



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

“Μελέτη επίπλευσης Ελληνικών σαπρολιτικών λατεριτών ”

Διπλωματική εργασία
του
Ευάγγελου Κακαξυλάκη

Επιβλέπων: Κομνίτσας Κωνσταντίνος (Καθηγητής)

Χανιά, 2023



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

“Μελέτη επίπλευσης Ελληνικών σαπρολιτικών λατεριτών ”

Διπλωματική εργασία
του
Ευάγγελου Κακαξυλάκη

Τριμελής Επιτροπή:

Κομνίτσας Κωνσταντίνος (Καθηγητής)

Γαλετάκης Μιχαήλ (Καθηγητής)

Πετράκης Ευάγγελος (Επ. Καθηγητής)

Χανιά, 2023

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στην Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Πετράκη Ευάγγελο. Αντικείμενό της είναι η επίπλευση Ελληνικών σαπρολιτικών λατεριτών από την περιοχή της Καστοριάς με σκοπό τον εμπλουτισμό τους σε νικέλιο. Το συγκεκριμένο θέμα επιλέχθηκε καθώς το νικέλιο είναι ένα μέταλλο μεγάλης εμπορικής αξίας. Σε αρκετά σημεία του Ελλαδικού χώρου εντοπίζονται νικελιούχες μεταλλοφορίες ενώ η βιομηχανία νικελίου αποτελεί ένα πολύ ισχυρό βιομηχανικό κλάδο στην Ελλάδα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κομνίτσα για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω το συγκεκριμένο θέμα και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Πετράκη για την πολύτιμη καθοδήγησή του, τις συμβουλές του και την αμέριστη βοήθεια του κατά την διάρκεια των δοκιμών επίπλευσης και της συγγραφής της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Γαλετάκη που δέχτηκε να είναι μέλος της εξεταστικής επιτροπή καθώς επίσης για τις συμβουλές του και τις παρατηρήσεις του.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη.....	1
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	2
1.1 Γενικά για το νικέλιο	2
1.2 Παραγωγή – Κατανάλωση Νικελίου Παγκοσμίως.....	3
1.3 Χρήσεις του Νικελίου.....	6
1.3.1 Παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα	8
1.3.2 Παραγωγή μη σιδηρούχων κραμάτων.....	9
1.3.3 Επιμετάλλωση.....	9
1.3.4 Παραγωγή συσσωρευτών.....	10
1.3.5 Ενώσεις του νικελίου	11
1.4 Αξία νικελίου	13
Κεφάλαιο 2. Κοιτάσματα Νικελίου	16
2.1 Νικέλιο σε πετρώματα	16
2.2 Ταξινόμηση κοιτασμάτων νικελίου.....	16
2.2.1 Θειούχα κοιτάσματα	17
2.2.2 Λατεριτικά κοιτάσματα.....	17
2.2.3 Ιζηματογενή κοιτάσματα.....	20
2.3 Κοιτάσματα νικελίου στην Ελλάδα.....	21
2.3.1 Γεωλογικό περιβάλλον.....	21
2.3.2 Κοίτασμα Ιεροπηγής Καστοριάς.....	23
2.3.3 Εκμετάλλευση κοιτασμάτων νικελίου στην Ελλάδα.....	23
2.3.3.1 Εγκαταστάσεις της ΛΑΡΚΟ.....	23
2.3.3.2 Η πυρομεταλλουργική μέθοδος της ΛΑΡΚΟ.....	25
2.4 Εμπλουτισμός λατεριτικών κοιτασμάτων νικελίου	27
2.5 Εμπλουτισμός μέσω επίπλευσης.....	28
2.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση της επίπλευσης λατεριτών	31
Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία.....	34
3.1 Χαρακτηρισμός υλικού.....	34

3.1.1 Θραύση	34
3.1.2 Κοσκίνιση	36
3.1.3 Λειοτρίβηση.....	37
3.1.4 Κοκκομετρική ανάλυση	39
3.1.5 Μέθοδος περιθλασιμετρίας ακτίνων – X.....	39
3.1.6 Μέθοδος φασματομετρίας ακτίνων – X.....	40
3.1.7 Απώλεια πύρωσης.....	41
3.2 Επίπλευση.....	42
3.2.1 Παρασκευή αντιδραστηρίων	42
3.2.2 Πρώτη σειρά δοκιμών – Επίδραση του pH	43
3.2.3 Δεύτερη σειρά δοκιμών – Επίδραση δόσης αντιδραστηρίων.....	44
3.2.4 Τρίτη σειρά δοκιμών – Επίδραση Κοκκομετρίας.....	46
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	48
4.1 Χαρακτηρισμός αρχικού υλικού	48
4.1.1 Κοκκομετρία αρχικού υλικού.....	48
4.1.2 Χημική και ορυκτολογική ανάλυση αρχικού υλικού.....	50
4.2 Αποτελέσματα 1ης Σειράς Δοκιμών- Επίδρασης του pH.....	52
4.2.1 Αποτελέσματα δοκιμών επίπλευσης	52
4.2.2 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης	53
4.2.3 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης.....	60
4.3 Αποτελέσματα 2ης Σειράς Δοκιμών- Επίδραση δόσης αντιδραστηρίων.....	64
4.3.1 Αποτελέσματα δοκιμών επίπλευσης	64
4.3.2 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης	65
4.3.3 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης.....	69
4.4 Αποτελέσματα 3ης Σειράς Δοκιμών- Επίδραση Κοκκομετρίας.....	71
4.4.1 Αποτελέσματα δοκιμών επίπλευσης	71
4.4.2 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης	72
4.4.3 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης.....	80
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα	84

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την επίπλευση Ελληνικών σαπρολιτικών λατεριτών από την περιοχή της Καστοριάς, με σκοπό τον εμπλουτισμό τους σε νικέλιο. Μεγάλο πλήθος ερευνητικών δραστηριοτήτων έχει πραγματοποιηθεί με σκοπό την ανάκτηση νικελίου και το θέμα εξακολουθεί να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, η οποία αναζητά τους περισσότερους αποδοτικούς τρόπους ανάκτησης που να μπορούν να εφαρμοστούν σε βιομηχανική κλίμακα.

Η εργασία διακρίνεται σε πέντε μέρη. Στο πρώτο κεφάλαιο παρέχονται γενικές πληροφορίες σχετικά με το νικέλιο, την παραγωγή, τις χρήσεις και την αξία του. Στο δεύτερο αναφέρονται οι κατηγορίες των κοιτασμάτων νικελίου με έμφαση στα Ελληνικά σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που περιλαμβάνει τις προπαρασκευαστικές διαδικασίες που χρειάστηκε να γίνουν (θραύση, λειοτρίβηση) ώστε να προετοιμαστεί το υλικό για το επόμενο βήμα, αυτό της επίπλευσης. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κοκκομετρική, χημική (XRF) και ορυκτολογική (XRD) ανάλυση του μεταλλεύματος. Τέλος, παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες επίπλευσης των τριών σειρών δοκιμών.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την πρώτη σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκαν δώδεκα δοκιμές με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση του pH του πολφού επίπλευσης στην ανάκτηση νικελίου. Στη δεύτερη και τρίτη σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές σε κάθε μία με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της δόσης των αντιδραστηρίων και η επίδραση της κοκκομετρίας του μεταλλεύματος στην ανάκτηση του νικελίου, αντίστοιχα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που αναφέρθηκε παραπάνω και τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν έπειτα από τις συνολικά είκοσι δοκιμές επίπλευσης.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά για το νικέλιο

Το νικέλιο είναι το 5^ο πιο κοινό στοιχείο στη Γη και συναντάται κυρίως στη δομή οξειδίων, θειούχων και ανόργανων αλάτων. Πρόκειται για ένα εμπορικό προϊόν μεγάλης σημασίας που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια βιομηχανική ανάπτυξη (<http://www.larco.gr/>).

Χρησιμοποιείται για την κατασκευή περισσότερων από 300.000 προϊόντων και περισσότερων από 3.000 κραμάτων (INSG, 2018). Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ορισμένες βασικές του ιδιότητες.

Πίνακας 1.1: Βασικές ιδιότητες του νικελίου (INSG, 2018).

Νικέλιο (Ni)	
Ατομικός Αριθμός:	28
Ατομικό Βάρος:	58,71
Σημείο Τήξεως:	1453 °C
Σημείο Ζέσεως:	2730 °C
Θερμοκρασία Curie:	253 °C
Πυκνότητα:	8,90 g/cm ³ στους 25 °C

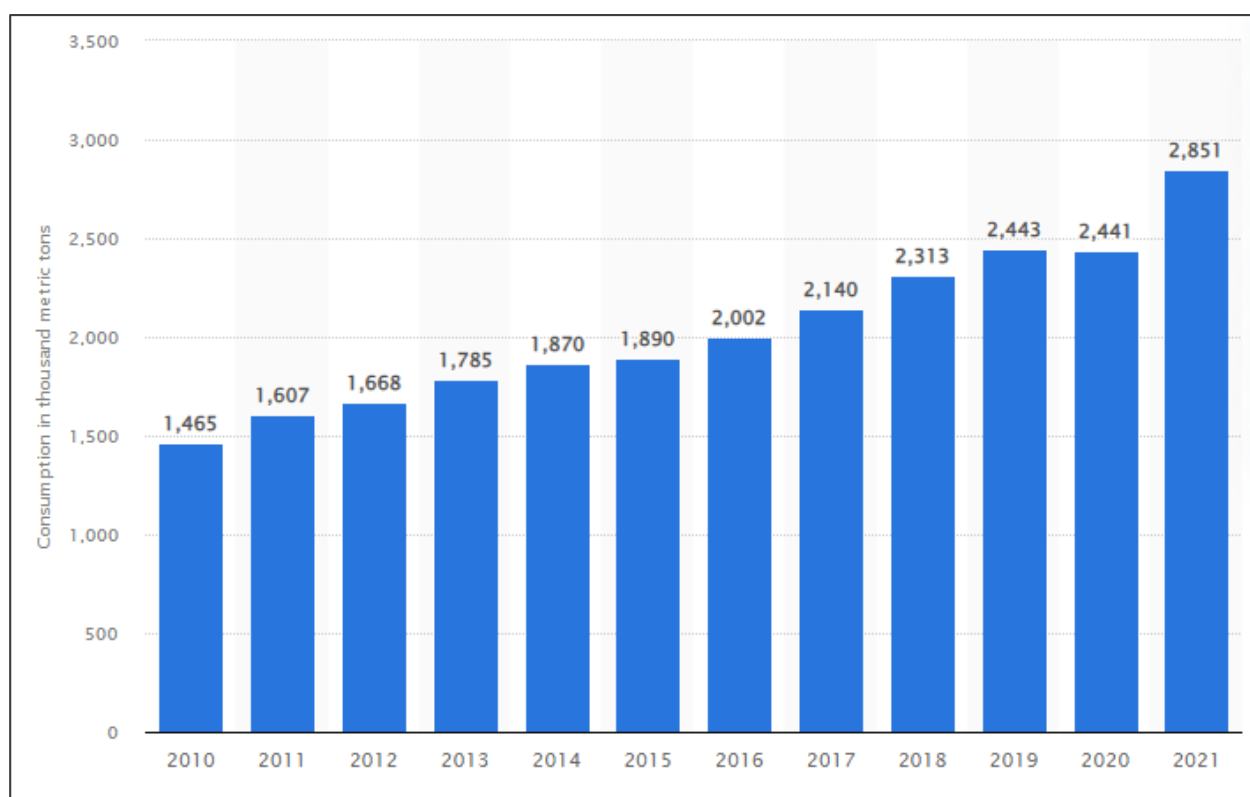
Η τόσο ευρεία χρήση του νικελίου και των κραμάτων του οφείλεται στις φυσικές και χημικές του ιδιότητες. Έχει καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, σε θερμοκρασία δωματίου εμφανίζει μαγνητικές ιδιότητες. Τέλος, είναι ελατό και όλκιμο (<http://www.larco.gr/>).

Έχει υψηλή σκληρότητα και είναι ανθεκτικό στην οξείδωση και τη διάβρωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Τόσο το νικέλιο όσο και τα κράματά του εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση σε θαλάσσια ή βιομηχανικά περιβάλλοντα, στο καυστικό νάτριο και στα άλλα αλκάλια. Ικανοποιητική είναι η αντίστασή του στο υδροχλωρικό και το θειικό οξύ καθώς και στα οργανικά οξέα. Χρησιμοποιείται για την επικάλυψη άλλων υλικών με σκοπό να τους εξασφαλίσει ανθεκτικότητα στη διάβρωση και τέλος υπό μορφή σκόνης είναι ικανό να απορροφά δεκαεφτά

φορές τον όγκο του σε υδρογόνο, γεγονός που του προσδίδει καταλυτικές ιδιότητες (Ζευγώλης – Κοντός, 2000).

1.2 Παραγωγή – Κατανάλωση Νικελίου Παγκοσμίως

Η χρήση του νικελίου ακολουθεί γενικά ανοδική πορεία, ωστόσο η αυξητική της τάση διακόπηκε κατά τη περίοδο 2006 – 2010 λόγω της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης. Από το 2016 και έπειτα ξεπερνά τους 2 εκατομμύρια τόνους (Σχήμα 1.1). Αυτή η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση οδήγησε στην αύξηση των χωρών που δραστηριοποιούνται στη παραγωγή νικελίου από 24 το 2005, σε 33 το 2017 (INSG, 2018).



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση νικελίου κατά τα έτη 1994-2017 σε $t \times 10^3$
(<https://www.statista.com/statistics/273635/consumption-of-nickel-since-2007/>).

Η παγκόσμια παραγωγή νικελίου το 2020 ήταν περίπου 2.500.000 τόνοι (Πίνακας 1.2), ελαφρώς μειωμένη, περίπου κατά 5% σε σχέση με το 2019, λόγω της πανδημίας της νόσου COVID-19. Η

Ινδονησία είναι το κράτος με την υψηλότερη παραγωγή και ακολουθούν οι Φιλιππίνες, η Ρωσία, η Νέα Καληδονία και η Αυστραλία (U.S. Geological Survey, 2021)

Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζεται αναλυτικά η παραγωγή νικελίου σε τόνους των 13 μεγαλύτερων παραγωγών χωρών παγκοσμίως κατά τα έτη 2019, 2020 και 2021 καθώς και τα εκτιμώμενα αποθέματά τους.

Πίνακας 1.2: Παγκόσμια παραγωγή και αποθέματα νικελίου (t) (U.S. Geological Survey, 2021, 2022).

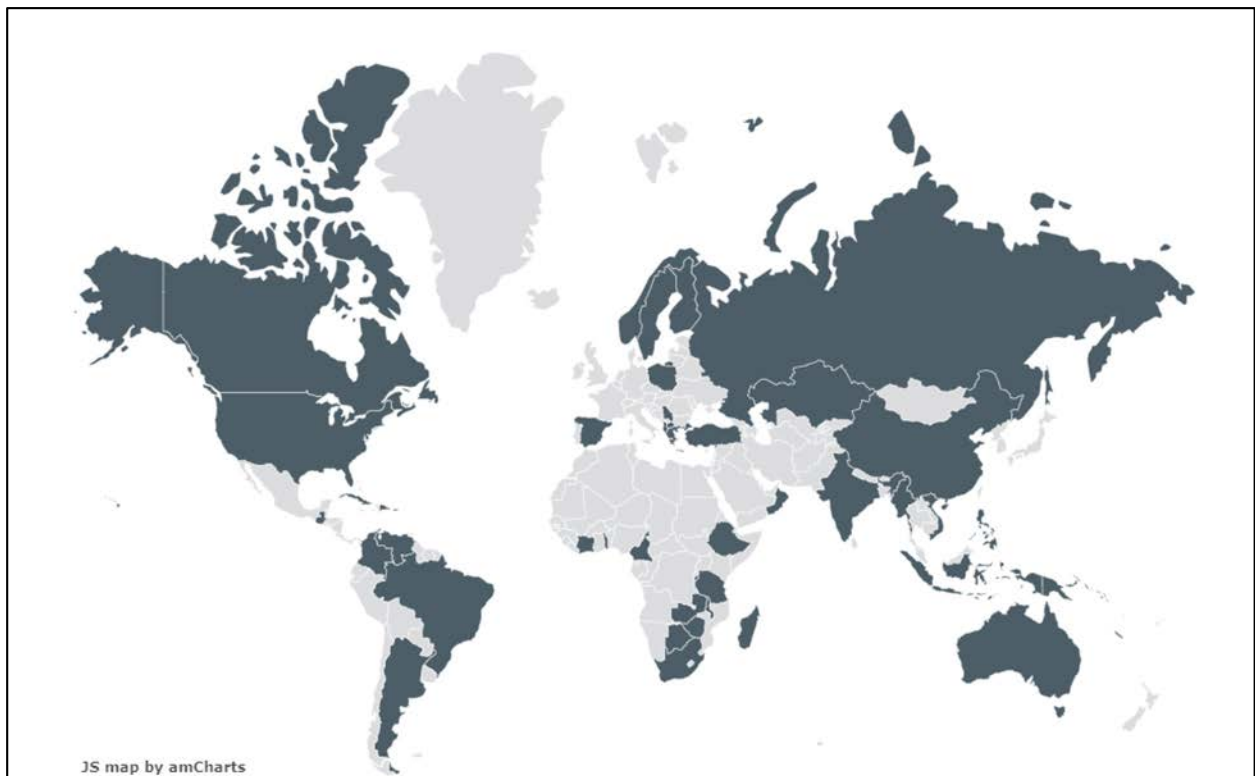
	Παραγωγή (t)			Αποθέματα (t)
	2019	2020	2021	
Ινδονησία	853.000	760.000	1.000.000	21.000.000
Φιλιππίνες	323.000	320.000	370.000	4.800.000
Ρωσία	279.000	280.000	250.000	6.900.000
Νέα Καληδονία	208.000	200.000	190.000	*
Αυστραλία	159.000	169.000	160.000	20.000.000
Καναδάς	181.000	150.000	130.000	2.800.000
Κίνα	120.000	120.000	120.000	2.800.000
Βραζιλία	60.600	73.000	100.000	16.000.000
Κούβα	49.200	49.000	*	5.500.000
Δομινικανή Δημοκρατία	56.900	47.000	*	*
ΗΠΑ	13.500	16.000	18.000	100.000
Άλλα κράτη	310.000	290.000	410.000	14.000.000
Σύνολο	2.613.200	2.475.000	2.700.000	93.900.000

Γενικότερα, κοιτάσματα νικελίου εμφανίζονται σε κάθε σημείο του πλανήτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Τα πέντε μεγαλύτερα θειούχα κοιτάσματα νικελίου με βάση την παραγωγή τους σε νικέλιο είναι τα εξής:

1. Το κοιτάσμα Taimyr στη βόρεια Ρωσία, με ετήσια παραγωγή περίπου 194 kt νικελίου.
2. Το κοιτάσμα Longshou στη περιοχή Jinchuan της κεντρικής Κίνας, με ετήσια παραγωγή περίπου 90 kt νικελίου.
3. Το κοιτάσμα Vale Inco στο Sudbury του κεντρικού Καναδά, με ετήσια παραγωγή περίπου 85,3 kt νικελίου.
4. Το κοιτάσμα Voisy's Bay στον ανατολικό Καναδά, με ετήσια παραγωγή περίπου 77,5 kt νικελίου.
5. Το κοιτάσμα Mt Keith της κεντρικής Αυσταλίας, με ετήσια παραγωγή περίπου 45 kt νικελίου.

Όσον αφορά τα λατεριτικά κοιτάσματα νικελίου, τα πέντε μεγαλύτερα με βάση τη παραγωγή τους σε νικέλιο είναι τα ακόλουθα:

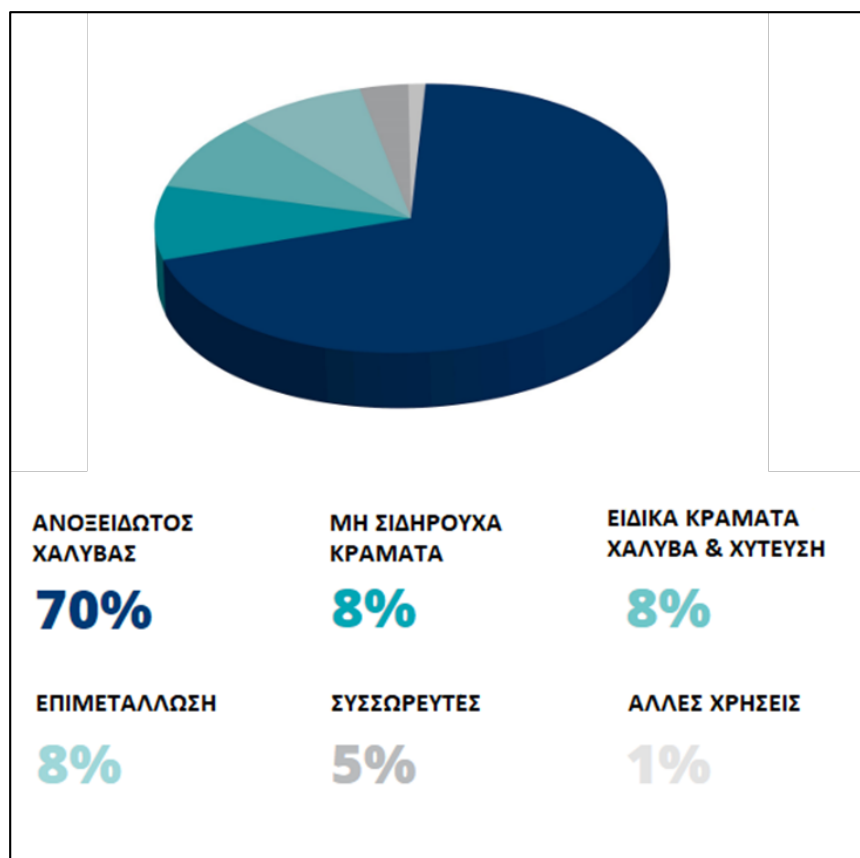
1. Το κοιτάσμα Sorowako στην ανατολική Ινδονησία, με ετήσια παραγωγή περίπου 72,4 kt νικελίου.
2. Το κοιτάσμα Doniambo, στην Νέα Καληδονία, με ετήσια παραγωγή περίπου 51,1 kt νικελίου.
3. Το κοιτάσμα Cerro Matoso στη βόρεια Κολομβία, με ετήσια παραγωγή περίπου 41,6 kt νικελίου.
4. Το κοιτάσμα Yabulu στη βορειοανατολική Αυστραλία, με ετήσια παραγωγή περίπου 35,1 kt νικελίου.



Σχήμα 1.2: Κράτη που διαθέτουν κοιτάσματα νικελίου (με γκρι χρώμα)
(<https://nickelinstitute.org/about-nickel/>).

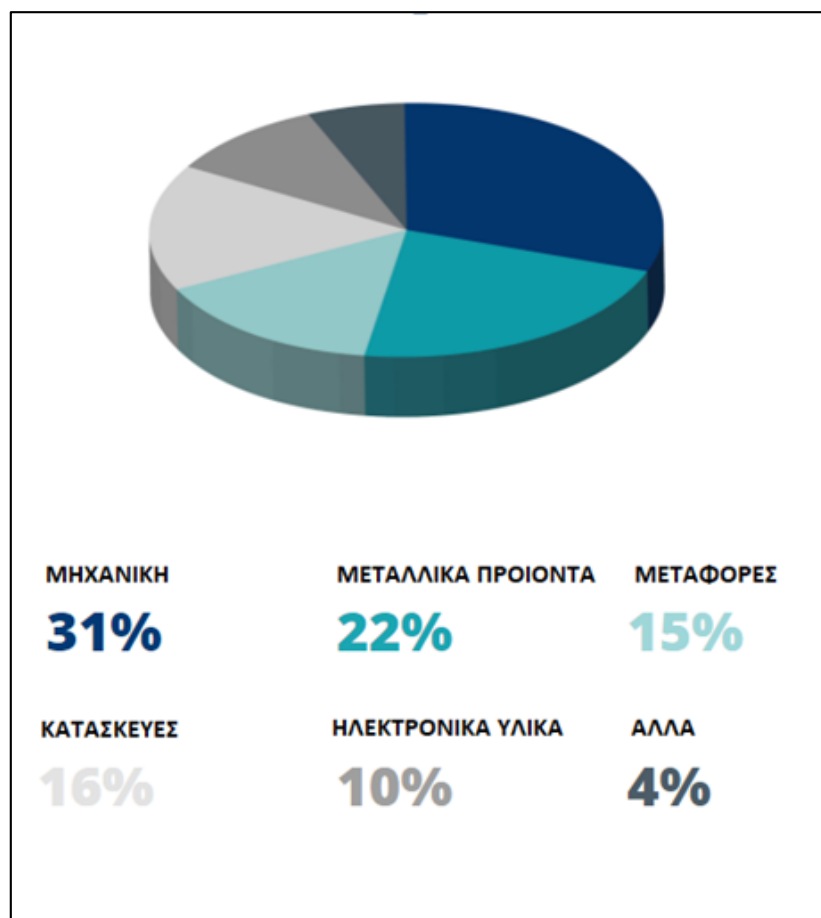
1.3 Χρήσεις του Νικελίου

Το νικέλιο αποτελεί απαραίτητη πρώτη ύλη για τη κατασκευή ποικίλων προϊόντων σε αρκετούς κλάδους της βιομηχανίας. Η ποσοστιαία κατανομή των χρήσεων του παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3. Φαίνεται πως το μεγαλύτερο ποσοστό του παραγόμενου νικελίου (70%) αξιοποιείται για την παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα, το υπόλοιπο 29% χρησιμοποιείται στην παραγωγή μη σιδηρούχων κραμάτων, ειδικών κραμάτων χάλυβα, συσσωρευτών, στην επιμετάλλωση και στη χύτευση, ενώ μόλις το 1% καταλήγει σε τυχόν άλλες χρήσεις.



Σχήμα 1.3: Χρήσεις του νικελίου (<https://nickelinstitute.org/>).

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή των χρήσεων του νικελίου στους διάφορους βιομηχανικούς κλάδους η οποία έχει ως εξής: Μηχανική – 31%, Κατασκευή μεταλλικών προϊόντων – 22%, Κατασκευαστικός τομέας – 16%, Μεταφορές – 15%, Κατασκευή ηλεκτρονικών ειδών – 10% και Λοιποί τομείς – 4%.



Σχήμα 1.4: Συμμετοχή του νικελίου στους κλάδους της βιομηχανίας
(<https://nickelinstitute.org/>).

1.3.1 Παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα

Τα 2/3 της συνολικής παραγωγής νικελίου παγκοσμίως χρησιμοποιείται στη βιομηχανία παραγωγής ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα μέσω κράματος σιδηρονικελίου. Οι σειρές 200 και 300 χρησιμοποιούνται κατά κόρον λόγω της αυξημένης αντοχής τους σε συνθήκες έντονης καταπόνησης και διάβρωσης και περιέχουν νικέλιο σε ποσοστό 1 – 6% και 8 – 14% αντίστοιχα. Η σειρά 304, που είναι από τις πλέον διαδομένες περιέχει 8 – 10,5% νικέλιο και 18 – 20% χρώμιο, ενώ η 316, η σειρά με την υψηλότερη ανθεκτικότητα στη διάβρωση περιέχει 10 – 14% νικέλιο, 16 – 18% χρώμιο και 2% μολυβδαίνιο. Μία νεότερη κατηγορία ανοξείδωτου χάλυβα, ο υπερ-ωστενιτικός, έχει υψηλότερη συγκέντρωση νικελίου και συγκεκριμένες εφαρμογές (Apostolikas et al., 2009).

1.3.2 Παραγωγή μη σιδηρούχων κραμάτων

Τα κράματα Cu-Ni είναι κράματα χαλκού με δεύτερο κυριότερο συστατικό το νικέλιο σε ποσοστό 8,5 – 45%. Μπορούν επίσης να περιέχουν πολύ μικρές ποσότητες άλλων στοιχείων όπως ψευδαργύρου, μαγγανίου, σιδήρου, νιόβιου, πυριτίου, χρωμίου, βηρυλλίου και αλουμινίου. Παρόλο που το στοιχειακό νικέλιο ανακαλύφθηκε σχετικά πρόσφατα, κράματα χαλκού με νικέλιο εντοπίστηκαν σε νομίσματα του 235 π.Χ. (<https://www.copper.org>).

Πλέον κυκλοφορεί στην αγορά μία μεγάλη ποικιλία κραμάτων Cu-Ni, το καθένα εκ των οποίων διαθέτει τις δικές του ξεχωριστές ιδιότητες και σύσταση και χρησιμοποιείται για εξειδικευμένους σκοπούς. Τα χαρακτηριστικά τους καθορίζονται σαφώς από τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN και το Πρότυπο DIN. Τα κράματα Cu-Ni διαθέτουν ενδιαφέρουσες φυσικές ιδιότητες και καλές μηχανικές ιδιότητες, ακόμη και υπό συνεχή αύξηση των φορτίων που τους ασκούνται καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή στη διάβρωση σε πολλά περιβάλλοντα και ιδιαίτερα στο θαλάσσιο (<https://www.copper.org>).

Σήμερα τα κράματα Cu-Ni έχουν πολλές εφαρμογές μερικές εκ των οποίων είναι η κατασκευή νομισμάτων, οι μονάδες αφαλάτωσης, τα συστήματα σωληνώσεων σε υποθαλάσσιο περιβάλλον, η κατασκευή ηλεκτρικών αντιστάσεων, η ναυπηγική και η αεροναυπηγική βιομηχανία (<https://www.copper.org>).

1.3.3 Επιμετάλλωση

Η επιμετάλλωση με τη χρήση νικελίου πραγματοποιείται ώστε να αποκτήσουν τα προϊόντα μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση, λάμψη και καλύτερη εμφάνιση. Παράλληλα προσφέρει πολύ καλές ιδιότητες προσκόλλησης και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται ως βάση άλλων επιστρώσεων. Βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως στη κατασκευή νομισμάτων λόγω του χαμηλού κόστους της και της αυξημένης διάρκειας ζωής της, στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής, στην επιμετάλλωση πλαστικών και ηλεκτρονικών ειδών (<https://nickelinstitute.org/about-nickel/plating/>).

Η επιμετάλλωση με νικέλιο μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με την τεχνική της ηλεκτρόλυσης ή χωρίς την επένεργεια ηλεκτρισμού με χημική επιμετάλλωση. Η πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται κυρίως στην επιμετάλλωση τμημάτων αυτοκινήτων ή μηχανών, σε υδραυλικά είδη όπως βρύσες και κεφαλές ντουζ, σε μεταλλικά έπιπλα και ηλεκτρονικά είδη. Η δεύτερη περίπτωση εφαρμόζεται

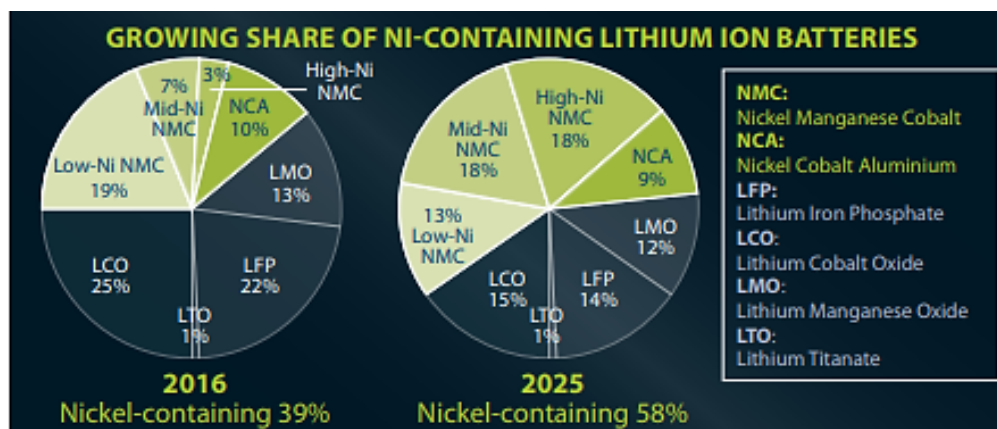
για την επιμετάλλωση σκληρών δίσκων, κυλίνδρων φρένων, αντλιών, βαλβίδων και άλλων προϊόντων. Επίσης, αποτελεί τη πρώτη επιλογή για την επιμετάλλωση υλικών που οφείλουν να λειτουργούν υπό σκληρές συνθήκες, όπως είναι τα συστήματα καυσίμων αυτοκινήτων ή τα τμήματα αεροσκαφών (<https://nickelinstitute.org/>).

1.3.4 Παραγωγή συσσωρευτών

Με τον όρο μπαταρίες νικελίου περιγράφεται μία ομάδα επαναφορτιζόμενων μπαταριών που περιέχουν ως βασικό συστατικό των καθόδων τους το οξείδιο του νικελίου. Συγκεκριμένα πρόκειται για τις μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (NiCd), Υδριδίου Νικελίου-Μετάλλου (NiMH), Νικελίου-Σιδήρου (NiFe), Νικελίου-Ψευδαργύρου (NiZn), Νικελίου-Υδρογόνου (NiH₂) αλλά και στις μπαταρίες ιόντων Λιθίου (Li-ion) συχνά εμπεριέχονται ποσότητες νικελίου στις καθόδους τους (Shukla et al., 2001).

Το νικέλιο αξιοποιείται στη κατασκευή μπαταριών για περισσότερο από έναν αιώνα. Η πρώτη μπαταρία νικελίου που κατασκευάστηκε ήταν η Νικελίου-Σιδήρου (Ni-Fe), η οποία αναπτύχθηκε από τον Edison το 1901 και βασίζεται στη χρήση του nickel oxyhydroxide (NiOOH) (οξυ-υδροξείδιο του νικελίου) στη κάθοδό τους και σιδήρου στην άνοδό τους. Η τεχνολογία της χρήσης νικελίου ως μέρους των καθόδων μπαταριών αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε σε μικρή κλίμακα στη Σουηδία, τη Γερμανία και τις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια των ετών 1897 – 1903 (Shukla et al., 2001).

Η χρήση επαναφορτιζόμενων μπαταριών αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία λόγω της παγκόσμιας ανησυχίας σχετικά με τη κλιματική αλλαγή και του στόχου των κυβερνήσεων να μειωθούν οι εκπομπές CO₂, που ωθούν στην αύξηση της παραγωγής ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών και της προώθησης των ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων. Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η κατανομή διαφόρων ειδών μπαταριών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα. Παρατηρείται ότι το 2016 οι μπαταρίες νικελίου αποτελούσαν το 39% των μπαταριών που χρησιμοποιούνταν σε αυτά και ότι έως το έτος 2025 αναμένεται η χρήση τους να ξεπερνάει το 58%.



Σχήμα 1.5: Δεδομένα 2016 σχετικά με τη χρήση μπαταριών νικελίου στα ηλεκτρικά οχήματα και πρόβλεψη για το 2025 (Nickel Magazine, 2017).

1.3.5 Ενώσεις του νικελίου

Οι ενώσεις του νικελίου έχουν καταστεί απαραίτητες σε ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών εφαρμογών λόγω των ιδιοτήτων τους και επίσης διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο στη δημιουργία τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον. Στον Πίνακα 1.3 αναφέρονται οι σημαντικότερες ενώσεις του καθώς και οι χρήσεις τους.

Αν και σε μικρό ποσοστό, αυτές οι ενώσεις χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ηλεκτρονικών ειδών, καταλυτών, λιπασμάτων ή άλλων χημικών ουσιών, στη παραγωγή οπτικών ειδών, χρωστικών ουσιών, μπαταριών και στην υαλουργία και τέλος στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική και στην αεροδιαστημική.

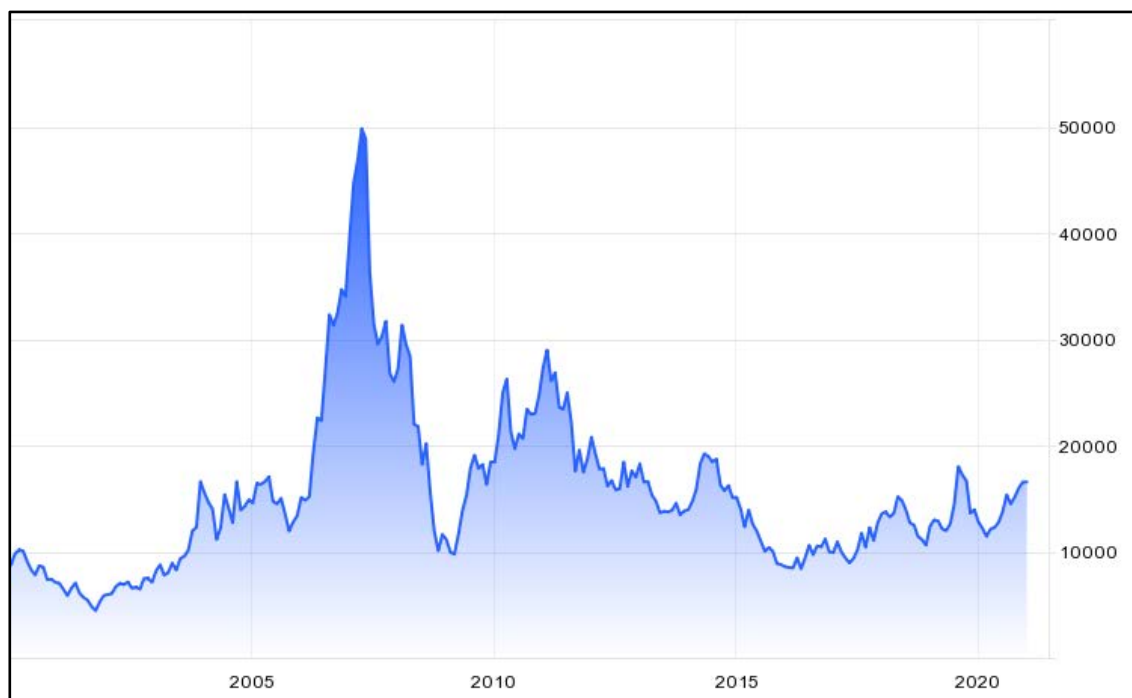
Πίνακας 1.3: Οι σημαντικότερες ενώσεις του νικελίου καθώς και οι χρήσεις τους
(<https://nickelinstitute.org/>).

Ένωση	Χημικός τύπος	Χρήση	Αυτοκινητοβιο- μηχανία	Αεροναυπηγική	Ηλεκτρονικά	Μπαταρίες	Πλαστικά	Χρώματα	Κεραμικά	Καύσιμα
Θειϊκό νικέλιο	NiSO ₄	Επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών, κάθοδοι μπαταριών	ο	ο	ο	ο				
Χλωριούχο νικέλιο	NiCl ₂	Επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών, καταλύτες	ο	ο	ο					ο
Σουλφαμικό νικέλιο	Ni(SO ₃ NH ₂) ₂	Επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών	ο	ο	ο					
Οξείδιο του νικελίου	NiO	Καταλύτες, χρωστικές, γυαλιά						ο	ο	ο
Υδραξυ-ανθρακικό νικέλιο	CH ₂ O ₃ Ni	Επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών, καταλύτες, χρωστικές	ο	ο	ο		ο	ο	ο	
Νιτρικό νικέλιο	Ni(NO ₃) ₂	Επεξεργασία μεταλλικών	ο	ο	ο	ο				ο

		επιφανειών, κάθοδοι μπαταριών, καταλύτες									
Διοξικό νικέλιο	$\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2$	Επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών	ο	ο	ο						
Υδροξειδίο του νικελίου	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	Επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών, κάθοδοι μπαταριών, χρωστικές	ο	ο	ο	ο	ο	ο	ο		
Θειούχο νικέλιο	NiS	Καταλύτες									ο
Υποσουλ- φίδιο του νικελίου	Ni_3S_2	Καταλύτες									ο

1.4 Αξία νικελίου

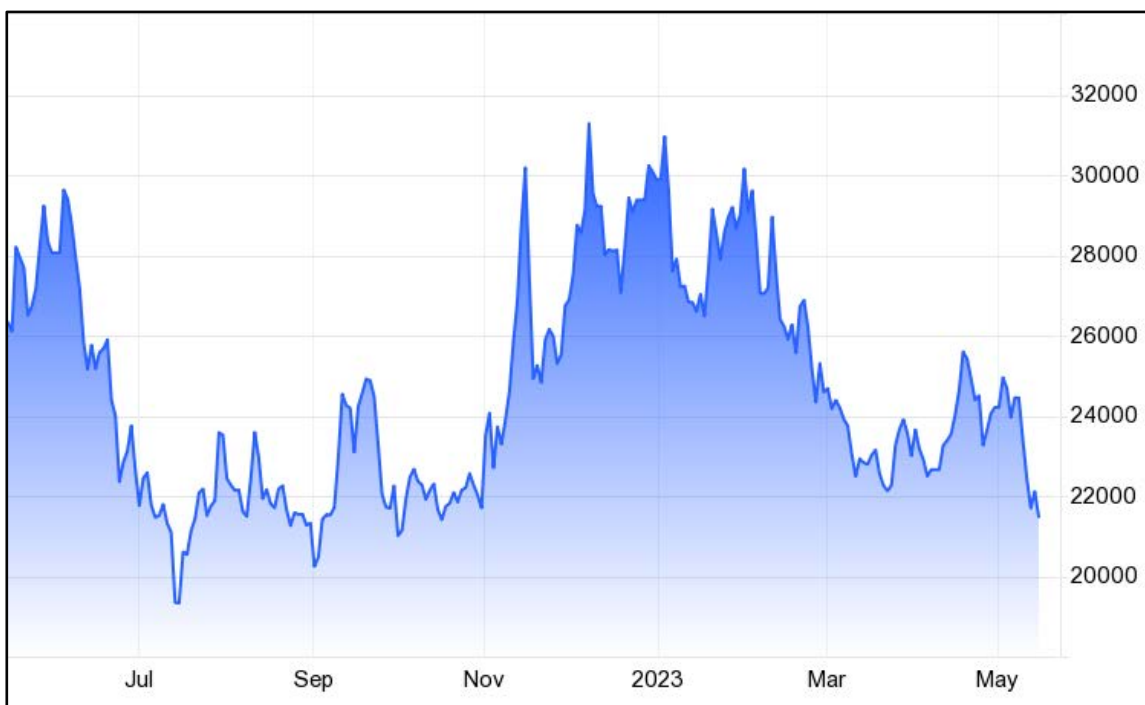
Σύμφωνα με το Χρηματιστήριο Μετάλλων του Λονδίνου (London Metal Exchange, LME), από τις αρχές του 2016 η τιμή του Νικελίου ακολουθεί ανοδική πορεία και έχει σχεδόν τριπλασιασθεί από 8.583 \$/t τον Ιανουάριο του 2016, σε 21.700 \$/t τον Μάιο του 2023. Ιστορικό υψηλό σημειώθηκε στις 02/04/2007 όταν η τιμή άγγιξε τα 49.825 \$/t. Το Μάρτιο του 2022 η τιμή άγγιξε ξανά τις 48.000 \$/t. Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής του νικελίου σε δολάρια ανά τόνο κατά τα έτη 2000 – 2021, στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η διακύμανση της τιμής του νικελίου σε δολάρια ανά τόνο για το διάστημα 2021 – 2022 και τέλος στο Σχήμα 1.8 φαίνεται η διακύμανση της τιμής του νικελίου κατά το τελευταίο έτος.



Σχήμα 1.6: Διακύμανση της τιμής του Νικελίου σε \$/t κατά τα έτη 2000 – 2021 σύμφωνα με το Χρηματιστήριο Μετάλλων του Λονδίνου (<https://tradingeconomics.com/>).



Σχήμα 1.7: Διακύμανση της τιμής του Νικελίου σε \$/t στο χρονικό διάστημα μεταξύ του Φεβρουαρίου του 2021 και του Οκτωβρίου του 2022 σύμφωνα με το Χρηματιστήριο Μετάλλων του Λονδίνου (<https://tradingeconomics.com/>).



Σχήμα 1.8: Διακύμανση της τιμής του Νικελίου σε \$/t στο χρονικό διάστημα μεταξύ του Ιουνίου του 2022 και του Μαΐου του 2023 σύμφωνα με το Χρηματιστήριο Μετάλλων του Λονδίνου (<https://tradingeconomics.com/>).

Κεφάλαιο 2. Κοιτάσματα Νικελίου

2.1 Νικέλιο σε πετρώματα

Τα νικελιούχα κοιτάσματα συνδέονται τόσο με πυριγενή όσο και με ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα.

Στα πυριγενή πετρώματα το νικέλιο εμφανίζεται σε δύο κατηγορίες ορυκτών. Στα σιδηρομαγνησιούχα πυριτικά ορυκτά, κυρίως στον ολιβίνη, όπου εμφανίζεται να αντικαθιστά το μαγνήσιο και τον σίδηρο. Επίσης εντοπίζεται στα θειούχα ορυκτά που σχηματίζονται στη νοριτική φάση της κρυστάλλωσης ενός βασαλτικού μάγματος παρουσία θείου. Σε γενικές γραμμές συγκεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό στα υπερβασικά πετρώματα (1450 ppm) και μειώνεται στα βασικά (130 ppm) και στα όξινα (10 ppm) (Αποστολίκας, 2009).

Τα ιζήματα με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι οι σύγχρονοι πελαγικοί άργιλοι. Στον Ειρηνικό Ωκεανό η περιεκτικότητα ανέρχεται κατά μέσο όρο στα 250 ppm, ενώ στους αργίλους του Ατλαντικού Ωκεανού και στα περιβάλλοντα ρηχών θαλάσσιων περιοχών μειώνεται στα 100 ppm και 20 ppm, αντίστοιχα. Στους αργιλικούς σχιστόλιθους, τους ψαμμίτες και τα ανθρακικά, το νικέλιο εμφανίζει περιεκτικότητα 60 ppm, 40 ppm και 10 ppm αντίστοιχα. Σημαντικές πηγές νικελίου επίσης αποτελούν τα σιδηρομαγνησιούχα κοιτάσματα της Βαλκανικής και οι μαγγανιούχοι κόνδυλοι (Αποστολίκας, 2009).

Η περιεκτικότητα του νικελίου στα μεταμορφωμένα πετρώματα εξαρτάται από τον τύπο του μητρικού πετρώματος και την περιεκτικότητά του νικελίου σε αυτό. Ως εκ τούτου δεν είναι εύκολο να δοθεί μία μέση τιμή. Ωστόσο, γενικά τα μεταμορφωμένα πετρώματα με προέλευση από πυριγενή πετρώματα εμφανίζουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με αυτά που προέρχονται από μεταμόρφωση ιζηματογενών (Αποστολίκας, 2009).

2.2 Ταξινόμηση κοιτασμάτων νικελίου

Ανάλογα με τον τρόπο γένεσής τους τα μεταλλεύματα νικελίου ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, τα θειούχα, τα λατεριτικά και τα ιζηματογενή. Τα πρώτα δύο υφίστανται εκμετάλλευση για τη παραγωγή νικελίου.

2.2.1 Θειούχα κοιτάσματα

Τα σημαντικότερα θειούχα κοιτάσματα εντοπίζονται στον Καναδά, στην Αυστραλία, στην Κίνα και στη Ρωσία. Πρόκειται συνήθως για πολυμεταλλικά κοιτάσματα που συνδέονται με μεταλλεύματα χαλκού και πλατινοειδών (PGE), τα οποία σχηματίστηκαν από την πρώιμη κρυστάλλωση, κατά το ορθομαγματικό στάδιο, ενός βασικού μάγματος εντός του μαγματικού θαλάμου. Η μεταλλοφορία μπορεί να είναι είτε συμπαγής είτε διάσπαρτη. Οι αποφύσεις μεταλλεύματος (Offsets) είναι μία ακόμη μορφή θειούχου μεταλλοφορίας. Σε αυτή τη περίπτωση υδροθερμικά ρευστά που προήλθαν από νερό και μέταλλα κατά τις διαδικασίες της κρυσταλλικής διαφοροποίησης κρυσταλλώνονται στο υδροθερμικό στάδιο και αναπτύσσονται σε κοίτασμα υπό μορφή φλέβας (Αποστολίκας, 2009).

Τα θειούχα κοιτάσματα νικελίου συνδέονται συνήθως με βασικά και υπερβασικά πυριγενή πετρώματα και έχουν σχηματισθεί σε ποικίλα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα, ενώ η συντριπτική πλειοψηφία τους έχει Αρχαϊκή και Παλαιο-προτεροζωϊκή ηλικία. Η περιεκτικότητα σε νικέλιο, χαλκό και πλατινοειδή σε αυτά εξαρτάται από τη σύσταση του μάγματος και ελέγχεται από τους εξής τρεις παράγοντες (Αποστολίκας, 2009):

- Το λόγο πυριτικών/θειούχων ορυκτών,
- Τη σύσταση του μάγματος και
- Τη ποσότητα των σταγονιδίων των δυσδιάλυτων θειούχων ενώσεων που υπάρχουν στο μείγμα.

Τα θειούχα κοιτάσματα περιέχουν περίπου το 30 % των παγκοσμίων αποθεμάτων νικελίου. Τα συχνότερα θειούχα ορυκτά του νικελίου είναι ο πεντλαδίτης (pentlandite) και ο μίλλερίτης (millerite) (Janwong, 2012).

2.2.2 Λατεριτικά κοιτάσματα

Τα λατεριτικά νικελιούχα κοιτάσματα αποτελούν το 70% των παγκόσμιων αποθεμάτων νικελίου και έχουν ιδιαίτερη οικονομική σημασία όσον αφορά τη περιεκτικότητα τους σε νικέλιο και ιδιαίτερα σε κοβάλτιο. Έχουν Μειόκαινη – Πλειόκαινη ηλικία και η πλειοψηφία τους αναπτύσσεται σε περιοχές με εκτεταμένα οφιολιθικά συμπλέγματα. Μεγάλα κοιτάσματα εμφανίζονται στην Αυστραλία, στη Νέα Καληδονία, στην Παπούα Νέα Γουινέα, στη Νότιο και

Κεντρική Αμερική, στην Ινδονησία, στις Φιλιππίνες, στην Αφρική, στη Τουρκία και στα Βαλκάνια. Δεδομένου ότι τα περισσότερα αναπτύσσονται επιφανειακά έχουν χαμηλό κόστος εκμετάλλευσης, ωστόσο τα κοιτάσματα των Βαλκανίων συχνά καλύπτονται από νεότερους σχηματισμούς μεγάλου πάχους (Αποστολίκας, 2009).

Ο όρος λατεριτίωση περιγράφει τη διαδικασία κατά την οποία τα αρχικά ορυκτά ενός πετρώματος διαλυτοποιούνται, γίνεται μετακίνηση των στοιχείων τους και απόθεσή τους σε κάποιο άλλο περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία κατέχει τη πρωτεύουσα θέση στο σχηματισμό των λατεριτικών κοιτασμάτων. Η λατεριτίωση ξεκινά με τη διαλυτοποίηση του περιδοτίτη από όξινο υπόγειο νερό. Ο περιδοτίτης αποτελείται κυρίως από ολιβίνη ($(\text{Mg,Fe,Ni})_2\text{SiO}_4$), ο οποίος συνήθως περιέχει 0.3 % κατά βάρος νικέλιο. Η μακροχρόνια αποσάθρωση του ολιβίνης απελευθερώνει στο περιβάλλον σίδηρο, μαγνήσιο, νικέλιο και πυρίτιο με μορφή διαλύματος. Ο σίδηρος οξειδώνεται και καθιζάνει πρώτος κοντά στην επιφάνεια της Γης, με τη μορφή γκαιτίτη (goethite) ($\text{FeO}(\text{OH})$) και αιματίτη (Fe_2O_3). Εφόσον το νερό παραμένει όξινο, το νικέλιο, το μαγνήσιο και το πυρίτιο συνεχίζουν τη πορεία τους βαθύτερα σαν διάλυμα. Μόλις το διάλυμα καταστεί ουδέτερο λόγω της αντίδρασής του με τα περιβάλλοντα εδάφη και πετρώματα, αυτά τα στοιχεία τείνουν να καθιζάνουν με τη μορφή ένυδρων πυριτικών. Το νικέλιο που είναι λιγότερο ευδιάλυτο σε σχέση με το μαγνήσιο, καθιζάνει ενώ το μαγνήσιο μπορεί να συνεχίσει τη πορεία του με τη μορφή διαλύματος προς τον υδροφόρο (Janwong, 2012).

Τυπικά, τα λατεριτικά εδάφη αποτελούνται από τέσσερις ζώνες οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 και συγκεκριμένα πρόκειται για τη σιδηρούχα ζώνη, τη ζώνη του λειμωνίτη, την αργιλική ζώνη και τη ζώνη του σαπρολίτη. Στη πλειοψηφία των τυπικών λατεριτών το νικέλιο εμφανίζει τη μέγιστη τιμή του στη σαπρολιτική ζώνη, ωστόσο μπορεί επίσης να συγκεντρωθεί σε κάποια ή κάποιες από τις υπόλοιπες (Αποστολίκας, 2009).

Η Λειμωνιτική Ζώνη αποτελείται κυρίως από γκαιτίτη και άμορφο σιδηρούχο υδροξείδιο. Ανάλογα με το κοιτάσμα οι περιεκτικότητες των στοιχείων σε αυτή τη Ζώνη είναι 0,6 – 0,7 % Ni, 0,1 – 0,2 % Co, 1 – 4 % Mg και περισσότερο από 40 % Fe. Η Νοντρονιτική ή Αργιλική Ζώνη αποτελείται κυρίως από σμεκτιτικές αργίλους, συνήθως νοντρονίτη και χαλαζία. Δημιουργείται σε περιοχές με ξηρό κλίμα και δεν εντοπίζεται σε περιοχές με υγρό κλίμα. Σε γενικές γραμμές οι περιεκτικότητες των στοιχείων σε αυτή είναι 1,2 % Ni, 0,08 % Co, 3,5 % Mg και 18 % Fe (Janwong, 2012).

Η Σαπρολιτική Ζώνη έχει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε νικέλιο σε σχέση με τις προηγούμενες, ενώ η ορυκτολογία της και η χημική της σύσταση επηρεάζεται άμεσα από τη γεωλογία και το κλίμα της περιοχής, το βαθμό λατεριτίωσης και την ικανότητα αποστράγγισης του υπεδάφους. Οι περιεκτικότητες των στοιχείων σε αυτή είναι 0,4 – 3 % Ni, 0,02 – 0,1 % Co, 10 – 30 % Mg και περισσότερο από 9 – 25 % Fe.

Πίνακας 2.1: Τυπικό προφίλ ενός λατεριτικού κοιτάσματος (Janwong, 2012).

Iron Cap		
Limonite Zone	Goethite (FeO(OH)) and ferric hydroxide	Ni: 0,6-1,7% Co: 0,1-0,2% Mg: 1,0-4,0% Fe>40%
Notronite Zone	Smectite clays, usually notronite (Fe ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O), quartz (SiO ₂) and a mineral possibly belong to the chlorite groups ((Mg, Fe, Ni, Mn, Al) ₆ (AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₈)	Ni: 1,2% Co: 0,08% Mg: 3,5% Fe:18%
Saprorite Zone	Bed rock fragments, garnierite ((Ni,Mg) ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈), quartz (SiO ₂) and saprolized rims of the boulders	Ni: 0,4-3,0% Co: 0,02-1,0% Mg: 10-30% Fe: 9-25%

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται ορισμένα ορυκτά που είναι συνήθως παρόντα στους λατερίτες.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχηματισμό των νικελιούχων ορυκτών σε λατεριτικά κοιτάσματα σχετίζονται με την αρχική συγκέντρωση του νικελίου και τη κίνηση των υδάτων. Πιο αναλυτικά, πρόκειται για την ορυκτολογία του περιδοτίτη, το τεκτονικό περιβάλλον, το κλίμα, τη τοπογραφία και τη γεωμορφολογία.

Πίνακας 2.2: Σημαντικά ορυκτά που είναι συνήθως παρόντα στους λατερίτες (Rao, 2000).

Ορυκτό	Χημικός τύπος	% Ni
Ολιβίνης	$(\text{Mg,Fe,Ni})_2\text{SiO}_4$	0,25
Ορθοπυρόξενος	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$	0,05
Σερπεντίνης	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	0,25
<i>Σαπρολιτική Ζώνη</i>		
Νικελιούχος σερπεντίνης	$(\text{Mg,Fe,Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	1-10
Γαρνιερίτης	$(\text{Ni,Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	10-24
<i>Νοντρονιτική Ζώνη</i>		
Νοντρονίτης	$(\text{Ca,Na,K})_{0.5}(\text{Fe}^{3+},\text{Ni,Mg,Al})_4(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	0-5
Χαλαζίας	SiO_2	0
<i>Λειμωνιτική Ζώνη</i>		
Γκαιτίτης	$(\text{Fe,Al,Ni})\text{OOH}$	0-1,5
Ασβολάνης	Mn,Fe,Co,Ni oxide	1-10

2.2.3 Ιζηματογενή κοιτάσματα

Ο σχηματισμός των ιζηματογενών κοιτασμάτων εξαρτάται από την προέλευση και τη μεταφορά του υλικού καθώς και από το περιβάλλον στο οποίο αποτίθεται. Τα συγκεκριμένα κοιτάσματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τα κοιτάσματα που υπέρκεινται υπερβασικών πετρωμάτων,
- Τα κοιτάσματα που υπέρκεινται ανθρακικών πετρωμάτων (καρστικά) και

- Τα κοιτάσματα που υπέρκεινται ανθρακικών πετρωμάτων όπου συνυπάρχουν σιδηρονικελιούχοι ορίζοντες με βωξίτες ή σιδηρούχοι αργιλικοί ορίζοντες.

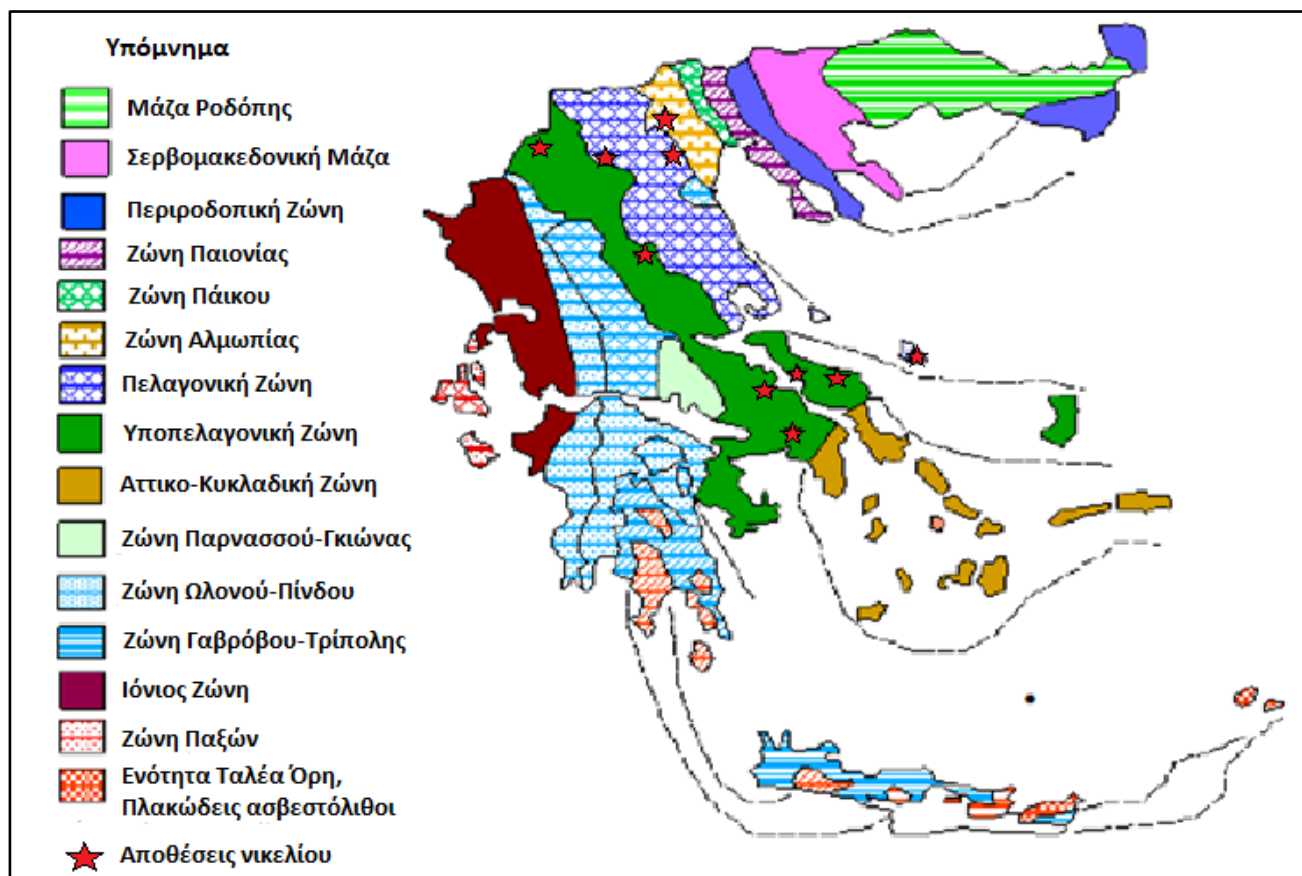
Πρόκειται για κοιτάσματα κυρίως Κρητιδικής ηλικίας που εντοπίζονται στα Βαλκάνια (Αποστολίκας, 2009).

Ο σχηματισμός των ιζηματογενών κοιτασμάτων εξαρτάται από την προέλευση και τη μεταφορά του υλικού καθώς και από το περιβάλλον στο οποίο αποτίθεται.

2.3 Κοιτάσματα νικελίου στην Ελλάδα

2.3.1 Γεωλογικό περιβάλλον

Οι νικελιούχες μεταλλοφορίες στην Ελλάδα εντοπίζονται σε τρεις γεωτεκτονικές ζώνες και συγκεκριμένα, στην Υποπελαγονική, όπου ανήκουν οι περισσότερες εμφανίσεις κοιτασμάτων, στην Πελαγονική και στη ζώνη Αλμωπίας. Κύριο χαρακτηριστικό των τριών αυτών ζωνών είναι η παρουσία μεγάλων οφιολιθικών μαζών (Αποστολίκας, 2020). Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος και η κατανομή των νικελιούχων μεταλλοφοριών στον ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 2.1: Κατανομή των νικελιούχων μεταλλοφοριών στις γεωτεκτονικές ζώνες του Ελλαδικού χώρου (Αποστολίκας, 2020).

Ανάλογα με την γεωτεκτονική ζώνη στην οποία ανήκουν τα ελληνικά κοιτάσματα διακρίνονται ως εξής (Αποστολίκας, 2009):

Υποπελαγονική ζώνη:

- Κοιτάσματα Λοκρίδας
- Κοιτάσματα Πάρνηθας
- Κοιτάσματα Εύβοιας
- Κοίτασμα Παλαιοχωρίου Γρεβενών
- Κοιτάσματα Ιεροπηγής Καστοριάς

Πελαγονική ζώνη:

- Κοίτασμα Βερμίου

Ζώνη Αλμωπίας:

- Κοίτασμα Έδεσσας

Τα κοιτάσματα νικελίου που εμφανίζονται στην Ελλάδα διακρίνονται σε τρεις τύπους (Αποστολίκας, 2020):

- Κοιτάσματα νικελίου ιζηματογενούς τύπου, με εναπόθεση προϊόντων λατεριτικής αποσάθρωσης πάνω σε υπερβασικά πετρώματα,
- Κοιτάσματα νικελίου ιζηματογενούς τύπου, με εναπόθεση προϊόντων λατεριτικής αποσάθρωσης πάνω σε καρστικοποιημένα ανθρακικά πετρώματα, κυρίως Ιουρασικής ηλικίας (καρστικού τύπου) και
- Λατεριτικά κοιτάσματα in situ με υποκείμενα υπερβασικά πετρώματα.

2.3.2 Κοίτασμα Ιεροπηγής Καστοριάς

Το συγκεκριμένο κοίτασμα βρίσκεται στην Υποπελαγονική ζώνη, υπέρκειται επί σερπεντινιτών και καλύπτεται από ιζήματα και συγκεκριμένα μάργες, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή Μειοκαινικής ηλικίας. Πρόκειται για ένα τυπικό λατεριτικό φλοιό αποσάθρωσης και η μεταλλοφορία του, που αναπτύσσεται σε τρία επιμέρους κοιτάσματα στην Ελλάδα (Σχήμα 8), αποτελεί συνέχεια εκείνης του Devoll της Αλβανίας (Αποστολίκας, 2009).

Εμφανίζει όλες τις ζώνες που εντοπίζονται στους λατεριτικούς φλοιούς αποσάθρωσης και η μεταλλοφορία αναπτύσσεται με τη μορφή μεγάλου μεγέθους φακών κυμαινόμενου πάχους (Αποστολίκας, 2009).

2.3.3 Εκμετάλλευση κοιτασμάτων νικελίου στην Ελλάδα

2.3.3.1 Εγκαταστάσεις της ΛΑΡΚΟ

Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων νικελίου στην Ελλάδα πραγματοποιείται αποκλειστικά από την εταιρεία ΛΑΡΚΟ η οποία ιδρύθηκε το 1963 με σκοπό την αξιοποίηση των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων της Λοκρίδας και το 1966 ξεκίνησε η λειτουργία του Μεταλλουργικού Εργοστασίου Λάρυμνας, με πρώτη ύλη από το σιδηρονικελιούχο κοίτασμα του Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας. Το 1969 εντάχθηκαν στην παραγωγική διαδικασία τα Μεταλλεία Ευβοίας. Αργότερα,

το 1997 ξεκίνησε η συστηματική εκμετάλλευση των λατεριτικών κοιτασμάτων νικελίου της Ιεροπηγής Καστοριάς (Αποστολίκας, 2020).

Πλέον στα μεταλλεία του Αγίου Ιωάννη πραγματοποιούνται τέσσερις ανοιχτές εκμεταλλεύσεις με ετήσια παραγωγή 500.000 - 550.000 τόνους σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος, στα μεταλλεία της Εύβοιας πραγματοποιούνται επίσης τέσσερις ανοιχτές εκμεταλλεύσεις με ετήσια παραγωγή 1.100.000 - 1.200.000 τόνους μεταλλεύματος και στα μεταλλεία Καστοριάς, με τρεις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις, η ετήσια παραγωγή ανέρχεται σε 350.000 - 400.000 τόνους μεταλλεύματος (Αποστολίκας, 2020).

Το μετάλλευμα στη συνέχεια οδηγείται στις μεταλλουργικές εγκαταστάσεις της Λάρυμνας στο νομό Φθιώτιδας, όπου πραγματοποιείται πυρομεταλλουργική επεξεργασία των Ελληνικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων με σκοπό την παραγωγή σιδηρονικελίου (FeNi), περιεκτικότητας 18 - 24% σε νικέλιο, το οποίο αποτελεί πρώτη ύλη για τις βιομηχανίες παραγωγής ανοξείδωτου χάλυβα στον Ευρωπαϊκό χώρο (<http://www.larco.gr/>).

Η βασική γραμμή παραγωγής του εργοστασίου της Λάρυμνας αποτελείται συνολικά από εννέα καμίνους, τέσσερις περιστροφικές και πέντε ηλεκτρικές. Επίσης διαθέτει δύο μεταλλάκτες τύπου OBM, με δυναμικότητα 50 τόνους μετάλλου ο καθένας. Επιπλέον των παραπάνω, διαθέτει απαραίτητες βοηθητικές εγκαταστάσεις, όπως δύο μονάδες για την παραγωγή οξυγόνου και αζώτου, μονάδες πελλετοποίησης και κοκκοποίησης FeNi, καθώς επίσης και μονάδες μαγνητικού εμπλουτισμού (<http://www.larco.gr/>).

Το εργοστάσιο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί συνεχώς 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες το χρόνο και παράγει κοκκοποιημένο σιδηρονικέλιο υψηλής καθαρότητας, χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά στην παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα. Η συνολική ετήσια ποσότητα μεταλλεύματος που επεξεργάζεται το εργοστάσιο της Λάρυμνας ανέρχεται στους 2.500.000 τόνους περίπου. Η ετήσια παραγωγή σε Νικέλιο (Ni) κυμαίνεται από 18.000 έως 20.000 τόνους ετησίως και καλύπτει το 6% περίπου της ζήτησης της Ευρωπαϊκής Αγοράς (<http://www.larco.gr/>).

Λόγω του ότι η ΛΑΡΚΟ με νόμο του κράτους (4664/2020) βρίσκεται υπό Ειδική Διαχείριση από το 2021, σε μία πορεία με στόχο την ιδιωτικοποίηση της και βρίσκεται σε διαδικασίες πώλησης εν λειτουργία, η παραγωγή της εταιρείας το έτος αυτό ήταν αισθητά μειωμένη. Πιο αναλυτικά, το

2021 η παραγωγή FeNi μειώθηκε κατά 11.112 t σε σχέση με το 2020, από 30.505 t σε 19.393 t. Η παραγωγή νικελίου μειώθηκε κατά 1.932 t, και συγκεκριμένα από 6.012 t σε 4.080 t. Αντιστοίχως περιορίστηκε η εξόρυξη της πρώτης ύλης η οποία το 2020 αντιστοιχούσε σε 1.030.000 t και το 2021 σε 596.871 t, καθώς επίσης η εξαγωγή των παραγόμενων προϊόντων από 155.111.808 t σε 73.624.319 t στο ίδιο χρονικό διάστημα. Στο επόμενο χρονικό διάστημα αναμένεται η πώληση του εργοστασίου και η μεταβίβαση των μεταλλευτικών της δικαιωμάτων, μετά από διεθνή διαγωνισμό εκδήλωσης ενδιαφέροντος. Οι αναγκαίες επενδύσεις του νέου ιδιοκτήτη θα δύνανται να υπαχθούν σε Ελληνικά και Ευρωπαϊκά αναπτυξιακά προγράμματα τα οποία θα έχουν στόχο την επίτευξη της απεξάρτησης της Ε.Ε., από το εισαγόμενο νικέλιο (π.χ. η Ρωσία καλύπτει πάνω από το 10% της παγκόσμιας παραγωγής) (ΣΜΕ, 2022).

2.3.3.2 Η πυρομεταλλουργική μέθοδος της ΛΑΡΚΟ

Η πυρομεταλλουργική μέθοδος της ΛΑΡΚΟ (Larco Process) αποτελεί τροποποίηση της παλαιότερης μεθόδου Μούσουλου για τη παραγωγή Fe-Ni (LM Process) (Ζευγώλης, 2013).

Η επεξεργασία του μεταλλεύματος πραγματοποιείται σε 4 στάδια (larco.gr):

1. Ανάμιξη πρώτων υλών
2. Προθέρμανση και προαναγωγή του μεταλλεύματος σε περιστροφικές καμίνους
3. Αναγωγική τήξη σε ηλεκτρικές καμίνους
4. Εμπλουτισμός - εξευγενισμός σε μεταλλάκτες OBM

Πιο αναλυτικά, κατά το πρώτο στάδιο, το μέταλλευμα που προέρχεται από τα μεταλλεία της Εύβοιας, του Αγίου Ιωάννη και της Καστοριάς, λειοτριβημένο σε μέγεθος – 25 mm, αναμειγνύεται με στερεά καύσιμα και συγκεκριμένα με λιγνίτη και γαιάνθρακα. Η τυπική σύσταση του τελικού μεταλλουργικού μίγματος περιλαμβάνει:

- 55 % Μέταλλευμα Εύβοιας,
- 30 % Μέταλλευμα Αγίου Ιωάννη,
- 15% Μέταλλευμα Καστοριάς και
- Στερεά καύσιμα σε αναλογία 200 – 230 kg/tn μεταλλεύματος.

Η συγκεκριμένη αναλογία εξαρτάται τόσο από τον όγκο των διαθέσιμων μεταλλευμάτων όσο και από την χημική και ορυκτολογική τους σύσταση. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί πως το

μετάλλευμα της Εύβοιας έχει υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο και οξείδιο του πυριτίου, το μετάλλευμα του Αγίου Ιωάννη έχει υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο αλλά μικρή σε οξείδιο του πυριτίου και το μετάλλευμα της Καστοριάς έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδιο του πυριτίου αλλά μικρή σε οξείδιο του σιδήρου.

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η προθέρμανση και προαναγωγή του μεταλλεύματος σε τέσσερις περιστροφικές καμίνους. Εντός τους, στο μεταλλουργικό μίγμα που κινείται σε αντιρροή με τον αέρα πραγματοποιούνται αναγωγικές αντιδράσεις που οδηγούν στη ξήρανση και προαναγωγή των οξειδίων του νικελίου και του σιδήρου. Οι Περιστροφικές Κάμινοι μπορούν να παράγουν 300 t/h προϊόν φρύγματος, το οποίο ισοδυναμεί περίπου με 2.500.000 τόνους ανά έτος.

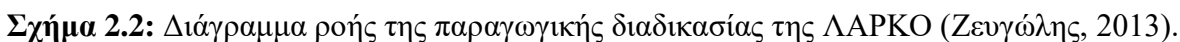
Κατά το τρίτο στάδιο, το προϊόν που προκύπτει από τις περιστροφικές καμίνους, προωθείται στις ηλεκτροκαμίνους. Εντός τους το προϊόν τήκεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (1600 °C) και με τη βοήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας διαχωρίζονται τα συστατικά του. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου και τους νικελίου προς μεταλλικό νικέλιο και σίδηρο. Τελικά διαμορφώνονται δύο φάσεις, μία μεταλλική, αυτή του σιδηρονικελίου (ή FeNi 15) και εκείνη της σκουριάς που περιέχει οξείδια του σιδήρου, ασβεστίου και πυριτίου.

Η περιεκτικότητα του νικελίου στο FeNi 15 ρυθμίζεται μέσω της αναλογίας του μόνιμου άνθρακα. Οι φάσεις του μετάλλου και της σκουριάς απομακρύνονται συστηματικά από τις κατάλληλες οπές που ευρίσκονται στο σώμα των ηλεκτροκαμίνων.

Το προϊόν των ηλεκτροκαμίνων, δηλαδή η φάση του σιδηρονικελίου, προωθείται στην επόμενη βαθμίδα της τελικής επεξεργασίας. Η παραγόμενη σκουριά αποτελεί το παραπροϊόν των ηλεκτροκαμίνων και κατά την έξοδό της κοκκοποιείται και είτε απορρίπτεται είτε πωλείται σε τσιμεντοβιομηχανίες ή μονάδες παραγωγής αμμοβολής.

Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο της μεθόδου, πραγματοποιείται εμπλουτισμός και εξευγενισμός του σιδηρονικελίου σε μεταλλάκτες OBM. Εκεί, με εμφύσηση οξυγόνου και προπάνιου από τον πυθμένα, οξειδώνεται μία ποσότητα σιδήρου και επιτυγχάνεται ο εμπλουτισμός του σιδηρονικελίου στην επιθυμητή τελική περιεκτικότητα σε Ni (συνήθως 18-23% Ni). Ταυτόχρονα με τον εμπλουτισμό σε Ni επιτυγχάνεται και ο εξευγενισμός του προϊόντος, με την προσθήκη κατάλληλων συλλιπασμάτων. Συνεπώς, περιορίζονται οι περιεκτικότητες φωσφόρου και του

Στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.2 παρουσιάζεται η παραπάνω παραγωγική διαδικασία της ΔΑΡΚΟ.



Λόγω της σταδιακής εξάντλησης των υψηλής περιεκτικότητας θειούχων κοιτασμάτων νικελίου, η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το βλέμμα της στα φτωχότερα σε νικέλιο λατεριτικά κοιτάσματα. Η ανάπτυξη οικονομικά αποδεκτών μεθόδων ανάκτησης νικελίου από αυτά κρίνεται πλέον αναγκαία (Farrokhpay et al., 2018).

27

εκ τούτου, η κατεργασία τους για τη παραγωγή νικελίου με συμβατικές μεθόδους είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτών των κοιτασμάτων είναι ότι το νικέλιο συχνά εντοπίζεται με τη μορφή πολύ λεπτών εγκλεισμάτων σε αρκετές ορυκτολογικές φάσεις του κοιτάσματος. Λόγω των παραπάνω, ο αποτελεσματικός εμπλουτισμός τους είναι δύσκολος. Επιπλέον, τα λατεριτικά κοιτάσματα εμπεριέχουν φυλλοπυριτικά ορυκτά, για παράδειγμα τάλκη, σερπεντίνη και σμεκτίτη, με αποτέλεσμα να απαιτείται καλή γνώση των φυλλοπυριτικών ορυκτών για τη κατανόηση της ορυκτολογίας των συγκεκριμένων κοιτασμάτων (Farrokhpay et al., 2018).

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ο εμπλουτισμός των λατεριτών σε νικέλιο σε βιομηχανική κλίμακα περιλαμβάνει κυρίως την απομάκρυνση του χονδρόκοκκου κλάσματος από τη τροφοδοσία, το οποίο είναι λιγότερο πλούσιο σε νικέλιο σε σχέση με το λεπτόκοκκο. Φαίνεται ότι η πλειοψηφία των οι συμβατικών μεθόδων εμπλουτισμού είναι αναποτελεσματικές για αυτό το σκοπό (Quast et al., 2015a).

Η επίδραση της μείωσης του μεγέθους των τεμαχιδίων στον εμπλουτισμό των νικελιούχων κοιτασμάτων αποτελεί αντικείμενο της επιστημονικής έρευνας. Στο κοιτάσμα Ravensthorpe της Δυτικής Αυστραλίας το ποσοστό σε νικέλιο αυξήθηκε από 1% σε 2% έπειτα από μείωση του μεγέθους και απομάκρυνση του κλάσματος με μέγεθος μεγαλύτερο από 75 μm . Αντίστοιχα, στα κοιτάσματα των ορυχείων Neroui και Tiebaghi στη Νέα Καληδονία, το ποσοστό σε νικέλιο αυξήθηκε από 1,8% στη τροφοδοσία σε 3% στο κλάσμα των -75 μm περίπου, έπειτα από μείωση του μεγέθους και απομάκρυνση των χονδρών τεμαχιδίων.

Αντίθετα, στο κοιτάσμα Falcondo της Δομινικανής Δημοκρατίας, το νικέλιο εμπλουτίστηκε κατά 0,2%, από 1,2% σε 1,4%, έπειτα από θραύση και απομάκρυνση των τεμαχιδίων με μέγεθος μεγαλύτερο από 1cm. Στο κοιτάσμα της Coral Bay στις Φιλιππίνες, το ποσοστό σε νικέλιο αυξήθηκε από 1,26% σε 1,5% έπειτα από θραύση, κοσκίνιση και απομάκρυνση των τεμαχιδίων με μέγεθος μεγαλύτερο από 2 mm. Φαίνεται λοιπόν, ότι ο εμπλουτισμός σε νικέλιο ευνοείται από την μείωση του μεγέθους του κόκκου του μεταλλεύματος (Crundwell et al., 2011).

2.5 Εμπλουτισμός μέσω επίπλευσης

Η επίπλευση ανακαλύφθηκε τυχαία στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και έκτοτε χρησιμοποιείται ως μέθοδος εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων. Αποτελεί τη πιο διαδεδομένη μέθοδο εμπλουτισμού

ενώ για ορισμένα είδη μεταλλευμάτων όπως τα μεικτά θειούχα χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά.

Αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια (Σταμπολιάδης, 2008):

- Την προετοιμασία του πολφού, που περιλαμβάνει τη μείωση του μεγέθους των κόκκων του μεταλλεύματος και την επιλογή των απαραίτητων αντιδραστηρίων,
- Την προοδοποίηση, όπου ο πολφός εισέρχεται στη κυψέλη της επίπλευσης και αναδεύεται με τα αντιδραστήρια,
- Την επίπλευση, όπου λαμβάνεται το επιπλεύσαν και παραμένον συμπύκνωμα και τέλος,
- Την ξήρανση των προϊόντων επίπλευσης (συμπύκνωμα και απόρριμμα).

Πιο αναλυτικά, σε μία δοκιμή επίπλευσης το λειοτριβημένο υλικό προοδοποιείται μέσα στο νερό, δηλαδή αλλάζουν οι επιφανειακές του ιδιότητες με τη βοήθεια κατάλληλων αντιδραστηρίων που ονομάζονται συλλέκτες. Πρόκειται για επιφανειακά ενεργές ουσίες και προστίθενται στο κελί της επίπλευσης με σκοπό να μετατρέψουν σε υδρόφοβες τις επιφάνειες των ορυκτών που θα θέλαμε να επιπλεύσουν. Ανάλογα με το πολικό τμήμα του μορίου τους διακρίνονται σε ανιονικούς και κατιονικούς ιονιζόμενους, μη ιονιζόμενους και σε επαμφοτερίζοντες συλλέκτες.

Οι μη ιονιζόμενοι συλλέκτες είναι συνήθως υγροί υδρογονάνθρακες όπως, το diesel ή διάφορα έλαια που δε διασπώνται στο νερό. Οι ανιονικοί συλλέκτες ιονίζονται και αποκτούν αρνητικό φορτίο στα υδατικά τους διαλύματα και διακρίνονται στους οξυδριλικούς (καρβοξυλικό, θειϊκό, σουλφονικό και φωσφορικό οξύ) και στους σουλφυδριλικούς (ξανθογονικά και διθειοφωσφορικά άλατα). Οι κατιονικοί συλλέκτες ιονίζονται και αποκτούν θετικό φορτίο στα υδατικά τους διαλύματα. Τέτοιοι συλλέκτες είναι οι αμίνες. Οι επαμφοτερίζοντες συλλέκτες ιονίζονται είτε σε κατιόν είτε σε ανιόν ανάλογα με το pH του διαλύματος. Οι συνηθέστεροι επαμφοτερίζοντες συλλέκτες είναι πρωτεΐνες που έχουν ένα καρβοξυλικό και ένα αμμωνιακό τμήμα (Σταμπολιάδης, 2008).

Στη συνέχεια διαβιβάζεται αέρας και τα τεμαχίδια που έχουν καταστεί υδρόφοβα προσκολλώνται στην επιφάνεια των φυσαλίδων. Το σύστημα τεμαχίδιο-φυσαλίδα ανέρχεται στην επιφάνεια του πολφού, όπου σχηματίζεται ένα στρώμα αφρού φορτισμένο με τεμαχίδια το οποίο απομακρύνεται είτε με μηχανικά μέσα είτε με υπερχειλίση (Σταμπολιάδης, 2008; Σαμμάς, 2018).

Στα αντιδραστήρια της επίπλευσης εκτός από τους συλλέκτες περιλαμβάνονται επίσης τα αφριστικά και τα ρυθμιστικά αντιδραστήρια. Τα αφριστικά αντιδραστήρια είναι επίσης επιφανειακά ενεργές ουσίες που χρησιμοποιούνται με σκοπό να ενισχύσουν τη δημιουργία αφρού, ώστε οι φορτωμένες με μέταλλευμα, ανερχόμενες φυσαλίδες να μη σπάσουν όταν φθάσουν στην επιφάνεια του πολφού.

Τα ρυθμιστικά αντιδραστήρια χρησιμοποιούνται για ποικίλους λόγους ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε επίπλευσης. Σε γενικές γραμμές διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Τα ενεργοποιητικά, όπως ο θειϊκός χαλκός και το θειούχο νάτριο, που στόχος τους είναι η καλύτερη απορρόφηση του συλλέκτη από την επιφάνεια του ορυκτού και η αύξηση της υδροφοβίας της. Τα καταβυθιστικά αντιδραστήρια βοηθούν στη διατήρηση της υδροφιλίας των επιφανειών των ορυκτών ή στη διασπορά των κόκκων του πολφού. Ορισμένα από τα κυριότερα καταβυθιστικά αντιδραστήρια είναι το κυανιούχο, το πυριτικό και το θειώδες νάτριο, τα χρωμικά και διχρωμικά και άλλα άλατα καθώς επίσης και κάποια οργανικά καταβυθιστικά όπως οι πολυγλυκο-αιθέρες, οι ταννίνες και οι πολυσακχαρίτες. Τέλος, ως ρυθμιστικά αντιδραστήρια του pH χρησιμοποιούνται ανόργανες βάσεις ή οξέα όπως, το υδροξείδιο του ασβεστίου, το ανθρακικό νάτριο, το καυστικό νάτριο και το θειικό οξύ.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου της επίπλευσης επηρεάζεται από ορισμένους παράγοντες. Ιδιαίτερη σημασία έχει το είδος του συλλέκτη και η προσθήκη του ανά τόνο μεταλλεύματος, όπως επίσης η ρύθμιση του pH, η ενεργοποίηση των χρήσιμων ορυκτών και η καταβύθιση των στεριών. Επίσης σημαντικός είναι ο ρόλος του μεγέθους της τροφοδοσίας, από το οποίο εξαρτάται άμεσα η αποδέσμευση των χρήσιμων ορυκτών και η δημιουργία λεπτομερών (Σταμπολιάδης, 2008).

Η μέθοδος της επίπλευσης μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε μείγμα τεμαχιδίων με την προϋπόθεση ότι αυτά έχουν μικρό μέγεθος ώστε να μπορούν να μεταφερθούν από τις ανερχόμενες φυσαλίδες. Η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από μέγεθος των τεμαχιδίων και από τη τυποποιημένη επαναληψιμότητα των σταδίων της επεξεργασίας των προϊόντων του κυκλώματος, μέχρι να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Χάρη στη μικρή κοκκομετρία του υλικού τροφοδοσίας και του μεγάλου βαθμού αποδέσμευσης σε αυτό το μέγεθος κόκκων, η επίπλευσης επιτυγχάνει συνήθως υψηλή ανάκτηση και απόδοση. Συνεπώς εφαρμόζεται ευρέως στα φτωχά μεταλλεύματα και ορυκτά. Επιπλέον εφαρμόζεται για

τη δημιουργία συμπυκνωμάτων με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χρήσιμο υλικό καθώς επίσης για την απομάκρυνση βλαπτικών συστατικών από σχετικά πλούσια μεταλλεύματα (Σαμμάς, 2018).

2.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση της επίπλευσης λατεριτών

Έως σήμερα η τεχνική της επίπλευσης δεν χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό σε νικέλιο των λατεριτικών κοιτασμάτων σε βιομηχανική κλίμακα (Quast et al., 2015).

Οι ερευνητές έχουν προσπαθήσει να βελτιώσουν την ανάκτηση νικελίου μέσω επίπλευσης διαφοροποιώντας είτε τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας ή και τις συνθήκες της επίπλευσης. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται αποτελέσματα των δοκιμών επίπλευσης λατεριτών οι οποίες αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 2.3: Σύνοψη των δοκιμών εμπλουτισμού λατεριτών σε νικέλιο με επίπλευση (Farrokhpay and Filippov, 2016).

Χώρα	Συνθήκες	% Ni στην τροφοδοσία	%Ni στο προϊόν (ανάκτηση %)	Βιβλιογραφική Αναφορά
Βραζιλία	Χρήση οκτανοδιόνης ως συλλέκτη	1,2%	1,4% (63%)	<u>Teoh et al., 1982</u>
Νέα Καληδονία	Micro-flotation του κλάσματος 53–74 μm με ποικίλους συλλέκτες.		Καθόλου η αμελητέος εμπλουτισμός	<u>Onodera et al., 1987</u>
Ινδία	Επίπλευση με χρήση ανιονικών συλλεκτών και πυριτικού νάτριου	0,6%	1,6% (60%)	<u>Rao and Charan, 1989</u>
Ινδία	Επίπλευση σε προϊόν απορροής κυκλώνων μεγέθους με χρήση κατιονικών συλλεκτών	0,8%	1,3% (86%)	<u>Rao and Charan, 1990</u>
Ινδία	Απόρριψη του χονδρόκοκκου κλάσματος στο οποίο εντοπίστηκε χαμηλή συγκέντρωση Ni, χρήση υδροκυκλώνων και υδροαυτοκαθαρισμός. Επίπλευση του υλικού απορροής του υδροκυκλώνα (underflow) με χρήση σουλφονικών αλάτων πετρελαίου, πυριτικού νατρίου και έλαιο πεύκου	0,5%	1% (82%)	<u>Rao et al., 1995</u>

Χώρα	Συνθήκες	% Ni στην τροφοδοσία	%Ni στο προϊόν (ανάκτηση %)	Βιβλιογραφική Αναφορά
Ινδία	Χρήση τύπου οξικού οξέως και άλατος νατρίου από τροποποιημένο καρβοξυλικό οξύ	0,5%	1% (70–80%)	<u>Rao and Sastri, 1996</u>
Ινδία	Χρήση διαφόρων αντιδραστηρίων κατά την επίπλευση συμπεριλαμβανομένων των υδροξυκινολίνη, διμεθυλ-γλυοξίμη, πυραζολόνη, τριαιθανολαμίνη και ελαϊκό νάτριο	0,5%	Ελαφρώς εμπλουτισμένο (40–60%)	<u>Mohanty et al., 2000</u>
Ακτή Ελεφαντοστού	Επίπλευση με τη χρήση πυριτικού νατρίου ως παράγοντα διασποράς	1,2%	6–8% (35–45%)	<u>Harris et al., 2013</u>
Αυστραλία	Ποικίλες τεχνικές προετοιμασίας του υλικού τροφοδοσίας πριν την εκτέλεση της επίπλευσης	1%	1,4% (43%)	<u>Quast et al., 2015c</u>

Φαίνεται ότι δεν επιτεύχθηκε σημαντικός εμπλουτισμός σε νικέλιο, συνεπώς η πρόκληση για την εξεύρεση αποτελεσματικών τρόπων επίπλευσης συνεχίζει να υπάρχει (Farrokhpay and Filippov, 2016).

Σε μελέτης τους οι Farrokhpay et al. (2018) επιχείρησαν τον εμπλουτισμό σε νικέλιο μέσω επίπλευσης τριών λατεριτικών μεταλλευμάτων που προέρχονται από την λειμωνιτική, την σαπρολιτική και την ενδιάμεση ζώνη λατεριτικών κοιτασμάτων. Κατάφεραν την αύξηση της ανάκτησης νικελίου από 40% σε 70% στο σαπρολιτικό δείγμα, χρησιμοποιώντας συλλέκτη υδροξαμικό οξύ σε πολφό επίπλευσης με pH = 10. Το ποσοστό αυτό είναι σημαντικά μεγαλύτερο από όσα έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία της επίπλευσης σαπρολιτικών λατεριτών.

Η αποτυχία του εμπλουτισμού σε νικέλιο των λατεριτικών κοιτασμάτων μέσω της μεθόδου της επίπλευσης πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει σε αυτά μία συγκεκριμένη φάση πλούσια σε νικέλιο. Αντίθετα, εντοπίζεται σε διάφορα μαλακά ορυκτά, τα οποία μπορούν εύκολα να λειοτριβηθούν σε μικρό μέγεθος τεμαχιδίων. Δεδομένου ότι η επίπλευση βασίζεται στην εκλεκτική προσρόφηση των συλλεκτών στις επιφάνειες συγκεκριμένων ορυκτών, το χαμηλό

ποσοστό νικελίου αλλά και η παρουσία λεπτομερών μέσα στη μάζα του μεταλλεύματος αποτρέπει την ανάκτηση ενός συμπυκνώματος υψηλής ποιότητας (David, 2008).

Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας δομείται σε δύο μέρη. Το πρώτο αφορά το χαρακτηρισμό του μεταλλεύματος μέσω θραύσης, κοσκίνισης και κοκκομετρικής ανάλυσης καθώς επίσης και μέσω της εφαρμογής των μεθόδων περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (X-Ray Diffraction ή XRD) και φθορισμού ακτίνων-X, (X-Ray Fluorescence Spectroscopy ή XRF) για την ορυκτολογική και την χημική ανάλυση του λατερίτη αντίστοιχα. Το δεύτερο μέρος αφορά τη μελέτη του εμπλουτισμού του μεταλλεύματος του λατερίτη με τη μέθοδο της επίπλευσης.

3.1 Χαρακτηρισμός υλικού

Το μετάλλευμα που μελετήθηκε είναι σαπρολιτικός λατερίτης από την περιοχή της Καστοριάς. Καθώς το μετάλλευμα που προμηθεύτηκε το Εργαστήριο Εμπλουτισμού είχε μέγεθος μικρότερο από 30 mm, υποβλήθηκε σε ορισμένες προπαρασκευαστικές διαδικασίες προκειμένου να λάβει την επιθυμητή κοκκομετρία για τον μετέπειτα εμπλουτισμό του.

3.1.1 Θραύση

Σε πρώτη φάση υποβλήθηκε σε θραύση σε σιαγονωτό (Σχήμα 3.1) και κωνικό σπαστήρα (Σχήμα 3.2) και στη συνέχεια σε κοσκίνιση με κόσκινο μεγέθους 1,18 mm. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε όσες φορές χρειάστηκε ώστε να παραχθεί στο επιθυμητό μέγεθος (-1,18 mm) επαρκής ποσότητα μεταλλεύματος (περίπου 20 kg) για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας.

Στην συνέχεια το μετάλλευμα ομογενοποιήθηκε και διαιρέθηκε σε 20 δείγματα (περίπου 1 kg έκαστο) με χρήση του δειγματολήπτη Jones (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.1: Ο σιαγονωτός σπαστήρας του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού.



Σχήμα 3.2: Ο κωνικός σπαστήρας του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού.



Σχήμα 3.3: Ο δειγματολήπτης Jones του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού.

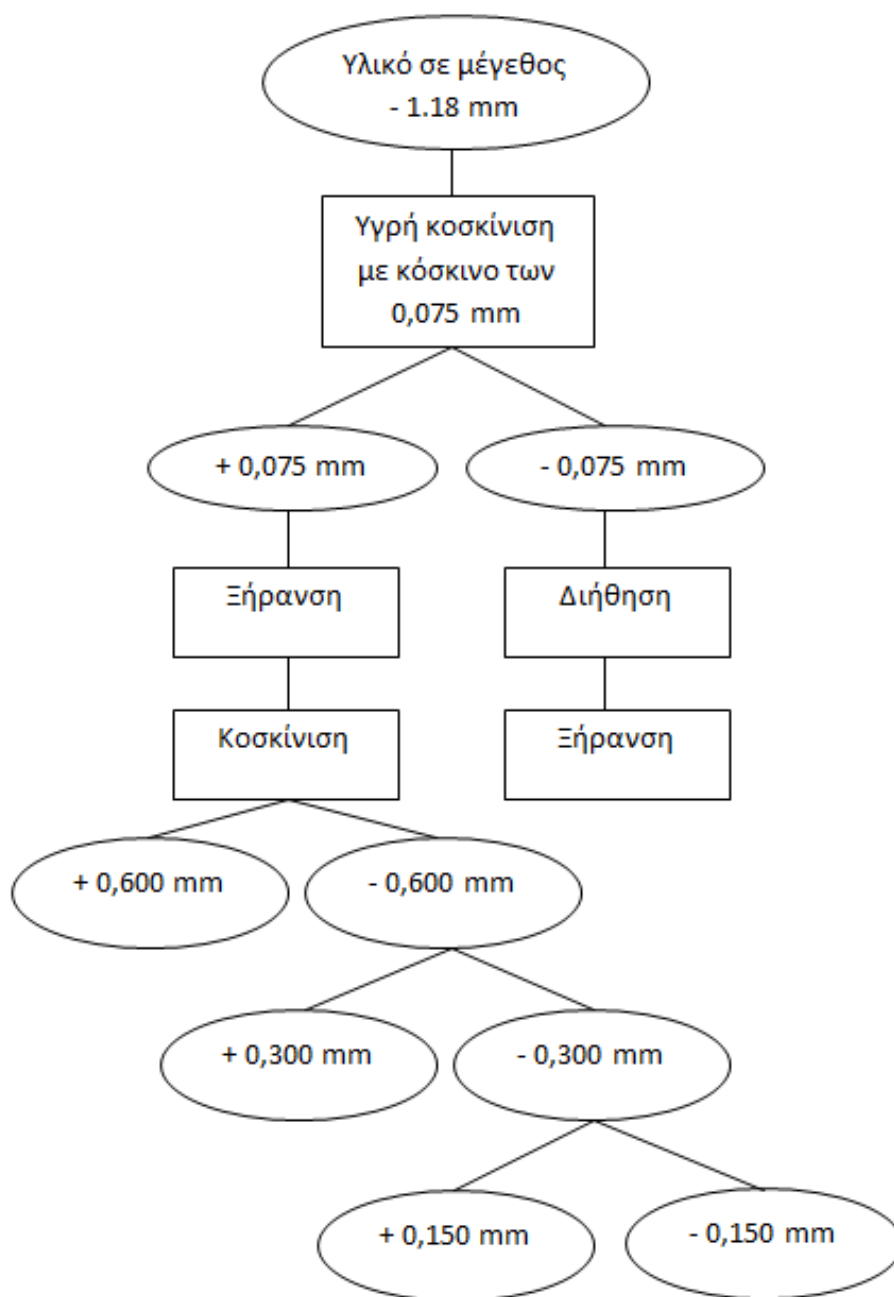
3.1.2 Κοσκίνιση

Στο επόμενο στάδιο προετοιμασίας του υλικού πραγματοποιήθηκε αρχικά υγρή και μετέπειτα ξηρή κοσκίνιση σε ένα τυχαίο δείγμα του. Πιο αναλυτικά, το μετάλλευμα υποβλήθηκε σε υγρή κοσκίνιση με κόσκινο μεγέθους 0,075 mm.

Το διερχόμενο υλικό (-0,075 mm) υποβλήθηκε σε διήθηση και στη συνέχεια σε ξήρανση. Το παραμένον υλικό (+0,075 mm) υποβλήθηκε σε ξηρή κοσκίνιση στη μηχανή κοσκίνισης του εργαστηρίου όπου χρησιμοποιήθηκαν τα κόσκινα των 0,600 mm, 0,300 mm, 0,150 mm και 0,075 mm. Τελικά, δημιουργήθηκαν τα εξής κοκκομετρικά κλάσματα:

- - 1,18 + 0,600 mm,
- - 0,600 + 0,300 mm,
- - 0,300 + 0,150 mm,
- - 0,150 + 0,075 και
- - 0,075.

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται σχηματικά οι διαδικασίες της υγρής και της ξηρής κοσκίνισης που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής των εργασιών κοσκίνισης.

Τα αποτελέσματα της κοσκίνισης, βάση των οποίων πραγματοποιήθηκε η κοκκομετρική ανάλυση του υλικού παρουσιάζονται στην Ενότητα 4.1.

3.1.3 Λειοτρίβηση

Στην δεύτερη φάση, πραγματοποιήθηκε η λειοτρίβηση του υλικού στον Εργαστηριακό σφαιρόμυλο (Σχήμα 3.5) του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου

Κρήτης. Ο συγκεκριμένος σφαιρόμυλος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, με την βοήθεια ενός συστήματος περιστρεφόμενων ράουλων.

Μία μικρή ποσότητα περίπου ίση με 300 g από ένα τυχαίο δείγμα υποβλήθηκε σε λειοτρίβηση. Στον Πίνακα 3.1 αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της λειοτρίβησης σχετικά με το σφαιρόμυλο, τις σφαίρες και το υλικό που λειοτριβήθηκε. Στο σφαιρόμυλο χρησιμοποιήθηκαν:

- 10 σφαίρες των 40 mm, συνολικού βάρους 2.620 g.
- 38 σφαίρες των 25,4 mm, συνολικού βάρους 2.529 g.
- 286 σφαίρες των 12,7 mm συνολικού βάρους 2.553 g.

Το υλικό λειοτριβήθηκε για χρόνους 5, 10, 15, 20 και 25 min.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά της λειοτρίβησης.

Σφαιρόμυλος	Εσωτερική διάμετρος, D (cm)	20,4
	Μήκος, L (cm)	16,6
	Όγκος, V (cm ³)	5,423
	Συχνότητα περιστροφής, (rpm)	66
	Κρίσιμη συχνότητα περιστροφής, Nc (rpm)	93,7
	Διάμετρος, d (mm)	40 25,4 12,7
Σφαίρες	Αριθμός	10, 38, 286
	Μάζα (kg)	2.619,8 2.529,3 2.552,7
	Πυκνότητα (g/cm ³)	7,85
	Πορώδες (%)	40
	Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών, J (%)	0,3
	Φαινόμενη πυκνότητα, ρ _b (g/cm ³)	1,37
Υλικό	Συντελεστής πλήρωσης υλικού στο σφαιρόμυλο, f _c (%)	0,04
	Συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό, U	0,33
	Μάζα (kg)	297.3



Σχήμα 3.5: Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού.

3.1.4 Κοκκομετρική ανάλυση

Έπειτα από τη διαδικασία της λειοτρίβησης, το προϊόν υποβλήθηκε σε κοκκομετρική ανάλυση στο κοκκομετρικό αναλυτή LASER τύπου Mastersizer S της Malvern, του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού. Ο αναλυτής είναι ένα σύστημα Laser He/Ne με ισχύ 2 mW. Το εύρος μεγεθών τεμαχίων που μετράει είναι 0,05 - 850 μm . Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στην εκτροπή των ακτίνων Laser, όταν αυτές προσπίπτουν σε κόκκους. Η γωνία εκτροπής εξαρτάται από το μέγεθος του τεμαχίου και συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο το μέγεθος, τόσο μικρότερη η γωνία και αντίστροφα (Πετράκης, 2004).

Γενικά, η μέθοδος των ακτίνων Laser παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού του μεγέθους κόκκων πολύ μικρής διαμέτρου με καλή ακρίβεια και παράλληλα απαλλάσσει από την ανάγκη χρήσης κοσκίνων μικρής διαμέτρου. Η διέλευση λεπτόκοκκου υλικού από κόσκινα μικρής διαμέτρου προκαλεί έμφραξη των οπών, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της κοσκίνισης.

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης του υλικού παρουσιάζονται στην Ενότητα 4.1.

3.1.5 Μέθοδος περιθλασιμετρίας ακτίνων – X

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης του υπό μελέτη υλικού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), με το περιθλασίμετρο τύπου D8-Advance της εταιρείας Bruker AXS, του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στη συγκεκριμένη τεχνική μετρούνται απευθείας οι γωνίες και οι εντάσεις των

ανακλάσεων των ακτίνων – X που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως του υπό εξέταση υλικού (Κωστάκης, 2005).

Το όργανο αποτελείται από τη μονάδα παραγωγής υψηλής τάσεως, τη λυχνία των ακτίνων – X, ένα γωνιόμετρο, τον απαριθμητή των ακτίνων – X με την ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής των κρούσεων και ακόμη τη μονάδα του μικροϋπολογιστή με τον οποίο το σύστημα διαχειρίζεται και αξιολογεί τα δεδομένα (Κωστάκης, 2005).

Μία ποσότητα δείγματος, περίπου ίση με 1 g, τοποθετείται με μορφή κόνεως στη κοιλότητα ενός πλαστικού ή μεταλλικού πλακιδίου, το οποίο στη συνέχεια τοποθετείται στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου. Το δείγμα βρίσκεται πάντα στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων – X με κάποια σταθερή γωνιακή ταχύτητα 2θ/min. Το επίπεδο του δείγματος περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα θ/min. Με αυτό τον τρόπο καταγράφεται η ακτινοβολία που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος, οι οποίοι βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων – X, ώστε να ισχύει σε κάποια ομάδα πλεγματικών επιπέδων hkl η εξίσωση του BRAGG (Κωστάκης, 2005)

3.1.6 Μέθοδος φασματομετρίας ακτίνων – X

Ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης του υπό μελέτη υλικού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της φασματομετρίας ακτίνων – X (XRF), με το φασματόμετρο τύπου Spectro Xepos της AMETEK του Εργαστηρίου Αναλυτικής και Περιβαλλοντικής Χημείας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η μέθοδος είναι μία από τις πλέον χρησιμοποιούμενες στην αναλυτική χημεία, καθώς είναι μη καταστροφική, γρήγορη και ακριβής και συνήθως δεν απαιτεί πολύπλοκη προετοιμασία. Το όργανο αποτελείται από λυχνία παραγωγής ακτίνων – X, τον δειγματοφορέα, τον ευθυγραμμιστή, τον αναλυτή κρύσταλλο, τον ανιχνευτή και το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής (Brouwer, 2010).

Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός ότι εάν ένα άτομο βομβαρδιστεί με ενέργεια μεγαλύτερη από εκείνη του δεσμού των ηλεκτρονίων του, τότε ηλεκτρόνια μετακινούνται από τις εσωτερικές στις εξωτερικές στοιβάδες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενές θέσεις οι οποίες καλύπτονται από ηλεκτρόνια που πέφτουν από τις εξωτερικές στοιβάδες. Ταυτόχρονα με τη μετάπτωση των ηλεκτρονίων και τη πλήρωση αυτών των θέσεων εκπέμπεται

ακτινοβολία X ενέργειας ίσης με τη διαφορά ενέργειας των δύο στοιβάδων (Περδικάτης και Πεντάρη, 2003).

Για τη διέγερση του δείγματος χρησιμοποιούνται ειδικές λυχνίες ακτινών – X ενέργειας πολλαπλάσιας από εκείνη που θέλει να διεγείρει ο ερευνητής. Αφού το δείγμα διεγερθεί εκπέμπει ακτίνες – X των στοιχείων που το αποτελούν. Σαρώνοντας μια συγκεκριμένη περιοχή 2θ με το γωνιόμετρο του φασματόμετρου, παρατηρούνται ανακλάσεις, εφόσον πληρούται η εξίσωση του Bragg. Στη συνέχεια, λύνοντας την εξίσωση αυτή ως προς λ, (2d: σταθερό, θ: μετράται) προσδιορίζεται το αντίστοιχο χημικό στοιχείο (Περδικάτης και Πεντάρη, 2003).

3.1.7 Απώλεια πύρωσης

Η απώλεια πύρωσης (LOI) είναι μια δοκιμή που έχει στόχο τον προσδιορισμό των πτητικών συστατικών (H₂O, H₂S, S, CO₂, CO κ.λπ.) των πετρωμάτων ή εδάφους. Το νερό εμπεριέχεται είτε σαν προσροφημένο, είτε στην κρυσταλλική δομή του ορυκτού. Αποτελεί μια κοινή μέθοδο προσδιορισμού του περιεχομένου σε οργανικό ή ανθρακικό υλικό σε πετρώματα ή ιζήματα.

Μία μικρή ποσότητα του υπό μελέτη υλικού τοποθετείται σε χωνευτήριο γνωστής μάζας και καταγράφεται η μάζα τους. Στη συνέχεια μεταφέρεται σε κλίβανο μέσων θερμοκρασιών και παραμένει στους 110 °C ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία. Μετά το πέρας της απαραίτητης ώρας, καταγράφεται το βάρος του και μεταφέρεται σε κλίβανο υψηλών θερμοκρασιών όπου αναπτύσσεται θερμοκρασία 1050 °C. Ανάλογα με το υλικό, ο ερευνητής έχει τη δυνατότητα να επιλέξει διαφορετική θερμοκρασία πύρωσης. Έπειτα από το απαραίτητο χρονικό διάστημα και αφού η θερμοκρασία του έχει μειωθεί ζυγίζεται εκ νέου και καταγράφεται η απώλεια μάζας. Το ποσοστό της απώλειας πύρωσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση 1.

$$(W_{\text{χωνευτ.}+\text{δείγμα (110}^\circ\text{C)}} - W_{\text{χωνευτ.}+\text{δείγμα (1050}^\circ\text{C)}}) / (W_{\text{χωνευτ.}+\text{δείγμα}} - W_{\text{χωνευτ.}}) * 100 \quad [1]$$

Όπου:

- $W_{\text{χωνευτ.}+\text{δείγμα (110}^\circ\text{C)}}$ η συνολική μάζα του χωνευτηρίου και του υλικού έπειτα από τη θέρμανσή του στους 110 °C
- $W_{\text{χωνευτ.}+\text{δείγμα (>900}^\circ\text{C)}}$ η συνολική μάζα του χωνευτηρίου και του υλικού έπειτα από τη πύρωσή του.
- $W_{\text{χωνευτ.}+\text{δείγμα}} - W_{\text{χωνευτ.}}$ η μάζα του αρχικού υλικού

3.2 Επίπλευση

Έπειτα από την ολοκλήρωση των τεχνικών χαρακτηρισμού του μεταλλεύματος ακολούθησε η επίπλευσή του σε τρεις σειρές δοκιμών. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 20 δοκιμές.

3.2.1 Παρασκευή αντιδραστηρίων

Πριν την έναρξη της εργαστηριακής δοκιμής της επίπλευσης προετοιμάστηκαν τα διαλύματα των αντιδραστηρίων. Κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας της επίπλευσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συλλέκτες:

- Ελαϊκό οξύ,
- Δωδεκακυλαμίνη,
- Μεθοξυφαινόλη και
- Βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο.

Οι τέσσερις παραπάνω συλλέκτες αραιώθηκαν σε αλκοόλη και προστέθηκαν στο κελί της επίπλευσης σε τρεις διαφορετικές ποσότητες, για δόση 500 g/t μεταλλεύματος, 1.000 g/t μεταλλεύματος και 1.500 g/t μεταλλεύματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά συλλεκτών επίπλευσης.

Συλλέκτης	Μοριακό Βάρος (g/mol)	Διαλύτης	Δόση (ml)		
			500 g/t	1000 g/t	1500 g/t
Ελαϊκό οξύ	282,47	Αλκοόλη	7,5	15,0	22,5
Δωδεκακυλαμίνη	185,35	Αλκοόλη	1,5	3,0	4,5
Βρωμιούχο κετυλο- τριμεθυλ-αμμώνιο	364,45	Αλκοόλη	1,5	3,0	4,5
Μεθοξυφαινόλη	124,14	Αλκοόλη	1,5	3,0	4,5

Για τις ανάγκες της επίπλευσης χρησιμοποιήθηκε ως αφριστικό αντιδραστήριο MIBC (Methyl Isobutyl Carbinol), καθαρότητας 98% και πυκνότητας 0,802 g/ml, το οποίο αραιώθηκε σε 100 ml νερό. Έπειτα από υπολογισμούς προέκυψε ότι για δόση 30 g/t μεταλλεύματος αντιστοιχούν 0,45 ml διαλύματος MIBC. Αναλογικά, για δόση 60 g/t μεταλλεύματος αντιστοιχούν 0,90 ml διαλύματος MIBC.

Τέλος, για με τη ρύθμιση του pH στην επιθυμητή τιμή χρησιμοποιήθηκε υδροχλωρικό οξύ (HCl) ή ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3). Τα συγκεκριμένα αντιδραστήρια δεν χρησιμοποιήθηκαν σε σταθερή ποσότητα, αλλά σε κάθε δοκιμή η ποσότητα τους άλλαζε ανάλογα με το αρχικό pH του πολφού επίπλευσης.

3.2.2 Πρώτη σειρά δοκιμών – Επίδραση του pH

Κατά τη διάρκεια της πρώτης σειράς δοκιμών πραγματοποιήθηκαν δώδεκα δοκιμές (δοκιμές 1.1 έως 1.12), τρεις για κάθε συλλέκτη, κάθε μία από τις οποίες χαρακτηριζόταν από διαφορετικό pH (4,5, 7 και 9 ή 11). Το κελί της επίπλευσης σε κάθε δοκιμή συμπληρώθηκε με:

- 300 g μεταλλεύματος σαπρολιτικού λατερίτη,
- 1L νερό,
- Συλλέκτη σε δόση 500 g/t μεταλλεύματος (7,5 ml δ/τος για το ελαϊκό οξύ και 1,5 ml δ/τος για τους υπόλοιπους τρεις συλλέκτες),
- MIBC σε δόση 30 g/t μεταλλεύματος (0,45 ml δ/τος) και
- Κατάλληλη ποσότητα ρυθμιστικού του pH.

Η επίπλευση πραγματοποιήθηκε στη μηχανή Denver (Σχήμα 3.6) του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Το στάδιο της προοδοποίησης, δηλαδή της ανάμειξης του πολφού μεταλλεύματος με τα προστιθέμενα αντιδραστήρια διήρκησε σε όλες τις δοκιμές 7 min, ενώ το στάδιο της επίπλευσης και παραγωγής συμπυκνώματος 9 min.



Σχήμα 3.6: Μηχανή επίπλευσης τύπου Denver του εργαστηρίου.

Μετά το πέρας της επίπλευσης, το επιπλεύσαν και το παραμένον κλάσμα διηθήθηκε υπό κενό. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε φούρνο ξήρανσης και αμέσως μετά ζυγίστηκαν ώστε να υπολογιστεί η μάζα τους. Έπειτα πραγματοποιήθηκε περιθλασιμετρία και φασματομετρία ακτίνων – Χ για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής και της χημικής τους σύστασης.

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται το είδος του συλλέκτη, το αρχικό και τελικό pH του πολφού, το είδος και η ποσότητα του ρυθμιστικού pH και τέλος το βάρος (%) του παραμένοντος και του επιπλεύσαντος κλάσματος των 12 δοκιμών της πρώτης σειράς.

3.2.3 Δεύτερη σειρά δοκιμών – Επίδραση δόσης αντιδραστηρίων

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης σειράς δοκιμών πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές (δοκιμές 2.1 έως 2.4), μία για κάθε συλλέκτη. Σε αυτήν τη φάση επιλέχθηκε το pH των τεσσάρων αντιδραστηρίων που είχε δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα (υψηλότερη περιεκτικότητα νικελίου στο συμπύκνωμα) κατά την πρώτη σειρά δοκιμών.

Στη συγκεκριμένη σειρά δοκιμών, κάθε επίπλευση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια.

Στο πρώτο στάδιο, το κελί της επίπλευσης σε όλες τις δοκιμές πληρώθηκε με:

- 300 g μεταλλεύματος σαπρολιτικού λατερίτη,
- 1L νερό,
- Συλλέκτη σε δόση 1.000 g/t μεταλλεύματος (15 ml δ/τος για το ελαϊκό οξύ και 3 ml δ/τος για τους υπόλοιπους τρεις συλλέκτες),
- MIBC σε δόση 60 g/t μεταλλεύματος (0,9 ml δ/τος) και
- Κατάλληλη ποσότητα ρυθμιστικού του pH.

Η φάση της προοδοποίησης, και στις τέσσερις δοκιμές διήρκησε 7 min, ενώ εκείνη της επίπλευσης και παραγωγής συμπυκνώματος 9 min.

Αμέσως μετά τη λήψη του πρώτου επιπλεύσαντος κλάσματος ξεκινά το δεύτερο στάδιο. Στο κελί της επίπλευσης προστέθηκαν:

- Συλλέκτης σε δόση 1.500 g/t μεταλλεύματος (4,5 ml δ/τος) και
- MIBC σε δόση 60 g/t μεταλλεύματος (0,9 ml δ/τος).

Μετά το πέρας του απαραίτητου χρονικού διαστήματος για την προοδοποίηση και την επίπλευση του πολφού (7 και 9 min αντίστοιχα), λήφθηκε το δεύτερο επιπλεύσαν και το παραμένον κλάσμα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στις δοκιμές 2.1, 2.2 και 2.3 δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί το ιδανικό pH (11, 9 και 11 αντίστοιχα), ακόμη και μετά από τη προσθήκη μεγάλης ποσότητας ρυθμιστικού. Για αυτό το λόγο, η προσθήκη σταμάτησε όταν φάνηκε πως δεν θα μεταβληθεί περαιτέρω η τιμή του pH.

Ομοίως με τη πρώτη σειρά δοκιμών, μετά το πέρας της επίπλευσης, το επιπλεύσαν και το παραμένον κλάσμα διηθήθηκαν υπό κενό. Στη συνέχεια κάθε κλάσμα τοποθετήθηκε σε κλίβανο για τη ξήρανσή του και αμέσως μετά ζυγίστηκε ώστε να υπολογιστεί η μάζα του. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε περιθλασιμετρία και φασματομετρία ακτίνων – X για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής και της χημικής τους σύστασης αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζεται το είδος του συλλέκτη, το αρχικό και το τελικό pH του πολφού, το είδος και η ποσότητα του ρυθμιστικού pH και τέλος το βάρος (%) του παραμένοντος και των δύο επιπλευσάντων κλασμάτων των τεσσάρων δοκιμών της δεύτερης φάσης.

3.2.4 Τρίτη σειρά δοκιμών – Επίδραση Κοκκομετρίας

Το μετάλλευμα που χρησιμοποιήθηκε κατά την πρώτη και τη δεύτερη σειρά δοκιμών είχε υποβληθεί σε λειοτριβήση στον εργαστηριακό σφαιρόμυλο για 5 min ($d_{90}=121,9 \mu\text{m}$). Καθώς ο στόχος της τρίτης σειράς δοκιμών είναι να παρατηρηθεί η επίδραση της κοκκομετρίας του μεταλλεύματος στην ανάκτηση του νικελίου, σε αυτές τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε μετάλλευμα λειοτριβημένο για 10 min ($d_{90}=66,3 \mu\text{m}$) και για 20 min ($d_{90}=38,1 \mu\text{m}$).

Πιο αναλυτικά, κατά τη διάρκεια της τρίτης σειράς δοκιμών πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές (δοκιμές 3.1 έως 3.4). Στις πρώτες δύο (3.1 και 3.2) χρησιμοποιήθηκε ως συλλέκτης δωδεκακυλαμίνη και μετάλλευμα λειοτριβημένο για 10 min και για 20 min. Στις επόμενες δύο (3.3 και 3.4) χρησιμοποιήθηκε ως συλλέκτης βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο και μετάλλευμα λειοτριβημένο για 10 min και για 20 min.

Οι συγκεκριμένοι δύο συλλέκτες επιλέχθηκαν καθώς έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την περιεκτικότητα νικελίου στο συμπύκνωμα κατά τη δεύτερη σειρά δοκιμών.

Στο πρώτο στάδιο το κελί της επίπλευσης σε κάθε περίπτωση πληρώθηκε με:

- 300 g μεταλλεύματος σαπρολιτικού λατερίτη λειοτριβημένο για χρόνο 10 min ή 20 min,
- 1L νερό,
- Συλλέκτη σε δόση 1.000 g/t μεταλλεύματος (3 ml δ/τος),
- MIBC σε δόση 60 g/t μεταλλεύματος (0,9 ml δ/τος) και
- Κατάλληλη ποσότητα ρυθμιστικού του pH.

Ομοίως με τις προηγούμενες σειρές, η φάση της προοδοποίησης και στις τέσσερις δοκιμές διήρκεσε 7 min, ενώ εκείνη της επίπλευσης και παραγωγής συμπυκνώματος 9 min.

Αμέσως μετά τη λήψη του πρώτου επιπλεύσαντος κλάσματος ξεκινά το δεύτερο στάδιο. Στο κελί της επίπλευσης προστέθηκαν:

- Συλλέκτης σε δόση 1.500 g/t μεταλλεύματος (4,5 ml δ/τος) και
- MIBC σε δόση 60 g/t μεταλλεύματος (0,9 ml δ/τος).

Επαναλήφθηκε το στάδιο της προοδοποίησης και της επίπλευσης του πολφού (7 και 9 min αντίστοιχα), και λήφθηκε το δεύτερο επιπλεύσαν και το τελικό παραμένον κλάσμα. Τα τρία κλάσματα που προέκυψαν σε κάθε μία από τις παραπάνω τέσσερις δοκιμές υποβλήθηκαν σε διήθηση υπό κενό, ξήρανση σε κλίβανο, ζύγιση, περιθλασιμετρία και φασματομετρία ακτίνων – X για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής και της χημικής τους σύστασης αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζεται το είδος του συλλέκτη, το αρχικό και το τελικό pH του πολφού, το είδος και η ποσότητα του ρυθμιστικού pH που χρησιμοποιήθηκε και τέλος το βάρος (%) του παραμένοντος και των δύο επιπλευσάντων κλασμάτων των τεσσάρων δοκιμών της τρίτης φάσης.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται, αναλύονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν στις συνολικά 20 δοκιμές. Συγκεκριμένα πρόκειται για αποτελέσματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά των προϊόντων των δοκιμών επίπλευσης κατά τις τρεις σειρές δοκιμών, καθώς επίσης τα αποτελέσματα της χημικής και ορυκτολογικής ανάλυσης των συγκεκριμένων προϊόντων.

4.1 Χαρακτηρισμός αρχικού υλικού

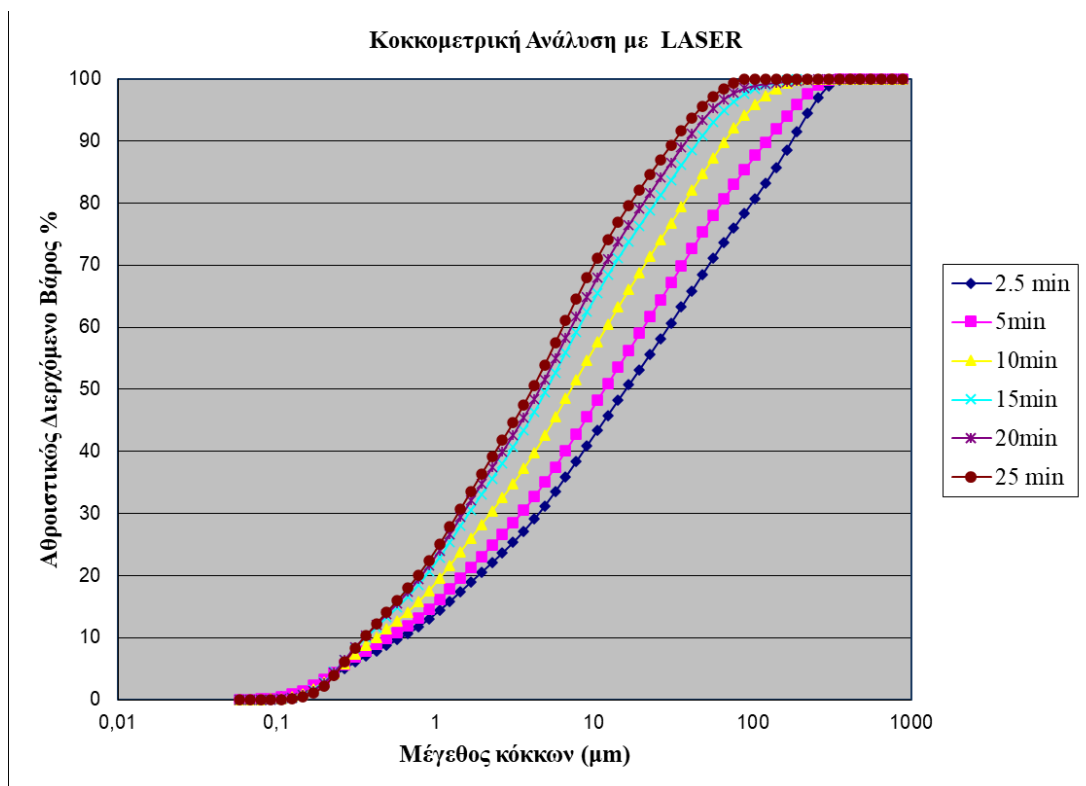
4.1.1 Κοκκομετρία αρχικού υλικού

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κοσκίνισης βάσει των οποίων προσδιορίστηκε η κοκκομετρική ανάλυση του αρχικού υλικού.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα κοσκίνισης.

Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%)
- 1,180 + 0,600	169,0	20,9	79,1
- 0,600 + 0,300	152,0	18,8	60,3
- 0,300 + 0,150	95,4	11,8	48,5
- 0,150 + 0,075	99,0	12,2	36,3
- 0,075	293,5	36,3	
Σύνολο	808,9	100	

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η καμπύλη της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος κόκκου, μετά από λειοτρίβηση του αρχικού υλικού σε συγκεκριμένους χρόνους όπως παραλήφθηκε έπειτα από τη χρήση κοκκομετρικού αναλυτή Laser.



Σχήμα 4.1: Καμπύλη αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος κόκκου.

Στο διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους % σε σχέση με το μέγεθος κόκκου των προϊόντων λειοτρίβησης του λατερίτη. Πραγματοποιήθηκαν έξι δοκιμές λειοτρίβησης και χρόνοι που επιλέχθηκαν ήταν 2,5 min, 5 min, 10 min, 15 min, 20 min και 25 min.

Επίσης, στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη d_{50} και d_{90} των προϊόντων λειοτρίβησης, για κάθε μία από τις έξι δοκιμές.

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, τα μεγέθη d_{50} και d_{90} των προϊόντων λειοτρίβησης μειώνονται. Χαρακτηριστικά το μέγεθος d_{90} μετά από 2,5 και 25 min λειοτρίβησης είναι 176,31 μm και 31,92 μm, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.2: Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών d_{50} και d_{90} για κάθε χρόνο λειοτρίβησης.

Χρόνος λειοτρίβησης (min)	Μέγεθος d_{50} (μm)	Μέγεθος d_{90} (μm)
2,5	15,85	176,31
5	11,57	121,92
10	7,13	66,26
15	5,01	45,42
20	4,52	38,08
25	4,07	31,92

4.1.2 Χημική και ορυκτολογική ανάλυση αρχικού υλικού

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του πρωτογενούς μεταλλεύματος, με φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων – X, έπειτα από την λειοτρίβησή του για 2.5 min.

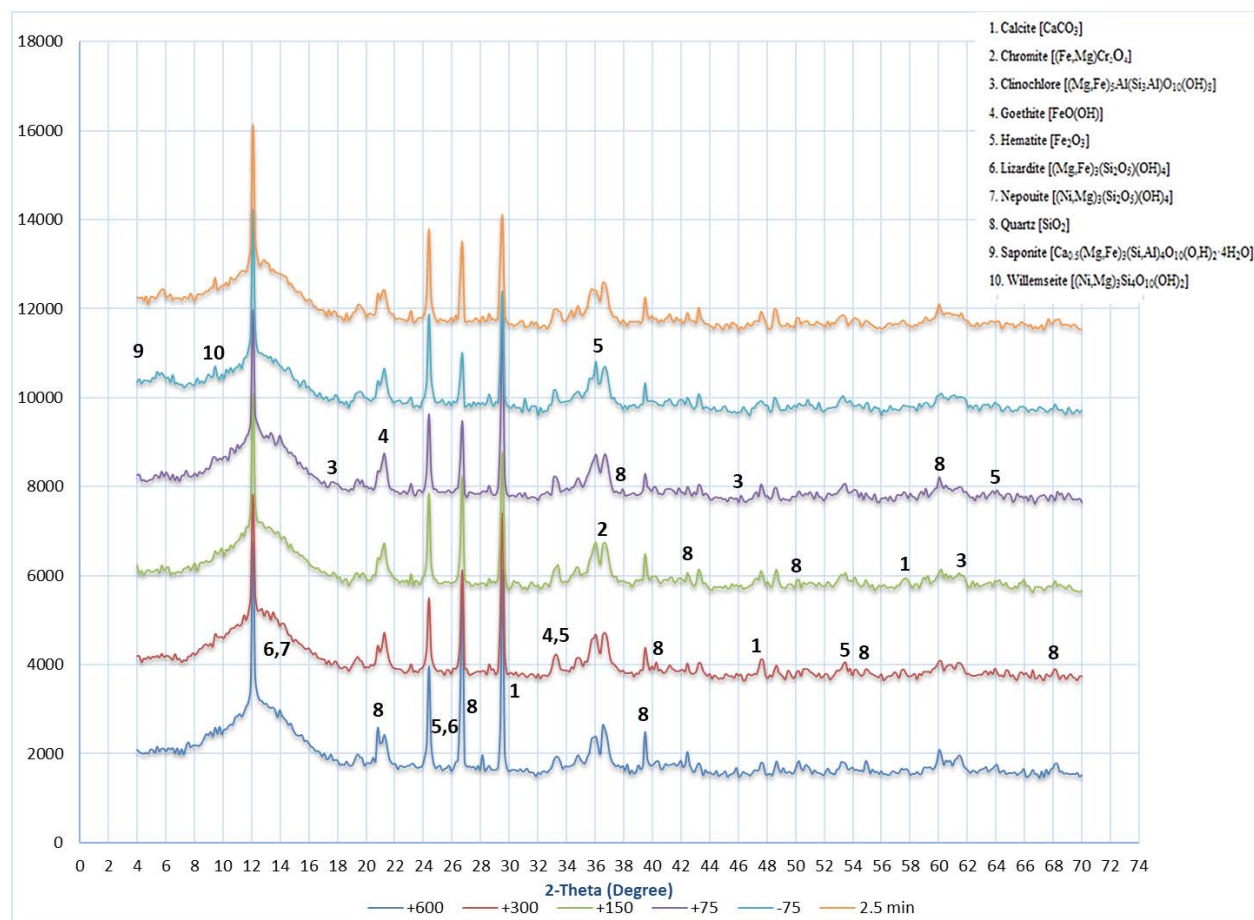
Πίνακας 4.3: Χημική ανάλυση XRF αρχικού μεταλλεύματος.

Μετάλλευμα λειοτριβημένο για 2.5 min	Fe_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	CaO (%)	Al_2O_3 (%)	Cr_2O_3 (%)	MgO (%)
	20,23	31,15	6,75	0,55	0,71	21,23
	NiO (%)	TiO_2 (%)	CoO (%)	MnO (%)	ZnO (%)	LOI
	1,49	0,027	0,050	0,32	0,013	17,45

Φαίνεται πως το μετάλλευμα είναι πλούσιο σε πυρίτιο (SiO_2 - 31,15 %), μαγνήσιο (MgO - 21,23 %) και σίδηρο (Fe_2O_3 - 20,23 %). Το νικέλιο με τη μορφή οξειδίου (NiO) βρέθηκε να είναι 1,49 %. Επίσης, εντοπίζονται μικρές ποσότητες τιτανίου, χρωμίου, κοβαλτίου, μαγγανίου και ψευδαργύρου.

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης των κοκκομετρικών κλασμάτων +0,600 mm, - 0,600 mm+0,300 mm, -0,300 mm+0,150 mm, -0,150 mm+0,075 mm, -0,75 mm καθώς και του

υλικού τροφοδοσίας της επίπλευσης (μετά από 2,5 min λειοτρίβησης) παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Ακτινοδιάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται οι καμπύλες των κλασμάτων +0,600 mm, -0,600 mm+0,300 mm, -0,300 mm+0,150 mm, -0,150 mm+0,075 mm, -0,075 mm και του υλικού έπειτα από 2,5 min λειοτρίβησης

Οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που εντοπίζονται στο μετάλλευμα είναι ο χαλαζίας (SiO_2), ο ασβεστίτης (CaCO_3), ο αιματίτης (Fe_2O_3), ο γκαιτίτης [$\text{FeO}(\text{OH})$] και ο λίζαρδίτης [$(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$]. Ο χρωμίτης [$(\text{Fe,Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$] και ο σαπωνίτης [$\text{Ca}_{0.5}(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{O,H})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] εμφανίζονται ως δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις. Οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που φέρουν νικέλιο στο μετάλλευμα είναι ο νεπουίτης [$(\text{Ni,Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] και ο βιλεμζεΐτης [$(\text{Ni,Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$].

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ότι η ορυκτολογική φάση του νεπουίτη συγκεντρώνεται εντονότερα στο κοκκομετρικό κλάσμα των +600 mm, ενώ στο κλάσμα των -0,075 mm συγκεντρώνεται εντονότερα η ορυκτολογική φάση του βιλεμζέϊτης.

4.2 Αποτελέσματα 1ης Σειράς Δοκιμών- Επίδρασης του pH

Η πειραματική διαδικασία της πρώτης σειράς δοκιμών περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 3.2.2.

4.2.1 Αποτελέσματα δοκιμών επίπλευσης

Η πρώτη σειρά των δοκιμών επίπλευσης (μελέτη της επίδρασης του pH) περιλαμβάνει 12 δοκιμές, τρεις για κάθε ένα από τα τέσσερα αντιδραστήρια. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται το είδος του συλλέκτη, το αρχικό και το τελικό pH του πολφού, το είδος και η ποσότητα του ρυθμιστικού pH που χρησιμοποιήθηκε και τέλος το βάρος (%) του παραμένοντος και επιπλεύσαντος κλάσματος των δώδεκα δοκιμών.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα πρώτης σειράς δοκιμών επίπλευσης.

1η Σειρά Δοκιμών						
Δοκιμή	Αντιδραστήριο	Αρχικό pH	Τελικό pH	Ρυθμιστικό pH (ml)	Βάρος παραμένον %	Βάρος επιπλεύσαν %
1.1	Ελαϊκό οξύ	8,45	7	HCl: 10,5	80,0	20,0
1.2		8,45	9	Na ₂ CO ₃ : 2	76,0	24,0
1.3		8,45	10,7	Na ₂ CO ₃ : 110	70,4	29,6
1.4	Δωδεκακυ- λαμίνη	8,8	4,5	HCl: 15,5	79,0	21,0
1.5		8,8	7	HCl: 13,5	82,3	17,7
1.6		8,8	9	Na ₂ CO ₃ : 110	78,1	21,9
1.7	Βρωμιούχο κετυλο- τριμεθυλ- αμμώνιο	8,55	7	HCl: 14	79,8	20,2
1.8		8,55	9	Na ₂ CO ₃ : 2,5	81,1	18,9
1.9		8,55	4,5	HCl: 21	81,1	18,9
1.10	Μεθοξυφαινόλη	8,65	7	HCl: 14	81,0	19,0
1.11		8,65	9	Na ₂ CO ₃ : 2,5	86,8	13,2
1.12		8,65	11	Na ₂ CO ₃ : 120	85,4	14,6

4.2.2 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης

Το παραμένον και το επιπλεύσαν κλάσμα κάθε δοκιμής υποβλήθηκε σε χημική ανάλυση με την χρήση φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων Χ. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι περιεκτικότητες (%) των κύριων οξειδίων του επιπλεύσαντος και του παραμένοντος κλάσματος της πρώτης σειράς δοκιμών επίπλευσης με ελαϊκό οξύ και δωδεκακυλαμίνη (δοκιμές 1.1 έως 1.6). Επίσης, στον πίνακα αυτό παρουσιάζεται η χημική ανάλυση του αρχικού δείγματος (προϊόν

λειτουργίβησης για χρόνο 2,5 min). Ομοίως, στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πρώτης σειράς δοκιμών επίπλευσης για τους συλλέκτες βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο και μεθοξυφαινόλη (δοκιμές 1.7 έως 1.12). Επιπλέον, παρουσιάζεται η απώλεια πύρωσης (LOI) που προσδιορίστηκε με θέρμανση των προϊόντων στους 1050 °C για 3 ώρες.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης (Πίνακες 4.5 και 4.6), οι δοκιμές στις οποίες επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη διαφοροποίηση % της περιεκτικότητας σε νικέλιο μεταξύ των προϊόντων είναι οι 1.3, 1.6, 1.9 και 1.12. Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις των προϊόντων επίπλευσης των τεσσάρων αυτών δοκιμών. Το αρχικό δείγμα μεταλλεύματος, έπειτα από 2,5 min λειτουργίβησης εμφανίζει 1,49 % περιεκτικότητα σε NiO.

Βάσει των δεδομένων του Πίνακα 4.7, τα κύρια οξείδια στα δείγματα είναι το SiO₂ και το Fe₂O₃. Το επιπλεύσαν κλάσμα εμπλουτίζεται σε NiO, Al₂O₃ και CoO σε όλες τις δοκιμές και επιπλέον εμπλουτίζεται σε MgO και SiO₂ στις δοκιμές 1.6, 1.9 και 1.12.

Πιο αναλυτικά, η αύξηση του pH του πολφού επίπλευσης συνέβαλε στον εμπλουτισμό σε Ni στο επιπλεύσαν κλάσμα στις δοκιμές με συλλέκτες ελαϊκό οξύ (δοκιμή 1.3), δωδεκακυλαμίνη (δοκιμή 1.6) και μεθοξυφαινόλη (δοκιμή 1.12). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης το ποσοστό NiO στο επιπλεύσαν κλάσμα αντιστοιχεί σε 1,59 %, 1,61 % και 1,68% έναντι 1,45 %, 1,47 % και 1,51 % στο παραμένον κλάσμα κάθε συλλέκτη αντίστοιχα. Για την εκτίμηση της αύξησης της περιεκτικότητας σε νικέλιο στο επιπλεύσαν κλάσμα αυτών των δοκιμών σε σχέση με την περιεκτικότητα του αρχικού δείγματος (2,5 min) χρησιμοποιήθηκε ο Λόγος Εμπλουτισιμότητας (ER) (Σχέση 1).

$$ER = \frac{\text{Περιεκτικότητα σε NiO \% στο προϊόν}}{\text{Περιεκτικότητα σε NiO \% στην αρχική τροφοδοσία}} \quad [1]$$

Από τη χρήση της Σχέσης 2 εκτιμήθηκε ότι ο Λόγος Εμπλουτισιμότητας των δοκιμών 1.3, 1.6 και 1.12 είναι ίσος με 1,067, 1,080 και 1,127 αντίστοιχα.

Αντίθετα, η μείωση του pH του πολφού επίπλευσης στη δοκιμή με βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο (δοκιμή 1.9) φαίνεται ότι συνέβαλε στον εμπλουτισμό σε Ni στο επιπλεύσαν κλάσμα. Το επιπλεύσαν κλάσμα εμφανίζει 1,72 % περιεκτικότητα σε NiO ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για το παραμένον κλάσμα είναι 1,49 %. Ο Λόγος Εμπλουτισιμότητας της δοκιμής 1.9 είναι ίσος με 1,154.

Μεταξύ των τεσσάρων καλύτερων δοκιμών της πρώτης σειράς, στη δοκιμή 1.9 επιτεύχθηκε ο καλύτερος Λόγος Εμπλουτισιμότητας.

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζεται η ανάκτηση (%) των οξειδίων στα προϊόντα της επίπλευσης των βέλτιστων δοκιμών (1.3, 1.6, 1.9 και 1.12). Παρατηρείται ότι και στις τέσσερις δοκιμές το επιπλεύσαν κλάσμα εμπλουτίζεται σε οξείδια, μεταξύ των οποίων είναι και οξείδια άλλων σημαντικών μετάλλων όπως του χρωμίου, του τιτανίου και του κοβαλτίου (Cr_2O_3 , TiO και CoO)

Πίνακας 4.5: Χημική ανάλυση των προϊόντων επίπλευσης της πρώτης σειράς δοκιμών.

Συλλέκτης	Δοκιμή	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	NiO (%)	CoO (%)	LOI
	Αρχικό 2.5 min	20,23	31,15	6,75	0,55	0,71	21,23	1,49	0,050	17,45
Ελαϊκό οξύ	1.1 Παρ.	21,72	31,50	5,09	0,57	0,82	21,62	1,52	0,049	16,73
	1.1 Επιπλ.	18,23	29,10	10,23	0,58	0,40	18,99	1,49	0,050	20,56
	Σύνολο	21,02	31,02	6,12	0,57	0,73	21,09	1,52	0,049	
	1.2 Παρ.	22,24	30,08	6,20	0,51	0,92	21,58	1,52	0,050	16,50
	1.2 Επιπλ.	18,29	30,86	8,83	0,53	0,42	20,18	1,52	0,046	18,95
	Σύνολο	21,29	30,27	6,83	0,52	0,80	21,25	1,52	0,049	
	1.3 Παρ.	20,91	31,95	6,24	0,49	0,86	21,19	1,45	0,045	16,42
	1.3 Επιπλ.	19,81	30,81	7,39	0,54	0,48	21,13	1,59	0,051	17,80
	Σύνολο	20,58	31,61	6,58	0,51	0,74	21,17	1,49	0,047	
Δωδεκακυλαμίνη	1.4 Παρ.	21,13	32,35	5,50	0,56	0,79	22,39	1,50	0,050	15,33
	1.4 Επιπλ.	19,88	36,48	2,34	0,65	0,45	24,00	1,59	0,072	14,16
	Σύνολο	20,87	33,22	4,83	0,58	0,72	22,73	1,52	0,055	
	1.5 Παρ.	21,34	30,53	7,12	0,52	0,71	21,64	1,58	0,051	16,12
	1.5 Επιπλ.	20,04	33,81	5,27	0,60	0,48	21,61	1,66	0,053	16,09
	Σύνολο	21,11	31,11	6,79	0,53	0,67	21,63	1,59	0,052	
	1.6 Παρ.	22,14	29,62	7,73	0,52	0,97	20,85	1,47	0,044	16,26
	1.6 Επιπλ.	19,53	33,08	5,64	0,58	0,43	21,24	1,61	0,049	17,46
	Σύνολο	21,55	30,40	7,26	0,53	0,85	20,94	1,51	0,045	

Πίνακας 4.6: Χημική ανάλυση XRF των προϊόντων επίπλευσης της πρώτης σειράς δοκιμών (συνέχεια).

Συλλέκτης	Δοκιμή	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	NiO (%)	CoO (%)	LOI
	Αρχικό 2.5 min	20,23	31,15	6,75	0,55	0,71	21,23	1,49	0,050	17,45
Βρωμούχο κετυλο-τριμεθυλο- αμμώνιο	1.7 Παρ.	22,33	29,22	7,16	0,51	1,03	20,52	1,52	0,052	17,24
	1.7 Επιπλ.	20,08	33,05	5,56	0,57	0,47	21,31	1,64	0,048	16,89
	Σύνολο	21,88	30,00	6,84	0,52	0,91	20,68	1,55	0,051	
	1.8 Παρ.	22,12	28,07	7,86	0,50	1,04	19,97	1,54	0,047	18,46
	1.8 Επιπλ.	20,01	31,53	5,35	0,55	0,46	20,85	1,64	0,056	19,15
	Σύνολο	21,72	28,72	7,39	0,51	0,93	20,14	1,56	0,049	
	1.9 Παρ.	23,69	29,55	6,00	0,57	1,45	20,68	1,49	0,046	16,11
	1.9 Επιπλ.	21,09	34,61	2,52	0,60	0,52	22,70	1,72	0,051	15,78
	Σύνολο	23,20	30,50	5,34	0,57	1,27	21,06	1,53	0,047	
Μεθοξυφαινόλη	1.10 Παρ.	22,34	29,00	7,35	0,51	1,12	20,41	1,49	0,066	17,32
	1.10 Επιπλ.	20,39	32,40	5,31	0,59	0,45	21,25	1,66	0,071	17,47
	Σύνολο	21,97	29,64	6,96	0,52	0,99	20,57	1,52	0,067	
	1.11 Παρ.	22,90	28,03	7,69	0,50	1,25	20,13	1,52	0,048	14,44
	1.11 Επιπλ.	20,33	32,82	5,20	0,56	0,49	21,31	1,67	0,054	17,14
	Σύνολο	22,56	28,66	7,36	0,51	1,15	20,29	1,54	0,049	
	1.12 Παρ.	23,57	27,57	8,33	0,53	1,34	19,79	1,51	0,044	16,90
	1.12 Επιπλ.	20,74	32,06	5,63	0,60	0,49	21,09	1,68	0,056	17,26
	Σύνολο	23,16	28,22	7,93	0,54	1,22	19,98	1,54	0,046	

Πίνακας 4.7: Χημική ανάλυση των προϊόντων επίπλευσης των δοκιμών που απέδωσαν μεγαλύτερη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο μεταξύ των προϊόντων.

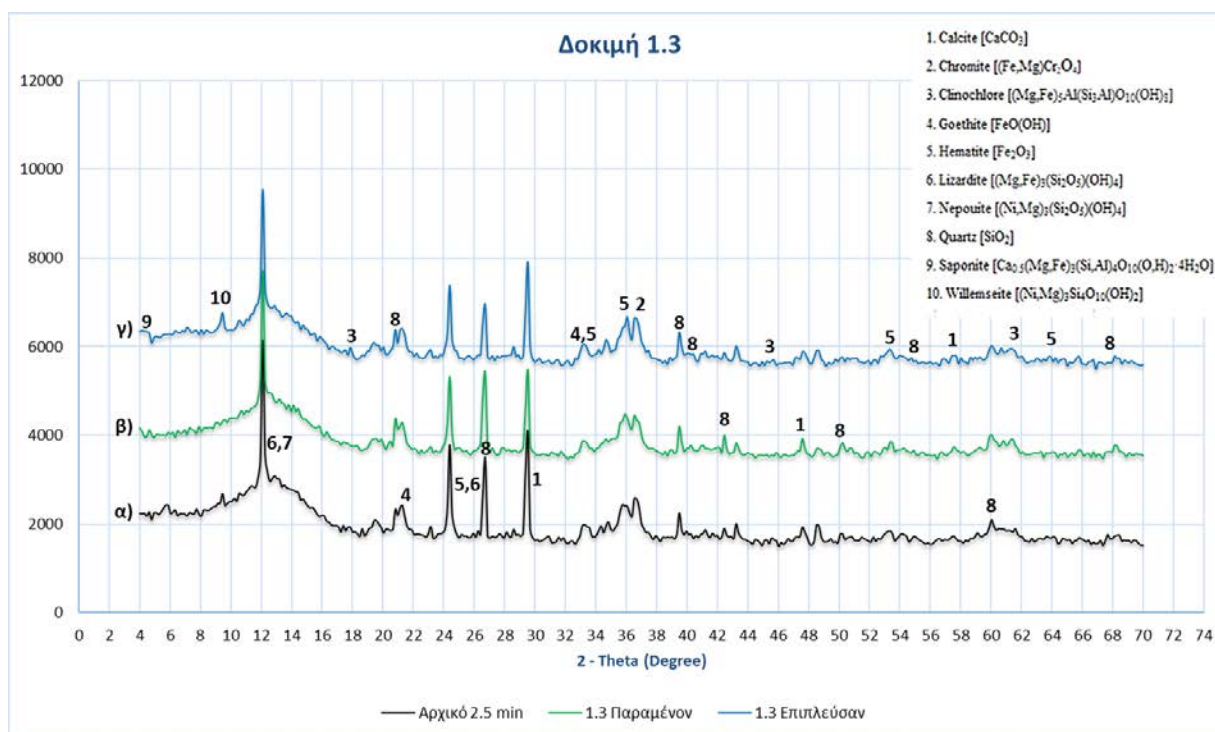
Συλλέκτης	Δοκιμή	Βάρος (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	NiO (%)	CoO (%)	LOI
	Αρχικό 2.5 min	100	20,23	31,15	6,75	0,55	0,71	21,23	1,49	0,050	17,45
Ελαϊκό οξύ	1.3 Παρ.	70,4	20,91	31,95	6,24	0,49	0,86	21,19	1,45	0,045	16,42
	1.3 Επιπλ.	29,6	19,81	30,81	7,39	0,54	0,48	21,13	1,59	0,051	17,80
	Σύνολο	100	20,58	31,61	6,58	0,51	0,74	21,17	1,49	0,047	
Δωδεκα-κυλαμίνη	1.6 Παρ.	78,1	22,14	29,62	7,73	0,52	0,97	20,85	1,47	0,044	16,26
	1.6 Επιπλ.	21,9	19,53	33,08	5,64	0,58	0,43	21,24	1,61	0,049	17,46
	Σύνολο	100	21,55	30,40	7,26	0,53	0,85	20,94	1,51	0,045	
Βρωμούχο κετυλο-τριμεθυλαμμώνιο	1.9 Παρ.	81,1	23,69	29,55	6,00	0,57	1,45	20,68	1,49	0,046	16,11
	1.9 Επιπλ.	18,9	21,09	34,61	2,52	0,60	0,52	22,70	1,72	0,051	15,78
	Σύνολο	100	23,20	30,50	5,34	0,57	1,27	21,06	1,53	0,047	
Μεθοξύ-φαινόλη	1.12 Παρ.	85,4	23,57	27,57	8,33	0,53	1,34	19,79	1,51	0,044	16,90
	1.12 Επιπλ.	14,6	20,74	32,06	5,63	0,60	0,49	21,09	1,68	0,056	17,26
	Σύνολο	100	23,16	28,22	7,93	0,54	1,22	19,98	1,54	0,046	

Πίνακας 4.8: Ανάκτηση (%) των οξειδίων στα προϊόντα επίπλευσης των βέλτιστων δοκιμών της πρώτης σειράς.

Συλλέκτης	Δοκιμή	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	NiO (%)	TiO ₂ (%)	CoO (%)
Ελαϊκό οξύ	1.3 Παρ.	71,5	71,2	66,8	68,2	81,1	70,5	68,5	68,4	67,8
	1.3 Επιπλ.	28,5	28,8	33,2	31,8	18,9	29,5	31,5	31,6	32,2
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Δωδεκα- κυλαμίνη	1.6 Παρ.	79,4	75,3	82,4	75,3	88,4	77,0	75,4	78,9	75,4
	1.6 Επιπλ.	20,6	24,7	17,6	24,7	11,6	23,0	24,6	21,1	24,6
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Βρωμιούχο κετυλο- τριμεθυλ-	1.9 Παρ.	82,8	78,6	91,1	80,2	92,3	79,7	78,9	83,7	79,5
	1.9 Επιπλ.	17,2	21,4	8,9	19,8	7,7	20,3	21,1	16,3	20,5
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Μεθοξύ- φαινόλη	1.12 Παρ.	87,0	83,5	89,7	83,8	94,1	84,6	84,1	85,6	82,2
	1.12 Επιπλ.	13,0	16,5	10,3	16,2	5,9	15,4	15,9	14,4	17,8
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

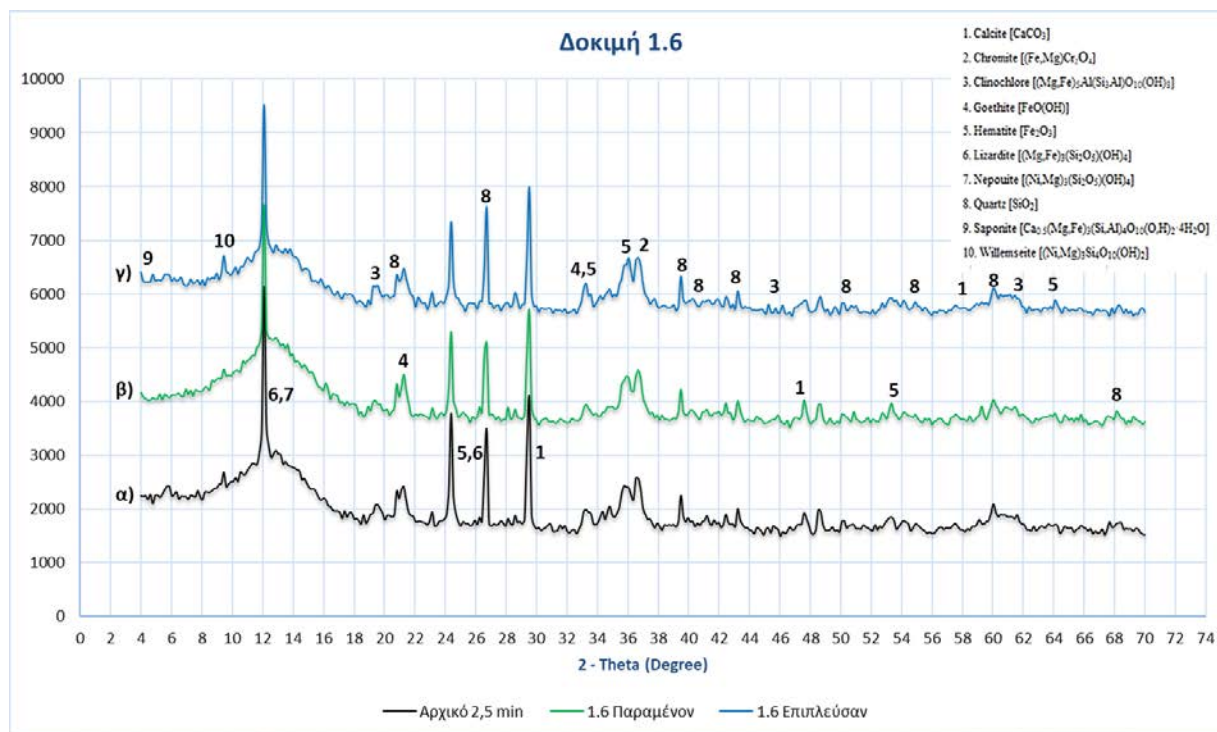
4.2.3 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης

Τα προϊόντα των τεσσάρων δοκιμών στις οποίες προέκυψε η μεγαλύτερη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο, δηλαδή οι δοκιμές 1.3, 1.6, 1.9 και 1.9, υποβλήθηκαν στην συνέχεια σε ορυκτολογική ανάλυση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3 έως 4.6 για κάθε μία δοκιμή αντίστοιχα.



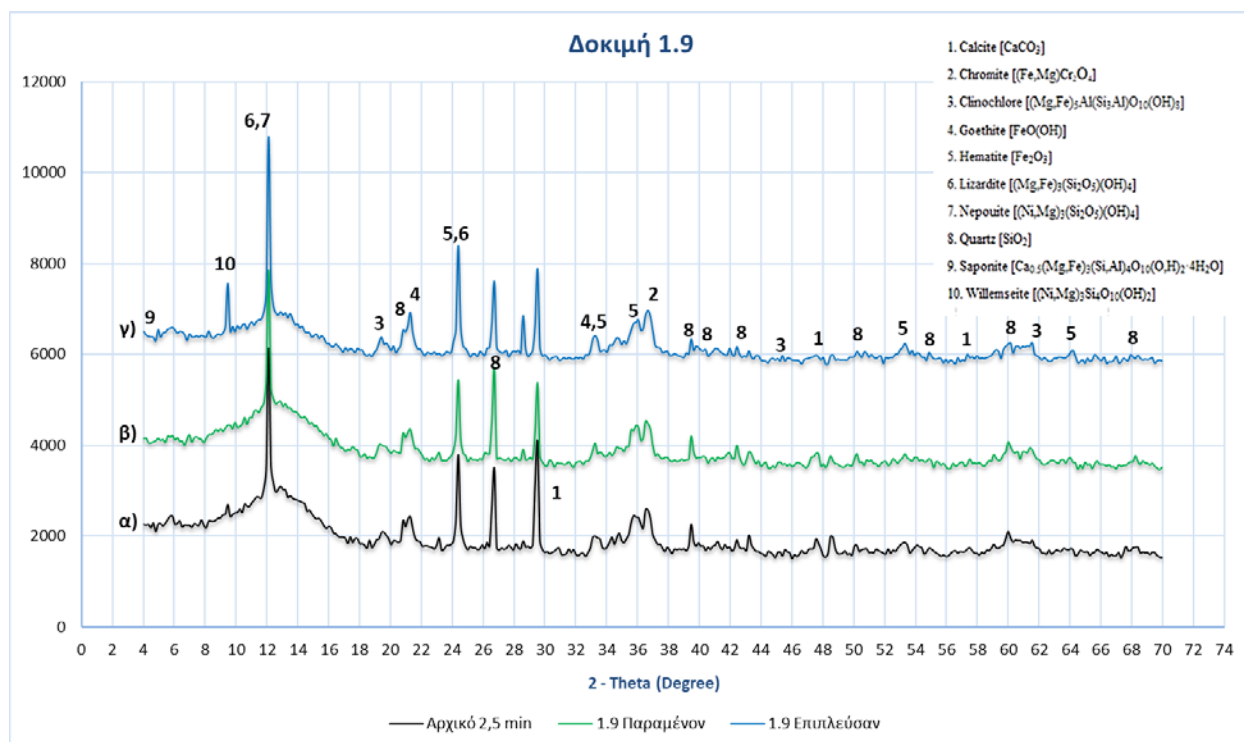
Σχήμα 4.3: Ακτινοδιαγράμματα XRD του α) αρχικού δείγματος έπειτα από 2,5 min λειοτρίβησης, β) παραμένοντος και γ) επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 1.3.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται τα ακτινοδιαγράμματα των ορυκτολογικών αναλύσεων XRD του αρχικού δείγματος καθώς και του παραμένοντος και του επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 1.3. Αναφορικά με τις ορυκτολογικές φάσεις που φέρουν νικέλιο, η φάση του νεπουίτη εντοπίζεται περισσότερο συγκεντρωμένη στο αρχικό δείγμα. Αντίθετα η φάση του βιλεμζέιτη μετά την επίπλευση συγκεντρώθηκε περισσότερο στο επιπλεύσαν κλάσμα.



Σχήμα 4.4: Ακτινοδιαγράμματα XRD του α) αρχικού δείγματος έπειτα από 2,5 min λειοτρίβησης, β) παραμένοντος και γ) επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 1.6.

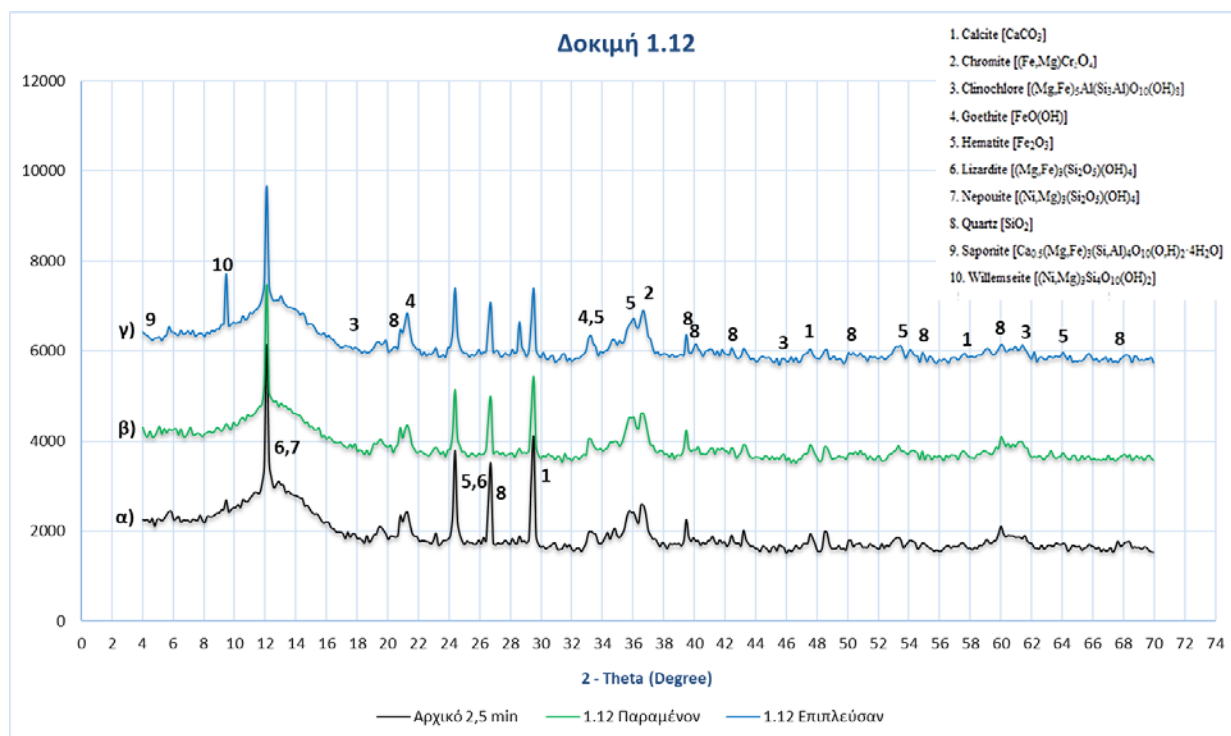
Παρόμοια χαρακτηριστικά με το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει το Σχήμα 4.4. Ομοίως οι ορυκτολογικές φάσεις του νεπουίτη και του βιλεμζεΐτη εμφανίζουν τις εντονότερες κορυφές στο αρχικό δείγμα και στο επιπλεύσαν κλάσμα της δοκιμής 1.6 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.5: Ακτινοδιαγράμματα XRD του α) αρχικού δείγματος έπειτα από 2,5 min λειοτρίβησης, β) παραμένοντος και γ) επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 1.9.

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης της δοκιμής 1.9 διαφέρουν αρκετά σε σχέση με εκείνα των δοκιμών 1.3 και 1.6. Σημειώνεται ότι στη δοκιμή 1.9 χρησιμοποιήθηκε βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο ως συλλέκτης σε πολφό με pH = 4,4.

Παρατηρείται ότι τόσο οι ορυκτολογικές φάσεις που φέρουν νικέλιο όσο και τα στεία συγκεντρώνονται περισσότερο στο επιπλεύσαν κλάσμα σε σχέση με το αρχικό δείγμα και το παραμένον κλάσμα.



Σχήμα 4.6: Ακτινοδιαγράμματα XRD του α) αρχικού δείγματος έπειτα από 2,5 min λειοτρίβησης, β) παραμένοντος και γ) επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 1.12.

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης της δοκιμής 1.12 είναι παρεμφερή με εκείνα των δοκιμών 1.3 (Σχήμα 4.3) και 1.6 (Σχήμα 4.4). Το ορυκτολογικό κλάσμα του νεπουίτη εμφανίζει την εντονότερη κορυφή του στο αρχικό δείγμα των 2,5 min λειοτρίβησης, ενώ το κλάσμα του βιλεμζείτη εμφανίζει την εντονότερη κορυφή του στο επιπλεύσαν κλάσμα. Καμία ορυκτολογική φάση δεν έχει έντονη απόκριση στο παραμένον κλάσμα.

4.3 Αποτελέσματα 2ης Σειράς Δοκιμών- Επίδραση δόσης αντιδραστηρίων

Η πειραματική διαδικασία της δεύτερης σειράς δοκιμών περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 3.2.3.

4.3.1 Αποτελέσματα δοκιμών επίπλευσης

Η δεύτερη σειρά των δοκιμών επίπλευσης (μελέτη της επίδρασης της δόσης αντιδραστηρίων) περιλαμβάνει 4 δοκιμές, μία για κάθε ένα από τα τέσσερα αντιδραστήρια που είχαν επιλεγεί από την πρώτη σειρά. Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζεται το είδος του συλλέκτη, το αρχικό και το τελικό pH του πολφού επίπλευσης, το είδος και η ποσότητα του ρυθμιστικού pH που χρησιμοποιήθηκε και τέλος το βάρος (%) του παραμένουστος και των δύο επιπλευσάντων κλασμάτων. Υπενθυμίζεται ότι σε κάθε δοκιμή έγιναν δύο επιπλεύσεις, η πρώτη με δόση συλλέκτη 1.000 g/t και η δεύτερη με δόση συλλέκτη 1.500 g/t όπως περιεγράφηκε στην Ενότητα 3.2.3. Τέλος σημειώνεται ότι η επιλογή του τελικού pH έγινε σύμφωνα με τα αποτελέσματα της πρώτης σειράς δοκιμών.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα δεύτερης σειράς δοκιμών επίπλευσης.

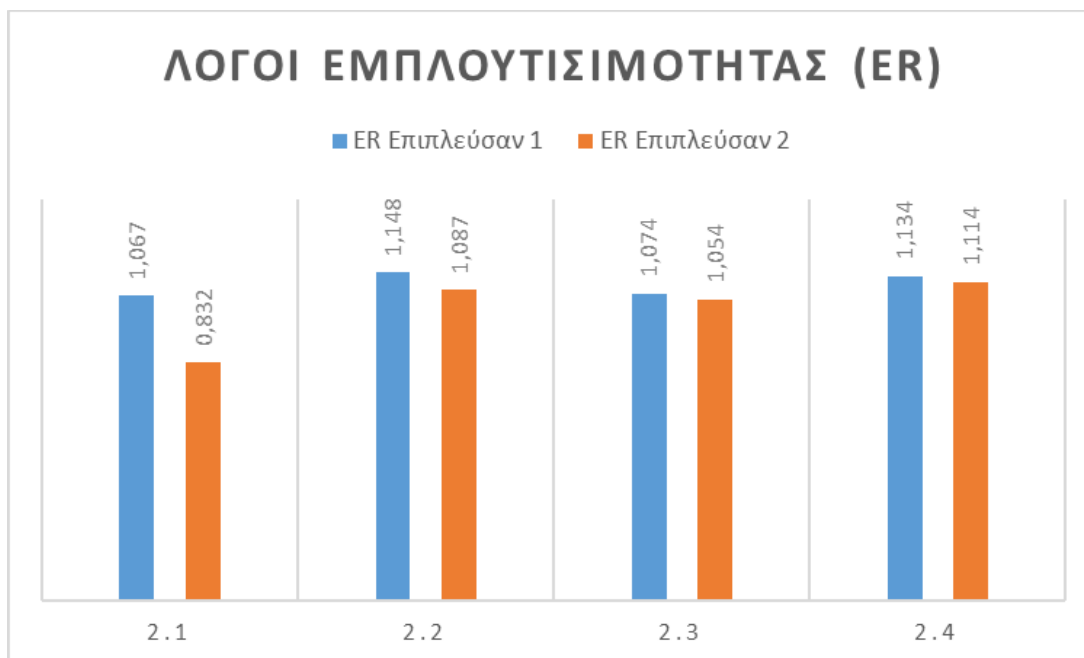
2η Σειρά Δοκιμών							
Δοκιμή	Αντιδραστήριο	Αρχικό pH	Τελικό pH	Ρυθμιστικό pH (ml)	Βάρος παραμένον %	Βάρος επιπλεύσαν 1 %	Βάρος επιπλεύσαν 2 %
2.1	Ελαϊκό οξύ	8,5	10,7	Na ₂ CO ₃ : 120	50,3	31,8	17,8
2.2	Δωδεκακυλαμίνη	8,8	9,2	Na ₂ CO ₃ : 0	73,5	10,5	15,9
2.3	Μεθοξυφαινόλη	8,8	4,5	HCl: 15	61,9	24,1	13,9
2.4	Βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλαμμώνιο	8,8	10,8	Na ₂ CO ₃ : 125	64,1	19,4	16,5

4.3.2 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης

Τα προϊόντα της επίπλευσης των τεσσάρων δοκιμών (δοκιμές 2.1 έως 2.4) υποβλήθηκαν σε φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων – Χ. Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζεται οι περιεκτικότητες (%) των διαφόρων οξειδίων και η απώλεια πύρωσης (LOI) στα δύο επιπλεύσαντα και στο παραμένον κλάσμα. Οι δοκιμές στις οποίες επιτεύχθηκε η μεγαλύτερη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο μεταξύ των προϊόντων είναι οι δοκιμές 2.2 και 2.4, όπου έγινε χρήση των συλλεκτών δωδεκακυλαμίνη και βρωμιούχου κετυλο-τριμεθυλ-αμμωνίου, αντίστοιχα.

Πιο αναλυτικά, στη δοκιμή 2.2 το ποσοστό NiO είναι ίσο με 1,45% στο παραμένον κλάσμα, 1,62% στο πρώτο επιπλεύσαν και 1,71% στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα. Τα δεδομένα αυτά συνεπάγονται λόγο εμπλουτισιμότητας (ER) ίσο με 1,148 στο πρώτο επιπλεύσαν κλάσμα και 1,087 στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία.

Στη δοκιμή 2.4 το ποσοστό NiO είναι ίσο με 1,51% στο παραμένον κλάσμα, 1,66% στο πρώτο επιπλεύσαν και 1,69% στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα. Συνεπώς ο λόγος εμπλουτισιμότητας (ER) είναι ίσος με 1,134 στο πρώτο επιπλεύσαν κλάσμα και 1,114 στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία. Η ανάκτηση (%) των διαφόρων οξειδίων στα προϊόντα των επιπλεύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11



Σχήμα 4.7: Λόγοι Εμπλουτισιμότητας (ER) σε NiO των επιπλευσάντων προϊόντων για τις δοκιμές 2.1 έως 2.4.

Πίνακας 4.10: Χημική ανάλυση των προϊόντων επίπλευσης της δεύτερης σειράς δοκιμών.

Συλλέκτης	Δοκιμή	Βάρος (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	NiO (%)	TiO ₂ (%)	CoO (%)	LOI
Ελαϊκό οξύ	2.1 Επιπλ. 1	31,8	21,38	30,92	7,41	0,54	0,70	21,23	1,59	0,03	0,048	12,72
	2.1 Επιπλ. 2	17,8	16,68	25,14	13,21	0,41	0,59	20,12	1,24	0,02	0,048	15,79
	2.1 Παρ.	50,3	23,31	34,14	3,53	0,56	1,08	22,70	1,55	0,03	0,044	22,15
	Σύνολο	100	21,51	31,51	6,49	0,53	0,87	21,77	1,51	0,03	0,046	
Δωδεκακυλαμίνη	2.2 Επιπλ. 1	10,6	19,30	35,55	3,47	0,66	0,35	21,87	1,71	0,03	0,068	17,39
	2.2 Επίπλ. 2	15,9	19,94	33,38	5,02	0,63	0,47	21,27	1,62	0,03	0,054	16,65
	2.2 Παρ.	73,5	21,33	28,41	8,50	0,44	0,92	21,11	1,45	0,03	0,051	17,23
	Σύνολο	100	20,90	29,95	7,41	0,49	0,79	21,22	1,50	0,03	0,053	
Μεθοξυφαινόλη	2.3 Επιπλ. 1	19,4	19,76	32,09	5,82	0,57	0,44	20,86	1,60	0,37	0,052	16,56
	2.3 Επίπλ. 2	16,5	19,71	30,77	6,97	0,50	0,47	21,54	1,57	0,03	0,053	18,09
	2.3 Παρ.	64,1	21,90	29,18	8,17	0,51	1,12	20,64	1,46	0,03	0,050	18,04
	Σύνολο	100	21,12	30,00	7,51	0,52	0,88	20,83	1,51	0,10	0,051	
Βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ- αμμώνιο	2.4 Επιπλ. 1	24,1	20,99	35,06	1,78	0,62	0,54	22,47	1,69	0,03	0,053	16,21
	2.4 Επίπλ. 2	13,9	20,89	33,56	1,83	0,59	0,51	22,01	1,66	0,04	0,067	16,27
	2.4 Παρ.		22,34	30,86	5,55	0,49	0,91	21,67	1,51	0,04	0,044	18,46
	Σύνολο	100	21,81	32,25	4,12	0,54	0,76	21,91	1,58	0,03	0,049	

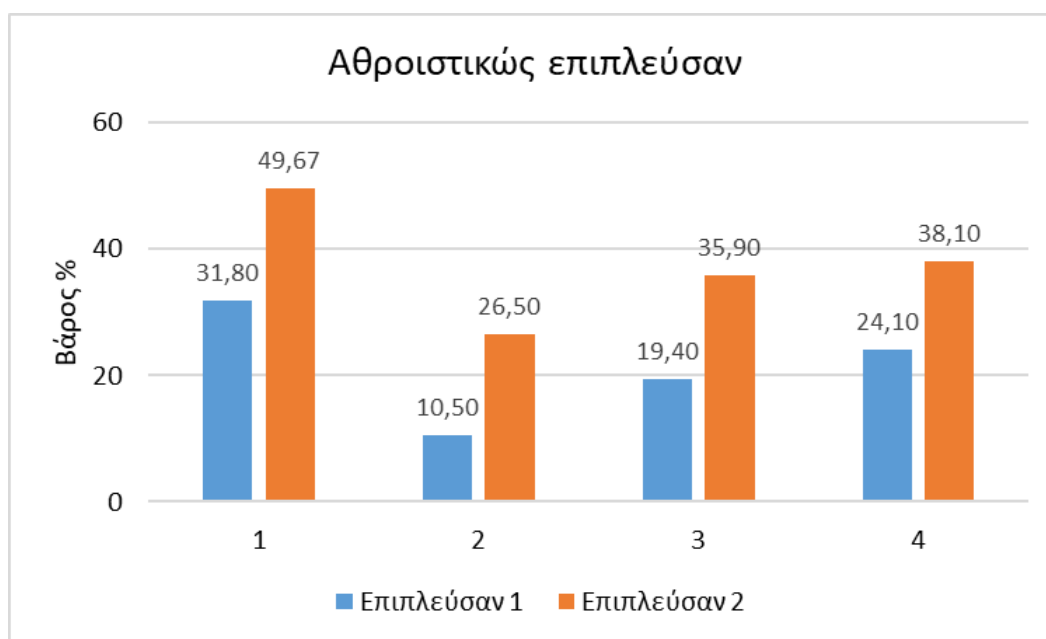
Πίνακας 4.11: Ανάκτηση (%) των οξειδίων στα προϊόντα της επίπλευσης των τεσσάρων δοκιμών της δεύτερης σειράς.

Συλλέκτης	Δοκιμή	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	NiO (%)	TiO ₂ (%)	CoO (%)
Ελαϊκό οξύ	2.1 Επιπλ. 1	31,6	31,2	36,3	32,7	25,4	31,0	33,7	30,9	33,1
	2.1 Επιπλ. 2	13,8	14,2	36,3	13,7	12,1	16,5	14,6	13,9	18,8
	2.1 Παρ.	54,5	54,5	27,4	53,6	62,4	52,5	51,7	55,2	48,1
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Δωδεκακυλαμίνη	2.2 Επιπλ. 1	9,7	12,5	4,9	14,2	4,8	10,9	12,0	10,5	13,5
	2.2 Επίπλ. 2	15,2	17,8	10,8	20,4	9,6	16,0	17,2	17,7	16,1
	2.2 Παρ.	75,1	69,7	84,3	65,4	85,7	73,1	70,8	71,8	70,3
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Μεθοξυφαινόλη	2.3 Επιπλ. 1	18,2	20,8	15,0	21,3	9,8	19,4	20,6	72,4	19,9
	2.3 Επίπλ. 2	15,4	16,9	15,3	15,8	8,8	17,1	17,2	5,4	17,3
	2.3 Παρ.	66,4	62,3	69,7	62,9	81,4	63,5	62,1	22,2	62,8
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Βρωμούχο κετυλο-τριμεθυλο- αμμώνιο	2.4 Επιπλ. 1	23,2	26,2	10,4	27,8	16,9	24,7	25,9	21,8	25,9
	2.4 Επίπλ. 2	13,3	14,5	6,2	15,4	9,4	14,0	14,7	14,3	19,0
	2.4 Παρ.	63,4	59,3	83,4	56,8	73,7	61,3	59,4	64,0	55,2
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Από τον συνδυασμό των δεδομένων του Πίνακα 4.10 και του Πίνακα 4.11 υπολογίστηκαν τα παρακάτω στοιχεία σχετικά με την αθροιστική ανάκτηση του NiO στα δύο επιπλεύσαντα κλάσματα και το αθροιστικό βάρος τους, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12 και στο Σχήμα 4.8.

Πίνακας 4.12: Αθροιστική ανάκτηση (%) NiO και αθροιστικό βάρος (%) των επιπλευσάντων κλασμάτων των δοκιμών 2.1 έως 2.4.

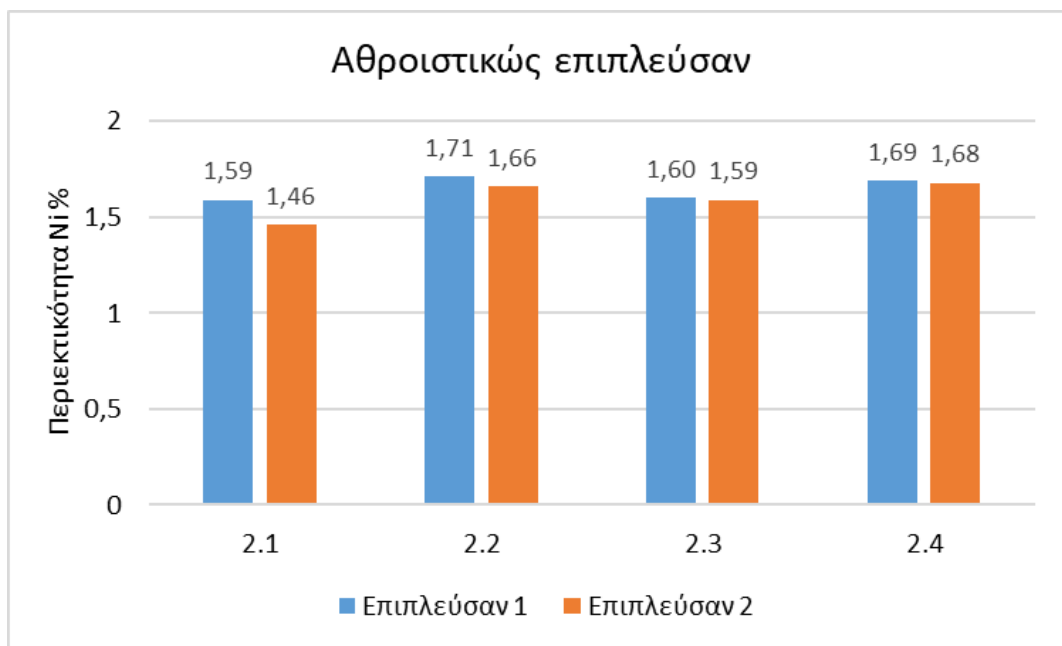
Δοκιμή	Αθροιστική ανάκτηση NiO %	Αθροιστικό βάρος %
2.1	48,3	49,7
2.2	29,2	26,5
2.3	37,8	35,9
2.4	40,6	38,1



Σχήμα 4.8: Αθροιστικά βάρη (%) των επιπλευσάντων προϊόντων των δοκιμών 2.1 έως 2.4.

Στο Σχήμα 4.8 παρατηρείται ότι το βάρος αυξάνεται έπειτα από την λήψη του δευτέρου επιπλεύσαντος προϊόντος, όπως ήταν αναμενόμενο. Στην δοκιμή 2.1 το βάρος αυξήθηκε από 31,8 % σε 49,7%, στην δοκιμή 2.2 αυξήθηκε από 10,5 % σε 26,5 %, στην δοκιμή 2.3 αυξήθηκε από 19,4 % σε 35,9 % και στην δοκιμή 2.4 αυξήθηκε από 24,1 % σε 38,1 %. Το μεγαλύτερο βάρος % στα επιπλεύσαντα προϊόντα παρατηρήθηκε στη δοκιμή 2.1 και το μικρότερο στην δοκιμή 2.2.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται με μορφή ραβδογράμματος οι αθροιστικές περιεκτικότητες σε NiO (%) των επιπλευσάντων προϊόντων των δοκιμών 2.1 έως 2.4. Η αθροιστική περιεκτικότητα NiO είναι σε όλες τις δοκιμές ελαφρώς μειωμένη σε σχέση με την περιεκτικότητα NiO του πρώτου επιπλεύσαντος προϊόντος. Οι δοκιμές στις οποίες επιτεύχθηκε η υψηλότερη αθροιστική περιεκτικότητα σε NiO είναι οι δοκιμές 2.2 και 2.4. Στην δοκιμή 2.2 μειώθηκε από 1,71 % σε 1,66 % αλλά το βάρος αυξήθηκε από 10,5 % σε 26,5%. Ομοίως, στην δοκιμή 2.4 η περιεκτικότητα μειώθηκε ελαφρώς από 1,69 % σε 1,68 % αλλά το βάρος αυξήθηκε από 24,1 % σε 38,1 %.

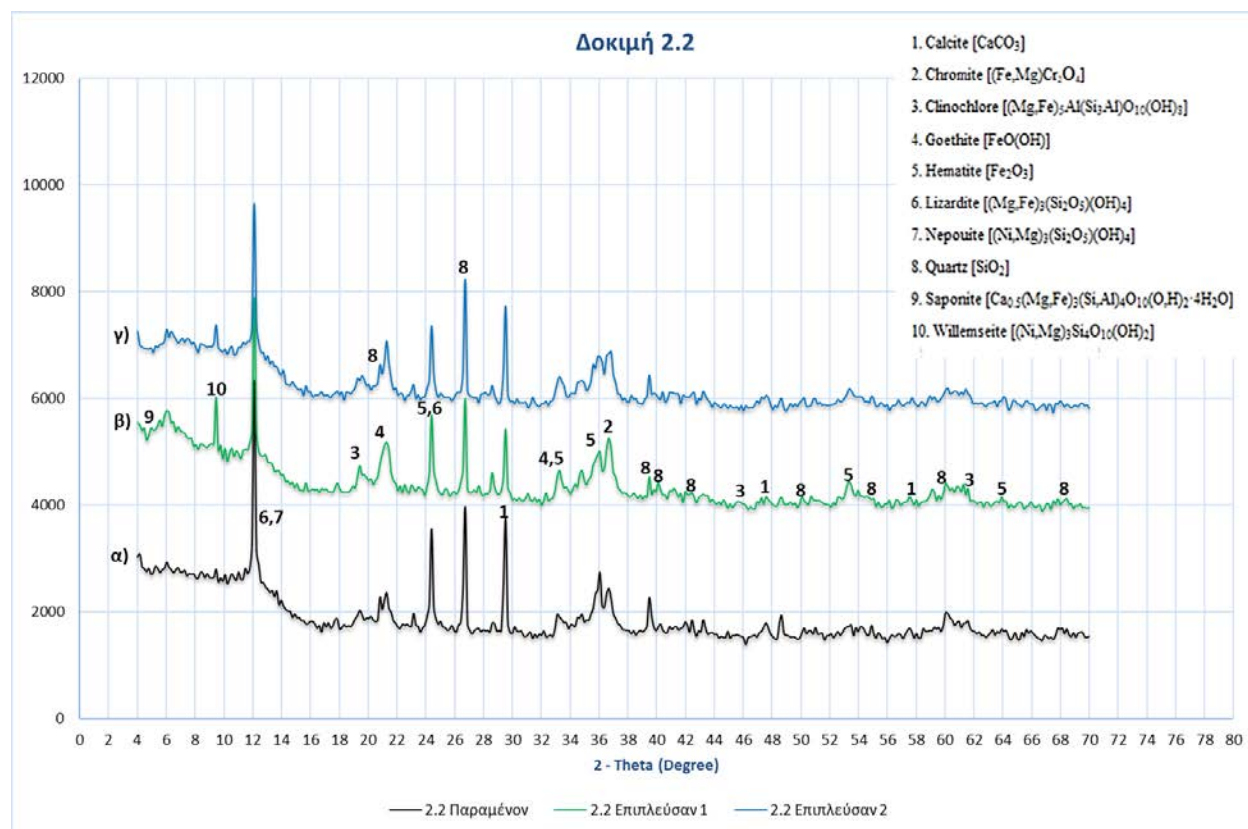


Σχήμα 4.9: Αθροιστικές περιεκτικότητες NiO (%) των επιπλευσάντων προϊόντων των δοκιμών 2.1 έως 2.4.

4.3.3 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης

Τα προϊόντα των δύο δοκιμών στις οποίες προέκυψε το καλύτερο ποσοστό ανάκτησης νικελίου στο επιπλεύσαν κλάσμα, δηλαδή των δοκιμών 2.2 και 2.4, υποβλήθηκαν στην συνέχεια σε

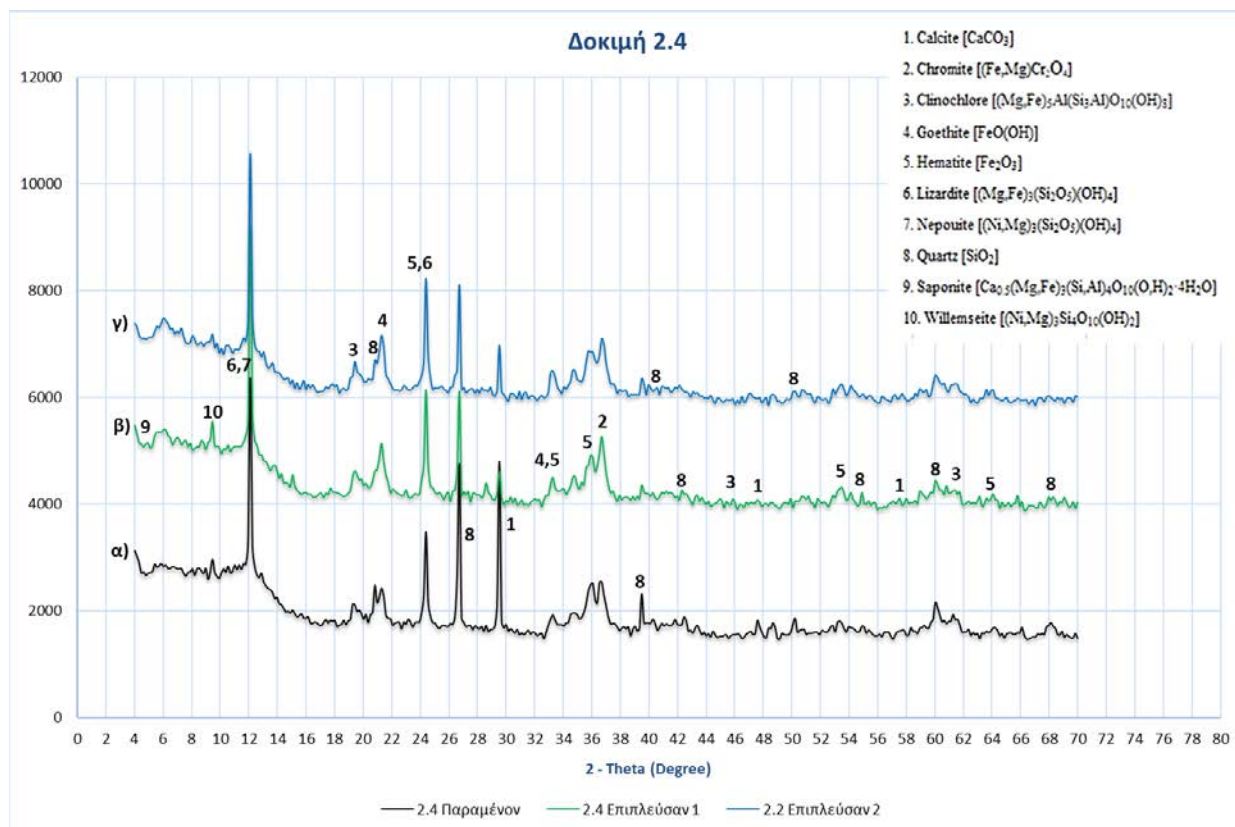
ορυκτολογική ανάλυση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με περιθλασιμετρία ακτίνων – X παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.10 και 4.11.



Σχήμα 4.10: Ακτινοδιάγραμμα του α) παραμένοντος, β) πρώτου επιπλεύσαντος και γ) δεύτερου επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 2.2.

Σχετικά με την δοκιμή 2.2 όπου έγινε χρήση δωδεκακυλαμίνης, φαίνεται ότι η ορυκτολογική φάση του νεπούιτη εμφανίζεται πολύ πιο έντονα στο παραμένον κλάσμα. Η ορυκτολογική φάση του βιλεμζεΐτη είναι σαφώς εντονότερη στο πρώτο επιπλεύσαν κλάσμα. Η συγκέντρωσή της και στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα είναι μεγαλύτερη από ότι στο παραμένον.

Σύμφωνα με το αποτέλεσμα της ορυκτολογικής ανάλυσης της δοκιμής 2.4 οι ορυκτολογικές φάσεις που φέρουν νικέλιο, δηλαδή ο νεπούιτης και ο βιλεμζεΐτης συγκεντρώνονται πιο έντονα στο πρώτο επιπλεύσαν κλάσμα.



Σχήμα 4.11: Ακτινοδιάγραμμα του α) παραμένοντος, β) πρώτου επιπλεύσαντος και γ) δεύτερου επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 2.4.

4.4 Αποτελέσματα 3ης Σειράς Δοκιμών- Επίδραση Κοκκομετρίας

Η πειραματική διαδικασία της τρίτης σειράς δοκιμών περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 3.2.4.

4.4.1 Αποτελέσματα δοκιμών επίπλευσης

Η τρίτη σειρά των δοκιμών επίπλευσης (μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας) περιλαμβάνει 4 δοκιμές. Δύο από αυτές πραγματοποιήθηκαν με συλλέκτη δωδεκακυλαμίνη και μετάλλευμα λειοτριβημένο για 10 min και 20 min (δοκιμές 3.1 και 3.2). Οι υπόλοιπες δοκιμές (δοκιμές 3.3 και 3.4) πραγματοποιήθηκαν με συλλέκτη βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο και μετάλλευμα λειοτριβημένο για 10 min και 20 min επίσης. Σημειώνεται ότι η επιλογή των συλλεκτών πραγματοποιήθηκε βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών της δεύτερης σειράς δοκιμών.

Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζεται το είδος του συλλέκτη, το αρχικό και το τελικό pH του πολφού, το είδος και η ποσότητα του ρυθμιστικού pH που χρησιμοποιήθηκε και τέλος το βάρος (%) του

παραμένοντος και των δύο επιπλευσάντων κλασμάτων των τεσσάρων δοκιμών της συγκριμένης φάσης.

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα τρίτης σειράς δοκιμών επίπλευσης.

3η Σειρά Δοκιμών								
Δοκιμή	Αντιδραστήριο	Χρόνος λειοτρίβησης (min)	Αρχικό pH	Τελικό pH	Ρυθμιστικό pH (ml)	Βάρος παρ. %	Βάρος επιπλ. 1 %	Βάρος επιπλ. 2 %
3.1	Δωδεκακυλαμίνη	10	8,5	9	NaCO ₃ : 1	52,5	34,2	13,2
3.2	Δωδεκακυλαμίνη	20	-	9	NaCO ₃ : 1,5	32,1	44,7	23,3
3.3	Βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλαμμώνιο	10	8,6	4,5	HCl: 40	50,5	31,5	18,0
3.4	Βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλαμμώνιο	20	8,3	4,5	HCl: 30	38,1	36,3	25,7

4.4.2 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης

Έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων – Χ στα προϊόντα των επιπλεύσεων, προσδιορίσθηκε η περιεκτικότητά (%) τους σε διάφορα οξείδια, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 4.14.

Οι δοκιμές στις οποίες επιτεύχθηκε η μεγαλύτερη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο είναι οι δοκιμές 3.1 και 3.2, όπου χρησιμοποιήθηκε ως συλλέκτης η δωδεκακυλαμίνη. Φαίνεται ότι τόσο στις δοκιμές με δωδεκακυλαμίνη όσο και στις δοκιμές με βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλαμμώνιο, η αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης του μεταλλεύματος από 10 min σε 20 min

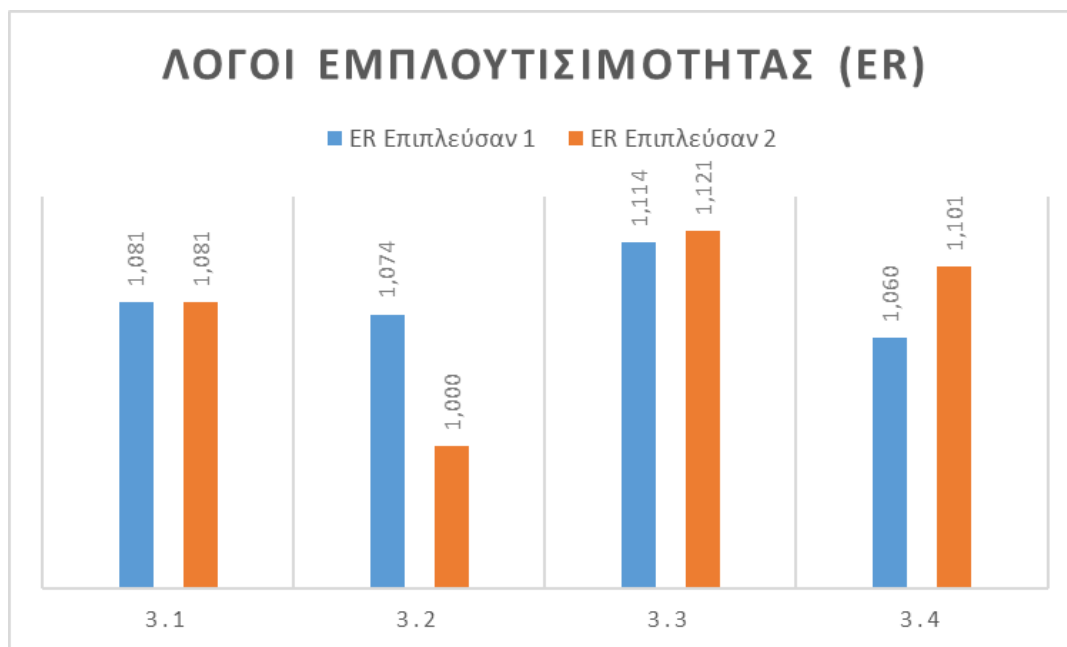
λειτουργήσε ευεργετικά στην αύξηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο στα επιπλεύσαντα κλάσματα.

Πιο αναλυτικά, συγκρίνοντας τις δοκιμές 3.1 και 3.2 προκύπτει ότι το ποσοστό NiO (Πίνακας 4.14) είναι ίσο με 1,61% τόσο στο πρώτο όσο και στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα και 1,32% στο παραμένον κλάσμα. Στην δοκιμή 3.2 το ποσοστό NiO προσδιορίσθηκε ίσο με 1,60% και 1,49% στο πρώτο και δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα αντίστοιχα και 1,27% στο παραμένον.

Αναφορικά με τη δοκιμή 3.3, το ποσοστό NiO είναι ίσο με 1,66% και 1,67% στο πρώτο και στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα και 1,41% στο παραμένον κλάσμα. Τέλος, στην δοκιμή 3.4 το ποσοστό NiO προσδιορίσθηκε ίσο με 1,58% και 1,64% στο πρώτο και δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα αντίστοιχα και 1,35% στο παραμένον.

Από τα στοιχεία αυτά συμπεραίνεται ότι η αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης του μεταλλεύματος από 10 min σε 20 min προκάλεσε αύξηση της ανάκτησης NiO στα επιπλεύσαντα κλάσματα και μείωση της περιεκτικότητας σε NiO στο παραμένον κλάσμα.

Σε σχέση με το αρχικό δείγμα (2,5 min), οι δοκιμές 3.3 και 3.4 απέδωσαν τον καλύτερο λόγο εμπλουτισιμότητας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Λόγοι Εμπλουτισιμότητας (ER) σε NiO των επιπλευσάντων προϊόντων για τις δοκιμές 3.1 έως 3.4.

Πίνακας 4.14: Χημική ανάλυση XRF των προϊόντων επίπλευσης της τρίτης σειράς δοκιμών.

Συλλέκτης	Δοκιμή	Βάρος (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	NiO (%)	TiO ₂ (%)	CoO (%)	LOI
Δωδεκακυλαμίνη (10 min)	3.1 Επίπλ. 1	34,2	20,86	34,00	5,36	0,57	0,53	21,50	1,61	0,04	0,052	15,79
	3.1 Επίπλ. 2	13,2	21,37	32,63	5,62	0,55	0,53	21,47	1,61	0,04	0,054	14,60
	3.1 Παρ.	52,5	22,19	27,72	9,23	0,44	1,37	20,90	1,32	0,03	0,044	15,52
	Σύνολο	100	21,62	30,52	7,43	0,50	0,97	21,18	1,46	0,03	0,048	
Δωδεκακυλαμίνη (20 min)	3.2 Επίπλ. 1	44,7	21,86	34,40	2,72	0,52	0,64	21,48	1,60	0,04	0,047	16,21
	3.2 Επίπλ. 2	23,3	21,47	31,31	6,93	0,50	0,72	20,83	1,49	0,04	0,048	15,86
	3.2 Παρ.	32,1	21,57	29,37	8,75	0,46	1,55	20,08	1,27	0,04	0,047	15,93
	Σύνολο	100	21,68	32,07	5,63	0,49	0,95	20,88	1,47	0,04	0,047	
Βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο (10 min)	3.3 Επίπλ. 1	31,5	22,91	37,46	0,53	0,57	0,69	22,97	1,66	0,05	0,062	14,90
	3.3 Επίπλ. 2	18,0	22,74	34,16	2,91	0,59	0,63	22,20	1,67	0,05	0,073	12,69
	3.3 Παρ.	50,5	23,14	30,96	5,99	0,52	1,48	21,02	1,41	0,04	0,043	14,53
	Σύνολο	100	23,00	33,58	3,72	0,55	1,08	21,84	1,54	0,05	0,055	
Βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο (20 min)	3.4 Επίπλ. 1	36,3	21,73	32,73	6,10	0,52	0,59	20,88	1,58	0,04	0,052	16,88
	3.4 Επίπλ. 2	25,7	22,83	34,42	3,54	0,55	0,64	22,24	1,64	0,05	0,051	14,60
	3.4 Παρ.	38,1	21,37	31,34	6,09	0,48	1,07	20,82	1,35	0,04	0,044	13,43
	Σύνολο	100	21,87	32,63	5,44	0,51	0,79	21,20	1,51	0,04	0,049	

Πίνακας 4.15: Ανάκτηση (%) των οξειδίων στα προϊόντα της επίπλευσης των τεσσάρων δοκιμών της τρίτης φάσης.

Συλλέκτης	Δοκιμή	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	NiO (%)	TiO ₂ (%)	CoO (%)
Δωδεκακαλαμίνη (10 min)	3.1 Επίπλ. 1	33,0	38,1	24,7	39,1	18,7	34,8	37,8	36,8	37,4
	3.1 Επίπλ. 2	13,1	14,2	10,0	14,5	7,2	13,4	14,6	15,0	14,9
	3.1 Παρ.	53,9	47,7	65,2	46,5	74,2	51,8	47,7	48,3	47,7
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Δωδεκακαλαμίνη (20 min)	3.2 Επίπλ. 1	45,0	47,9	21,6	46,8	30,0	45,9	48,7	45,4	44,7
	3.2 Επίπλ. 2	23,1	22,7	28,6	23,7	17,8	23,2	23,7	22,5	23,7
	3.2 Παρ.	31,9	29,4	49,8	29,5	52,2	30,8	27,7	32,2	31,7
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Βρωμούχο κετυλο-τριμεθυλο- αμμώνιο (10 min)	3.3 Επίπλ. 1	31,4	35,1	4,5	32,8	20,0	33,1	34,0	32,5	35,9
	3.3 Επίπλ. 2	17,8	18,3	14,1	19,3	10,5	18,3	19,6	18,7	24,2
	3.3 Παρ.	50,8	46,6	81,4	47,9	69,4	48,6	46,5	48,7	39,9
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Βρωμούχο κετυλο-τριμεθυλο- αμμώνιο (20 min)	3.4 Επίπλ. 1	36,1	36,4	40,7	36,9	27,4	35,7	38,1	33,6	39,1
	3.4 Επίπλ. 2	26,8	27,1	16,7	27,7	20,8	26,9	27,8	31,0	26,8
	3.4 Παρ.	37,2	36,5	42,6	35,5	51,9	37,4	34,0	35,5	34,1
	Σύνολο	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

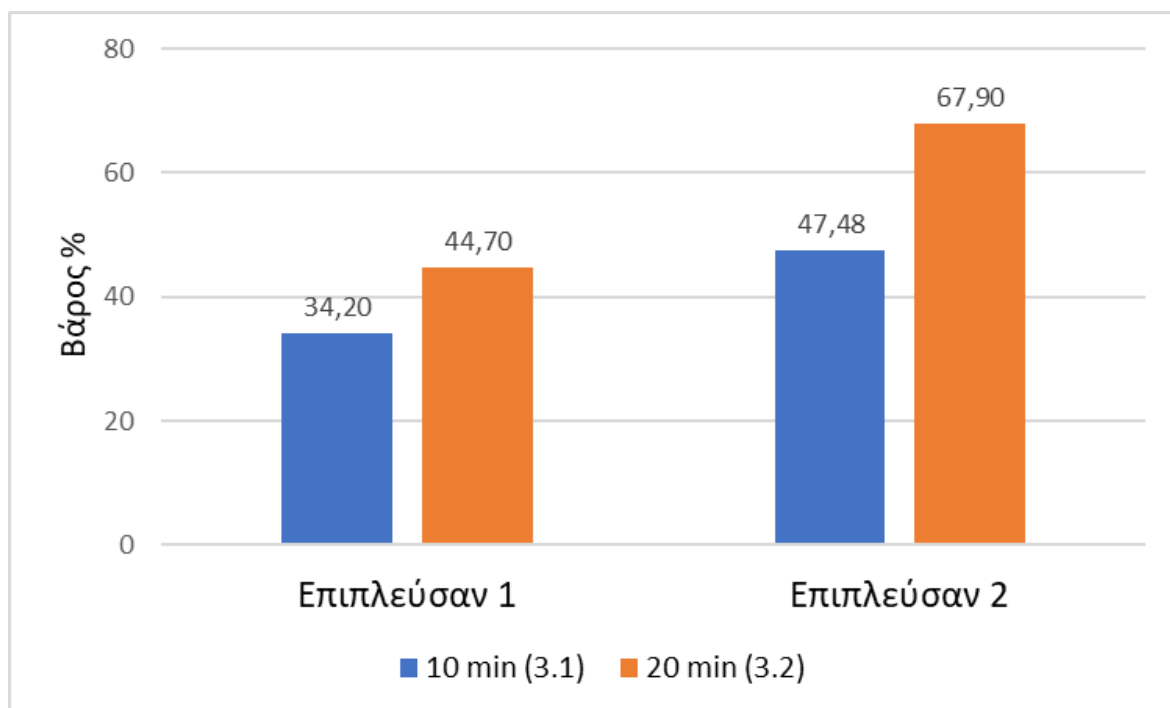
Από τον συνδυασμό των δεδομένων του Πίνακα 4.14 και 4.15 υπολογίστηκαν τα παρακάτω στοιχεία σχετικά με την αθροιστική ανάκτηση του NiO στα επιπλεύσαντα προϊόντα και το αθροιστικό βάρος τους, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.18 και στο Σχήμα 4.7. Στις δοκιμές 3.2 και 3.4 παρατηρείται η μεγαλύτερη αθροιστική ανάκτηση NiO.

Πίνακας 4.18: Αθροιστική ανάκτηση (%) NiO και αθροιστικό βάρος (%) των επιπλευσάντων κλασμάτων των δοκιμών 3.1 έως 3.4.

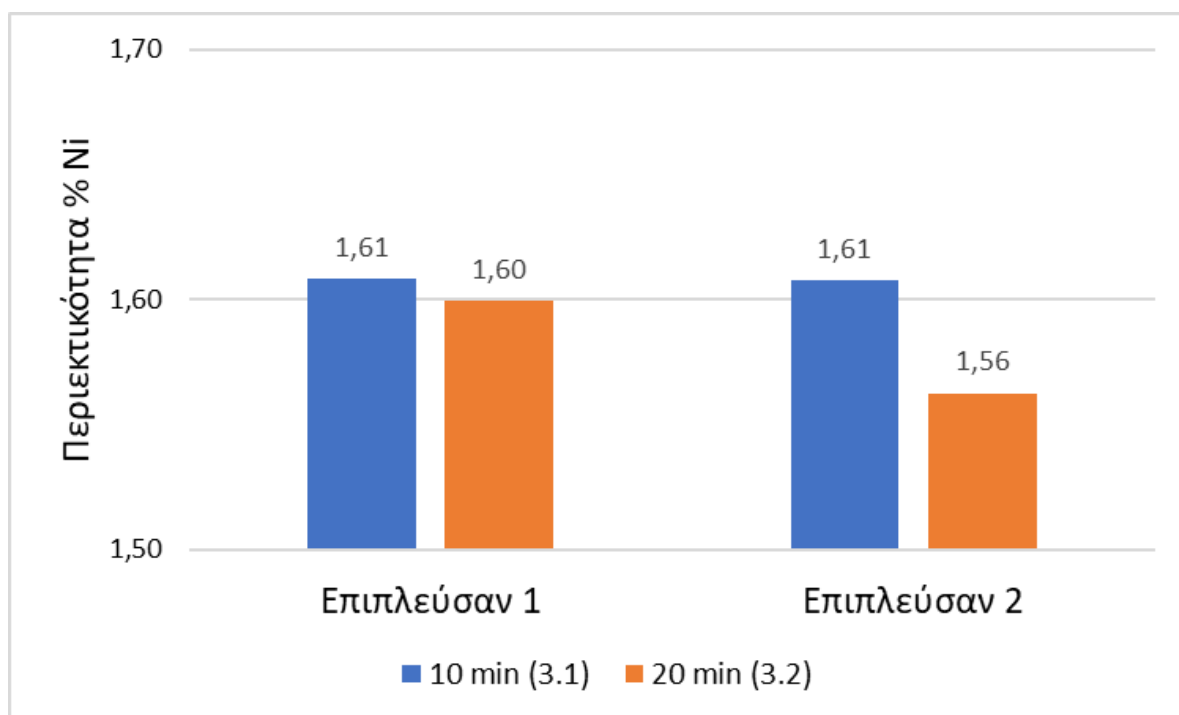
Δοκιμή	Αθροιστική ανάκτηση	
	NiO %	Αθροιστικό βάρος %
3.1	52,4	47,4
3.2	72,4	67,9
3.3	53,6	49,5
3.4	65,9	61,9

Στα Σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζονται με μορφή ραβδογράμματος το αθροιστικό βάρος και η αθροιστική περιεκτικότητα σε NiO (%) των δοκιμών 3.1 και 3.2. Ομοίως, στα Σχήματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζονται το αθροιστικό βάρος και η αθροιστική περιεκτικότητα σε Ni (%) των δοκιμών 3.3 και 3.4.

Οι δοκιμές 3.1 και 3.2 παρουσιάζουν παρεμφερή αθροιστική περιεκτικότητα, 1,61 % και 1,60 % αντίστοιχα. Από την συσχέτιση των δύο πρώτων σχημάτων (4.13 και 4.14) προκύπτει ότι το ποσοστό της περιεκτικότητας NiO παραμένει σταθερό (1,61%) στα δύο επιπλεύσαντα προϊόντα της δοκιμής 3.1, ωστόσο αυξάνεται το βάρος από 34,2% σε 47,5%. Στην δοκιμή 3.2 όπου χρησιμοποιήθηκε μετάλλευμα λειοτριβημένο επί 20 min παρατηρείται μείωση της αθροιστικής περιεκτικότητας Ni, από 1,60% σε 1,56% και αισθητή αύξηση του αθροιστικού βάρους, από 44,7 σε 67,9%.



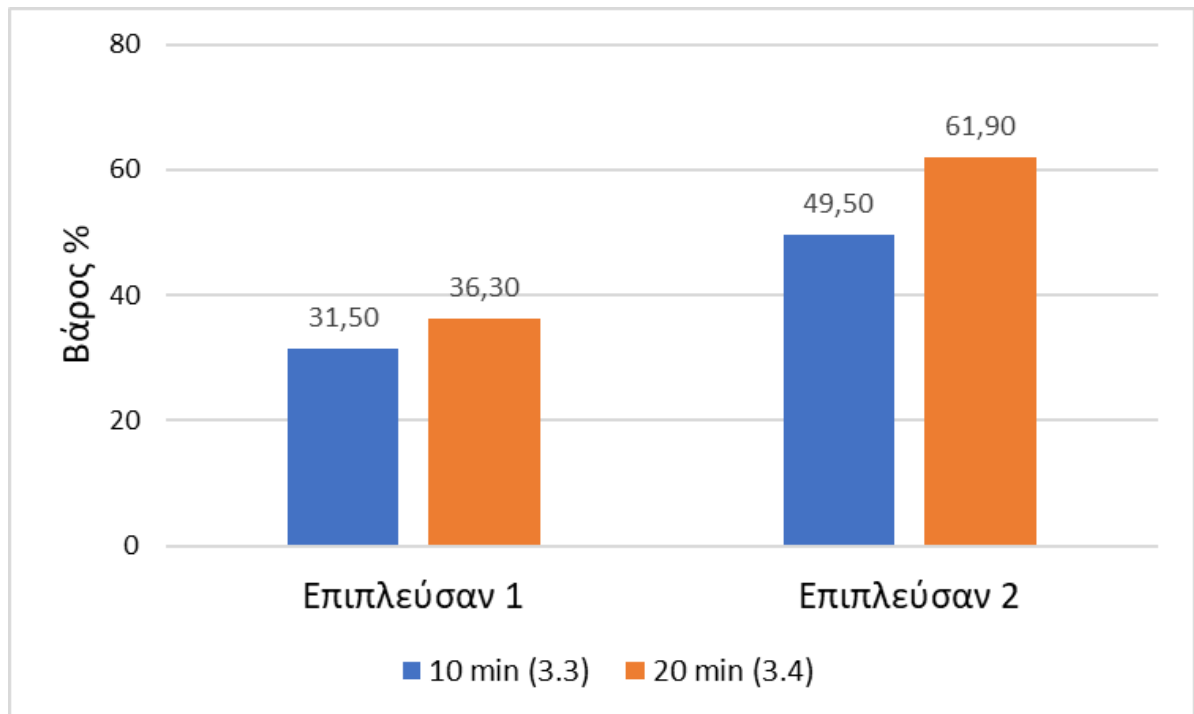
Σχήμα 4.13: Αθροιστικά βάρη (%) των επιπλευσάντων προϊόντων των δοκιμών 3.1 και 3.2.



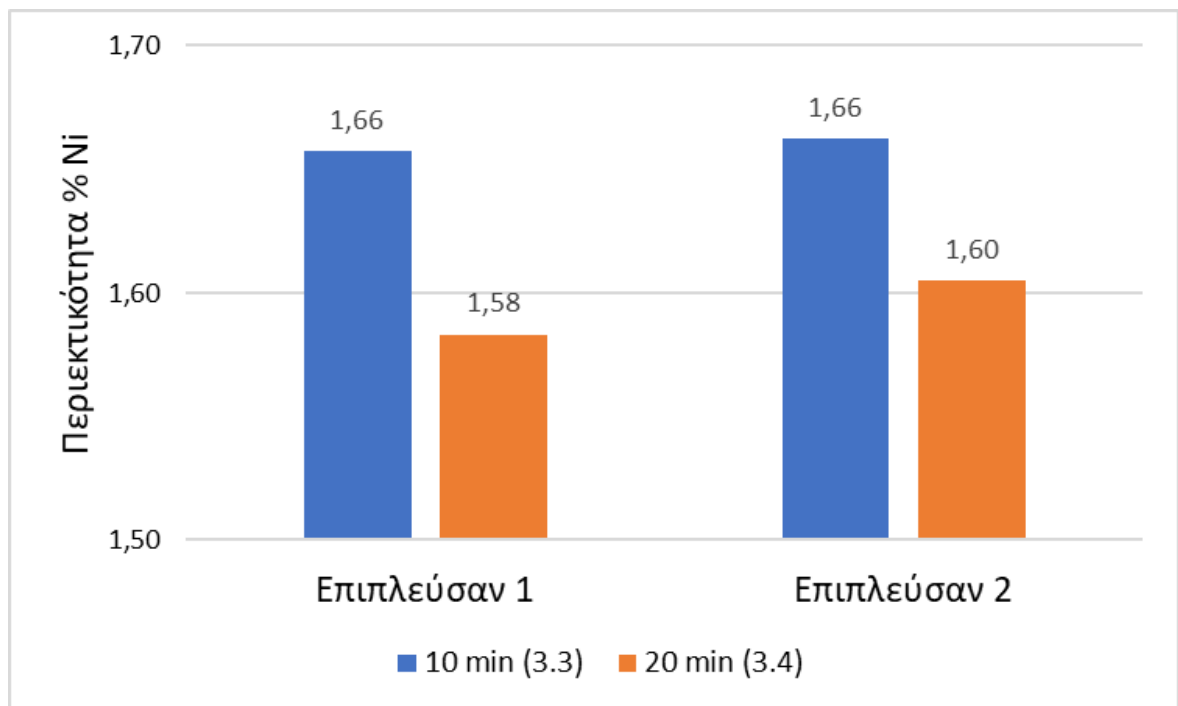
Σχήμα 4.14: Αθροιστικές περιεκτικότητες NiO (%) των επιπλευσάντων προϊόντων των δοκιμών 3.1 και 3.2.

Ομοίως, από την μελέτη των σχημάτων 4.15 και 4.16 συμπεραίνεται ότι η περιεκτικότητα του Ni της δοκιμής 3.3 παρέμεινε σταθερή (1,66%) και υψηλότερη σε

σχέση με εκείνη των δοκιμών 3.1 και 3.2, όμως το βάρος αυξήθηκε από 31,50% σε 49,50%. Στην δοκιμή 3.4 όπου χρησιμοποιήθηκε μετάλλευμα λειοτριβημένο για 20 min παρατηρείται αύξηση στην αθροιστική περιεκτικότητα NiO, συγκεκριμένα από 1,58% αυξήθηκε σε 1,60%, και μεγάλη αύξηση του αθροιστικού βάρους, από 36,30% σε 61,90%.



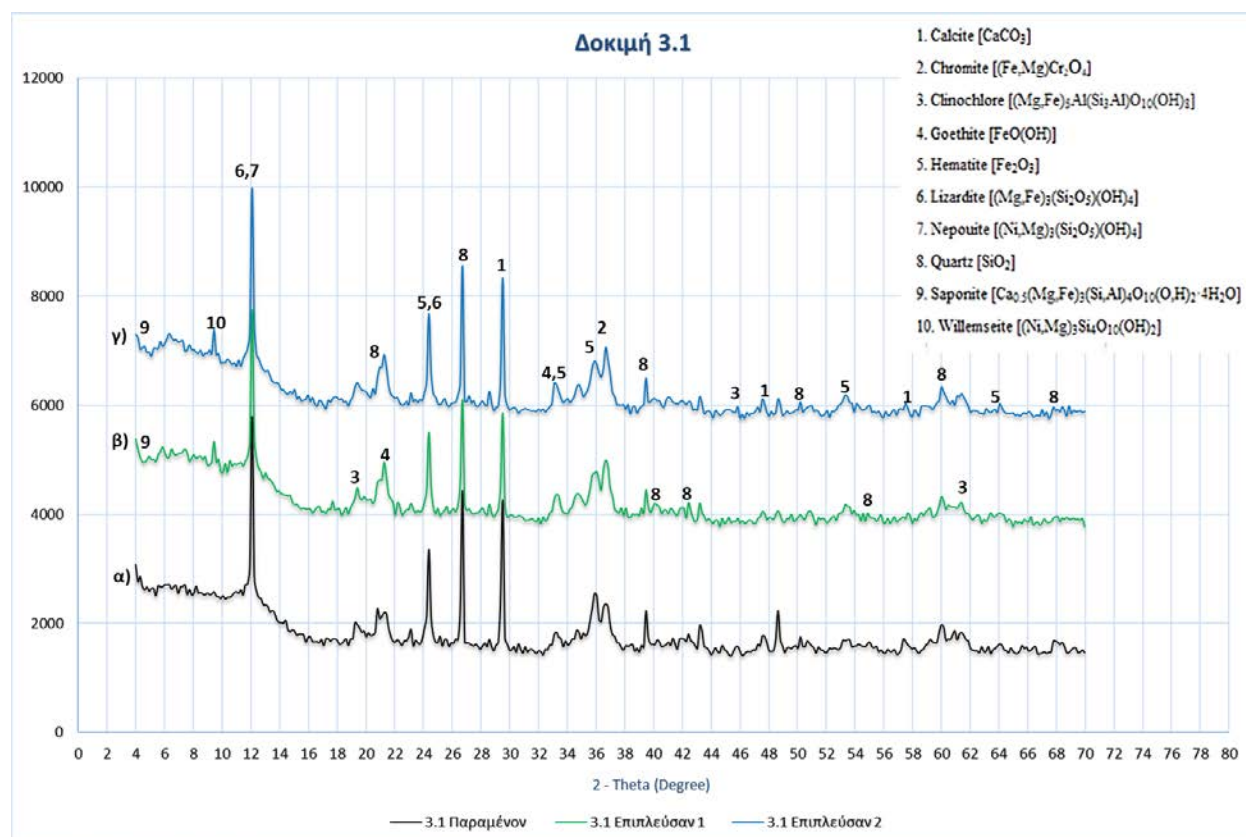
Σχήμα 4.15: Αθροιστικά βάρη (%) των επιπλευσάντων προϊόντων των δοκιμών 3.3 και 3.4.



Σχήμα 4.16: Αθροιστικές περιεκτικότητες NiO (%) των επιπλευσάντων προϊόντων των δοκιμών 3.3 και 3.4.

4.4.3 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης προϊόντων επίπλευσης

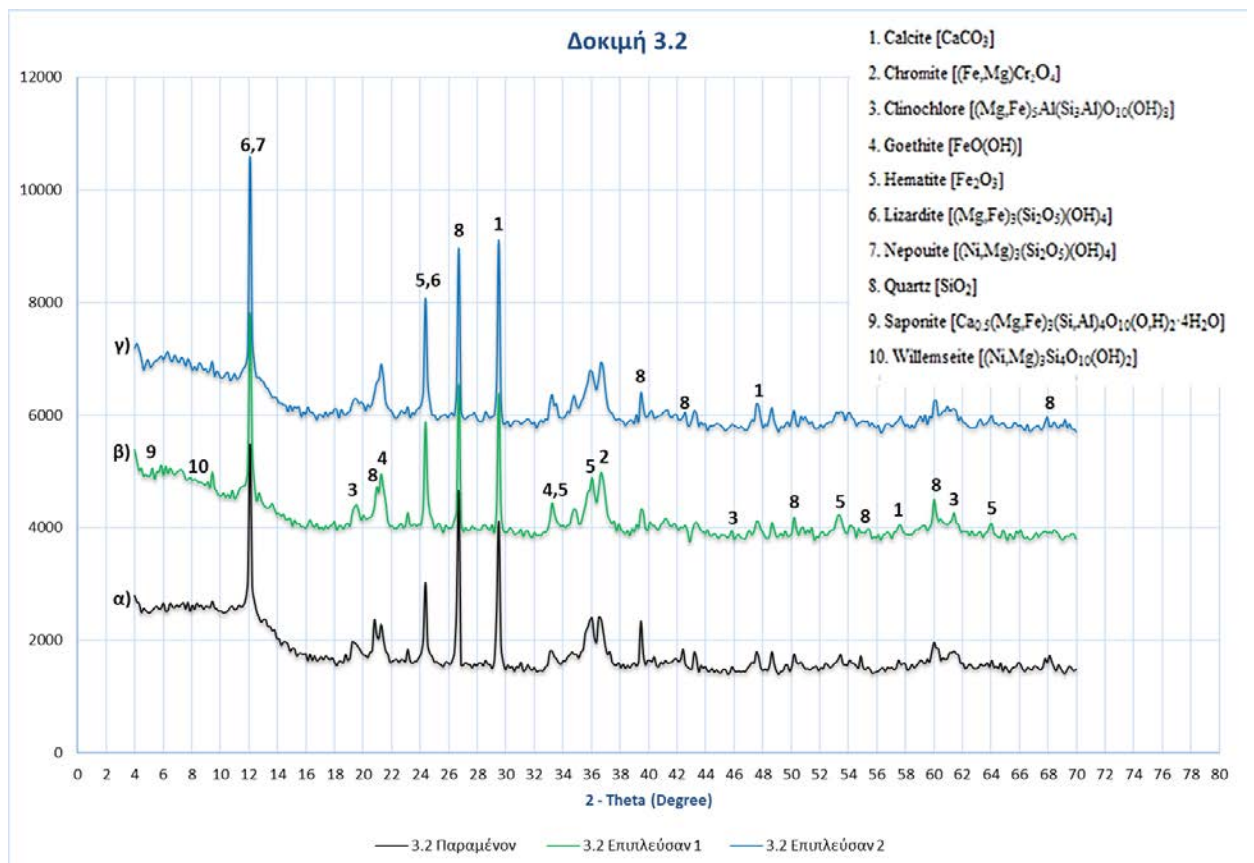
Στα προϊόντα των τεσσάρων τελικών δοκιμών, δηλαδή των δοκιμών 3.1 έως 3.4 πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με περιθλασιμετρία ακτίνων – Χ παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.17 έως 4.20.



Σχήμα 4.17: Ακτινοδιάγραμμα του α) παραμένοντος, β) πρώτου επιπλεύσαντος και γ) δεύτερου επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 3.1.

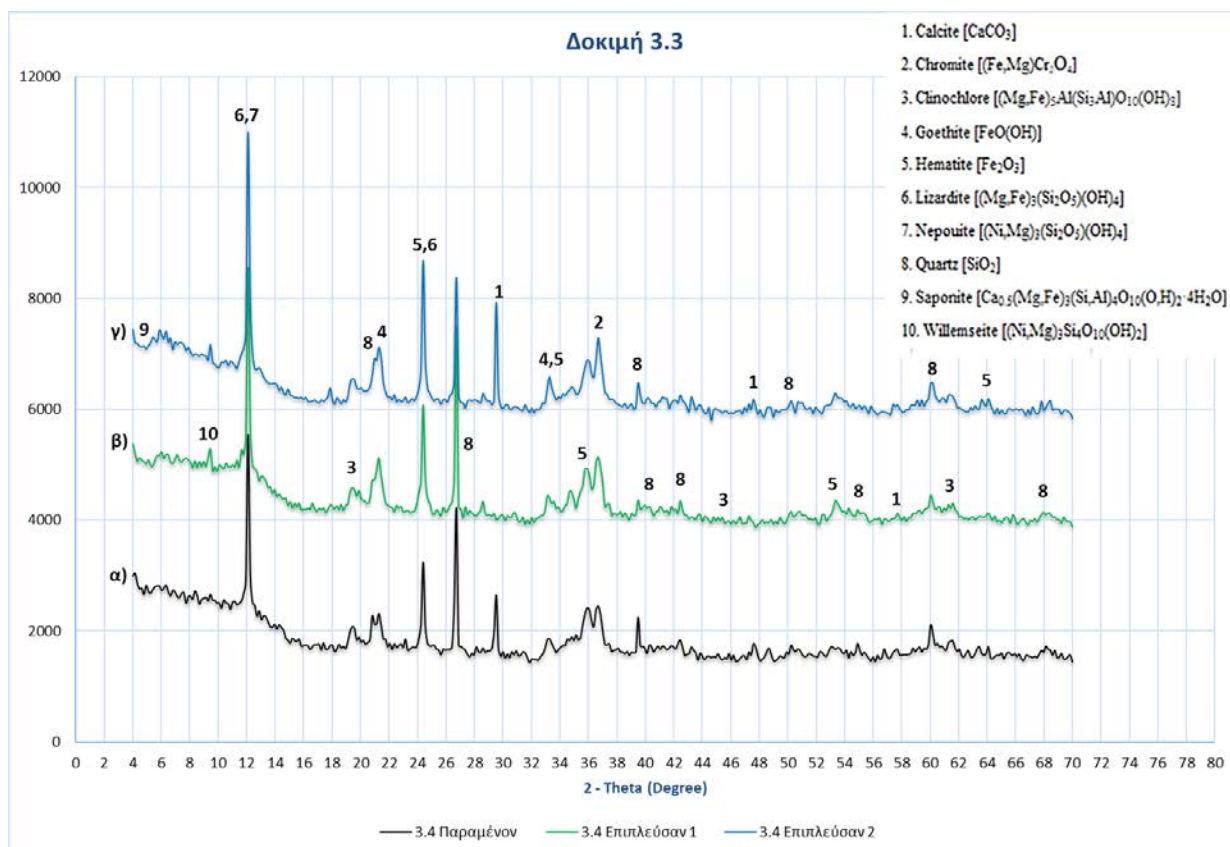
Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17 τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης των προϊόντων της δοκιμής 3.1 διαφέρουν αρκετά σε σχέση με εκείνα των προηγούμενων δοκιμών.

Όλες οι ορυκτολογικές φάσεις συγκεντρώνονται περισσότερο στα δύο επιπλεύσαντα κλάσματα. Οι ορυκτολογικές φάσεις που φέρουν νικέλιο εμφανίζουν τις πιο έντονες κορυφές τους στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα. Συνεπώς η αύξηση της δόσης του συλλέκτη από 1.000 g/t σε 1.500 g/t λειτούργησε ευεργετικά στην ανάκτηση νικελίου.



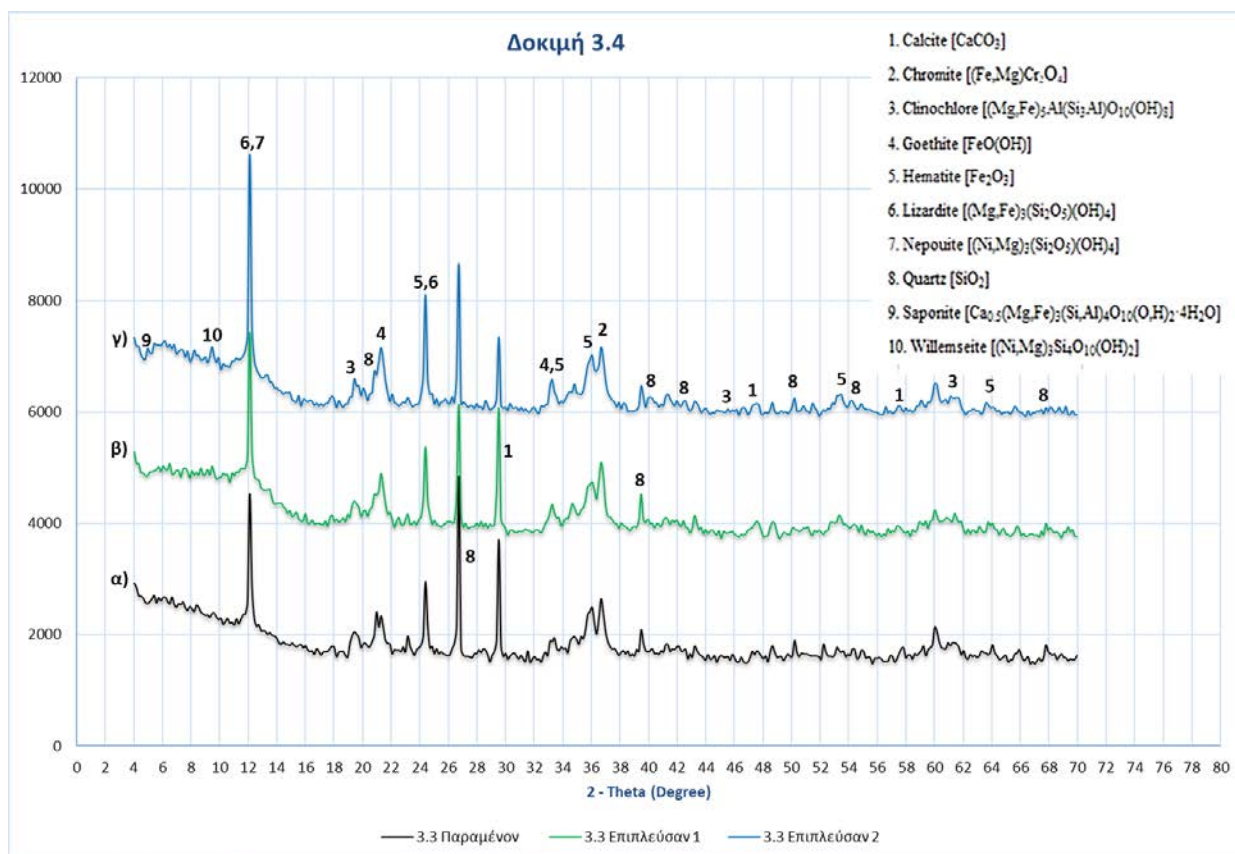
Σχήμα 4.18: Ακτινοδιάγραμμα του α) παραμένοντος, β) πρώτου επιπλεύσαντος και γ) δεύτερου επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 3.2.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.18 και τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης των προϊόντων της δοκιμής 3.2, οι νικελιούχες ορυκτολογικές φάσεις συγκεντρώνονται στα δύο επιπλεύσαντα κλάσματα. Πιο αναλυτικά, η φάση του νεπουίτη εμφανίζει την πιο έντονη κορυφή της στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα, ενώ η φάση του βιλεμζέιτη στο πρώτο. Η αύξηση της δόσης του συλλέκτη συνέβαλλε στην αύξηση της συγκέντρωσης της ορυκτολογικής φάσης του νεπουίτη στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα αντί του πρώτου.



Σχήμα 4.19: Ακτινοδιάγραμμα του α) παραμένοντος, β) πρώτου επιπλεύσαντος και γ) δεύτερου επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 3.3.

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης των προϊόντων της δοκιμής 3.3 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.19. Οι ορυκτολογικές φάσεις του βιλεμζεΐτη και του νεπούιτη εμφανίζουν τις πιο έντονες κορυφές τους στο πρώτο και δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα αντίστοιχα και έχουν πολύ μικρότερη απόκριση στο παραμένον κλάσμα.



Σχήμα 4.20: Ακτινοδιάγραμμα του α) παραμένοντος, β) πρώτου επιπλεύσαντος και γ) δεύτερου επιπλεύσαντος κλάσματος της δοκιμής 3.4.

Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης των προϊόντων της δοκιμής 3.4 όπου χρησιμοποιήθηκε βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλαμμώνιο και μετάλλευμα λειοτριβημένο για 20 min. Οι νικελιούχες ορυκτολογικές φάσεις του νεπουίτη και του βιλεμζεϊτη έχουν μεγαλύτερη απόκριση στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα σε σχέση με το πρώτο. Η αύξηση της δόσης του συλλέκτη σε 1.500 g/t οδήγησε σε υψηλότερη συγκέντρωσή τους .

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Από την χημική και ορυκτολογική ανάλυση του αρχικού μεταλλεύματος προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Το πρωτογενές λατεριτικό μέταλλευμα διαθέτει 1,49% περιεκτικότητα σε NiO. Φαίνεται ότι είναι πλούσιο σε πυρίτιο (SiO_2 - 31,15%), μαγνήσιο (MgO - 21,23%) και σίδηρο (Fe_2O_3 - 20,23%). Επίσης, εντοπίζονται μικρές ποσότητες τιτανίου, χρωμίου, κοβαλτίου, μαγγανίου και ψευδαργύρου.
- Από την ορυκτολογική ανάλυση με των κοκκομετρικών κλασμάτων του αρχικού μεταλλεύματος καθώς και του μεταλλεύματος έπειτα από 2,5 min λειοτριβήσης προέκυψε ότι οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που εντοπίζονται στο μέταλλευμα είναι ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης, ο αιματίτης, ο γκαιτίτης και ο λιζαρδίτης. Ο χρωμίτης και ο σαπωνίτης εμφανίζονται ως δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις. Οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που φέρουν νικέλιο στο μέταλλευμα είναι ο νεπουίτης και ο βιλεμζεΐτης.
- Πρώτη σειρά δοκιμών-Επίδραση pH:
 1. Σε όλες τις δοκιμές, εκτός της δοκιμής 1.1- το επιπλεύσαν κλάσμα εμπλουτίζεται σε νικέλιο συγκριτικά με το μέταλλευμα που είχε λειοτριβηθεί για 2,5 min.
 2. Η πιο αποδοτική δοκιμή για κάθε ένα από τα τέσσερα αντιδραστήρια είναι η 1.3, 1.6, 1.9 και 1.12 αντίστοιχα. Σε αυτές επιτυγχάνεται υψηλότερος λόγος εμπλουτισιμότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα νικελίου του αρχικού μεταλλεύματος που είχε λειοτριβηθεί για 2,5 min.
 3. Η αύξηση του pH του πολφού επίπλευσης συνέβαλλε στην αύξηση της περιεκτικότητας NiO στο επιπλεύσαν κλάσμα στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με συλλέκτες ελαϊκό οξύ, δωδεκακυλαμίνη και μεθοξυφαινόλη. Αντίθετα η μείωση του pH συνέβαλλε στην αύξηση της περιεκτικότητας NiO στο επιπλεύσαν κλάσμα στην δοκιμή με συλλέκτη βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο.
 4. Από την ορυκτολογική ανάλυση των προϊόντων των δοκιμών 1.3, 1.6, 1.9 και 1.12 φάνηκε ότι η ορυκτολογική φάση του βιλεμζεΐτη συγκεντρώνεται πιο έντονα στο επιπλεύσαν κλάσμα και στις τέσσερις περιπτώσεις. Η φάση του

νεπουίτη συγκεντρώνεται πιο έντονα στο δείγμα του αρχικού μεταλλεύματος στις δοκιμές 1.3, 1.6 και 1.12, ενώ στην δοκιμή 1.9 συγκεντρώνεται πιο έντονα στο επιπλεύσαν κλάσμα.

■ Δεύτερη σειρά δοκιμών-Επίδραση δόσης αντιδραστηρίων:

1. Σε όλες τις δοκιμές -πλην της δοκιμής 2.1- η αύξηση της δόσης του συλλέκτη από 1000 g/t σε 1500 g/t και η λήψη του δεύτερου επιπλεύσαντος κλάσματος συνέβαλλε στην αύξηση της περιεκτικότητας σε NiO σε αυτό σε σχέση με το μετάλλευμα που είχε λειοτριβηθεί για 2,5 min.
2. Οι δοκιμές 2.2 (δωδεκακυλαμίνη) και 2.4 (βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλαμμώνιο) απέδωσαν τον υψηλότερο λόγο εμπλουτισιμότητας σε σχέση με το αρχικό υλικό που είχε λειοτριβηθεί για 2,5 min. Στις δοκιμές αυτές η αθροιστική ανάκτηση είναι μεγαλύτερη του αθροιστικού βάρους, δηλαδή μικρότερη ποσότητα μεταλλεύματος αποδίδει μεγαλύτερα ποσοστά ανάκτησης NiO.
3. Από την ορυκτολογική ανάλυση των προϊόντων της δοκιμής 2.2 (δωδεκακυλαμίνη - τελικό pH ~9) φάνηκε ότι η ορυκτολογική φάση του νεπουίτη συγκεντρώνεται πιο έντονα στο παραμένον κλάσμα ενώ εκείνη του βιλεμζείτη συγκεντρώνεται πιο έντονα στο πρώτο επιπλεύσαν κλάσμα.
4. Από την ορυκτολογική ανάλυση των προϊόντων της δοκιμής 2.4 (βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο – τελικό pH ~11) φάνηκε ότι και οι δύο νικελιούχες ορυκτολογικές φάσεις συγκεντρώνονται πιο έντονα στο πρώτο επιπλεύσαν κλάσμα.

■ Τρίτη σειρά δοκιμών-Επίδραση κοκκομετρίας μεταλλεύματος:

1. Σε όλες τις δοκιμές η αύξηση της δόσης του συλλέκτη από 1000 g/t σε 1500 g/t και η λήψη του δεύτερου επιπλεύσαντος κλάσματος συνέ



XRF.3 neo (ME
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ 2).ods

βαλλε στην αύξηση της περιεκτικότητας σε NiO σε αυτό σε σχέση με το μετάλλευμα που είχε λειοτριβηθεί για 2,5 min.

2. Οι δοκιμές 3.3 και 3.4 (Βρωμιούχο κετυλο-τριμεθυλ-αμμώνιο) απέδωσαν τον υψηλότερο λόγο εμπλουτισιμότητας σε σχέση με το αρχικό υλικό που είχε λειοτριβηθεί για 2,5 min.
3. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας NiO στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα σε σχέση με το παραμένον κλάσμα. Συνεπώς

οι δοκιμές στις οποίες επιτεύχθηκε η μεγαλύτερη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο είναι οι δοκιμές 3.1 και 3.3, όπου χρησιμοποιήθηκε μετάλλευμα λειοτριβημένο επί 10 min.

4. Από την ορυκτολογική ανάλυση των προϊόντων των δοκιμών 3.1, 3.2, 3.3 και 3.4 φάνηκε ότι η ορυκτολογική φάση του νεπουίτη συγκεντρώνεται πιο έντονα στο δεύτερο επιπλεύσαν κλάσμα και στις τέσσερις περιπτώσεις. Στις δοκιμές 3.2 και 3.4 που πραγματοποιήθηκαν με μετάλλευμα λειοτριβημένο για 20 min, η ορυκτολογική φάση του βιλεμζέϊτη συγκεντρώθηκε πιο έντονα στο πρώτο επιπλεύσαν κλάσμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αποστολίκας Α. (2009) Κοιτασματολογία Νικελίου. Εκδόσεις Εφύρα, Καστοριά.
- Αποστολίκας Α. (2020) Ορυκτός Πλούτος - Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ - Η συμβολή τους στην Ελληνική Οικονομία, Διαδικτυακό σεμινάριο, Διαθέσιμο online [εδώ](#).
- Ζευγώλης, Μ.Ν. και Κοντός, Ι.Λ., (2000). Η διεθνής εικόνα του νικελίου και η θέση της ελληνικής βιομηχανίας σιδηρονικελίου σε αυτή (The Internationalal Picture of Nickel Metallurgy and the Position of the Greek Ferronickel Industry in it). 3ο Συνέδριο Ορυκτού Πλούτου ΤΕΕ στην Αθήνα, Πρακτικά Συνεδρίου, Τόμος Β, σελ. 199-208.
- Ζευγώλης, Μ.Ν. (2013). Η Ελληνική Βιομηχανία Νικελίου και η Διεθνής της Θέση.
- Κωστάκης, Γ. (2005). Οπτική Κρυσταλλογραφία. Σημειώσεις μαθήματος, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Περδικάτης, Β. και Πεντάρη, Δ. (2003). Εργαστηριακές ασκήσεις γεωχημείας, Εργαστηριακές σημειώσεις, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Πετράκης, Ε. (2004). Σχέση ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την λειοτρίβηση ψαθυρών υλικών. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Σαμμάς, Η. (2018). Συμβολή στον εμπλουτισμό μικτού θειούχου μεταλλεύματος από τους Μολάους. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Σταμπολιάδης, Η. (2008). Εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων.
- Σύνδεσμος Μεταλλευτικών Επιχειρήσεων (2022). 2021 Έκθεση δραστηριοτήτων. Διαθέσιμο online [εδώ](#).
- Apostolikas, T., Frogoudakis E. and Bakalldashi, J. (2009). Nickel, World Production and Demand. 3rd Balkan Mining Congress, BALKANMINE 2009, 1-3 October, Izmir, Turkey.

Brouwer, P. (2010). Theory of XRF, Getting acquainted with the principals. 3rd Edition. PANanalytical B.V., Almelo, Netherlands.

Crundwell, F.K., Moats, M.S., Ramachandran, V., Robinson, T.G., and Davenport, W.G. (2011). Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals. Elsevier, pp. 43.

David, D. (2008). Beneficiation of nickel laterites for HPAL processing, in: Proceedings of the Metallurgical Plant Design and Operating Strategies (MetPlant), AusIMM.

Farrokhpay, S. and Filippov, L. (2016). Challenges in processing nickel laterite ores by flotation. International Journal of Mineral Processing, Vol. 151, pp. 59–67.

Farrokhpay, S., Fornasiero, D. and Filippov, L. (2018). Upgrading nickel in laterite ores by flotation. Minerals Engineering, Vol. 121, pp. 100-106.

INSG - International Nickel Study Group (2018). The world nickel factbook 2018. Available online (https://insg.org/wp-content/uploads/2019/03/publist_The-World-Nickel-Factbook-2018.pdf).

Janwong, A. (2012). The agglomeration of nickel laterite ore. Doctoral dissertation, The University of Utah, USA.

Mudd, G.M. (2010). Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. Ore Geology Reviews, Vol. 38, pp. 9–26.

Nickel Magazine: Powering the future. Nickel Institute, Vol. 32, No. 1, May 2017. Available online (https://nickelinstitute.org/media/2718/nickelvol32no1may2017_fb2.pdf).

Quast, K., Connor, J.N., Skinner, W., Robinson, D.J. and Addai-Mensah, J. (2015a). Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores, Part 1: Literature review. Mineral Engineering, Vol. 79, pp. 261-268.

Quast, K., Otsuki, A., Fornasiero, D., Robinson, D.J., Addai-Mensah, J. (2015c). Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores part 3: Flotation testing. Mineral Engineering, Vol. 79, pp. 279-286.

Rao, G.V. (2000). Nickel and cobalt ores: Flotation. Regional Research Laboratory, Council of Scientific and Industrial Research, Bhubaneswar, India.

Shukla, A.K., Venugopalan, S. and Hariprakash, B. (2001) Nickel-based rechargeable batteries. Journal of Power Sources, Vol. 100, Issues 1–2, pp. 125-148, [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00890-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00890-4).

U.S. Geological Survey (2021). Mineral commodity summaries 2021. U.S. Geological Survey, <https://doi.org/10.3133/mcs2021>.

U.S. Geological Survey (2021) Mineral commodity summaries 2022. U.S. Geological Survey.

Ιστότοποι:

<https://www.copper.org/>

<http://www.larco.gr/>

<https://nickelinstitute.org/>

<https://www.statista.com/>

<https://tradingeconomics.com/>