88,99
M_Γ	0,119	0,175	39,70	2,77	32,80	1,08	0,069	33,63	4,84	7,69	6,12	3,13	0,34	0,06	0,09	94,08
MM_Γ	0,300	0,149	31,90	6,18	29,12	0,07	0,020	37,48	5,33	8,16	6,72	2,88	0,36	0,06	0,09	85,15
M₃	0,169	0,200	38,72	6,27	34,48	0,99	0,070	32,77	5,02	6,43	5,69	2,91	0,34	0,06	0,08	87,29
MM₁	0,266	0,207	32,00	4,01	27,68	0,12	0,022	38,85	5,68	8,29	6,91	2,86	0,35	0,06	0,10	89,86
MM₂	0,470	0,162	31,80	5,49	28,56	0,12	0,023	37,82	5,70	8,09	6,64	2,89	0,34	0,05	0,10	86,55
MM₃	0,327	0,162	33,80	2,18	27,80	0,35	0,052	37,05	6,15	9,29	6,58	3,51	0,38	0,05	0,09	94,51

Τα αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των δειγμάτων που προέκυψαν από τον Β΄ κύκλο δοκιμών μαγνητικού διαχωρισμού παρατίθενται στον Πίνακα 4.8.

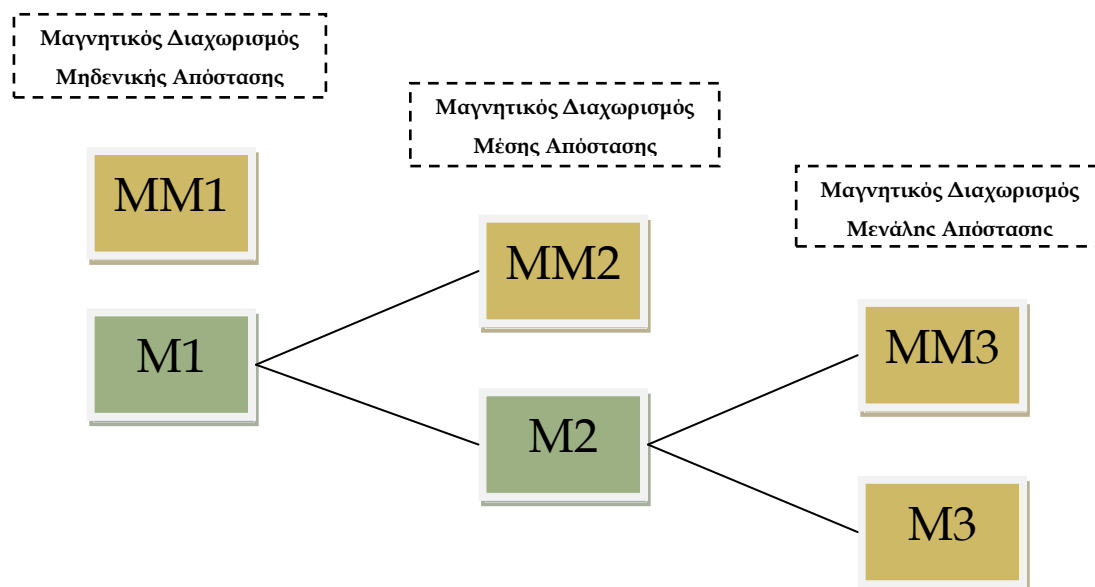
4.5.2.1. Επίδραση απόστασης μαγνήτη

Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 4.8 προκύπτει ο Πίνακας 4.9 που παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών σε συνάρτηση με την απόσταση.

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με την απόσταση του μαγνήτη

Δοκιμές Απόστασης Μαγνήτη	Περιγραφή Προϊόντος	Περιεκτικότητα Ni (%)	Βάρος (%)	% Κατανομή Ni
Μαγνητικό	M ₃	0,99	11,52	51,60
Μη Μαγνητικό Μεγάλης Απόστασης	MM ₃	0,35	0,35	0,55
Μη Μαγνητικό Μέσης Απόστασης	MM ₂	0,12	1,30	0,71
Μη Μαγνητικό Μηδενικής Απόστασης	MM ₁	0,12	86,83	47,15
	Τροφοδοσία	0,22	100,00	100,00

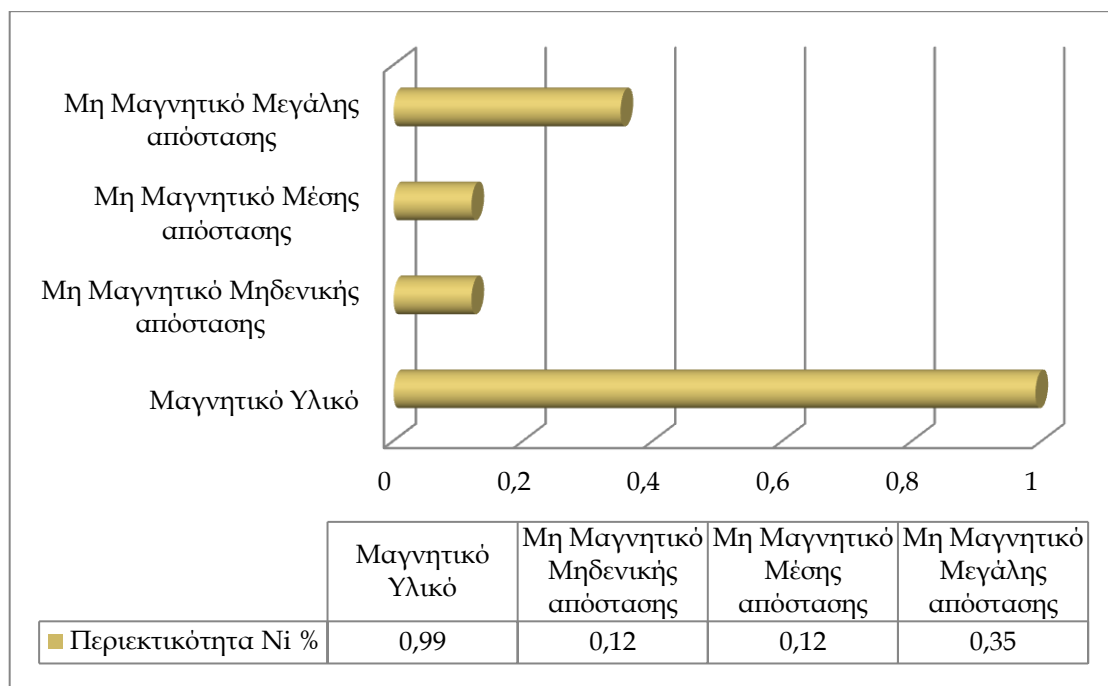
Η ακολουθία με την οποία προέκυψαν αυτά τα δείγματα φαίνεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8. Ακολουθία διαδικασίας στις δοκιμές διαφορετικής απόστασης του μαγνήτη

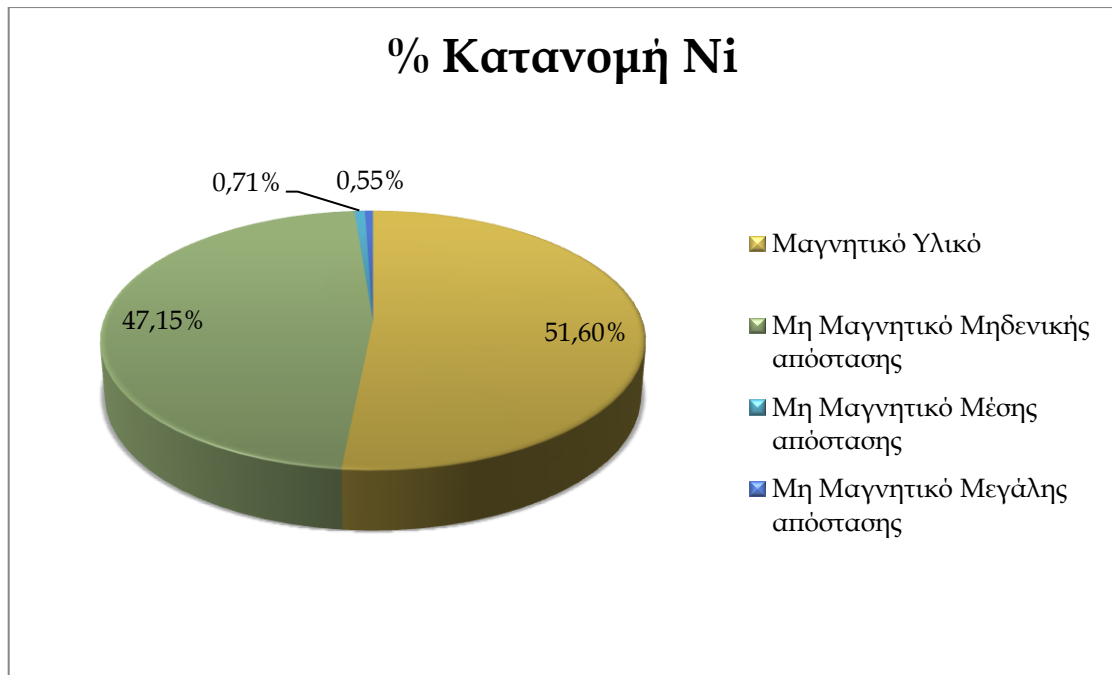
Από τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού σχετικά με την απόσταση του μαγνήτη από την τροφοδοσία κατασκευάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζονται στα Σχήματα 4.9, 4.10 και 4.11.

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται η περιεκτικότητα του νικελίου για το μαγνητικό προϊόν και μη μαγνητικά προϊόντα κάθε απόστασης. Παρατηρείται πως η περιεκτικότητα σε νικέλιο για το μαγνητικό προϊόν είναι 0,99%, δηλαδή αρκετά υψηλή. Επίσης, στη μεγάλη απόσταση του μαγνήτη η περιεκτικότητα σε νικέλιο του μη μαγνητικού δείγματος είναι υπερδιπλάσια από ότι των μη μαγνητικών σε μικρότερες αποστάσεις. Επομένως, όσο αυξάνεται η απόσταση του μαγνήτη από την τροφοδοσία, τόσο μεγαλώνει η περιεκτικότητα σε νικέλιο των μη μαγνητικών, με τη διαφορά ότι για μηδενική και μέση απόσταση η περιεκτικότητα των μη μαγνητικών σε νικέλιο είναι ίδια.



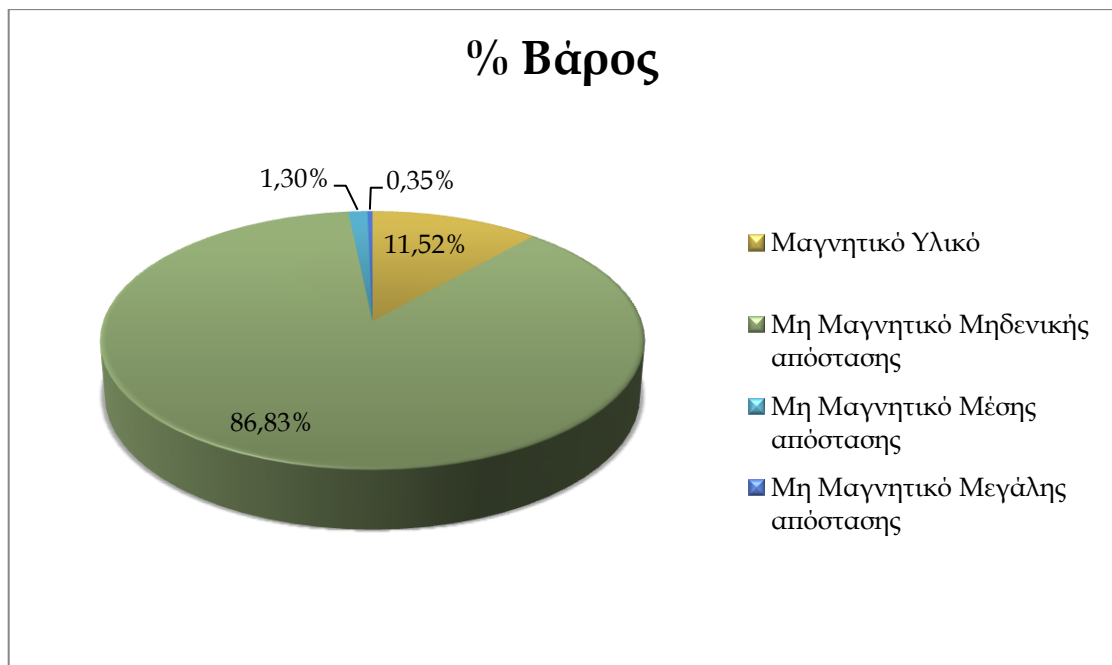
Σχήμα 4.9. Περιεκτικότητα νικελίου συναρτήσει της απόστασης του μαγνήτη από την τροφοδοσία

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η κατανομή του νικελίου για κάθε δείγμα από τις διαφορετικές θέσεις του μαγνήτη. Το μαγνητικό προϊόν καταλαμβάνει ποσοστό πάνω από 50%.



Σχήμα 4.10. Επί τοις εκατό κατανομή νικελίου για κάθε προϊόν στις διάφορες θέσεις του μαγνήτη

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται το επί τοις εκατό ποσοστό του βάρους κάθε προϊόντος. Παρατηρείται πως η ποσότητα του μαγνητικού υλικού είναι χαμηλή (11,52%).



Σχήμα 4.11. Επί τοις εκατό ποσοστό βαρών για κάθε προϊόν στις δοκιμές διαφορετικής απόστασης του μαγνήτη.

4.5.2.2. Επίδραση πάχους στρώματος

Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 4.8 προκύπτει ο Πίνακας 4.10, οποίος παρουσιάζει το βάρος, την περιεκτικότητα και την ανάκτηση σε νικέλιο των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με το πάχος της τροφοδοσίας του υλικού(σειρά στηλών στον Πίνακα: βάρος, περιεκτικότητα, ανάκτηση).

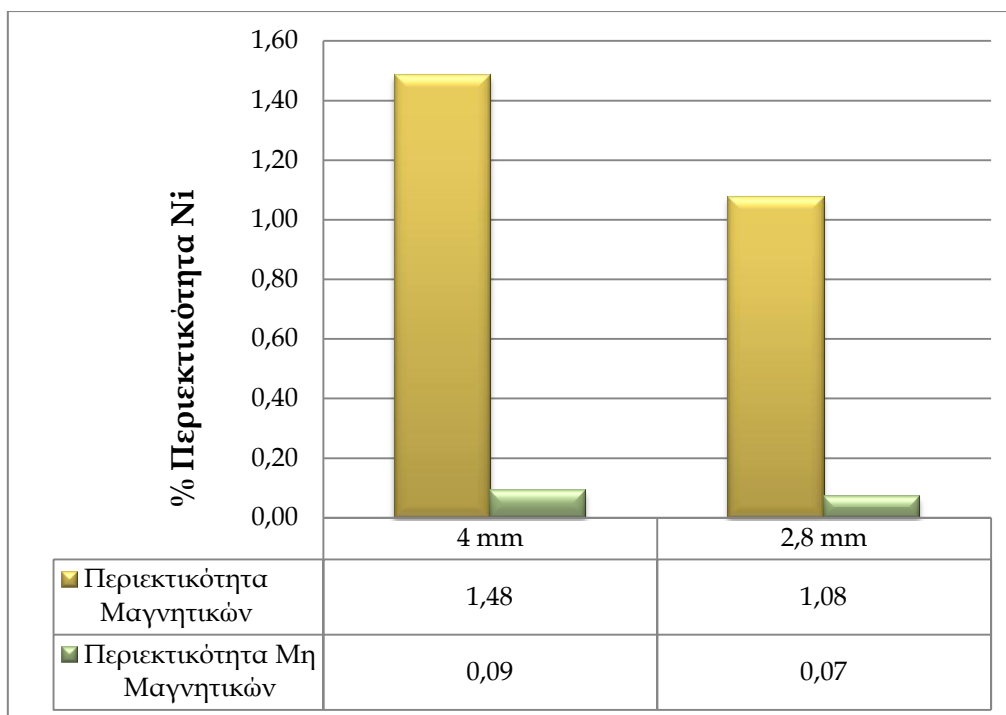
Πίνακας 4.10. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με το πάχος της τροφοδοσίας υλικού

Πάχος Στρώματος (mm)	Προϊόν	Περιγραφή Προϊόντος	Βάρος (%)	Περιεκτικότητα Ni (%)	% Ανάκτηση Ni
4,00	Μαγνητικό	M _B	2,98	1,48	33,14
	Μη Μαγνητικό	MM _B	97,02	0,09	66,86
		Τροφοδοσία	100,00	0,13	100,00
2,80	Μαγνητικό	M _Γ	7,00	1,08	52,94
	Μη Μαγνητικό	MM _Γ	93,00	0,07	47,06
		Τροφοδοσία	100,00	0,14	100,00

Από τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού σχετικά με το πάχος του τροφοδοτούμενου στρώματος κατασκευάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζονται στα Σχήματα 4.12, 4.13 και 4.14.

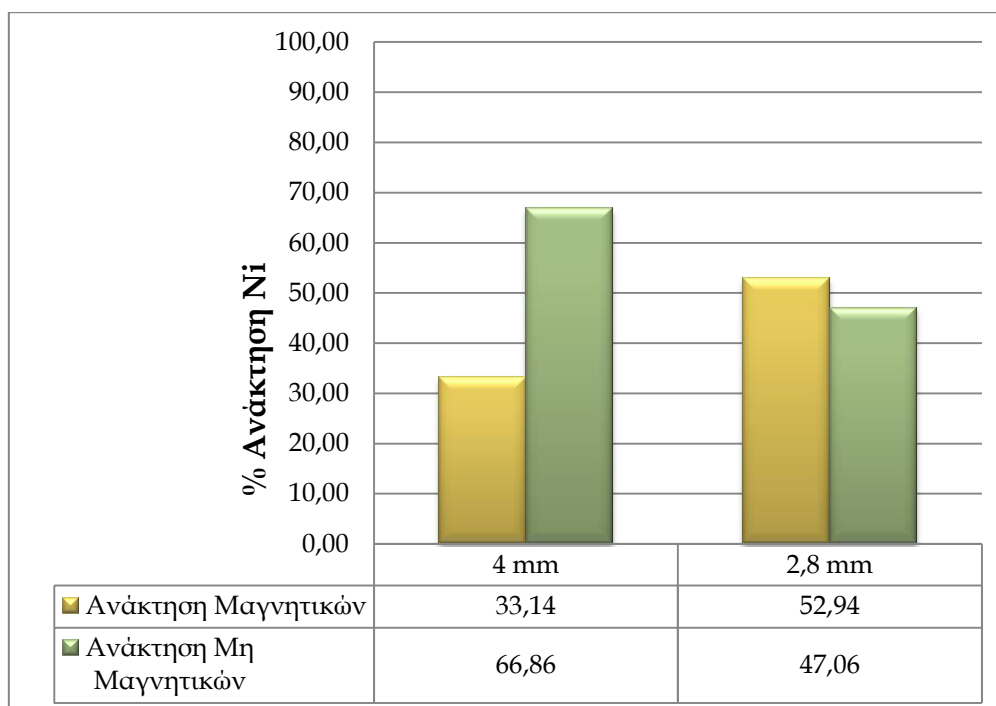
Έτσι, στο Σχήμα 4.12 το διάγραμμα δείχνει την περιεκτικότητα σε νικέλιο για κάθε προϊόν ανάλογα με το πάχος της τροφοδοσίας.

Παρατηρείται ότι, ενώ η περιεκτικότητα του νικελίου στα μη μαγνητικά διατηρείται πρακτικά σταθερή και χαμηλή, στα μαγνητικά προϊόντα η περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι μεγαλύτερη στο στρώμα μεγαλύτερου πάχους από ότι στο μονοτεμαχιακό στρώμα.



Σχήμα 4.12. Περιεκτικότητα νικελίου στα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με το πάχος της τροφοδοσίας του υλικού

Παρόμοια, στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η μεταβολή της ανάκτησης του νικελίου στα μαγνητικά και μη μαγνητικά προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού σε σχέση με το πάχος του στρώματος της τροφοδοσίας.



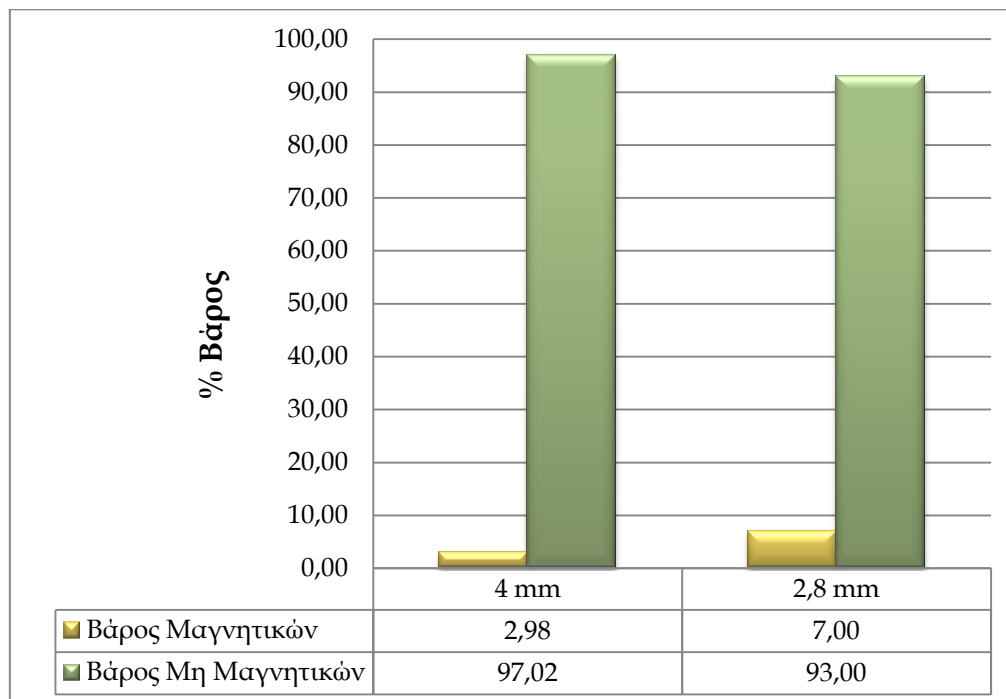
Σχήμα 4.13. Ανάκτηση νικελίου στα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού σε συνάρτηση με το πάχος της τροφοδοσίας υλικού

Σημειώνεται πως η ανάκτηση είναι μεγαλύτερη στο μονοτεμαχιακό στρώμα αλλά όμως η περιεκτικότητα σε νικέλιο για το μαγνητικό προϊόν είναι χαμηλότερη, γεγονός που οφείλεται στην συγκέντρωση στο μαγνητικό προϊόν κόκκων με μικρότερη περιεκτικότητα σε νικέλιο. Αντίθετα, σε πάχος στρώματος 4mm, το ποσοστό ανάκτησης είναι ιδιαίτερα χαμηλό, αφού είναι περίπου 33% αλλά η περιεκτικότητα αρκετά μεγαλύτερη (περίπου κατά 50%).

Συμπερασματικά λοιπόν, φαίνεται ότι το μικρότερο πάχος στρώματος οδηγεί σε μεγαλύτερη ανάκτηση αλλά σε μικρότερη περιεκτικότητα μαγνητικού προϊόντος σε νικέλιο.

Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται το επί τοις εκατό ποσοστό του βάρους για κάθε προϊόν σε συνάρτηση με το πάχος του στρώματος.

Σημειώνεται ότι, ακόμη και αν τα ποσοστά των βαρών για τα μαγνητικά προϊόντα είναι γενικά χαμηλά, στην περίπτωση του μονοτεμαχιακού στρώματος το ποσοστό είναι υπερδιπλάσιο από αυτό του πάχους των 4mm.



Σχήμα 4.14. Βάρος προϊόντων σε συνάρτηση με το πάχος του στρώματος της τροφοδοσίας υλικού

4.5.3. Επίδραση ελάττωσης μεγέθους και ποσοστού υγρασίας

Στο τελικό στάδιο των δοκιμών μαγνητικού διαχωρισμού, ελέγχθηκε η συμπεριφορά του υλικού i) έπειτα από ελάττωση μεγέθους των κόκκων μέσω θραύσης και ii) με αυξημένο το ποσοστό υγρασίας.

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μετά από θραύση η προετοιμασία του υλικού για τον μαγνητικό διαχωρισμό έγινε ως εξής:

- ✓ Ταξινόμηση του δείγματος στα ίδια κοκκομετρικά κλάσματα που είχαν επιλεγεί εξ αρχής για τα πειραματικά δεδομένα.
- ✓ Επιλογή των κοκκομετρικών κλασμάτων για μέγεθος μέχρι 1,40mm (ποσότητα περίπου 340g).
- ✓ Θραύση στον κωνικό θραυστήρα σε μέγεθος -1,40mm.



Εικόνα 4.9. Κωνικός θραυστήρας εργαστηρίου εμπλουτισμού

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός του θραυσμένου υλικού με μαγνήτη χειρός, ο οποίος πέρασε πάνω από το υλικό σχεδόν σε μηδενική απόσταση.

Για την πραγματοποίηση μαγνητικού διαχωρισμού έπειτα από προσθήκη νερού για την αύξηση του ποσοστού υγρασίας, η διαδικασία ήταν η ακόλουθη:

- ✓ Ταξινόμηση του δείγματος στα ίδια κοκκομετρικά κλάσματα που είχαν επιλεγεί εξ αρχής για τα πειραματικά δεδομένα.
- ✓ Οι δοκιμές έγιναν σε ποσότητα σκουριάς περίπου 580g με μέγεθος - 2,80+0,15mm .
- ✓ Προσθήκη ποσότητας νερού σε όλη τη μάζα του δείγματος.

Υπολογίστηκε πως η απαιτούμενη ποσότητα νερού για την απόδοση διπλάσιου ποσοστού υγρασίας από ότι στην αρχική σκουριά, που είχε 3,93% υγρασία, ήταν 20ml. Έτσι η υγρασία έφτασε το ποσοστό 7,86% στο δείγμα μας για τα κοκκομετρικά κλάσματα που είχαν επιλεγεί.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός με μόνιμο μαγνήτη με τον ίδιο τρόπο όπως στις δοκιμές που εξετάστηκε η επίδραση του πάχους στρώματος του υλικού (Εικόνα 4.8).

Στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζονται οι χαρακτηρισμοί των προϊόντων από τις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού για το υλικό έπειτα από θραύση και την προσθήκη του νερού.

Πίνακας 4.11. Ανάλυση των χαρακτηρισμών των δειγμάτων από τον Γ' κύκλο δοκιμών

Συνθήκες	Προϊόν	Περιγραφή Προϊόντος	Μαγνητικός Διαχωριστής
θραύση του υλικού ως το 1,40mm	Μαγνητικό	A₁	Μαγνήτης Χειρός
	Μη Μαγνητικό	A₂	
ποσοστό υγρασίας 7,86% για υλικό κάτω από τα 2,80mm	Μαγνητικό	B₁	Μόνιμος Μαγνήτης και υλικό στη μεταφορική ταινία
	Μη Μαγνητικό	B₂	

Τα αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των δειγμάτων που προέκυψαν από τον Γ' κύκλο δοκιμών μαγνητικού διαχωρισμού παρατίθενται στον Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12. Χημική ανάλυση Γ' κύκλου δειγμάτων

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΚΟΥΡΙΑΣ ΑΝΑ ΚΛΑΣΜΑ															
	C	S	FeO	Fe ₂ O ₃	Fet	Ni	Co	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	ZnO	ΣΥΝΟΛΟ
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
A1	0,229	0,146	30,50	8,20	29,44	0,66	0,040	30,89	9,53	8,23	7,02	3,13	1,06	0,04	0,06	80,53
A2	0,693	0,192	27,10	6,54	25,64	0,06	0,018	39,45	5,57	9,75	6,86	2,96	0,41	0,04	0,06	82,16
B1	0,086	0,213	34,05	6,02	30,68	1,07	0,057	35,09	4,75	8,49	6,07	3,43	0,32	0,04	0,06	86,28
B2	0,195	0,221	30,30	4,36	26,60	0,10	0,021	39,88	5,09	9,29	6,76	3,12	0,34	0,04	0,05	88,54

4.5.3.1. Επίδραση ελάττωσης μεγέθους

Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του διαχωρισμού για τις προαναφερθείσες συνθήκες.

Πίνακας 4.13. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού έπειτα από θραύση του υλικού σε μέγεθος

	Περιγραφή Προϊόντος	Βάρος (%)	Περιεκτικότητα Ni (%)	% Ανάκτηση Ni
Μαγνητικό	A ₁	24,76	0,66	77,34
Μη Μαγνητικό	A ₂	75,24	0,06	22,66
	Τροφοδοσία	100,00	0,21	100,00

Από αυτόν τον Πίνακα δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο του μαγνητικού προϊόντος (0,66% Ni). Σχετικά με την ανάκτηση, σημειώνεται πως είναι σχετικά υψηλή, αφού η τιμή της είναι γύρω στο 77%. Αντίστοιχα, το επί τοις εκατό ποσοστό του βάρους του μαγνητικού υλικού είναι μικρό, αφού καταλαμβάνει περίπου το ¼ της τροφοδοσίας.

4.5.3.2. Επίδραση υγρασίας

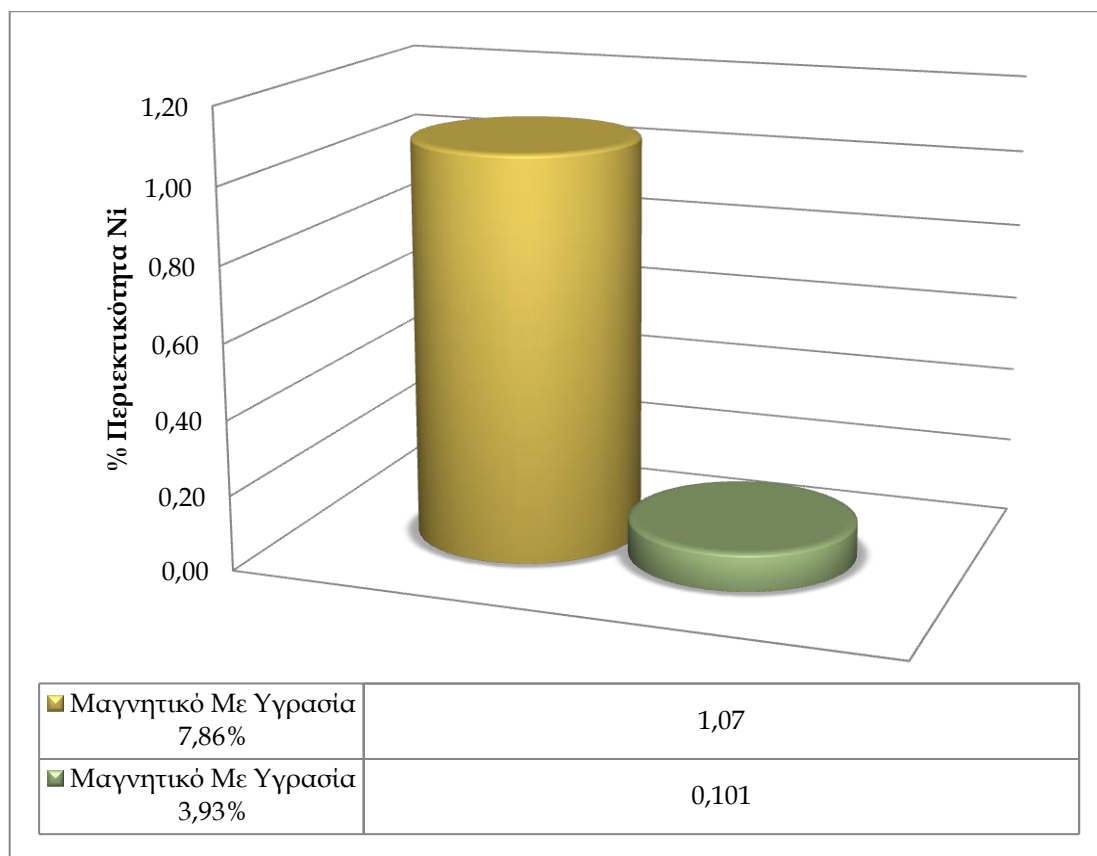
Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του διαχωρισμού, έπειτα από την προσθήκη νερού προς διπλασιασμό της υγρασίας του αρχικού δείγματος.

Πίνακας 4.14. Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με υγρασία τροφοδοσίας 7,96%

	Περιγραφή Προϊόντος	Βάρος (%)	Περιεκτικότητα Ni (%)	% Ανάκτηση Ni
Μαγνητικό	B ₁	24,07	1,07	76,92
Μη Μαγνητικό	B ₂	75,93	0,10	23,08
	Τροφοδοσία	100	0,34	100,00

Σχετικά με την περιεκτικότητα του υλικού με το διπλάσιο ποσοστό υγρασίας παρατηρείται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.15, πως είναι υψηλή, αφού ξεπερνά το 1%. Επίσης η ανάκτηση σε νικέλιο είναι σχετικά υψηλή αφού είναι σχεδόν 77%.

Ωστόσο, το επί τοις εκατό ποσοστό του βάρους του μαγνητικού υλικού είναι μικρό αφού καταλαμβάνει περίπου το $\frac{1}{4}$ της τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.15. Περιεκτικότητα Νικελίου - Υγρασία 7,96%

Τα αποτελέσματα σχετικά με την προσθήκη υγρασίας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Και αυτό γιατί τα κλάσματα στα οποία έγινε προσθήκη νερού ήταν αυτά κάτω από τα 2,80mm. Με βάση τις αρχικές αναλύσεις, τα μαγνητικά προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού είχαν από μέση ως χαμηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο και χαμηλή ανάκτηση. Όμως με η προσθήκη νερού έδρασε βοηθητικά τόσο στην αύξηση της περιεκτικότητας όσο και στην αύξηση της ανάκτησης. Όμως, για πιο ασφαλή συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση της υγρασίας, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας αναφορικά με την ανάκτηση νικελίου από τη σκουριά ηλεκτροκαμίνων του μεταλλουργικού εργοστασίου της ΓΜΜ ΑΕ ΛΑΡΚΟ, που βρίσκεται στη Λάρυμνα, συνοψίζονται στα εξής:

→ Από τις χημικές αναλύσεις των κοκκομετρικών κλασμάτων, που προέκυψαν από την ταξινόμηση του αρχικού δείγματος, παρατηρείται ότι τα χονδρομερέστερα κλάσματα (+2,80mm) έχουν συγκριτικά μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νικέλιο. Αθροιστικά το +2,80mm κλάσμα έχει περιεκτικότητα σε νικέλιο περίπου 0,75% με αντίστοιχη κατανομή νικελίου 87% περίπου.

→ Δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού που έγιναν σε υψηλής έντασης πεδίο, έδειξαν ότι η ανάκτηση νικελίου στο μαγνητικό προϊόν είναι υψηλή πλην όμως η περιεκτικότητά του δεν βελτιώνεται σημαντικά σε σχέση με αυτή της τροφοδοσίας.

→ Τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού με μαγνήτη χαμηλής έντασης ήταν ικανοποιητικά δεδομένου ότι τα μαγνητικά προϊόντα είχαν περιεκτικότητα σε νικέλιο μεγαλύτερη από 1% (1,12-1,31% Ni) ενώ και η ανάκτηση του νικελίου **κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα**. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κοκκομετρικό κλάσμα -8,00 +4,70mm, όπου το μαγνητικό προϊόν είχε περιεκτικότητα σε νικέλιο 1,31% και ανάκτηση 97,18%.

→ Στις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού συναρτήσεως της κοκκομετρίας παρατηρείται πως η περιεκτικότητα σε νικέλιο των μη μαγνητικών προϊόντων διατηρείται σταθερά χαμηλή και κυμαινόμενη γύρω από το 0,08%.

→ Αναφορικά με την απόσταση του μαγνήτη από το στρώμα του υλικού, παρατηρείται ότι για μικρή απόσταση έχουμε μεγάλη ανάκτηση αλλά μικρότερη περιεκτικότητα του μαγνητικού προϊόντος σε νικέλιο. Για μεγαλύτερες αποστάσεις το

μαγνητικό προϊόν έχει αυξημένη περιεκτικότητα σε νικέλιο, περίπου 1%, αλλά μικρότερη ανάκτηση.

→ Παρατηρήθηκε πως, ενώ η περιεκτικότητα του νικελίου στα μη μαγνητικά διατηρείται πρακτικά σταθερή και χαμηλή, στα μαγνητικά προϊόντα η περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι λίγο μεγαλύτερη στο μεγαλύτερο πάχος στρώματος από ότι στο μονοτεμαχιακό. Σημειώνεται όμως, πως η ανάκτηση είναι μεγαλύτερη στο μονοτεμαχιακό στρώμα, εκεί δηλαδή όπου η περιεκτικότητα σε νικέλιο για το μαγνητικό προϊόν είναι χαμηλότερη. Αντίθετα, για πάχος στρώματος 4mm, το ποσοστό ανάκτησης είναι ιδιαίτερα χαμηλό, αφού είναι περίπου 33%, αλλά η περιεκτικότητα σε νικέλιο αυξημένη κατά 50% περίπου σε σχέση με το μικρότερο πάχος τροφοδοσίας.

→ Από τις δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού που πραγματοποιήθηκαν έπειτα από θραύση του υλικού ως το 1,40mm του αρχικού δείγματος, συμπεραίνεται πως η θραύση του υλικού δεν βοηθά στην σημαντική αύξηση της περιεκτικότητας ή στην αύξηση της ανάκτησης.

→ Η μικρή αύξηση του ποσοστού υγρασίας στα περισσότερο λεπτομερή τεμάχια (κάτω από τα 2,80mm) φαίνεται να δίνει ελαφρά βελτιωμένα αποτελέσματα αλλά απαιτείται λεπτομερέστερη διερεύνηση της επίδρασης της υγρασίας για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Πίνακας 5.1. Συγκεντρωτική παρουσίαση συμπερασμάτων

	Περιεκτικότητα Νικελίου	% Ανάκτηση Νικελίου
Κοκκομετρία		
ως το 2,80mm	υψηλή	υψηλή
από το 2,80mm	χαμηλή	χαμηλή
Μαγνητικός Διαχωριστής		
Μαγνήτης Χειρός	υψηλή	υψηλή
Ρωσικός Μαγνητικός Διαχωριστής	χαμηλή	υψηλή
Ένταση Μαγνητικού Πεδίου		
χαμηλή	υψηλή	χαμηλή
υψηλή	χαμηλή	υψηλή
Απόσταση του Μαγνήτη από την Τροφοδοσία		
μηδενική	υψηλή	υψηλή
μεγαλύτερη	χαμηλή	χαμηλή
Πάχος Στρώματος Τροφοδοτούμενου Υλικού		
4,00mm	υψηλή	χαμηλή
2,80mm	υψηλή	μέτρια
Θραύση του Υλικού	μέση	μέτρια
Υγρασία		
κλάσματα κάτω από τα 2,80mm	υψηλή	υψηλή

5.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Από τις εργαστηριακές δοκιμές εμπλουτισμού με τη μέθοδο μαγνητικού διαχωρισμού της σκουριάς των Η/Κ, για την βιομηχανική εφαρμογή των αποτελεσμάτων, ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα ως προς τις ανακτήσιμες ποσότητες νικελίου, με την προϋπόθεση ότι το μαγνητικό προϊόν έχει αυξημένη περιεκτικότητα σε νικέλιο. Με βάση λοιπόν αυτά τα αποτελέσματα, προτείνονται τα εξής:

→ Δεδομένου ότι η ανάκτηση νικελίου από την περιεκτικότητα σε νικέλιο της κοκκοποιημένης σκουριάς των Η/Κ, και συνεπώς εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας αυτών, θα πρέπει να εξεταστεί σε συνάρτηση με τις λειτουργικές συνθήκες των Η/Κ.

→ Με βάση τα εργαστηριακά αποτελέσματα, οι ανακτήσιμες απώλειες νικελίου από την κοκκοποιημένη σκουριά Η/Κ κυμαίνονται από 70% ως 90% για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα. Δεδομένου ότι τα χονδρομερέστερα κλάσματα ήταν πλουσιότερα σε νικέλιο, θα πρέπει να εξεταστεί η χρήση κοσκίνων με κατάλληλο άνοιγμα για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ανάκτηση και περιεκτικότητα.

→ Βελτιστοποίηση του πάχους τροφοδοσίας του υλικού, της απόστασης μαγνήτη-υλικού και ποσοστού υγρασίας.

Συνεπώς, η υλοποίηση βιομηχανικών δοκιμών προς την πραγματοποίηση αναγκαίων τροποποιήσεων στις εγκαταστάσεις μαγνητικού εμπλουτισμού του εργοστασίου κρίνεται απαραίτητη, προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι ανακτήσεις σε νικέλιο και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες του στη σκουριά των Η/Κ, ιδιαίτερα σε περιόδους μη ομαλής λειτουργίας των Η/Κ.

Με ετήσια παραγωγή σκουριάς Η/Κ 2.000.000 t μέσης περιεκτικότητας σε νικέλιο 0,80% Ni (για τα μαγνητικά προϊόντα) και με μέσο βαθμό ανάκτησης 70%, αναμένεται, με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών του εργαστηρίου εμπλουτισμού η ετήσια ανάκτηση πάνω από 11.000 t Ni.

Θεωρώντας πως με την εφαρμοζόμενη σήμερα μέθοδο επεξεργασίας, το μέγιστο ανακτήσιμο νικέλιο είναι περίπου 400 t/y, σε σύγκριση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα, το ανακτήσιμο νικέλιο είναι περίπου 28 φορές περισσότερο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Apostolikas, A., Maglaras, K., Frogoudakis, E., Kirillidi, Y. (2006). The Nickel industry in Greece, paper, source <http://www.researchgate.net/>
2. Ashcroft G. (2014). Nickel Laterites: The World's Largest Source of Nickel, <http://www.geologyforinvestors.com/>
3. W. Betteridge, Nickel and its Alloys, J. Wiley and Sons, 1984.
4. Dalvi, A., Bacon, G. and Osborne, R. (2004). The Past and the Future of Nickel Laterites, PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors
5. Diaz, C.M., Landolt, C.A. Vahed, A., Warner, A.E.M and Talor, J.C. (1988). A Review of Nickel Pyrometallurgical Operations, Journal of Metals (September), pp. 28-33.
6. Exchange, Ontario, Canada, 7-10 March, pp. 1-27.
7. Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie, Nickel, 57 Teil AI, Verlag Chemie, 1967.
8. Kauffman, George, and Isaac Mayo. "Memory Metal." Chem Matters Oct. 1993: pp 4-7.
9. J. W. Mellor, A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, Vol. XV, Longmans (1936)
10. Nath, N.K., Chakraborti, N. and Shekar, R. (1997). Reduction of Indian nickeliferous ore in a Fixed Bed Reactor with Gas Flowing Horizontally over the Bed, Scandinavian Journal of Metallurgy, 26, pp.158-168.
11. Unesco - IUGS, (1979). International Seminar on Lateritisation Processes, Abstracts of Papers. Trivandrum, India.
12. Zevgolis, E., Zografidis C., and Halikia, I. (2010). The reducibility of the Greek nickeliferous laterites: a review, Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, pp. 9 - 10.
13. Ζευγώλης, Ε.Ν., Εξαγωγική Μεταλλουργία του Νικελίου: Μέρος Πρώτο. Πορομεταλλουργικές Μέθοδοι, Σημειώσεις μαθήματος Μεταλλουργίας Σιδήρου, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2000.

14. Μούσουλος, Λ., Μεταλλουργία του Νικελίου, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 1973.
15. Μπόσκος, Ε., Ορφανουδάκη, Α. και Περράκη, Θ. (2000). Κατανομή του Νικελίου στις Ορυκτολογικές Φάσεις Fe-Ni- ούχων Λατεριτών του Ελλαδικού Χώρου, Πρακτικά του 3ου Συνεδρίου του Ορυκτού Πλούτου, Τεχνικό Επιμελητήριο της Ελλάδος, Αθήνα, 22-24 Νοεμβρίου, σελ. 107-115.
16. Οικονομοπούλου, Μ.Π., Επίδραση Συνθηκών Ηλεκτρόλυσης στη Δομή και τις Ιδιότητες Επικαλύψεων Ni και Σύνθετων Επικαλύψεων Ni/micro-ZrO₂, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2013.
17. Ορφανουδάκη - Μανουσάκη, Α., Κοιτασματολογία, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.
18. Φραγκίσκος, Α.Ζ., Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών, εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1995.