

**ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗ ΛΑΤΕΡΙΤΗ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ
ΜΕ ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟ**

Διπλωματική Εργασία
Αγγελική Ευαγγελία Μαρίνη

Επιβλέπων:

Κομνίτσας Κων/νος, Καθηγητής

Χανιά

Ιούνιος, 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρίνη Αγγελική Ευαγγελία

Επιβλέπων: Κομνίτσας Κων/νος, Καθηγητής

Εξεταστική επιτροπή:

Κομνίτσας Κων/νος, Καθηγητής,

Αλεβίζος Γεώργιος, Αν. Καθηγητής,

Δρ Πετράκης Ευάγγελος, ΕΔΙΠ,

Χανιά, Ιούνιος, 2018

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Κομνίτσα, στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων, της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Μέρος των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν στα Εργαστήρια Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας καθώς και στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκλεκτική λειοτρίβηση λατερίτη Καστοριάς σε σφαιρόμυλο. Η εκλεκτική λειοτρίβηση, η οποία εκμεταλλεύεται τη διαφορετική συμπεριφορά κατά τη λειοτρίβηση μεταξύ των μαλακών και σκληρών ορυκτών που περιέχει ο λατερίτης, θα μπορούσε να αποτελέσει μια αποδοτική μέθοδος εμπλουτισμού του νικελίου. Η ελληνική βιομηχανία νικελίου αποτελεί έναν από τους βασικότερους τομείς της ελληνικής βαριάς βιομηχανίας και συγχρόνως μια από τις πιο σημαντικές πλουτοπαραγωγικές μονάδες της εθνικής οικονομίας. Δεν υπάρχει λοιπόν αμφιβολία ότι πρόκειται για ένα αξιόλογο θέμα διπλωματικής εργασίας.

Με την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με καθοδήγησαν, με βοήθησαν και μοιράστηκαν την γνώση και την εμπειρία τους μαζί μου. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Ευάγγελο Πετράκη, για την καθοδήγηση, την προθυμία του να μου παρέχει την πολύτιμη βοήθειά του, την κατανόησή του και την άριστη συνεργασία μας. Υπήρξε πηγή πραγματικής έμπνευσης για μένα, ένας άνθρωπος με όραμα και θετική ενέργεια για τους γύρω του.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον Αν. καθηγητή κ. Γεώργιο Αλεβίζο, για την τιμή που μου κάνει να είναι μέλος της εξεταστικής επιτροπής, τη διδακτορική φοιτήτρια Βασιλική Καρμάλη για την υποστήριξή της καθ' όλην την διάρκεια της εργασίας, το Δρ. Αντώνη Στρατάκη, τη Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Παυλίνα Ροτόντο για την εξαιρετική συνεργασία και συμπαράσταση.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την οικογένειά μου. Τους γονείς μου, Γιάννη Μαρίνη και Ελένη Ζωγόγιαννη, που πιστεύουν και στηρίζουν ακατάπαυστα όλες τις επιλογές μου, την αδερφή μου, Πηνελόπη Μαρίνη η οποία είναι δίπλα μου και με στηρίζει πάντα. Επίσης την γιαγιά μου Αγγελική Σπήλιου και τον θείο μου Παναγιώτη Ζωγόγιαννη και τους πνευματικούς μου γονείς Γεώργιο και Ευαγγελία Ασημακοπούλου, χάρις τους οποίους κατάφερα να σπουδάσω και να γίνω ο άνθρωπος που είμαι σήμερα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και τον σύλλογο BEST Chania Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη συντροφικότητα, την ενθάρρυνση και την κατανόηση που έδειξαν όλα αυτά τα πολύτιμα χρόνια.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	17
Abstract	19
Κεφάλαιο 1: Νικέλιο.....	21
1.1 Κοιτάσματα νικελίου	21
1.2 Εφαρμογές-χρήσεις-κράματα νικελίου	24
1.3 Νικέλιο στον Ελλαδικό χώρο.....	25
1.4 Βιομηχανία Νικελίου στην Ελλάδα και Παγκοσμίως.....	26
Κεφάλαιο 2: Χαρακτηρισμός Λατερίτη.....	27
2.1 Γεωλογία περιοχής δείγματος	27
2.2 Κοκκομετρική ανάλυση λατερίτη	28
2.3 Χημική και Ορυκτολογική Ανάλυση αρχικού δείγματος	29
Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι Εμπλουτισμού και Μεταλλουργικές Μέθοδοι Εξαγωγής Νικελίου	35
3.1 Μέθοδοι εμπλουτισμού.....	35
3.2 Μεταλλουργικές μέθοδοι εξαγωγής νικελίου από λατερίτες.....	36
Κεφάλαιο 4: Θεωρητικό υπόβαθρο	39
4.1 Κατάτμηση.....	39
4.2 Μηχανές κατάτμησης	40
4.3 Παράμετροι λειοτρίβησης.....	45
4.4 Επίδραση μεγέθους σφαίρας.....	47
Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διαδικασία.....	49
5.1 Θραύση	49
5.2 Κοσκίνιση	51
Κεφάλαιο 6: Επεξεργασία Αποτελεσμάτων	54
6.1 Τροφοδοσία -3.35+1.70 mm.....	54
6.1.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και της διαμέτρου των σφαιρών.....	54
6.1.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}	56
6.1.3 Χημική ανάλυση προϊόντων	57
6.2 Τροφοδοσία -1.18+0.600 mm.....	68
6.2.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και της διαμέτρου σφαιρών.....	68
6.2.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}	70

6.2.3 Χημική ανάλυση προϊόντων	70
6.3 Τροφοδοσία -0.300+0.150 mm.....	82
6.3.1 Επίδραση του χρόνου λειοτριβήσης και της διαμέτρου σφαιρών.....	82
6.3.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}	84
6.3.3 Χημική ανάλυση προϊόντων	84
Κεφάλαιο 7: Λόγος κατάτμησης.....	94
Κεφάλαιο 8: Λόγος Εμπλουτισιμότητας.....	97
Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα – Προτάσεις	99
Βιβλιογραφικές Αναφορές	101
Παράρτημα Α.....	103
Παράρτημα Β.....	105
Παράρτημα Γ	107

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Καμπύλη κοκκομετρικής ανάλυσης αρχικού δείγματος.....	29
Διάγραμμα 2.2: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε NiO.	31
Διάγραμμα 2.3: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε CoO.	31
Διάγραμμα 2.4: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , CaO και MgO.	31
Διάγραμμα 2.5: Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικών φάσεων για τα κοκκομετρικά κλάσματα LK1 – LK5.	32
Διάγραμμα 2.6: Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικών φάσεων για τα κοκκομετρικά κλάσματα LK6 – LK10.	32
Διάγραμμα 2.7: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε Νεπουίτη και Γκαιτίτη.....	34
Διάγραμμα 2.8: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε Χαλαζία.	34
Διάγραμμα 6.1: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την αυτολειοτρίβηση, d=0 (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).	54
Διάγραμμα 6.2: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου d=6.5 mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).	54
Διάγραμμα 6.3: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου d=12.7 mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).	54
Διάγραμμα 6.4: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, t=0.25 min (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).	55
Διάγραμμα 6.5: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, t=0.5 min (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).	55
Διάγραμμα 6.6: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, t=1 min (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).	55
Διάγραμμα 6.7: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, t=2 min (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).	55
Διάγραμμα 6.8: Μέγεθος d ₈₀ του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm, για κάθε διάμετρο σφαιρών (d=0, d=6.5 mm, d=12.7 mm).	56
Διάγραμμα 6.9: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για t=0.25 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.....	59
Διάγραμμα 6.10: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για t=0.5 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.....	59

Διάγραμμα 6.11: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για t=1 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.....	59
Διάγραμμα 6.13: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.25 min).	61
Διάγραμμα 6.14: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min).	61
Διάγραμμα 6.15: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min).	61
Διάγραμμα 6.16: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min).	61
Διάγραμμα 6.17: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.25 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.....	64
Διάγραμμα 6.18: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.....	64
Διάγραμμα 6.19: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.....	64
Διάγραμμα 6.20: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.....	64
Διάγραμμα 6.21: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.25 min).	66
Διάγραμμα 6.22: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min).	66
Διάγραμμα 6.23: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min).	66
Διάγραμμα 6.24: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min).	66
Διάγραμμα 6.25: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και d=0 (τροφοδοσία -3.35+1.70 mm).	67
Διάγραμμα 6.26: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και d=6.5 mm (τροφοδοσία -3.35+1.70 mm).	67
Διάγραμμα 6.27: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=12.7 mm (τροφοδοσία -3.35+1.70 mm).	67
Διάγραμμα 6.28: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την αυτολειοτρίβηση, d=0 (κλάσμα τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm).	68

Διάγραμμα 6.29: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου $d=6.5\text{ mm}$, (κλάσμα τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$).	68
Διάγραμμα 6.30: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου $d=12.7\text{ mm}$, (κλάσμα τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$).	68
Διάγραμμα 6.31: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=0.25\text{ min}$ (κλάσμα τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$).	69
Διάγραμμα 6.32: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=0.5\text{ min}$ (κλάσμα τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$).	69
Διάγραμμα 6.33: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=1\text{ min}$ (κλάσμα τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$).	69
Διάγραμμα 6.34: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=2\text{ min}$ (κλάσμα τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$).	69
Διάγραμμα 6.35: Μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κλάσμα τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$, για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5\text{ mm}$, $d=12.7\text{ mm}$).	70
Διάγραμμα 6.36: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=0.25\text{ min}$. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας $1.58\% \text{ NiO}$	72
Διάγραμμα 6.37: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=0.5\text{ min}$. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας $1.58\% \text{ NiO}$	72
Διάγραμμα 6.38: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=1\text{ min}$. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας $1.58\% \text{ NiO}$	73
Διάγραμμα 6.39: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=2\text{ min}$. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας $1.58\% \text{ NiO}$	73
Διάγραμμα 6.40: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.25\text{ min}$).	75
Διάγραμμα 6.41: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.5\text{ min}$).	75
Διάγραμμα 6.42: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=1\text{ min}$).	75
Διάγραμμα 6.43: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=2\text{ min}$).	75

Διάγραμμα 6.44: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.25 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.....	77
Διάγραμμα 6.45: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.....	77
Διάγραμμα 6.46: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.....	78
Διάγραμμα 6.47: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.....	78
Διάγραμμα 6.48: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.25 min).....	80
Διάγραμμα 6.49: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min).....	80
Διάγραμμα 6.50: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min).....	80
Διάγραμμα 6.51: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min).....	80
Διάγραμμα 6.52: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=0 (τροφοδοσία -1.18+0.600 mm).....	81
Διάγραμμα 6.53: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=6.5 mm (τροφοδοσία -1.18+0.600 mm).	81
Διάγραμμα 6.54: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=12.7 mm (τροφοδοσία -1.18+0.600 mm).	81
Διάγραμμα 6.55: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την αυτολειοτρίβηση, d=0 (κλάσμα τροφοδοσίας - 0.300+0.150 mm).....	82
Διάγραμμα 6.56: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου d=6.5 mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm).	82
Διάγραμμα 6.57: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου d=12.7 mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm).	82
Διάγραμμα 6.58: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, t=0.5 min (κλάσμα τροφοδοσίας - 0.300+0.150mm).....	83
Διάγραμμα 6.59: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, t=1 min (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm).....	83

Διάγραμμα 6.60: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min (κλάσμα τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm).....	83
Διάγραμμα 6.61: Μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κλάσμα τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm, για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).....	84
Διάγραμμα 6.62: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=0.5$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.....	86
Διάγραμμα 6.63: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=1$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.....	86
Διάγραμμα 6.65: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.5$ min).....	88
Διάγραμμα 6.66: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=1$ min).....	88
Διάγραμμα 6.67: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=2$ min).....	88
Διάγραμμα 6.68: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.5$ min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.....	90
Διάγραμμα 6.69: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=1$ min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.....	90
Διάγραμμα 6.70: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=2$ min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.....	90
Διάγραμμα 6.71: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.5$ min).....	92
Διάγραμμα 6.72: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=1$ min).....	92
Διάγραμμα 6.73: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=2$ min).....	92
Διάγραμμα 6.74: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και $d=0$ (τροφοδοσία $-0.300+0.150$ mm).....	93
Διάγραμμα 6.75: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και $d=6.5$ mm (τροφοδοσία $-0.300+0.150$ mm).....	93
Διάγραμμα 6.76: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και $d=12.7$ mm (τροφοδοσία $-0.300+0.150$ mm).....	93
Διάγραμμα 7.1: Σχέση του λόγου κατάτμησης με την ειδική ενέργεια για τις τροφοδοσίες ($-3.35+1.70$ mm, $-1.18+0.600$ mm, $-0.300+0.150$ mm) στην αυτολειοτρίβηση ($d=0$).....	94

Διάγραμμα 7.2: Σχέση του λόγου κατάτμησης με την ειδική ενέργεια για τις τροφοδοσίες (-3.35+1.70 mm, -1.18+0.600 mm, -0. +0.150 mm) με χρήση διαμέτρου σφαιρών d=6.5 mm.....	94
Διάγραμμα 7.3: Σχέση του λόγου κατάτμησης με την ειδική ενέργεια για τις τροφοδοσίες (-3.35+1.70 mm, -1.18+0.600 mm, -0.300+0.150 mm) με χρήση διαμέτρου σφαιρών d=12.7 mm.....	95
Διάγραμμα 8.1: Λόγος εμπλουτισιμότητας των λεπτών προϊόντων (-0.075 mm) των κλασμάτων τροφοδοσίας (-3.35+1.70 mm, -1.70+0.600 mm, -0.300+0.150 mm).	97
Διάγραμμα 8.2: Κατανομή των λεπτών προϊόντων (-0.075 mm) των κλασμάτων τροφοδοσίας (-3.35+1.70 mm, -1.70+0.600 mm, -0.300+0.150 mm).	97

Λίστα σχημάτων και πινάκων

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες νικελίου(www.lenntech.com).....	21
Πίνακας 2.1: Βάρη κοκκομετρικών κλασμάτων αρχικού δείγματος.....	29
Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης κοκκομετρικών κλασμάτων με XRF.....	30
Πίνακας 4.1 : Στάδια κατάκτησης, Μεγέθη τεμαχιδίων τροφοδοσίας και προϊόντων (Πετράκης,2017)...	39
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά λειοτρίβησης.....	51
Πίνακας 6.1: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	57
Πίνακας 6.2: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	57
Πίνακας 6. 3: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	57
Πίνακας 6.5: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	60
Πίνακας 6.6: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	60
Πίνακας 6.7: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	60
Πίνακας 6.8: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	60
Πίνακας 6.9: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	62
Πίνακας 6.10: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	62
Πίνακας 6. 11: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	62
Πίνακας 6. 12: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	63
Πίνακας 6.13: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	65
Πίνακας 6. 14: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	65
Πίνακας 6. 15: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	65
Πίνακας 6. 16: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	65
Πίνακας 6.17: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).	71

[illegible]

Πίνακας 6.39: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 0.300+0.150 mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).	89
Πίνακας 6.40: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 0.300+0.150 mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).	89
Πίνακας 6.41: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).	89
Πίνακας 6.42: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).	91
Πίνακας 6.43: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).	91
Πίνακας 6.44: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).	91
Πίνακας 7.1: Τιμές της σταθεράς c για τα τρία κλάσματα τροφοδοσίας	96
Πίνακας A1: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm μετά από αυτολειοτριβήση, $d=0$	103
Πίνακας A2: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm με χρήση σφαιρών, $d=6.5$	103
Πίνακας A3: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm με χρήση σφαιρών, $d=12.7$	104
Πίνακας A4: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm	104
Πίνακας B1: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος - 1.18+0.600 mm μετά από αυτολειοτριβήση, $d=0$	105
Πίνακας B2: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος - 1.18+0.600 mm με χρήση σφαιρών, $d=6.5$ mm.	105
Πίνακας B3: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος - 1.18+0.600 mm με χρήση σφαιρών, $d=12.7$ mm.	106
Πίνακας B4: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm.	106
Πίνακας Γ1: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος - 0.300+0.150 mm μετά από αυτολειοτριβήση, $d=0$	107
Πίνακας Γ2: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος - 0.300+0.150 mm με χρήση σφαιρών, $d=6.5$	107
Πίνακας Γ3: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος - 0.300+0.150 mm με χρήση σφαιρών, $d=12.7$	107
Πίνακας Γ4: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm.	107

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1: Χρήσεις νικελίου(www.lenntech.com)	24
Εικόνα 1.2: GAGR (compound annual growth rate) : Συμμιγής ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης	26
Εικόνα 1.3: Τιμή νικελίου τα έτη 2004-2017 (http://markets.businessinsider.com)	27
Εικόνα 2.1: Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη του κοιτάσματος Ιεροπηγής (Αποστολίκας 2010)	28
Εικόνα 4.1: Τροχιά σφαιρών κατά τη λειτουργία ενός σφαιρόμυλου	41
Εικόνα 4.2: Ανοιχτό κύκλωμα κατάτμησης	42
Εικόνα 4.3: Κλειστό άμεσο κύκλωμα κατάτμησης (Σταμπολτζής, 1994)	43
Εικόνα 4.4: Κλειστό έμμεσο κύκλωμα κατάτμησης (Σταμπολτζής, 1994)	43
Εικόνα 5.1.1: Σιαγονοτός σπαστήρας	49
Εικόνα 5.1: Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος	50
Εικόνα 5.2: Εργαστηριακός δονητής κοσκίνων	52

Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη της εκλεκτικής λειοτρίβησης λατερίτη Καστοριάς με σκοπό τον εμπλουτισμό του σε νικέλιο. Παρά τη μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα που έχει αναπτυχθεί με σκοπό την ανάκτηση νικελίου, ακόμα και σήμερα αποτελεί μεγάλη πρόκληση η εύρεση αποδοτικότερων μεθόδων εμπλουτισμού. Αυτό συμβαίνει διότι ο λατερίτης αποτελεί ένα ετερογενές υλικό με πολύπλοκη χημική και ορυκτολογική σύσταση και το νικέλιο δεν αποτελεί ξεχωριστή ορυκτολογική φάση αλλά βρίσκεται διάσπαρτο στο πλέγμα διαφορετικών ορυκτών. Η εκλεκτική λειοτρίβηση, η οποία εκμεταλλεύεται τη διαφορετική συμπεριφορά κατά τη λειοτρίβηση μεταξύ των μαλακών και σκληρών ορυκτών που περιέχει ο λατερίτης, θα μπορούσε να αποτελέσει μια αποδοτική μέθοδος εμπλουτισμού του νικελίου.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λειοτρίβησης σε σφαιρόμυλο, σε διαφορετικούς χρόνους και μεγέθη σφαιρών. Το αρχικό υλικό, το οποίο ήταν λατερίτης Καστοριάς, θραύστηκε και κοσκινίστηκε σε επιμέρους κλάσματα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τριών κοκκομετρικών κλασμάτων ($-3.35+1.70$ mm, $-1.18+0.600$ mm και $-0.300+0.150$ mm), τα οποία αποτέλεσαν τις τροφοδοσίες του μύλου. Για κάθε τροφοδοσία, πραγματοποιήθηκε λειοτρίβηση σε τέσσερις διαφορετικούς χρόνους ($t=0.25$ min, $t=0.5$ min, $t=1$ min και $t=2$ min) και σε τρία διαφορετικά μεγέθη σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm) για τον κάθε χρόνο,. Κάθε μία από τις δοκιμές αντιστοιχεί σε διαφορετική ενέργεια κατανάλωσης, η οποία εξαρτάται από την ισχύ του σφαιρόμυλου, τη μάζα του υλικού και το χρόνο λειοτρίβησης.

Το προϊόν μετά από την κάθε δοκιμή λειοτρίβησης χωρίστηκε σε τρία επιμέρους κλάσματα, το χονδρό (το οποίο αποτελεί την τάξη μεγέθους της τροφοδοσίας), το ενδιάμεσο και το λεπτό το οποίο ήταν το μέγεθος -0.075 mm. Μετά το πέρας των δοκιμών πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση των προϊόντων με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων Χ, XRF (X-ray fluorescence spectroscopy) και ορυκτολογική ανάλυση με την μέθοδο περίθλασης ακτίνων-Χ XRD (X-Ray Diffraction). Τα κύρια οξείδια τα οποία βρέθηκαν ήταν το NiO , Fe_2O_3 , το SiO_2 και το MgO και οι κυριότερες ορυκτολογικές φάσεις του δείγματος ήταν ο νεπουίτης $((\text{Ni,Mg})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4)$, ο χαλαζίας SiO_2 και ο γκαιτίτης $\text{FeO}(\text{OH})$. Τα αποτελέσματα, έδειξαν ότι η μεγαλύτερη περιεκτικότητα NiO (%) υπάρχει κυρίως στο πιο λεπτό προϊόν (-0.075 mm). Παρατηρήθηκε ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η περιεκτικότητα (%) του NiO παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ αυξάνεται σημαντικά η κατανομή (%) του. Το μεγαλύτερο μέρος των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η αυτολειοτρίβηση ($d=0$) οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της περιεκτικότητας (%) του NiO στο προϊόν της λειοτρίβησης με πολύ όμως μικρή κατανομή ($<1\%$). Η μεγαλύτερη κατανομή (56.94%) παρατηρήθηκε στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm) της τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm, στη λειοτρίβηση με σφαίρες διαμέτρου $d=6.5$ mm και χρόνο $t=2$ min, με περιεκτικότητα NiO 1.92 % (αύξηση 18.6% σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία). Ικανοποιητική περιεκτικότητα και κατανομή NiO υπάρχει ακόμη στο προϊόν -0.075 mm της τροφοδοσίας $-1.18+0.600$ mm, στη δοκιμή με σφαίρες διαμέτρου $d=6.5$ mm και χρόνο $t=2$ min, όπου η κατανομή είναι 43.59 % και αντίστοιχα η περιεκτικότητα NiO 1.85 % (αύξηση 17.1%). Επίσης, το λεπτό προϊόν (-0.075 mm) της τροφοδοσίας -

0.300+0.150 mm, για d=12.7 mm και t=2 min έδωσε περιεκτικότητα NiO 1.81 % (αύξηση 11.7%) που αντιστοιχεί σε κατανομή NiO 37.36 %.

Από τη μελέτη του λόγου κατάτμησης ($\frac{d_{180}}{d_{280}}$) προέκυψε ότι σε μικρούς χρόνους λειοτρίβησης, συνεπώς και σε χαμηλές ενέργειες κατανάλωσης, ο λόγος κατάτμησης των διαφορετικών μεγεθών τροφοδοσίας δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές. Στις δοκιμές αυτολειοτρίβησης (d=0), ο λόγος κατάτμησης παραμένει σταθερός ανεξαρτήτως του μεγέθους τροφοδοσίας και της ενέργειας που καταναλώνεται. Στις δοκιμές με χρήση σφαιρών d=6.5 mm και σε ειδική ενέργεια κατανάλωσης $\epsilon = 1.61$ kWh/t (t=2 min), ο λόγος κατάτμησης είναι μεγαλύτερος όταν χρησιμοποιείται το πιο λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας (-0.300+0.150 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.87$) και μικρότερος στο ενδιάμεσο (-1.18+0.600 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.66$) και στο πιο χονδρό κλάσμα (-3.35+1.70 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.44$). Από την άλλη, στις δοκιμές με χρήση μεγαλύτερων σφαιρών (d=12.7 mm) και σε ειδική ενέργεια $\epsilon = 1.61$ kWh/t (t=2 min), ο λόγος κατάτμησης είναι μεγαλύτερος στο ενδιάμεσο κλάσμα (-1.18+0.600 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=2.48$), ενώ είναι μικρότερος στο πιο χονδρό (-3.35+1.70 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.68$) και λεπτό κλάσμα (-0.300+0.150 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.56$). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος της τροφοδοσίας, τόσο πιο μικρές σφαίρες απαιτούνται για να λειοτριβηθεί πιο αποδοτικά το υλικό και το αντίστροφο. Ενδεχομένως, εάν χρησιμοποιούνταν μεγαλύτερες διαμέτρου σφαίρες από τις d=12.7 mm, θα παρατηρούταν ότι πιο αποδοτικά θα λειοτριβόταν το μεγαλύτερο μέγεθος τροφοδοσίας (-3.35+1.70 mm).

Τέλος, υπολογίστηκε ο λόγος εμπλουτισιμότητας (ER, Enrichment Ratio) που ορίζεται ως ο λόγος της περιεκτικότητας ενός στοιχείου ή οξειδίου (στην περίπτωσή μας το NiO) στο προϊόν προς την περιεκτικότητά του στην αρχική τροφοδοσία. Ο λόγος εμπλουτισιμότητας του NiO υπολογίστηκε για το λεπτό προϊόν -0.075 mm σε χρόνο λειοτρίβησης t=2 min, για κάθε κλάσμα τροφοδοσίας (-3.35+1.70 mm, -1.17+0.600 mm, -0.300+0.150 mm). Από τη μελέτη του λόγου εμπλουτισιμότητας του NiO (ER, Enrichment Ratio) στα προϊόντα των λειοτριβήσεων προέκυψε ότι, ότι στο πιο χονδρό κλάσμα τροφοδοσίας (-3.35+1.70 mm) εμφανίζεται ο μεγαλύτερος λόγος εμπλουτισιμότητας (ER=1.31, d=6.5 mm, t=2 min), η κατανομή του είναι 20.71 %. Στα λεπτότερα κλάσματα τροφοδοσίας (-1.18+0.600 mm, -0.300+0.150 mm) παρατηρείται μεγαλύτερη κατανομή (%) NiO (42.64 για d=6.5 mm, t=2 min και 36.82% για d=12.7 mm, t=2 min αντίστοιχα) και αξιόλογος λόγος εμπλουτισιμότητας (ER=1.17 και ER=1.12 αντίστοιχα).

Abstract

The main topic of this thesis is the study of Kastoria's laterite by using the technique of selective grinding, in order to enrich it in nickel. Despite the great research activity that has been developed to recover nickel, it is a great challenge to find more efficient enrichment techniques, even nowadays. This happens because laterite is a heterogeneous material with a complex chemical and mineral composition, and nickel is an element which is found dispersed in the grid of different minerals. Selective grinding exploits the different grinding behavior of soft and hard minerals contained in the laterite and it could be an efficient technique of enriching nickel.

During this project, grinding tests were performed in a ball mill, at different times and ball sizes. The initial material, which was Kastoria's laterite, was smashed and sifted into individual fractions, as a result the formation of three granulometric fractions ($-3.35+1.70$ mm, $-1.18+0.600$ mm and $-0.300+0.150$ mm), which constituted the feeds of the ball mill. A grinding test was performed for each one of the feeds, in four different times ($t = 0.25$ min, $t = 0.5$ min, $t = 1$ min and $t = 2$ min) and three different ball sizes ($d = 0$, $d = 6.5$ mm and $d = 12.7$ mm) in each time. Each test corresponds to a different energy consumption, which depends on the power of the ball mill, the mass of the material and the grinding time.

The output of each grinding test was divided into three individual fractions, coarse, intermediate and fine, which was the fraction size -0.075 mm. By the end of the tests, X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) and X-ray diffraction analysis were performed. The main oxides which were found are NiO, Fe_2O_3 , SiO_2 and MgO and the main mineral phases of the sample were nepuite $((\text{Ni,Mg})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4)$, quartz SiO_2 and goethite $\text{FeO}(\text{OH})$. Results showed that the highest NiO content (%) is mainly present in the finer product (-0.075 mm). It was observed that as the grinding time increases, NiO content (%) remains nearly constant, while its distribution (%) is significantly increased. Most of the results showed that self-grinding ($d=0$) leads to a higher increase in NiO content in the grinding output, with a really low distribution ($<1\%$). The highest distribution (56.94%) was observed in the fine product (-0.075 mm) of $-0.300+0.150$ mm feed, in the grinding with balls of diameter $d = 6.5$ mm, grinding duration $t=2$ min with 1.92% NiO content, (an increase of 18.6% compared to the initial feed). Satisfactory NiO content and distribution showed in the -0.075 mm product of $-1.18+0.600$ mm feed, in the test with $d=6.5$ mm balls and grinding duration $t=2$ min, in which the distribution is 43.59% and the NiO content 1.85% (an increase of 17.1%). Moreover, in the fine product (-0.075 mm) of $-0.300+0.150$ mm feed, for $d = 12.7$ mm balls and $t = 2$ min grinding duration, there is a distribution of 37.36% and a NiO content of 1.81%.

From the study of size reduction ratio $\left(\frac{d_{180}}{d_{280}}\right)$, it emerged that in short grinding times, and therefore in low consumption energies, the size reduction ratio of the different feed sizes does not show major changes. In self-grinding tests ($d=0$), the size reduction ratio remains nearly constant, regardless the feed size and energy consumption. In tests using $d=6.5$ mm balls and with a energy consumption of $\varepsilon=1.61$ kWh/t ($t=2$ min), the size reduction ratio is higher in the finest feeds ($-0.300+0.150$ mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=$

1.87) (-1.18+0.600 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.66$) and lower in the coarser fraction (-3.35+1.70 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}= 1.44$). On the other hand, in tests using larger balls (d=12.7 mm) and an energy of $\epsilon = 1.61$ kWh/t (t =2 min), the size reduction ratio is higher in the intermediate fraction (-1.18+0.600 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}= 2.48$) and lower in the coarser (-3.35+1.70 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}= 1.68$) and in the fine fraction (-0.300 + 0.150 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}= 1.56$). Results show that the smaller the size of the feed, the smaller the balls required, in order to grind the material more efficiently and vice versa. If larger diameter balls were used than d=12.7 mm, it would be observed that the largest feed (-3.35 + 1.70 mm) would be more efficiently ground.

Finally, the enrichment ratio (ER) was calculated, which is defined as the ratio of the content of an element or oxide (in our case, NiO) in the product to its initial feed content. The NiO enrichment ratio was calculated for the fine fraction -0.075 mm at grinding time t=2 min, for each feed (-3.35+1.70 mm, -1.17+0.600 mm, -0.300+0.150 mm). From the enrichment ratio diagram it is observed that although the coarser feed fraction (-3.35+1.70 mm) has the highest enrichment ratio (for d=0, ER = 1.47), its distribution is very small (1.60%) , while the two finest fractions (-1.18+0.600 mm, -0.300+0.150 mm) for d=6.5 mm balls, have a higher distribution (42.64% and 20.01%, respectively) and a significant enrichment ratio (ER= 1.17 and ER = 1.19).

Κεφάλαιο 1: Νικέλιο

1.1 Κοιτάσματα νικελίου

Το νικέλιο είναι ένα χημικό στοιχείο που στην φύση δεν βρίσκεται σε αυτοφυή μορφή. Βρίσκεται υπό την μορφή σουλφιδίων, οξειδίων και ανόργανων αλάτων. Το νικέλιο παρουσιάζει μεγάλη συγγένεια με το σίδηρο, το κοβάλτιο και το χαλκό. Ως εκ τούτου, συνυπάρχουν σε πολλούς τύπους κοιτασμάτων και μπορούν να αντικατασταθούν μεταξύ τους σε μεγάλο βαθμό. Αυτό έχει μεγάλη σημασία, καθώς μπορεί εύκολα να αναμειχθεί με πολλά μέταλλα, σχηματίζοντας κράματα και έτσι να αυξηθεί η αντοχή, η σκληρότητα, η αντίσταση στη διάβρωση, η ελαστικότητα, η καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα του κράματος σε μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών (πίνακας 1.1). Τα υλικά που περιέχουν νικέλιο διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην καθημερινή μας ζωή - στον εξοπλισμό παρασκευής τροφίμων, στα κινητά τηλέφωνα, στον ιατρικό εξοπλισμό, στις μεταφορές, στα κτίρια, στην παραγωγή ενέργειας - ο κατάλογος είναι σχεδόν ατελείωτος. Περίπου το 90% της παραγωγής νικελίου φθάνει κάθε χρόνο σε κράματα, τα δύο τρίτα από τα οποία υπεισέλθονται σε ανοξείδωτο χάλυβα. Σύμφωνα με τη γένεσή τους, τα νικελιούχα μεταλλεύματα ανήκουν στις ακόλουθες κατηγορίες (Γκουτζιούπα,2016):

- 1) θειούχα κοιτάσματα
- 2) λατεριτικά κοιτάσματα.
- 3) ιζηματογενή κοιτάσματα, τα οποία δημιουργήθηκαν από προϊόντα αποσάθρωσης και μεταφοράς του λατεριτικού υλικού.

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες νικελίου(www.lenntech.com)

Ατομικός αριθμός	28
Ατομική μάζα	58.71 g.mol ⁻¹
Ηλεκτραρνητικότητα	1.8
Πυκνότητα	8.9 g.cm ⁻³ at 20°C
Σημείο τήξεως	1453 °C
Σημείο βρασμού	2913 °C
Ακτίνα Van der Waals	0.124 nm
Ιοντική ακτίνα	0.069 nm (+2); 0.06 nm (+3)
Πρότυπο δυναμικό	- 0.25 V
Ανακαλύφθηκε από	Alex Constedt 1751 μ.Χ.

Σε κάθε περίπτωση, κοινή διαπίστωση είναι ότι τα λατεριτικά κοιτάσματα περιέχουν και το μεγαλύτερο ποσοστό νικελίου (πάνω από 72% παγκοσμίως), ενώ αντιθέτως σήμερα η παγκόσμια παραγωγή νικελίου στο μεγαλύτερο μέρος της προέρχεται από τα θειούχα, σε ποσοστό πάνω από 60%.

Αναλυτικότερα, τα θειούχα (υδροθερμικά κοιτάσματα σουλφιδίων) είναι μεταλλεύματα κυρίως με μαγνητοπυρίτη, πεντλανδίτη, χαλκοπυρίτη. Συχνά περιέχουν εκμεταλλεύσιμες περιεκτικότητες σε Co, Au, Ag, Se, Te. Συναντώνται, επίσης, μεταλλεύματα αρσενιδίων Ni-Co με φλεβική μορφή, παρουσία ορυκτών Ag, Bi και U.

Τα ιζηματογενή, απαντώνται σε κλειστές λεκάνες πλούσιες σε οργανικές ύλες και με αναγωγικές συνθήκες, γεγονός που οδηγεί σε εμπλουτισμό νικελίου. Οι κόνδυλοι μαγγανίου (Mn) περιέχουν κατά μέσο όρο 0,99% Ni (www.orgkta.gr) . Στον ελλαδικό χώρο δεν απαντώνται θειούχα κοιτάσματα.

Τα λατεριτικά (κοιτάσματα λατεριτικής αποσάθρωσης και οξειδωμένα-φτωχά σε νικέλιο) είναι προϊόντα είτε λατεριτίωσης υπερβασικών πετρωμάτων (περιδοτίτες) σε συνθήκες τροπικού-υποτροπικού κλίματος με περιεκτικότητα σε ολιβίνη έως 0,3% Ni, που έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό νικελιούχων πυριτικών ορυκτών, είτε σερπεντινίωση, με αποτέλεσμα το σχηματισμό σουλφιδίων και κραμάτων Ni. Στα ανώτερα επιφανειακά στρώματα νικελιούχα οξείδια σιδήρου επιφέρουν τη δημιουργία σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων σε Ελλάδα, Κούβα και Φιλιππίνες. Στα κατώτερα στρώματα της σιδηρούχου ζώνης έχουμε το σχηματισμό πυριτικών ορυκτών Ni-Mg και κυρίως γαρνιερίτη (Νέα Καληδονία, Βραζιλία, Ινδονησία).

Ανεξάρτητα από το είδος του μητρικού πετρώματος, σε ένα φλοιό λατεριτικής αποσάθρωσης διακρίνονται οι ακόλουθοι ορίζοντες (από κάτω προς τα επάνω). Το πάχος των διαφόρων οριζόντων, τα ιδιαίτερα ιστολογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά και η κατανομή των στοιχείων με το βάθος κυμαίνονται από θέση σε θέση ανάλογα με το είδος του μητρικού πετρώματος, το ανάγλυφο της περιοχής, την απορροή του νερού, τις κλιματικές μεταβολές σε κλίμακα γεωλογικού χρόνου και τη βλάστηση (Σκαρπέλης, 2014). Οι ορίζοντες αυτοί είναι:

1. Ορίζοντας σαπρολίτη: Αναπτύσσεται σταδιακά και αντικαθιστά το μητρικό πέτρωμα, του οποίου η αρχική δομή και ο όγκος διατηρούνται. Υπολείμματα του πετρώματος εμφανίζονται με μορφή αποστρογγυλομένων όγκων του. Τα περισσότερα από τα διαλυτά χημικά στοιχεία έχουν αποπλυθεί, ενώ τα λιγότερο ευκίνητα αργίλιο και σίδηρος σχηματίζουν νέα ορυκτά in situ.
2. Αργιλικός ορίζοντας: Αποτελείται κυρίως από αργιλικά ορυκτά. Τα οξείδια διαφοροποιούνται με τη μορφή κονδύλων ή πisolιθικών δομών.
3. Ορίζοντας σιδηρούχος (ferricrete, cuirasse) με ιστολογικά χαρακτηριστικά αθροίσματος κονδύλων ή ψευδοκροκαλοπαγούς ή πisolιθικός: Αναπτύσσεται in situ σταδιακά σε βάρος του υποκείμενου ορίζοντα. Δεν διακρίνονται πλέον ιστολογικά χαρακτηριστικά του μητρικού πετρώματος. Αποτελούνται από οξείδια και υδροξείδια. Τυπικός ιστός του πετρώματος είναι ο πisolιθικός. Στους πισσόλιθους

επικρατούν ωοειδή, πελοειδή και πισοειδή σωματίδια αποτελούμενα από οξειδία ή υδροξείδια αργιλίου ή / και σιδήρου.

Ο λατερίτης είναι ένας τύπος εδάφους και βράχου πλούσιος σε σίδηρο και αλουμίνιο και θεωρείται ότι έχει σχηματιστεί σε θερμές και υγρές τροπικές περιοχές. Στην αρχική του δομή είναι πολύ μαλακό, και γίνεται πολύ σκληρό με την ξήρανση. Ο όρος προέρχεται από την λατινική λέξη “later” που σημαίνει πλιθάρι και ονομάστηκε έτσι από τον φυσικό Francis Buchanan - Hamilton (Thurston, 1913). Σχεδόν όλοι οι λατερίτες έχουν σκούρο κόκκινο χρώμα, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε οξείδιο του σιδήρου. Αναπτύσσονται με εντατική και μακροχρόνια αποσάθρωση του υποκείμενου μητρικού βράχου. Η πλειοψηφία της γης που περιέχει λατερίτες είναι μεταξύ των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερου.

Η λατερίωση είναι μια παρατεταμένη διαδικασία χημικής αποσάθρωσης που παράγει μεγάλη ποικιλία στο πάχος, την ποιότητα, την χημεία και την ορυκτολογία των μεταλλευμάτων των προκυπτόντων εδαφών. Τα αρχικά προϊόντα της αποσάθρωσης είναι ουσιαστικά πετρώματα καολινίτη που ονομάζονται σαπρόλιτες. (Schellmann,2007) Μια περίοδος λατερίωσης επεκτάθηκε από περίπου την μέση της Τριτογενούς περιόδου έως την μέση της Τεταρτογενούς περιόδου (35 έως 1,5 εκατομμύρια χρόνια πριν (Dalvi,2004). Στα μέσα της Πλειστόκαινου περιόδου φαίνεται ότι υπήρξε απότομη κλιματική αλλαγή με αποτέλεσμα την αύξηση της μάζας του πάγου και απότομη μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών στην θάλασσα (Maasch,1988). Αυτές οι δύο αλλαγές δείχνουν μια ξαφνική παγκόσμια ψύξη. Ο ρυθμός της λατερίωσης μειώθηκε με την απότομη ψύξη της γης. Η αποσάθρωση σε τροπικά κλίματα συνεχίζεται μέχρι σήμερα, με μειωμένο ρυθμό.

Οι ορυκτολογικές και χημικές συνθέσεις των λατεριτών εξαρτώνται από τα μητρικά πετρώματα (Tardy,1997). Οι λατερίτες αποτελούνται κυρίως από χαλαζία, ζirkόνιο και οξείδια τιτανίου, σιδήρου, κασσίτερου, αλουμινίου και μαγγανίου, τα οποία παραμένουν κατά τη διάρκεια της αποσάθρωσης. Οι λατερίτες ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία, το κλίμα και το βάθος τους. Τα κύρια ορυκτά που φιλοξενούν το νικέλιο και το κοβάλτιο μπορούν να είναι είτε οξείδια σιδήρου, αργιλικά ορυκτά ή οξείδια μαγγανίου (Whittington,2000). Τα οξείδια του σιδήρου προέρχονται από βασικά πυριγενή πετρώματα και άλλα πλούσια σε σίδηρο πετρώματα. Οι βωξίτες προέρχονται από γρανιτικά πυριγενή πετρώματα και άλλα φτωχά σε σίδηρο πετρώματα (Yamaguchi,2004). Οι νικελιούχοι λατερίτες εμφανίζονται σε ζώνες της γης που παρουσίασαν παρατεταμένη αποσάθρωση των υπερβασικών πετρωμάτων που περιέχουν τα σιδηρομαγνησιακά ορυκτά ολιβίνη, πυρόξενο και αμφίβολο.

Η γεωλογική δομή των κοιτασμάτων διακρίνεται σε:

- Αυτόχθονα ή αποσαθρωμένα: Τα κοιτάσματα που δεν έχουν μετακινηθεί ή μετακινήθηκαν ελάχιστα από το μητρικό πέτρωμα (οφειόλιθος) πάνω στο οποίο έλαβε χώρα ο σχηματισμός του σιδηρονικελιούχου κοιτάσματος μέσω της λατεριτικής αποσάθρωσης.
- Αλλόχθονα ή δευτερογενή ή ιζηματογενή: Τα κοιτάσματα που έχουν μεταφερθεί από το μητρικό

πέτρωμα κατά την περίοδο της άνω κρητιδικής επίκλυσης. Τα κοιτάσματα αυτά είναι υπερκείμενα σε ιουρασικούς ή τριαδικούς ασβεστόλιθους.

-«Ψευδοαυτόχθονα»: Τα κοιτάσματα εκείνα τα οποία έχουν μεταφερθεί, αλλά βρίσκονται πάλι πάνω σε οφειολίθους και δίνουν την εντύπωση πρωτογενών κοιτασμάτων.

1.2 Εφαρμογές-χρήσεις-κράματα νικελίου

Η κύρια χρήση του νικελίου είναι στην παρασκευή κραμάτων. Τα κράματα νικελίου χαρακτηρίζονται από αντοχή, ολκιμότητα και αντίσταση στη διάβρωση και τη θερμότητα. Περίπου το 66% του νικελίου που καταναλώνεται στον Δυτικό Κόσμο χρησιμοποιείται για την κατασκευή ανοξείδωτου χάλυβα, η σύνθεση του οποίου μπορεί να ποικίλει αλλά είναι τυπικά σίδηρος με περίπου 18% χρώμιο και 8% νικέλιο. Το 12% του συνόλου του νικελίου που καταναλώνεται πηγαίνει σε ενισχυμένα κράματα. Το υπόλοιπο 23% της κατανάλωσης κατανέμεται μεταξύ των χαλύβων αλουμινίου, των επαναφορτιζόμενων μπαταριών, των καταλυτών και άλλων χημικών ουσιών, των νομισμάτων, των προϊόντων χυτηρίου και της επιμετάλλωσης (εικόνα 1.2.1).

Τα κράματα νικελίου βρίσκουν εφαρμογή σε σύρματα. Αντέχουν στη διάβρωση ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε αεριοστρόβιλους και πυραυλοκινητήρες. Το Monel είναι κράμα νικελίου και χαλκού (π.χ. 70% νικέλιο, 30% χαλκό με ίχνη σιδήρου, μαγγανίου και πυριτίου), το οποίο δεν είναι μόνο σκληρό αλλά μπορεί να αντισταθεί στη διάβρωση από θαλάσσιο νερό, έτσι ώστε να είναι ιδανικό για άξονα έλικας σε σκάφη και μονάδες αφαλάτωσης.



Εικόνα 1.1: Χρήσεις νικελίου(www.lenntech.com)

Το σιδηρονικέλιο χρησιμοποιείται πρωτίστως στην κατασκευή Ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων (γνωστών και ως σειρές 200 και 300). Αυτοί είναι μη μαγνητικοί και περιέχουν μεταξύ 8.5% και 25% νικέλιο, ενισχύοντας την αντιδιαβρωτική τους αντίσταση. Είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη ομάδα ανοξειδωτων χαλύβων, αναλογώντας στο 70%-75% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής. Οι Φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες (γνωστοί και ως σειρά 400) δεν περιέχουν νικέλιο.

Σήμερα, το σιδηρονικέλιο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε όλες τις ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες οικονομίες. Χρησιμοποιείται σε μια πληθώρα εφαρμογών και τομείς: εφαρμοσμένη μηχανική, μεταφορές, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά, κτίρια και κατασκευές, μεταλλικά αντικείμενα, σωλήνες και εξαρτήματα σωλήνων. Επίσης καθιστά δυνατή την παραγωγή πολύ χρήσιμων προϊόντων με ειδικές ιδιότητες- μαγνητικές, ηλεκτρονικές, ελεγχόμενης διαστολής, καταλυτικές και ιδιότητες σχετιζόμενες με την τεχνολογία των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών.

Το σιδηρονικέλιο συμβάλλει σε αποδοτικές τηλεπικοινωνίες, ασφαλείς μεταφορές, αποδοτική παραγωγή πετρελαίου και βενζίνης, καθαρή και αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας, υγιεινολογική κατεργασία τροφίμων και ποτών, ασφαλή και αξιόπιστο ιατρικό εξοπλισμό, καθώς και σε εξοπλισμό μειωμένων εκπομπών από συσκευές έκλυσης απαερίων έως υβριδικά οχήματα.

Η χρήση του σιδηρονικελίου είναι εξαιρετικά καινοτόμος, ενώ η μεγάλη του χρηστικότητα αντισταθμίζει το σχετικά υψηλό του κόστος. Με αποδειγμένη την καινοτόμο πορεία του, το σιδηρονικέλιο θα διαδραματίζει έναν ακόμα πιο σημαντικό ρόλο στις μελλοντικές κοινωνίες από ότι σήμερα. (www.larco.gr)

1.3 Νικέλιο στον Ελλαδικό χώρο

Οι ελληνικές καταθέσεις νικελίου προέρχονται από τη λατεριτική αποσάθρωση των υπερβασικών πετρωμάτων του Μεσοζωικού. Η λατεριτική αποσάθρωση είναι η διαδικασία δημιουργίας αποθέματος νικελίου από την αποσάθρωση των υπερβασικών πετρωμάτων σε διάφορες γεωλογικές περιόδους και σε διαφορετικά προφίλ των καιρικών συνθηκών, τα οποία σχετίζονται γενετικά με τους υποκείμενα πετρώματα. Τα προϊόντα της αποσάθρωσης υπέστησαν πολύπλοκες γεωλογικές διεργασίες που οδήγησαν στην τελική εναπόθεση "νικελιούχου σιδηρομεταλλεύματος".

Στην Ελλάδα υπήρχαν ευνοϊκές συνθήκες για το σχηματισμό λατεριτών κατά τη διάρκεια της Κάτω Κρητιδικής, λόγω της εμφάνισης τροπικού ή υποτροπικού κλίματος και εκτεταμένης επιφανειακής εξάπλωσης των οφιόλιθων. Χαρακτηρίζονται ως "απολιθωμένα" και καλύπτονται από ασβεστόλιθο της Άνω Κρητιδικής ή ιζήματα του Μειόκαινου. Η μέση περιεκτικότητά τους σε νικέλιο κυμαίνεται από 0,8% έως 1,5% περίπου και συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή νικελίου. Ο νικελιούχος σερπεντίνης (νεπουίτης) αποτελεί τον κύριο φορέα νικελίου ενώ άλλες ορυκτολογικές φάσεις του νικελίου έχουν ανακαλυφθεί με μικρότερη σημασία, όπως ο τάλκης κι ο τοκοβίτης. Τα λατεριτικά προφίλ ποικίλλουν σημαντικά όχι μόνο από το πάχος και τη συνέχεια μεταξύ των μεμονωμένων ζωνών, αλλά και από την ορυκτολογία και τη χημεία των ζωνών ακόμη και σε μικρές αποστάσεις.

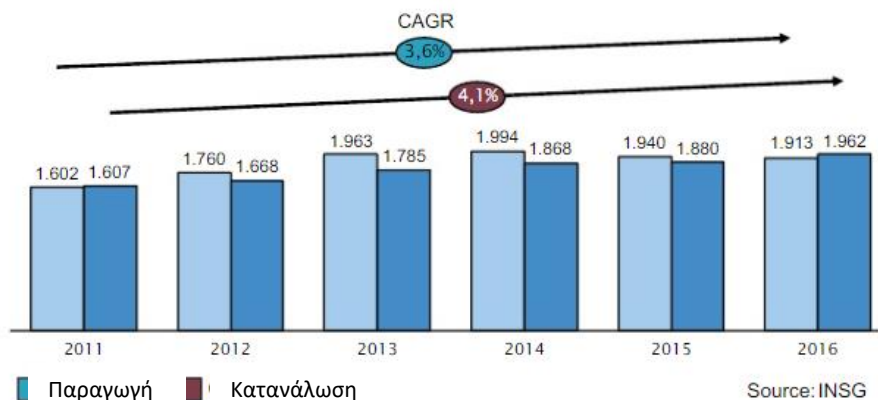
Στην Ελλάδα υπάρχουν περισσότερα από 110 εμφανίσεις νικελιούχο σιδηρομετάλλευμα με περιεκτικότητα σε νικέλιο που κυμαίνεται από 0,4 έως 2,7% και σίδηρο από 20% έως 79% (Γκουτζιούπα,2016). Τα συνολικά αποθέματα εκτιμάται ότι υπερβαίνουν τα 500 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων τα 200 εκατομμύρια τόνοι είναι εκμεταλλεύσιμα. Οι ορυκτοί πόροι λατεριτικού νικελιούχου σιδηρομεταλλεύματος κατανέμονται κυρίως στις περιοχές της Εύβοιας, της Βοιωτίας και της Καστοριάς. Οι ελληνικοί λατερίτες εκμεταλλεύονται από την εταιρεία παραγωγής νικελίου Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ, η οποία είναι η σημαντικότερη εταιρεία παραγωγής κράματος Fe-Ni στην Ελλάδα (2% - 3% της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου).

1.4 Βιομηχανία Νικελίου στην Ελλάδα και Παγκοσμίως

Στην Ελλάδα, η “Γ.Μ.Μ.Α.Ε Λάρκο” είναι η μοναδική μεταλλευτική και μεταλλουργική εταιρεία, η οποία αναζητά και εκμεταλλεύεται το σιδηρονικέλιο για να παράγει κράμα σιδερνικελίου (FeNi) και καλύπτει το 5% της ετήσιας ζήτησης νικελίου στην Ευρωπαϊκή αγορά και η εταιρία παράγει περίπου 19.000 τόνους ετησίως (Κουντουρέλλης,2014).

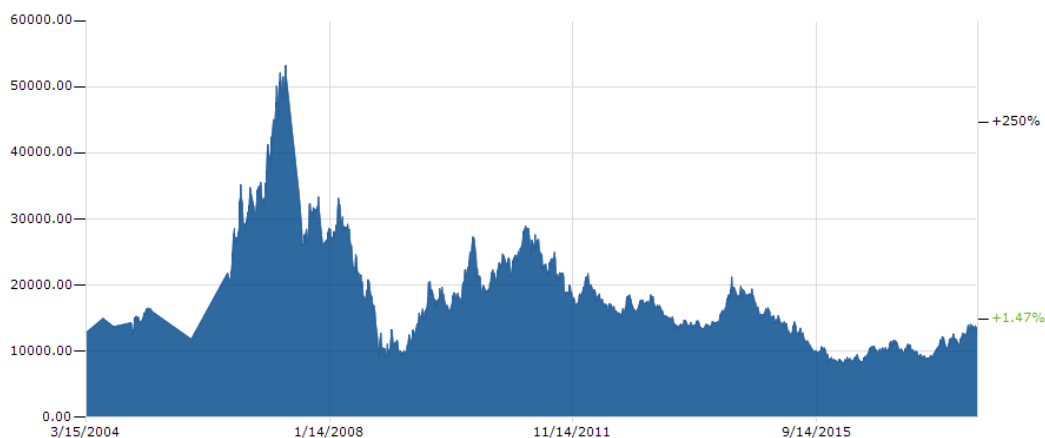
Η παραγωγή νικελίου από λατερίτες παγκοσμίως χρονολογείται περισσότερο από έναν αιώνα (Dalvi,2004). Τα λατεριτικά μεταλλεύματα είναι η κύρια πηγή νικελίου. Περίπου το 70% των παγκόσμιων πόρων νικελίου περιέχονται σε λατερίτες και αντιπροσωπεύουν σήμερα μόνο το 40% της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου. Οι κυριότερες χώρες παραγωγής νικελίου είναι η Ν.Καληδονία, η Ινδονησία, η Κούβα, η Αυστραλία, η Δομινικανή Δημοκρατία, η Ιαπωνία, η Ελλάδα και η Βραζιλία και οι Φιλιππίνες.

Στην εικόνα 1.2 φαίνεται η παγκόσμια παραγωγή και κατανάλωση νικελίου από το 2011 μέχρι το 2016, όπου παρατηρείται αύξηση και των δύο μεταβλητών τα τελευταία έτη.



Εικόνα 1.2: GAGR (compound annual growth rate) : Συμμιγής ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης

Στην εικόνα 1.3 φαίνεται η μεταβολή της τιμής του νικελίου στην αγορά, όπου διακρίνεται εμφανής πτώση της τιμής το τελευταίο χρονικό διάστημα. Η μέση τιμή του την περίοδο 2004-2017 είναι 8.700 US\$/t. Η σημερινή του τιμή (17/06/2018) είναι 15,244.97 US\$/t.



Εικόνα 1.3: Τιμή νικελίου τα έτη 2004-2017 (<http://markets.businessinsider.com>)

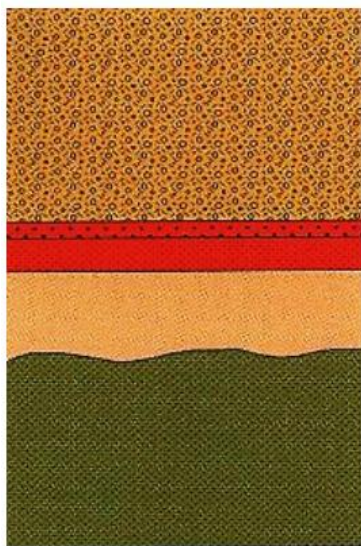
Κεφάλαιο 2: Χαρακτηρισμός Λατερίτη

2.1 Γεωλογία περιοχής δείγματος

Σημαντικά κοιτάσματα σιδηρονικελιούχων λατεριτών βρίσκονται σήμερα σε εκμετάλλευση στην Εύβοια, στη Λοκρίδα και στην Ιεροπηγή Καστοριάς. Το κοιτάσμα Fe-Ni στην Ιεροπηγή Καστοριάς βρίσκεται στην Βόρεια Ελλάδα, βορειοδυτικά της πόλης της Καστοριάς και αναπτύσσεται στους άνω Ιουράσιους – κάτω Κρητιδικούς σερπεντινοποιημένους υπερβασικούς οφιολίθους. Επικαλύπτεται από την Τριτογενή μελάσα (Πλαστήρας, 1979, Μουντράκης, 1983, Σκάρπελης, 1997, Σκαρπέλης κ.ά., 1993). Καταγράφηκε ένα προφίλ λατερίτη που εκτέθηκε από την εξόρυξη σε ανοιχτό ορυχείο, καθώς παρουσιάζει χαρακτηριστικά που μοιάζουν με ένα in situ προφίλ (Ελιόπουλος, 2010).

Η γεωλογική δομή της περιοχής αντιπροσωπεύεται από σχηματισμούς της Υποπελαγονικής ζώνης. Το κοιτάσμα αναπτύσσεται επί σερπεντινιτών και καλύπτεται από Μειοκαινικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας, τα οποία αποτελούνται από ασβεστολιθικά-οφιολιθικά κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και μάργες (Αποστολίκας, 2010).

Η μεταλλοφορία κατανέμεται σε τρία επιμέρους κοιτάσματα και είναι συνέχεια της αντίστοιχης του Devoll Αλβανίας. Χαρακτηρίζεται σαν κλασσικός λατεριτικός φλοιός αποσάθρωσης και είναι η μεγαλύτερη παρόμοιου τύπου γνωστή μεταλλοφορία στην Ελλάδα. Εμφανίζονται όλες οι ζώνες που έχουν οι λατεριτικοί φλοιοί αποσάθρωσης (σιδηρούχο κάλυμμα-γκαιιτική ζώνη-νοντρονιτική – σαπρολιτική). Το μεταλλοφόρο σώμα αναπτύσσεται υπό μορφή μεγάλου μεγέθους φακών, με κυμαινόμενο πάχος της συνολικής μεταλλοφορίας αλλά και των επί μέρους ζωνών και εναλλαγές της κατανομής του νικελίου τόσο κατά την κατακόρυφη, όσο και κατά την οριζόντια εξέλιξη της μεταλλοφορίας (εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη του κοιτάσματος Ιεροπηγής (Αποστολίκας 2010)

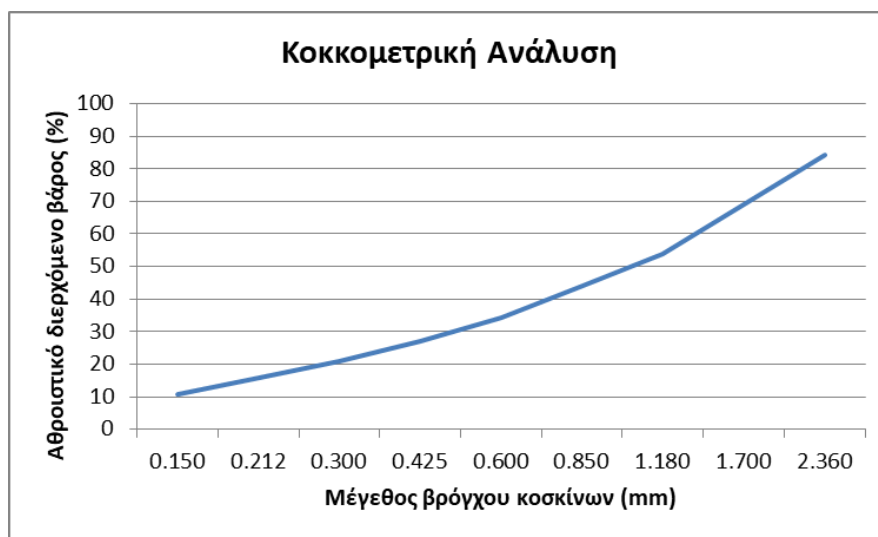
Τα πρωτογενή λατεριτικά κοιτάσματα Ιεροπηγής και Παλαιοχωρίου σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου λατεριτίωσης των υπερβασικών πετρωμάτων του Ελλαδικού χώρου. Γεωλογικές προϋποθέσεις ύπαρξης αντίστοιχης μεταλλοφορίας υπάρχουν επίσης στο ανατολικό και δυτικό περιθώριο της Μεσοελληνικής αύλακας.

2.2 Κοκκομετρική ανάλυση λατερίτη

Για την κοκκομετρική ανάλυση του λατερίτη χρησιμοποιήθηκε αντιπροσωπευτική ποσότητα του αρχικού δείγματος, η οποία προήλθε από την τεταρτοδιαίρεσή του. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε υγρή κοσκίνιση του υλικού σε κόσκινο 0,150mm. Το υλικό -0,150 mm φυλάχθηκε, ενώ το +0,150 mm τοποθετήθηκε στον φούρνο για ξήρανση. Μετά την ξήρανση του υλικού έγινε η κοσκίνισή του στη μηχανή κοσκίνισης και σε κόσκινα με λόγο $\sqrt{2}$. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία 10 κοκκομετρικών κλασμάτων, τα οποία φαίνονται στον πίνακα 2.1. Από το βάρος που παρέμεινε σε κάθε κόσκινο δημιουργήθηκε η καμπύλη του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος του κοσκίνου (Διάγραμμα 2.1)

Πίνακας 2.1: Βάρη κοκκομετρικών κλασμάτων αρχικού δείγματος

Κοκκομετρικά κλάσματα mm	Κωδικός κλασμάτων	Βάρος (gr)	Βάρος (%)	Αθρ. Διερχ. Βάρος (%)
2.36	LK1	198.90	15.69	84.31
1.7	LK2	191.83	15.14	69.17
1.18	LK3	195.37	15.42	53.75
0.85	LK4	124.50	9.82	43.93
0.6	LK5	121.51	9.59	34.34
0.425	LK6	92.72	7.32	27.02
0.3	LK7	78.8	6.22	20.81
0.212	LK8	63.99	5.05	15.76
0.15	LK9	63.17	4.98	10.77
-0.15	LK10	136.5	10.77	
Σύνολο		1267.29	100	



Διάγραμμα 2.1: Καμπύλη κοκκομετρικής ανάλυσης αρχικού δείγματος

2.3 Χημική και Ορυκτολογική Ανάλυση αρχικού δείγματος

Όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα υποβλήθηκαν σε ορυκτολογική και χημική ανάλυση στο εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας και Ανόργανης Γεωχημείας στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Η χημική ανάλυση των χρησιμοποιηθέντων κοκκομετρικών κλασμάτων, έγινε σε αντιπροσωπευτικά δείγματα με την χρήση της μεθόδου XRF. Για την διεξαγωγή των αναλύσεων πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία:

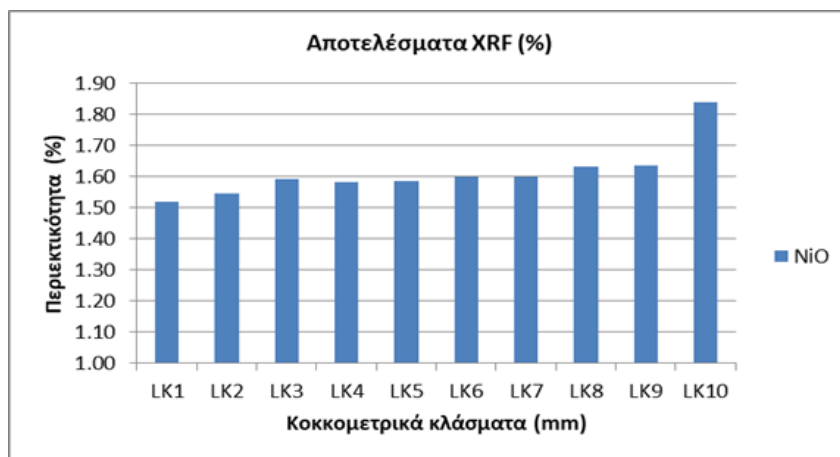
- Λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από το προς ανάλυση υλικό.
- Λειοτρίβηση δείγματος στη συσκευή του πλανητικού μύλου.
- Δημιουργία ταμπλέτας με ανάμιξη 5 g δείγματος και 0.5 g wax.

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης για όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 2.2.

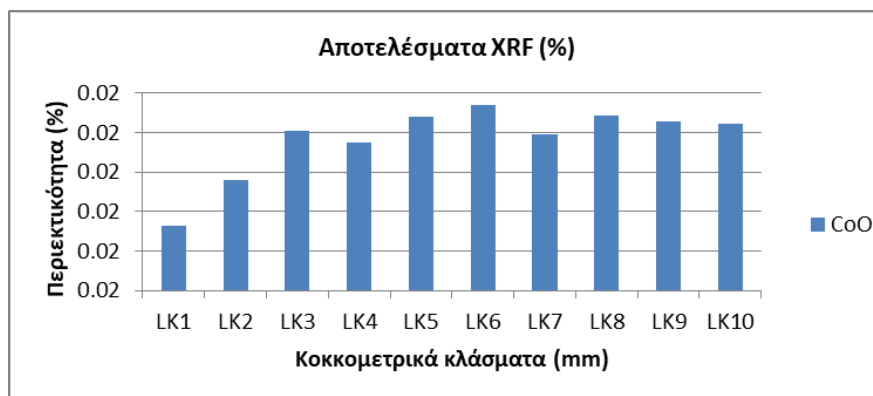
Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης κοκκομετρικών κλασμάτων με XRF

Δείγματα	NiO	CoO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	LOI
LK1	1.52	0.019	22.82	32.91	5.78	18.48	16.97
LK2	1.54	0.020	23.98	32.43	6.03	18.01	16.48
LK3	1.59	0.021	25.70	31.50	5.98	17.03	16.54
LK4	1.58	0.021	25.67	31.03	6.16	17.19	16.77
LK5	1.59	0.021	26.53	30.38	6.23	16.72	16.75
LK6	1.60	0.022	26.56	30.13	6.46	16.38	16.81
LK7	1.60	0.021	25.62	29.89	6.57	16.50	17.71
LK8	1.63	0.021	26.00	30.17	6.93	16.77	16.22
LK9	1.64	0.021	25.67	30.20	7.04	16.75	16.45
LK10	1.84	0.021	25.74	31.81	4.77	17.66	16.25

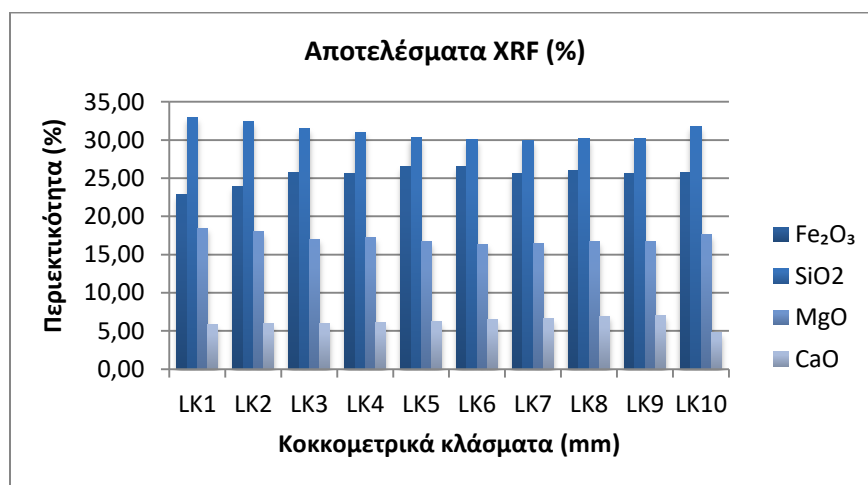
Από τον πίνακα προέκυψαν τα διαγράμματα 2.2 – 2.4 τα οποία παριστάνουν τις χημικές αναλύσεις ανά κοκκομετρικό κλάσμα LK1 – LK10.



Διάγραμμα 2.2: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε NiO.



Διάγραμμα 2.3: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε CoO.

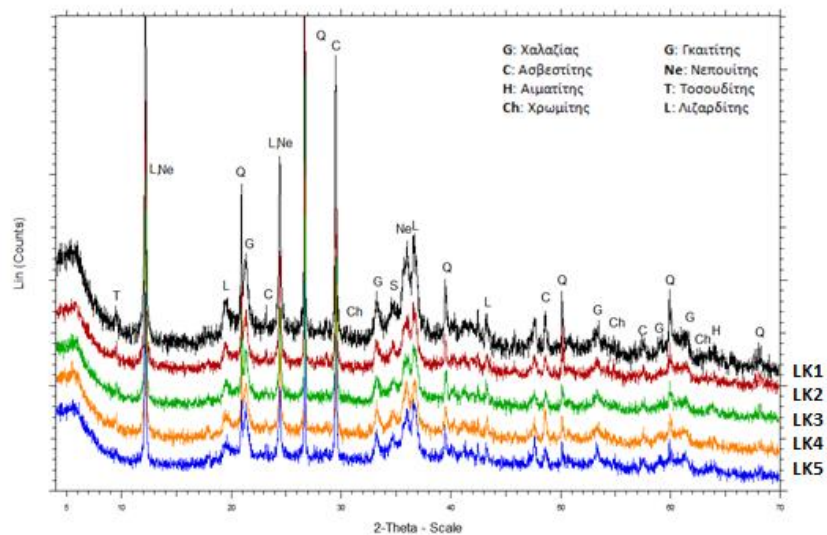


Διάγραμμα 2.4: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε Fe₂O₃, SiO₂, CaO και MgO.

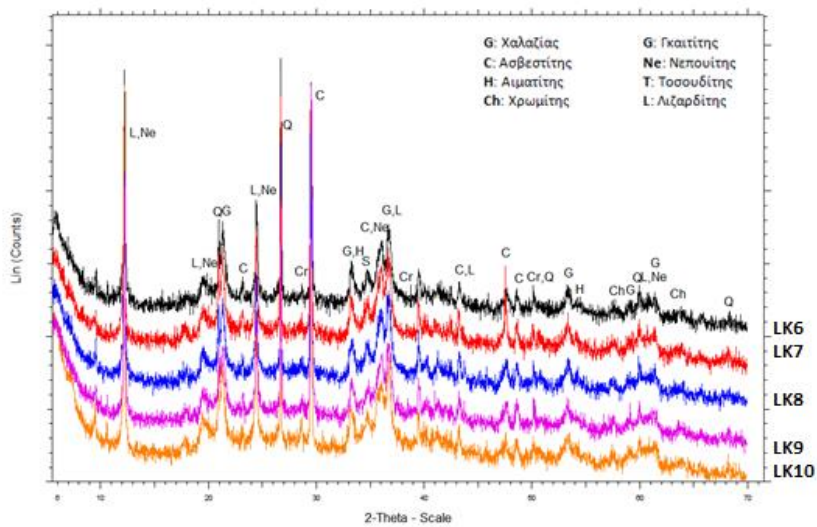
Από τα διαγράμματα 2.2 – 2.4 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα των περισσότερων οξειδίων (NiO, Fe₂O₃, CaO, CoO) έχει μια τάση να αυξάνεται με τη μείωση του μεγέθους του κοκκομετρικού κλάσματος. Αντίθετα, η περιεκτικότητα του SiO₂ και του MgO μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους του κοκκομετρικού κλάσματος.

Η ορυκτολογική ανάλυση έγινε με την μέθοδο περίθλασης ακτίνων-Χ με την χρήση του προγράμματος EVA. Η περίθλαση ακτίνων-Χ (X-Ray Diffraction ή XRD) είναι μια μη καταστροφική μέθοδος για την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση κρυσταλλικών υλικών σε στερεά μορφή. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου μπορούν επίσης να προσδιοριστούν πολλές φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών όπως: Παραμένουσες τάσεις, μέγεθος κρυστάλλων και μικροτάσεις, ο προσανατολισμός των κρυστάλλων και η κρυσταλλογραφική δομή του υλικού.

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης παρουσιάζονται στα διαγράμματα 2.5 και 2.6.



Διάγραμμα 2.5: Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικών φάσεων για τα κοκκομετρικά κλάσματα LK1 – LK5.



Διάγραμμα 2.6: Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικών φάσεων για τα κοκκομετρικά κλάσματα LK6 – LK10.

Η ορυκτολογική ανάλυση, (διαγράμματα 2.5 και 2.6), έδωσε τα εξής ορυκτά:

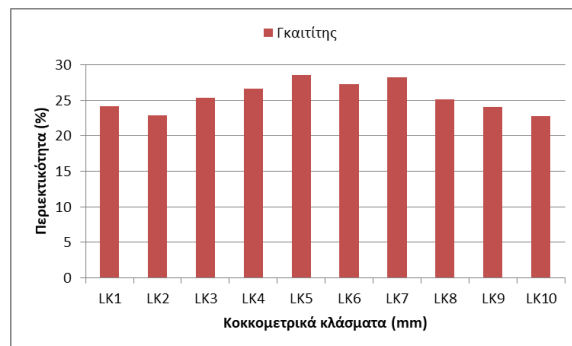
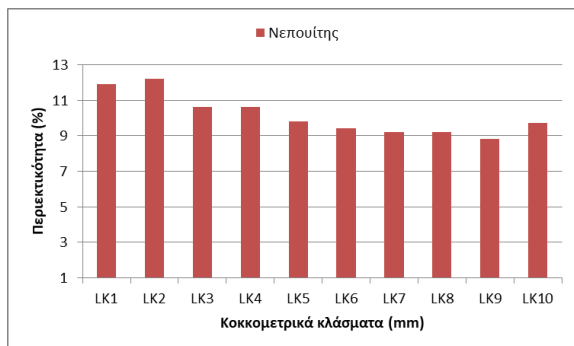
- χαλαζίας
- λιζαρδίτης $((\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$
- τοσουδίτης $(\text{Na}_{0.5}(\text{Al}, \text{Mg})_6(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{18}(\text{OH})_{12} \cdot 5(\text{H}_2\text{O}))$
- αιματίτης (Fe_2O_3)
- γκαιτίτης $(\text{Fe}^{+3}\text{O}(\text{OH}))$
- χρωμίτης $(\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{NiO})$
- νεπουίτης $((\text{Ni}, \text{Mg})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4)$
- κρυπτομέλανας $(\text{KMn}_8\text{O}_{16})$
- σεπιόλιθος $(\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$
- ασβεστίτης (CaCO_3)

, οι φάσεις που μπορεί να φέρουν νικέλιο (Ni) είναι ο νεπουίτης $((\text{Ni}, \text{Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ και ο γκαιτίτης $\text{Fe}^{+3}\text{O}(\text{OH})$ και πρέπει να εξεταστούν μικροσκοπικά για να πιστοποιήσουμε την ύπαρξή του.

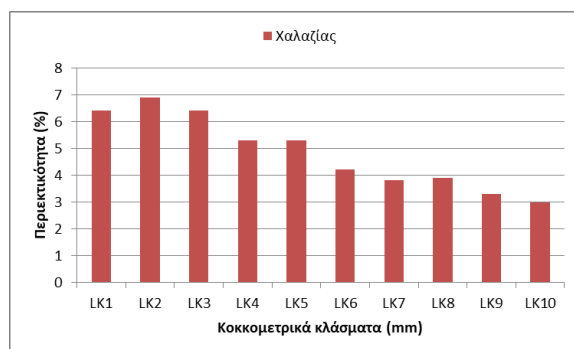
Στον πίνακα 2.3 και στα διαγράμματα 2.7 - 2.8 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα (%) των ορυκτολογικών φάσεων των κοκκομετρικών κλασμάτων LK1-LK10, από ημιποσοτική ανάλυση EVA. Παρατηρείται ότι υπάρχει μια τάση να μειώνεται η περιεκτικότητα του νεπουίτη και του χαλαζία των ορυκτών, με την μείωση του μεγέθους του κοκκομετρικού κλάσματος, ενώ ο γκαιτίτης εμφανίζεται πιο πλούσιος στα ενδιάμεσα κλάσματα.

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης κοκκομετρικών κλασμάτων με XRD

Δείγματα	Νεπουίτης (%)	Γκαιτίτης (%)	Χαλαζίας (%)
	$((\text{Ni}, \text{Mg})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4)$	$(\text{Fe}^{+3}\text{O}(\text{OH}))$	(SiO_2)
LK1	12	24	6
LK2	12	23	7
LK3	11	25	6
LK4	11	27	5
LK5	10	29	5
LK6	9	27	4
LK7	9	28	4
LK8	9	25	4
LK9	9	24	3
LK10	10	23	3



Διάγραμμα 2.7: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε Νεπουίτη και Γκαϊτίτη.



Διάγραμμα 2.8: Περιεκτικότητα κοκκομετρικών κλασμάτων σε Χαλαζία.

Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι Εμπλουτισμού και Μεταλλουργικές Μέθοδοι Εξαγωγής Νικελίου

3.1 Μέθοδοι εμπλουτισμού

Εμπλουτισμός μεταλλεύματος ονομάζεται το σύνολο των διεργασιών που πρέπει να υποστεί ένα μέταλλευμα ώστε να διαχωριστεί το χρήσιμο ορυκτό από τα συνυπάρχοντα στείρα ορυκτά. (Σταμπολιάδης,1993). Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με διάφορες μεθόδους, οι οποίες εκμεταλλεύονται τις διάφορες χημικές και φυσικές ιδιότητες του χρήσιμου και των στείρων ορυκτών. Έτσι, με την βοήθεια ειδικά σχεδιασμένων μηχανών παράγονται το συμπύκνωμα (προϊόν εμπλουτισμένο στο χρήσιμο ορυκτό), το απόρριμμα (απορριπτόμενο στείρο υλικό) και το ενδιάμεσο προϊόν.

Οι κυριότερες ιδιότητες που εκμεταλλεύεται ο εμπλουτισμός για το διαχωρισμό των ορυκτών μεταξύ τους είναι οι διαφορές στη μορφή (σχήμα, μέγεθος), στην όψη (χρώμα, λάμψη), στο ειδικό βάρος, στις ιδιότητες των επιφανειών, στη μαγνητική επιδεκτικότητα, στην ηλεκτρική αγωγιμότητα και στις χημικές ιδιότητες των ορυκτών.

Η τεχνολογία του εμπλουτισμού διακρίνεται σε τρεις κύριες φάσεις, οι οποίες είναι οι ακόλουθες (Κατράκης,1979):

- Κατάτμηση, δηλαδή θραύση ή λειοτριβήση ανάλογα με τον απαιτούμενο βαθμό αποδέσμευσης,
- Ταξινόμηση κατά μέγεθος ανάλογα με το μέγεθος αποδέσμευσης της μεθόδου εμπλουτισμού ή της τελικής εφαρμογής του χρήσιμου ορυκτού,
- Συγκέντρωση, δηλαδή η εφαρμογή μεθόδων εμπλουτισμού και η παραγωγή προϊόντων.

Τα λατεριτικά κοιτάσματα έχουν μικρή περιεκτικότητα σε νικέλιο (1,0 – 2,0 %) κι αυτό κάνει το κόστος επεξεργασίας να είναι αυξημένο και το βάρος της παραγόμενης σκωρίας να είναι 20 φορές το βάρος του παραγόμενου κράματος σιδηρονικελίου (Καρμάλη,2018). Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο εμπλουτισμός πριν την μεταλλουργική επεξεργασία στοχεύει:

- Στην αναβάθμιση της ποιότητας του μεταλλεύματος σε περιεκτικότητα νικελίου,
- Στην απόρριψη στείρου υλικού και
- Στην επιλογή της οικονομικότερης μεθόδου εμπλουτισμού.

Σύμφωνα με τον Quast et al. (2015), η πιο κοινή διαδικασία προ-επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για εμπορική υδρομεταλλουργική επεξεργασία των νικελιούχων λατεριτών, είναι η αφαίρεση ενός χονδρόκοκκου κλάσματος από την τροφοδοσία, η οποία έχει χαμηλή περιεκτικότητα νικελίου (Ni) σε σχέση με το πιο λεπτό υλικό.

Η Αγατζίνη-Λεονάρδου et al. χρησιμοποίησε θραύση και κοσκίνιση πριν από τον μαγνητικό διαχωρισμό για να αναβαθμίσει ένα ελληνικό λατεριτικό μέταλλευμα. Οι κύριοι φορείς Ni ήταν ο σερπεντινίτης (ένα μέταλλευμα που περιέχει μεταλλικό πυριτικό άλας). Τα αποτελέσματα διαλογής

έδειξαν ότι κανένα κλάσμα του θρυμματισμένου μεταλλεύματος δεν θα μπορούσε να απορριφθεί αλλά το κλάσμα -0,15 mm ήταν αρκετά υψηλό σε Νί ώστε να μπορεί να μεταφερθεί στο στάδιο της έκπλυσης. Ο κύριος στόχος της επεξεργασίας ορυκτών ήταν η αφαίρεση ασβεστίου που καταναλώνει οξύ στην επακόλουθη διαδικασία εκχύλισης.

Οι Muir και Johnson (2006) επανεξέτασαν τον φυσικό εμπλουτισμό του νικελιούχου λατερίτη, χρησιμοποιώντας βαρυτομετρικό διαχωρισμό (κυρίως για τον διαχωρισμό του χρωμίτη), μαγνητικό και ηλεκτροστατικό διαχωρισμό και ταξινόμηση κατά μέγεθος. Από όλες αυτές τις τεχνικές, η ταξινόμηση μεγέθους ήταν η πιο επιτυχής μέθοδος για τον εμπλουτισμό των λατεριτικών μεταλλευμάτων. Το νικέλιο στον λατερίτη της Νέας Καληδονίας ήταν υψηλότερο στα πιο λεπτά κλάσματα με μόλις λιγότερο από το 50% να βρίσκεται στο κλάσμα -37 μ m. Το μαγνήσιο, το χρώμιο, το αργίλιο και το πυρίτιο συγκεντρώθηκαν στα πιο χονδρά κλάσματα.

Επίσης, οι Tong κ.α. (2015) έκανα μια σύγκριση για τρεις διαφορετικούς λατερίτες από την Αυστραλία. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν ένα γκαϊτιτικό λατερίτη πλούσιο σε πυρίτιο (SG), έναν γκαϊτιτικό λατερίτη (G) κι έναν σαπρολιτικό λατερίτη (SAP) και μελέτησαν τον εμπλουτισμό τους σε Νί μέσω εκλεκτικής λειοτρίβησης. Από τη μελέτη αυτή συμπέραναν ότι το Νί περιέχεται στα κλάσματα μαλακών ορυκτών στα οποία γίνεται πιο εύκολα εμπλουτισμός. Επίσης, κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι ο μικρότερος χρόνος λειοτρίβησης ($t=0.25$ min) είναι βέλτιστος, για την εκλεκτική λειοτρίβηση και τον εμπλουτισμό του Νί. Τα αποτελέσματα της έρευνας για τον εμπλουτισμό του Νί έδειξαν ότι στο μέταλλευμα SG το Νί εμπλουτίστηκε από 0.73 % σε 1.22 % στο προϊόν λειοτρίβησης -38 μ m με ανάκτηση Νί 33 % στο προϊόν -38 μ m. Αντίθετα, στο μέταλλευμα G, εκλεκτική λειοτρίβηση δεν ήταν αποτελεσματική διότι περιείχε πολύ λίγο χαλαζία.

3.2 Μεταλλουργικές μέθοδοι εξαγωγής νικελίου από λατερίτες

Γενικά οι μέθοδοι που εφαρμόζονται σήμερα για την εξαγωγή νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα διακρίνονται σε πυρομεταλλουργικές και υδρομεταλλουργικές (Συγκούνα,1999). Τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας είναι η χημική σύσταση του μεταλλεύματος και συγκεκριμένα ο λόγος Ni/Mg για την υδρομεταλλουργική μέθοδο και οι λόγοι Mg/SiO₂ και Mg/Fe για την επιλογή πυρομεταλλουργικής μεθόδου (Κομνίτσας 2010).

Η πυρομεταλλουργική μέθοδος της Mousoulou – LARCO, αναπτύχθηκε στην Ελλάδα για λογαριασμό της ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ. Εφαρμόζεται στις εγκαταστάσεις της εν λόγω εταιρίας, στην περιοχή της Λοκρίδας, με σκοπό της αξιοποίηση των Ελληνικών λατεριτικών κοιτασμάτων. Πρόκειται για πυρομεταλλουργική κατεργασία, βάση της οποίας αποτελεί η εκλεκτική αναγωγή του μεταλλεύματος.

Οι ελληνικοί λατερίτες διαφέρουν από τους υπόλοιπους στην σχετικά χαμηλότερη περιεκτικότητά τους σε νερό και στη σχετικά υψηλότερη σε Al₂O₃. Η μέθοδος LM εκτός από την αξιοποίηση των ιδιόρρυθμων ελληνικών κοιτασμάτων, μπορεί να καλύψει όλους τους τύπους λατεριτικών μεταλλευμάτων.

Το μέταλλευμα, θραύεται και αναμειγνύεται με συγκεκριμένη ποσότητα στερεού καυσίμου (λιγνίτης, γαιάνθρακας). Οδηγείται σε περιστροφικό κλίβανο, όπου υποβάλλεται σε ελεγχμένη ανθρακοθερμική αναγωγή, μια προαναγωγή ουσιαστικά των οξειδίων Ni, καθώς επίσης και μέρος των οξειδίων του σιδήρου. Στην έξοδο του κλιβάνου υπάρχει καυστήρας μαζούτ, με σκοπό την υποβοήθηση της θέρμανσης του μεταλλεύματος, ενώ στα πλάγια της καμίνου υπάρχουν φυσητήρες, απ' όπου τροφοδοτείται αέρας. Η θερμοκρασία του μεταλλεύματος φθάνει τους 850 – 900 °C .

Τα καυσάεργια της καμίνου παρασύρουν λεπτή σκόνη, η οποία συλλέγεται σε φίλτρα και κατόπιν μορφοποιείται σε pellets τα οποία ανακυκλώνονται στην περιστροφική κάμινο.

Το προϊόν των περιστροφικών καμίνων εν συνεχεία υποβάλλεται σε μία επιπλέον αναγωγή των οξειδίων του Fe σε ηλεκτρικές καμίνους αναγωγικής τήξης, όπου μεταφέρεται από την περιστροφική κάμινο μέσω κάδων γερανογεφύρων. Από εκεί παραλαμβάνεται σιδηρονικελιούχο προϊόν και σκωρία. Το σιδηρονικελιούχο προϊόν έχει θερμοκρασία 1500 °C και περιεκτικότητα 14 % σε Ni. Η σκωρία αποβάλλεται με θερμοκρασία 1400 °C, ψύχεται και συγχρόνως σφαιροποιείται.

Το σιδηρονικελιούχο προϊόν στη συνέχεια οδηγείται σε μεταλλάκτες, όπου γίνεται εμπλουτισμός και ταυτόχρονα καθαρίζεται από θείο και φώσφορο. Με εμφύσηση οξυγόνου – προπανίου , μέρος του σιδήρου φεύγει ως σκωρία, με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του μίγματος Ni.

Η σκωρία που παράγεται εδώ από απόχυση και ψύξη θραύεται, με σκοπό την ανάκτηση του μηχανικώς παρασυρόμενου μετάλλου έπειτα από μαγνητικό διαχωρισμό. Η μεταλλική φάση που παράγεται στο στάδιο αυτό, αποτελεί και το τελικό προϊόν προς πώληση, με περιεκτικότητα σε Ni 20 – 25 % , ανάλογα με τις ζητούμενες προδιαγραφές.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος αξιοποίησης λατεριτικών μεταλλευμάτων περιλαμβάνει τις εξής φάσεις (Σκλαβούνος 1999):

1. Ελεγχμένη αναγωγή του μεταλλεύματος.
 2. Τήξη σε σιδηρονικέλιο (22 – 25 % Ni)
 3. Καθαρισμό και εμπλουτισμό του κράματος (25 – 30 % Ni)
- Εφόσον επιζητείται καθαρό νικέλιο:
4. Παρασκευή ανόδων (90 % Ni)
 5. Ηλεκτρόλυση

Οι υδρομεταλλουργικές μέθοδοι κατεργασίας του λατερίτη αναφέρονται στην εκχύλιση με αμμωνία και στην εκχύλιση με θειικό οξύ σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση (Ζευγώλης, 1989).

Στην εκχύλιση με αμμωνία, κατά τη μέθοδο Nicaro, απαιτείται προθέρμανση και αναγωγή του μεταλλεύματος, όπως και στην παραγωγή του FeNi. Όταν ο χαλκός και το κοβάλτιο βρίσκονται σε αξιόλογα ποσοστά, τότε η εκχύλιση γίνεται υπό πίεση όπου η αμμωνία διαλυτοποιεί το νικέλιο, τον χαλκό και το κοβάλτιο, δίνοντας αμίνες. Ακολουθεί υδρομεταλλουργικός διαχωρισμός και η ανάκτηση του νικελίου ολοκληρώνεται με αναγωγή, σε μορφή κόνεως, με υδρογόνο (μέθοδος Sherrit – Gordon).

Η μέθοδος εκχύλισης με οξύ περιλαμβάνει τη διαλυτοποίηση του νικελίου και κοβαλτίου σε θειϊκό οξύ, σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Κύρια λειτουργική επιβάρυνση της μεθόδου είναι το κόστος του θειικού οξέος, του οποίου η κατανάλωση αυξάνει όσο αυξάνει η περιεκτικότητα του μεταλλεύματος σε μαγνήσιο.

Κεφάλαιο 4: Θεωρητικό υπόβαθρο

4.1 Κατάτμηση

Κατάτμηση γενικά καλείται η διαδικασία της ελάττωσης του μεγέθους των τεμαχίων μεταλλεύματος, ορυκτού ή πετρώματος σε μεγέθη κατάλληλα για τον εμπλουτισμό (αποδέσμευση), την κατ' ευθείαν μεταλλουργική επεξεργασία ή τη βιομηχανική χρήση του υλικού (όπως στα αδρανή υλικά, στο τσιμέντο κλπ) (Σταμπολτζής,1994).

Ο όρος κατάτμηση περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ελάττωσης του μεγέθους των υλικών (θραύση και λειοτρίβηση) ανεξάρτητα από το αρχικό και τελικό μέγεθος των τεμαχίων.

Θραύση είναι η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους μεγάλων τεμαχίων μεταλλεύματος (ή πετρώματος) σε τεμάχια με μέγεθος περίπου μεγαλύτερο από 2 mm. Απλή θραύση ονομάζεται η θραύση ενός τεμαχίου από ένα σύστημα εξωτερικών δυνάμεων που ενεργεί μία φορά πάνω στο τεμάχιο και απομακρύνεται αμέσως μόλις αρχίσει η θραύση. Όταν η διαδικασία αυτή εφαρμοστεί πάνω στο ίδιο τεμάχιο πολλές φορές διαδοχικά, τότε η θραύση λέγεται πολλαπλή. Οι στοιχειώδεις διαδικασίες θραύσης ενός τεμαχίου είναι η απλή κρούση, η διπλή κρούση, η δυναμική θλίψη, η αργή συμπίεση και η στατική θλίψη. Η θραύση γίνεται με την επιλογή του κατάλληλου τύπου θραυστήρα (θραυστήρα σιαγόνων, γυροσκοπικός, κωνικός, κρουστικός, σφυρόμυλος και θραυστήρας κυλίνδρων).

Μετά τη θραύση ακολουθεί η λειοτρίβηση, προκειμένου το μέγεθος των τεμαχίων να μειωθεί στα 10 έως 300 μm (πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1 : Στάδια κατάτμησης, Μεγέθη τεμαχιδίων τροφοδοσίας και προϊόντων (Πετράκης,2004)

Στάδια	Φάσεις	Μέγεθος τεμαχιδίων (mm)	
		Τροφοδοσίας	Προϊόντων
Θραύση	α.Πρωτογενής	1200-200	300-60
	β.Δευτερογενής	250-90	80-25
		100-30	30-8
	γ.Τριτογενής	35-5	10-2
Λειοτρίβηση	α.Χονδρομερής	25-2	1-0.5
	β.Λεπτομερής	10-2	0.5-0.074
	γ.Άλεση	10-2	-0.074 ή -0.040

4.2 Μηχανές κατάτμησης

Οι μηχανές κατάτμησης χρησιμοποιούνται για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων και χωρίζονται στις μηχανές θραύσης και στις μηχανές λειοτρίβησης. Οι μηχανισμοί ελάττωσης του μεγέθους κατά τη θραύση και τη λειοτρίβηση είναι διαφορετικοί. Η κύρια διαφορά τους είναι στις διεργασίες θραύσης, οι δυνάμεις που ενεργούν για την ελάττωση του μεγέθους του τεμαχιδίου είναι κυρίως θλίψης και κρούσης και λιγότερο τριβής, ενώ στη λειοτρίβηση οι δυνάμεις που ενεργούν είναι αυτές της τριβής. (Tasdemir, 2009)

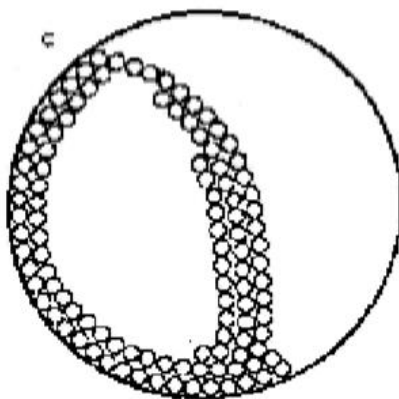
Οι μηχανές θραύσης χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος της τροφοδοσίας που μπορούν να θραύσουν. Στην παρούσα εργασία για τις ανάγκες θραύσης του υλικού χρησιμοποιήθηκε ο σιαγονοτός θραυστήρας ο οποίος αποτελείται από μια ακίνητη επιφάνεια, σχεδόν κατακόρυφη, απέναντι στην οποία βρίσκεται μια δεύτερη κινητή επιφάνεια υπό γωνία. Η κίνηση της δεύτερης επιφάνειας συνθλίβει τα σώματα που βρίσκονται μεταξύ των επιφανειών, οι οποίες ενεργούν σαν είδος σιαγόνων. Το άνοιγμα στο πάνω μέρος των σιαγόνων καθορίζει το μέγεθος των τεμαχιδίων της τροφοδοσίας, ενώ το άνοιγμα στο κάτω μέρος καθορίζει το μέγεθος του προϊόντος που δεν είναι σταθερό. Οι σιαγονοτοί σπαστήρες χρησιμοποιούνται στην πρωτογενή και δευτερογενή θραύση (Σταμπολιάδης, 2008).

Το βασικό μηχάνημα μιας διάταξης κατάτμησης είναι ο μύλος (Φραγκίσκος, 1990). Υπάρχουν πολλά είδη μύλων που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει επειδή τα διάφορα υλικά δεν αλέθονται όλα με τον ίδιο τρόπο. Έτσι άλλα υλικά απομειώνονται σε μέγεθος με κρούση, άλλα με κοπή, άλλα με τριβή, άλλα με σύνθλιψη κλπ. Η λειοτρίβηση γίνεται κυρίως σε μύλους κυλιόμενου φορτίου (ραβδόμυλοι, σφαιρόμυλοι, κροκαλόμυλοι, αυτογενείς μύλοι). Γίνεται επίσης και σε μύλους περιφερόμενων τροχών (ξηρή κατάτμηση). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε λειοτρίβηση με χρήση σφαιρόμυλου.

Στους ραβδόμυλους, σφαιρόμυλους και κροκαλόμυλους, η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων γίνεται με τη θλίψη, την κρούση και την τριβή που εφαρμόζουν τα μέσα λειοτρίβησης (ράβδοι, σφαίρες, κροκάλες) στα τεμάχια του υλικού, αλλά και τα ίδια τα τεμάχια μεταξύ τους (αυτογενής λειοτρίβηση).

Οι σφαιρόμυλοι είναι κυλινδρικοί χαλύβδινοι θάλαμοι που μπορούν να περιστρέφονται γύρω από ένα οριζόντιο άξονα, οι οποίοι περιέχουν χαλύβδινες σφαίρες διαφόρων διαμέτρων για τη λειοτρίβηση του υλικού. Οι διαστάσεις τους ποικίλουν ανάλογα με το είδος της κατάτμησης που πρόκειται να εκτελέσουν. Κατά τη λειτουργία του σφαιρόμυλου, οι σφαίρες εκτελούν, λόγω τριβής με τα τοιχώματα του μύλου αλλά και λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων, κυκλική τροχιά μέχρι κάποιο οριακό σημείο, που βρίσκεται π.χ. κοντά στην κορυφή της τροχιάς τους. Εκεί, λόγω του βάρους τους χάνουν την επαφή τους με τα τοιχώματα του κελύφους και πέφτουν προς τον πυθμένα, όπου όμως παρασύρονται από το κέλυφος της μηχανής και πάλι. Η δύναμη που κρατά σε επαφή τις σφαίρες μεταξύ τους και με τα τοιχώματα κατά τη διάρκεια της κίνησης προς τα πάνω είναι η φυγόκεντρος.

Κατά την επαφή τους με τα τοιχώματα οι σφαίρες κυλούν επίσης μεταξύ τους, οπότε προκαλείται επιπλέον (μερική) κατάτμηση του υλικού λόγω τριβής. Το μεγαλύτερο όμως ποσοστό κατάτμησης συμβαίνει στη ζώνη σύγκρουσης, κατά την ελεύθερη πτώση των σφαιρών και την πρόσκρουσή τους με το προς κατάτμηση στερεό υλικό και με το κάτω μέρος του μύλου (Εικόνα 4.1).



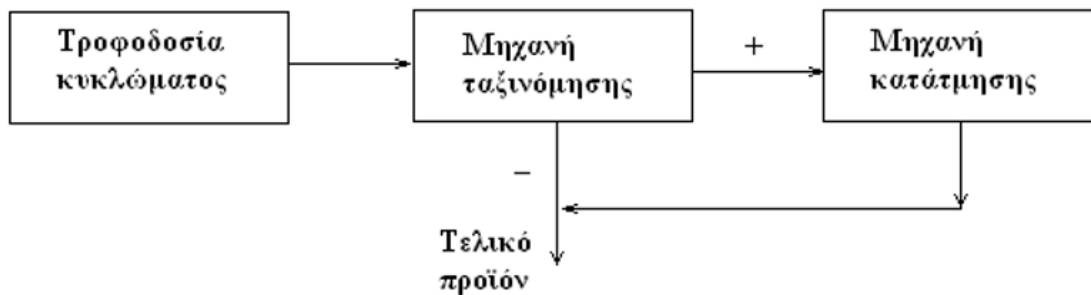
Εικόνα 4.1: Τροχιά σφαιρών κατά τη λειτουργία ενός σφαιρόμυλου

Οι διατάξεις κατάτμησης, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Διατάξεις διακοπτόμενης λειτουργίας
2. Διατάξεις ανοικτού κυκλώματος
3. Διατάξεις κλειστού κυκλώματος

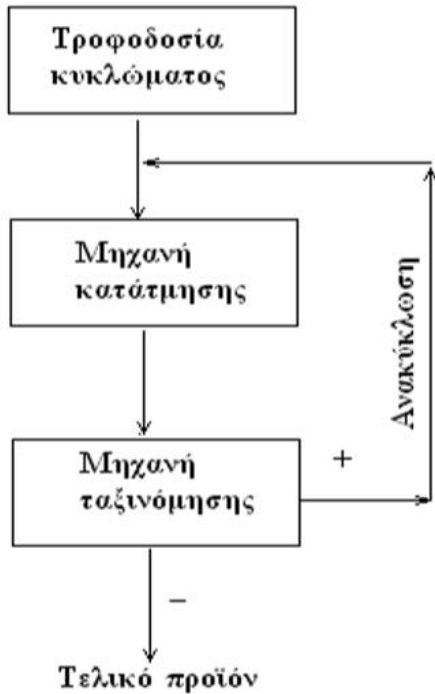
Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν διατάξεις στις οποίες η προς λειοτρίβηση ουσία εισάγεται στο μύλο, λειοτριβείται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα ανάλογα με την επιδιωκόμενη λεπτότητα και στη συνέχεια εξάγεται προκειμένου να εισέλθει άλλη και να επαναληφθεί ο ίδιος κύκλος.

Στη διάταξη ανοικτού κυκλώματος, με την παρεμβολή της μηχανής ταξινόμησης, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του ποσοστού της τροφοδοσίας του κυκλώματος με μέγεθος τεμαχίων μικρότερο ή ίσο του επιθυμητού (προ της εισαγωγής της τροφοδοσίας στη μηχανή κατάτμησης) και η κατάτμηση του υπόλοιπου ποσοστού με μέγεθος τεμαχίων μεγαλύτερο ή ίσο του επιθυμητού (Εικόνα 4.2).

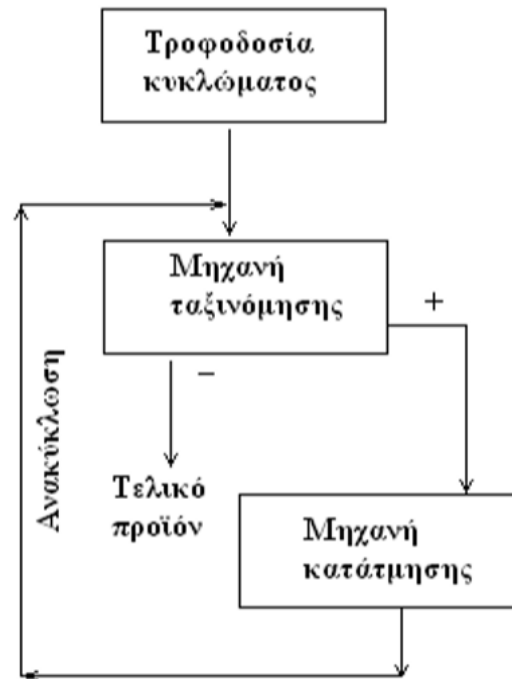


Εικόνα 4.2: Ανοιχτό κύκλωμα κατάτμησης

Τα κλειστά κυκλώματα διακρίνονται σε άμεσα και έμμεσα (Σταμπολτζής,1994). Στα άμεσα κλειστά κυκλώματα η μηχανή ταξινόμησης τοποθετείται μετά τη μηχανή κατάτμησης και έτσι επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του ποσοστού του προϊόντος της μηχανής κατάτμησης με μέγεθος τεμαχίων μικρότερο ή ίσο του επιθυμητού και η επιστροφή (ανακύκλωση) του υπόλοιπου ποσοστού, με μέγεθος τεμαχίων μεγαλύτερο ή ίσο του επιθυμητού, στην τροφοδοσία της μηχανής κατάτμησης (Εικόνα 4.3). Στα έμμεσα κυκλώματα επιτυγχάνεται (με παρεμβολή της μηχανής ταξινόμησης προ της μηχανής κατάτμησης) η απομάκρυνση και κατάτμηση των αντίστοιχων ποσοστών της τροφοδοσίας του κυκλώματος που προαναφέρθηκαν στα ανοιχτά κυκλώματα και η επιστροφή (ανακύκλωση) του προϊόντος της μηχανής κατάτμησης στην τροφοδοσία της μηχανής ταξινόμησης (Εικόνα 4. 4).



Εικόνα 4.3: Κλειστό άμεσο κύκλωμα κατάτμησης (Σταμπολτζής,1994)



Εικόνα 4.4: Κλειστό έμμεσο κύκλωμα κατάτμησης (Σταμπολτζής,1994)

Σημαντικό μέγεθος για τα κλειστά κυκλώματα άλεσης είναι το κυκλοφορούν φορτίο που ορίζεται ως το πηλίκο της ποσότητας (χονδρόκοκκο κλάσμα) που επιστρέφει προς το μύλο, προς τη νεοεισαγόμενη στο μύλο ποσότητα, που προφανώς είναι ίση με το λεπτόκοκκο κλάσμα που αποτελεί το τελικό προϊόν του συστήματος κατάτμησης.

Είναι γνωστό ότι η κατάτμηση, ως γενική έννοια, είναι μία από τις πιο σημαντικές διεργασίες στην οποία υποβάλλεται ένα μετάλλευμα, πέτρωμα ή βιομηχανικό ορυκτό. Η παρεμβολή της είναι αναπόφευκτη, συνεχής και δαπανηρή σε κόστος αγοράς /εγκατάστασης μηχανημάτων και λειτουργίας. Το κόστος κατάτμησης ανά τόνο μεταλλεύματος, ιδιαίτερα αν πρόκειται για κατάτμηση, πολλές φορές δημιουργεί τη μεγαλύτερη δαπάνη σε ένα εργοστάσιο.

Γι αυτό το λόγο η μελέτη της κατάτμησης ενός μεταλλεύματος είναι απαραίτητη τόσο από την άποψη του αποτελέσματος για τον επιδιωκόμενο σκοπό, όσο και από την άποψη της οικονομίας. Οποιαδήποτε οικονομία στο κύκλωμα κατάτμησης γίνεται αμέσως αντιληπτή στο συνολικό κόστος της λειτουργίας του εργοστασίου (Σταμπολτζής,1994).

Οι κυριότερες φυσικοχημικές και φυσικομηχανικές ιδιότητες των τεμαχιδίων οι οποίες επηρεάζουν (μεταξύ άλλων) και την επιλογή της καταλληλότερης συσκευής κατάτμησης (ελάττωσης μεγέθους στερεών), είναι η σκληρότητα, η επιφανειακή ενέργεια, η φαινόμενη πυκνότητα και το πορώδες, οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις και η κατάτμηση.

❖ Σκληρότητα

Η ιδιότητα αυτή των στερεών επηρεάζει κυρίως τις διεργασίες ελάττωσης μεγέθους, καθώς επιδρά στην κατανάλωση ενέργειας και στη φθορά του μηχανήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Εκφράζεται συνήθως με κάποια τιμή στην κλίμακα της σχετικής σκληρότητας του Mohs, στην οποία ως βάση θεωρείται το σκληρότερο υλικό (διαμάντι) με τιμή 10.

❖ Επιφανειακή ενέργεια

Η ενέργεια που απαιτείται για το σχηματισμό μιας μονάδας επιφάνειας στα στερεά καλείται επιφανειακή ενέργεια. Γενικά ισχύει, ότι αυξανόμενης της σκληρότητας και του σημείου τήξης ενός στερεού υλικού, αυξάνεται και η επιφανειακή του ενέργεια. Στις άκρες ενός σωματιδίου η επιφανειακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη. Εξαρτάται επίσης από το σχήμα και το μέγεθος των τεμαχιδίων. Σφαιρικά και κυβικά τεμαχίδια έχουν μικρότερη τιμή επιφανειακής ενέργειας και ρέουν ευκολότερα από τα βελονοειδή, φυλλώδη και ινώδη τεμαχίδια. Επίσης, η τιμή της επιφανειακής ενέργειας των τεμαχιδίων, επηρεάζεται από το εάν αυτά παρουσιάζουν το φαινόμενο της μεταξύ τους συγκόλλησης.

❖ Φαινόμενη πυκνότητα και πορώδες

Σαν φαινόμενη πυκνότητα (bulk density, ρ_B) μιας κλίνης (στρώματος) στερεών τεμαχιδίων ορίζεται η μάζα ενός πληθυσμού τεμαχιδίων ανά μονάδα όγκου (kg/m^3 ή g/cm^3). Είναι πάντοτε μικρότερη από την πραγματική πυκνότητα των ανεξαρτήτων τεμαχιδίων (ρ_S):

$\rho_B = (1 - \varepsilon) \rho_S$, όπου ε είναι το πορώδες της κλίνης, υπό μορφή κλασματος.

Η φαινόμενη πυκνότητα εξαρτάται από τον τρόπο πλήρωσης του δοχείου μέτρησης, από τη «συμπύκνωσή» τους και επομένως, από τη διάταξη των τεμαχιδίων στο δοθέντα όγκο, συνεπώς τόσο το μέγεθος, όσο και η κατανομή μεγέθους των τεμαχιδίων θα επιδρούν σημαντικά σ' αυτήν, αλλά και στις διεργασίες που εξαρτώνται από αυτήν (π.χ. αποθήκευση, ροή υπό την επίδραση βαρύτητας).

❖ Ηλεκτροστατικές δυνάμεις

Αυτές εμφανίζονται σε όλες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες ξηρά σωματίδια βρίσκονται σε κίνηση (π.χ. κοσκίνιση, ανάμιξη, διακίνηση σε αγωγούς, ή σε μεταφορικές ταινίες). Είναι δυνατό να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα και για το λόγο αυτό η ηλεκτροστατική φόρτιση θα πρέπει να εξουδετερώνεται με κατάλληλη γείωση των εγκαταστάσεων, ή να ελέγχεται με την προσθήκη υγρασίας. Θετικά φορτία εμφανίζονται συνήθως στην περίπτωση του άνθρακα, στο αλάτι, το πυριτικό οξύ και το θείο, ενώ αρνητικά φορτία στο αλουμίνιο, στη σόδα, στον ψευδάργυρο, στη μαγνησία, στην αλούμινα και στα οξείδια του σιδήρου. Τέλος, για τα υλικά που εμφανίζουν κολλώδεις ιδιότητες, λιπώδεις ή εκρηκτικές, καθώς και αυτά που παράγουν σκόνη επικίνδυνη για την υγεία, θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη πρόνοια για τη μετακίνηση ή γενικότερα για τον ασφαλή χειρισμό τους (π.χ.

κατά τη κατάτμηση) προς αποφυγή απόφραξης των μηχανημάτων, ή άλλων επικινδύνων καταστάσεων (πυρκαγιές, εκρήξεις κτλ.).

❖ Ευθραυστότητα

Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται η ευκολία κατάτμησης ενός υλικού, δηλ. η ελάττωση του μεγέθους του σε μεγάλο βαθμό (μεγάλος λόγος κατάτμησης, reduction ratio). Μαζί με ορισμένες άλλες φυσικομηχανικές ιδιότητες των στερεών, όπως είναι η αντοχή σε θλίψη, κρούση και διάτμηση, παίζει σημαντικό ρόλο για την επιλογή των κατάλληλων μηχανών και μεθόδων ελάττωσης του μεγέθους των στερεών. Επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το είδος του μηχανήματος, η σκληρότητα, υγροσκοπικότητα και συσσωμάτωση των στερεών, ο τρόπος θραύσης του υλικού, η παρουσία κατά τη θραύση (ή άλεση) κατάλληλων βοηθητικών ουσιών (συνήθως επιφανειακώς ενεργών), που με την προσρόφησή τους στην επιφάνεια των σωματιδίων ελαττώνουν την αντίστοιχη απαραίτητη επιφανειακή ενέργεια, με συνέπεια να βελτιώνουν την κατάτμησή τους.

4.3 Παράμετροι λειοτρίβησης

Κατά την διαδικασία της λειοτρίβησης υπάρχουν κάποιοι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να γίνει σωστά η διαδικασία. Αυτοί οι παράμετροι εξαρτώνται από το υλικό, από τα μέσα λειοτρίβησης, από τα χαρακτηριστικά του μύλου και τη συχνότητα περιστροφής του και από την πλήρωση των κενών των σφαιρών με υλικό.

❖ Κρίσιμη συχνότητα περιστροφής N_c

Η ανύψωση μιας σφαίρας, παρασυρόμενης από την περιστροφική κίνηση του κελύφους του μύλου, εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής. Η δύναμη που κρατάει τη σφαίρα επί του τυμπάνου είναι η φυγόκεντρος. Το υψηλότερο σημείο στο οποίο μπορεί να φθάσει μια σφαίρα κατά την περιστροφή του μύλου είναι η κορυφή του κελύφους. Σε αυτή την περίπτωση η συχνότητα περιστροφής είναι η N_c και ονομάζεται κρίσιμη συχνότητα περιστροφής διότι όταν το κέλυφος περιστρέφεται με συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση με αυτή, τότε η σφαίρα δεν πέφτει και παραμένει συνεχώς κολλημένη στο κέλυφος, οπότε δε γίνεται λειοτρίβηση στον μύλο. Η N_c υπολογίζεται από τη σχέση (1) (Σταμπολιάδης, 2008):

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \text{rpm} \quad (1)$$

όπου D η εσωτερική διάμετρος του μύλου (m).

Συνήθως οι μύλοι περιστρέφονται με συχνότητα 60% - 80% της N_c .

❖ Συντελεστής πλήρωσης υλικού f_c

Ο συντελεστής πλήρωσης του υλικού μας δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνει το υλικό σε σχέση με τον όγκο του μύλου. Ο f_c δίνεται από τη σχέση (2):

$$f_c = \left(\frac{\frac{\text{μάζα υλικού}}{\text{φαινόμενη πυκνότητα}}}{\text{όγκος μύλου}} \right) (\%) \quad (2)$$

❖ Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών J

Ο συντελεστής πλήρωσης σφαιρών J μας δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνουν οι σφαίρες σε σχέση με τον όγκο του μύλου. Το J δίνεται από τη σχέση (3):

$$J = \left(\frac{\frac{\text{μάζα σφαιρών}}{\text{πυκνότητα σφαιρών}}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \times \frac{1}{(1-\varphi)} (\%) \quad (3)$$

όπου φ είναι το πορώδες στρώματος των σφαιρών και του υλικού μέσα στο μύλο, το οποίο διαφέρει ελάχιστα ανάλογα με το μέγεθος σφαιρών, την πλήρωση σε υλικό κλπ. Η συνήθης τιμή για το φ είναι το 0.4 ή 40% και σε εργαστηριακό και σε βιομηχανικό επίπεδο (Austin et al., 1984).

❖ Συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό U

Ο συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό μας δείχνει το κατά πόσο έχουν πληρωθεί τα κενά ανάμεσα στις σφαίρες με υλικό και είναι συνάρτηση των f_c και J . Το U δίνεται από τη σχέση (4):

$$U = \frac{f_c}{0.4 \times J} \quad (4)$$

❖ Ισχύς P

Η ισχύς P (W) που απορροφάται από ένα μύλο εξαρτάται από τη διάμετρο του μύλου, τη συχνότητα περιστροφής και τη μάζα της τροφοδοσίας. Δίνεται από τη παρακάτω σχέση (5) (Σταμπολτζής, 1990):

$$P = 0.109 \times M \times N^{1.124} \times D^{1.078} \quad (5)$$

όπου M είναι η μάζα της τροφοδοσίας σε kg, N η συχνότητα περιστροφής σε rpm και D η διάμετρος του μύλου σε m.

❖ Ειδική ενέργεια ε

Η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων αποτελεί μια εξαιρετικά ενεργοβόρα διεργασία. Το μέγεθος που μετράται κατά τη λειοτρίβηση, είναι η ενέργεια ανά μονάδα βάρους ή όγκου (ειδική ενέργεια) που απαιτείται ώστε από ένα αρχικό υλικό να επιτύχουμε το επιθυμητό μέγεθος. Για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων καταναλώνεται το 3-4% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως και η κατανάλωση φθάνει μέχρι το 70% της συνολικής ενέργειας που απαιτείται σε μια βιομηχανία επεξεργασίας ορυκτών. Από την ενέργεια που παράγουν οι μηχανές θραύσης και

λειτουργίβησης μόνο ένα μικρό ποσοστό διατίθεται για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων, ενώ η περισσότερη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα.

Έτσι είναι απαραίτητο να γίνονται προσπάθειες πρόβλεψης ή μείωσης της απαιτούμενης ειδικής ενέργειας, ώστε να γίνει σωστός προγραμματισμός της λειτουργίβησης και ορθολογικός σχεδιασμός της όλης εγκατάστασης επεξεργασίας του μεταλλεύματος με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα βάρους υλικού (Πετράκης, 2017).

Η ενέργεια E (kJ) που απαιτείται για την κατάτμηση μεταλλεύματος ή πετρώματος δίνεται από τη σχέση (6):

$$E = P \times t \quad (6)$$

όπου P η ισχύς σε kW και t ο χρόνος σε sec.

Ένα διαιρέσουμε τη σχέση (6) με τη μάζα M του υλικού προκύπτει η ειδική ενέργεια ε από τη σχέση (7) σε kJ/kg:

$$\varepsilon = \frac{P \times t}{M} \quad (7)$$

όπου P η ισχύς σε kW, t ο χρόνος λειτουργίβησης σε sec και M η μάζα του υλικού σε κιλά (kg).

Η διαίρεση της σχέσης (7) με το 3.6 θα δώσει την ειδική ενέργεια σε kWh/t.

4.4 Επίδραση μεγέθους σφαίρας

Η επίδραση του μεγέθους των σφαιρών που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία λειτουργίβησης είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας αυτής (Πετράκης, 2017). Από πολλές έρευνες έχει αποδειχθεί ότι οι μεγάλες σφαίρες είναι καταλληλότερες για τα μεγάλα τεμαχίδια, ενώ οι μικρές σφαίρες είναι πιο αποτελεσματικές για την λειτουργίβηση των λεπτών τεμαχιδίων. Τα πιο σκληρά και χονδρόκοκκα υλικά απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και μεγάλα μέσα, ενώ τα λεπτά υλικά απαιτούν μεγαλύτερη επιφάνεια λειτουργίβησης και μικρότερα μέσα (Napier-Munn et al. 1996). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει σχέση (8) μεταξύ του βέλτιστου μεγέθους (x_m) του θραυσμένου τεμαχιδίου και της διαμέτρου της σφαίρας (d) και είναι η ακόλουθη:

$$x_m = k \times d^A \quad (8)$$

Όπου,

k, A : σταθερές,

d : διάμετρος σφαίρας.

Επίσης, για το βέλτιστο μέγεθος (x_m) υπάρχει η αντίστοιχη μέγιστη τιμή του ρυθμού θραύσης (S_m) του θραυσμένου τεμαχιδίου, όπου ο ρυθμός θραύσης ορίζεται ως το κλάσμα της μάζας (m_i) του υλικού μεγέθους i , μετά από χρόνο λειοτρίβησης t (Πετράκης, 2017). Η σχέση (9) η οποία δείχνει το μέγιστο ρυθμό θραύσης (S_m) με τη διάμετρο της σφαίρας (d) είναι η ακόλουθη:

$$S_m = k' \times d^B \quad (9)$$

Όπου,

k' , B : σταθερές.

d : διάμετρος σφαίρας.

Υπάρχουν διαφορετικές απόψεις για τις τιμές που μπορεί να πάρει η παράμετρος k . Οι Austin et al. (1976) αναφέρουν ότι η σταθερά k παίρνει τιμές μεταξύ $10^{-3} - 0.7 \times 10^{-3}$ για μαλακά μέχρι σκληρά υλικά, ενώ οι Napier – Munn et al (1996) βρήκαν ότι η σταθερά k είναι της τάξης $0,44 \times 10^{-3}$.

Επίσης, ο εκθέτης A της σχέσης έχει προσδιοριστεί από πολλούς ερευνητές και για διάφορα υλικά κι έχει βρεθεί ότι είναι ίσος με 2. Αυτό όμως δεν ισχύει για όλα τα υλικά. Πιο συγκεκριμένα, οι Austin et al (1976) αναφέρουν ότι ο εκθέτης παίρνει τιμή 2. Αντίθετα, οι Kotake et al (2002) μετά από σειρά δοκιμών σε διάφορα υλικά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές του εκθέτη ανάλογα με το υλικό. Για παράδειγμα, στον ασβεστόλιθο ο εκθέτης παίρνει τιμή 0,51, ενώ στη γύψο 0,60. Σε μια άλλη σειρά δοκιμών οι Kotake et al (2004) έδειξαν ότι στον τάλκη ο εκθέτης παίρνει τιμή 0,48, ενώ στη γύψο 0,60.

Οι Kotake et al (2004) μετά από σειρά δοκιμών σε διάφορα υλικά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές της σταθεράς k' και του εκθέτη B ανάλογα με το υλικό. Για παράδειγμα, στο χαλαζίτη η σταθερά k' παίρνει τιμή 0,015 και ο εκθέτης B παίρνει τιμή 1,21. Επίσης, οι ίδιοι βρήκαν ότι για δοκιμές με διάμετρο σφαίρας, $d \leq 20$ mm σε ασβεστόλιθο και σε γύψο οι σταθερές k' παίρνουν τιμές 0,0092 και 0,027 και οι εκθέτες B έχουν τιμές 1,42 και 1,06 αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διαδικασία

5.1 Θραύση

Στο πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας έγινε πρωτογενής θραύση λατερίτη Καστοριάς σε σιαγονοτό σπαστήρα τύπου Fritsch (Εικόνα 5.1.1), Germany, στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων Πολυτεχνείου Κρήτης.

Πραγματοποιήθηκε σταδιακή θραύση του υλικού με μέγιστο άνοιγμα αποκένωσης στην θέση 5 και εν συνεχεία όλη η ποσότητα του υλικού κοσκινίστηκε σε κόσκινο με άνοιγμα βρόγχου 3.35 mm. Το παραμένον υλικό, συλλέχθηκε και τοποθετήθηκε επανειλημμένως στο σπαστήρα στην θέση 1 έως ότου διέλθει όλο το υλικό από το κόσκινο 3.35 mm.



Εικόνα 5.1.1: Σιαγονοτός σπαστήρας

Στην συνέχεια, όλο το υλικό κοσκινίστηκε εν υγρώ σε άνοιγμα βρόγχου 150 μm . Το παραμένον υλικό (+150 μm) τοποθετήθηκε στο φούρνο για ξήρανση στους 100 °C για 12 ώρες, ενώ το υλικό -150 μm φυλάχθηκε. Τέλος, το εναπομείναν υλικό στο κόσκινο +150 μm κοσκινίστηκε εν ξηρώ στα κόσκινα 2.36, 1.70, 1.18, 0.850, 0.600, 0.425, 0.300, 0.212, 0.150 και 0.075 mm για τη λήψη των 10 αρχικών κοκκομετρικών κλασμάτων.

Στην παρούσα εργασία για τις δοκιμές λειοτρίβησης χρησιμοποιήθηκαν 3 κοκκομετρικά κλάσματα τα οποία δημιουργήθηκαν από την ενοποίηση κάποιων από τα 10 αρχικά κοκκομετρικά κλάσματα LK1-LK10.

Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τα εξής 3 στενά κοκκομετρικά κλάσματα:

- -3.35+1.70 mm (κωδικός LK13)
- -1.18+0.600 mm (κωδικός LK14)
- -0.300+0.150 mm (κωδικός LK15)

Στην δεύτερη φάση, πραγματοποιήθηκε η λειοτριβήση του υλικού στον εργαστηριακό σφαιρόμυλο (Εικόνα 5.1) του εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο συγκεκριμένος σφαιρόμυλος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, με την βοήθεια ενός συστήματος περιστρεφόμενων ράουλων.



Εικόνα 5.1: Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος

Κάθε ένα από τα 3 ενοποιημένα κοκκομετρικά κλάσματα λειοτριβήθηκε σε διαφορετικούς χρόνους και σε διαφορετικά μεγέθη σφαιρών. Οι συνθήκες που επιλέχθηκαν ήταν ήπιες ώστε να επιτευχθεί εκλεκτική λειοτριβήση του λατερίτη. Οι χρόνοι που επιλέχθηκαν για την λειοτριβήση των ενοποιημένων κλασμάτων LK13 και LK14 ήταν 0.25 min, 0.5 min, 1 min και 2 min, ενώ για το κλάσμα LK14 λόγω ανεπαρκούς ποσότητας υλικού πραγματοποιήθηκαν 3 χρόνοι , 0.5 min, 1 min και 2 min.

Οι διάμετροι των σφαιρών που πραγματοποιήθηκαν ήταν 12.7 mm, 6.5 mm, ενώ η τρίτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε χωρίς σφαίρες ($d=0$), δηλαδή έγινε αυτολειοτριβήση του υλικού.

Η ποσότητα του υλικού και των σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν στο σφαιρόμυλο για κάθε δοκιμή, υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (9) και (10):

$$M = 0.6 \times f_c \times \text{πυκνότητα υλικού} \times \text{όγκος μύλου} \quad (9)$$

$$M_b = 0.6 \times J \times \text{πυκνότητα σφαιρών} \times \text{όγκος μύλου} \quad (10)$$

όπου,

f_c : συντελεστής πλήρωσης υλικού

J : συντελεστής πλήρωσης σφαιρών

Τα χαρακτηριστικά της λειοτριβήσης (μύλος, σφαίρες, υλικό) φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Η συχνότητα περιστροφής (N) και η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής (N_c) υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (11) και (12), αντίστοιχα.

$$N = 70\% \cdot N_c \quad (11)$$

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (12)$$

Η αναλογία στερεών και νερού για κάθε δοκιμή ήταν 60% και 40%, αντίστοιχα. Επομένως η ποσότητα του νερού ήταν 293 gr. Το βάρος του υλικού πριν την τοποθέτηση στο σφαιρόμυλο για λειοτρίβηση (αρχική τροφοδοσία) καθώς και μετά τη λειοτρίβηση (τελικό προϊόν) πρέπει να είναι ίδιο ή σχεδόν ίδιο.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά λειοτρίβησης

Αντικείμενο	Περιγραφή	1η δοκιμή	2η δοκιμή	3η δοκιμή
Σφαιρόμυλος	Εσωτερική διάμετρος D (cm)	20.4	20.4	20.4
	Μήκος, L (cm)	16.6	16.6	16.6
	Όγκος, V (cm ³)	5.423	5.423	5.423
	Συχνότητα περιστροφής, (rpm)	66	66	66
	Κρίσιμη συχνότητα περιστροφής, N_c (rpm)	93.7	93.7	93.7
Σφαίρες	Διάμετρος, d (mm)	-	6.5	12.7
	Αριθμός	-	1480	457
	Μάζα (kg)	-	3,828.50	3,827.80
	Πυκνότητα (g/cm ³)	-	7.64	7.64
	Πορώδες (%)	-	40	40
	Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών, J (%)	-	15	15
Υλικό	Φαινόμενη Πυκνότητα, ρ_b (g/cm ³)	1.2	1.2	1.2
	Συντελεστής πλήρωσης υλικού στο σφαιρόμυλο, f_c (%)	3	3	3
	Συντελεστής πλήρωσης κενών, U (%)	-	50	50
	Πορώδες υλικού (%)	40	40	40
	Πυκνότητα πολφού, στερεά (%)	40	40	40

5.2 Κοσκίνιση

Το συνολικό προϊόν κατόπιν της διαδικασίας θραύσης και λειοτρίβησης, κοσκινίστηκε εν υγρώ σε κόσκινο 75 μm για τον καλύτερο διαχωρισμό του ψιλού υλικού.

Υγρή κοσκίνιση: Το υλικό τοποθετήθηκε στο κόσκινο 75 μm και κοσκινίστηκε με την προσθήκη νερού χαμηλής πίεσεως για τον καλύτερο διαχωρισμό του υλικού. Από αυτήν την κοσκίνιση προέκυψαν δύο κλάσματα. Το κλάσμα +75 μm τοποθετήθηκε σε εργαστηριακό φούρνο για ξήρανση. Το κλάσμα -75 μm τοποθετήθηκε σε διαδοχικά δοχεία και παρέμεινε μέσα σε αυτά για διάρκεια 2-3 ημερών, ούτως ώστε να καθιζάνει όλο το υλικό και στην συνέχεια τοποθετήθηκε κι αυτό στον εργαστηριακό φούρνο για ξήρανση και προστέθηκε με το -75 μm κλάσμα της ξηρής κοσκίνησης.

Ξηρή κοσκίνιση: Το υλικό +75 μm που πρόεκυψε από την υγρή κοσκίνιση, ύστερα από την ξήρανσή του στον εργαστηριακό φούρνο, τοποτήθηκε στον εργαστηριακό δονητή κοσκίνων τύπου RETSCH VE 1000 (Εικόνα 5.2). Η διαδικασία της κοσκίνησης πραγματοποιήθηκε για κάθε κλάσμα τροφοδοσίας ξεχωριστά, τα οποία είναι:

- -3.35+1.70 mm (κωδικός LK13)
- -1.18+0.600 mm (κωδικός LK14)
- -0.300+0.150 mm (κωδικός LK15)

Το κάθε κλάσμα τροφοδοσίας διαχωρίστηκε σε επιμέρους κλάσματα μέσω των διαφορετικών ανοιγμάτων των βρόγχων, τα οποία μειώνονταν διαδοχικά με λόγο $\sqrt{2}$. Τα κόσκινα τοποθετούνταν στην μηχανή κοσκίνησης για 7 λεπτά με δόνηση 0.80 mm.



Εικόνα 5.2: Εργαστηριακός δονητής κοσκίνων

Για το ενοποιημένο κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm (κωδικός LK13) χρησιμοποιήθηκαν τα εξής κόσκινα: 1.70 mm, 1.18 mm, 0.850 mm, 0.600 mm, 0.425, 0.300 mm, 0.212 mm, 0.150 mm, 0.075 mm. Για το ενοποιημένο κλάσμα -1.18+0.600 mm (κωδικός LK14) χρησιμοποιήθηκαν 0.600 mm, 0.425,

0.300 mm, 0.212 mm, 0.150 mm, 0.075 mm και για το λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας, -0.300+0.150 mm (κωδικός LK15) τα κόσκινα 0.150 mm και 0.075 mm.

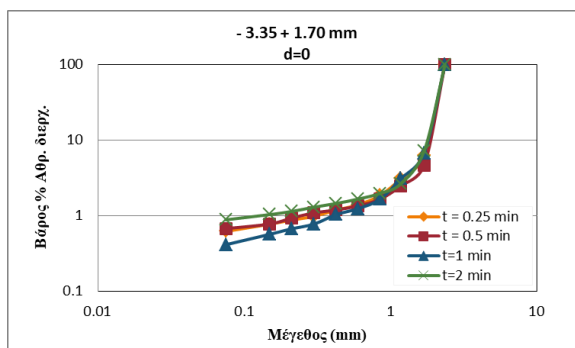
Μετά το τέλος της κάθε σειράς κοσκίνισης ζυγίζεται το υλικό που παρέμεινε σε κάθε κόσκινο σε ζυγαριά ακριβείας. Το συνολικό βάρος των κλασμάτων των κοσκίνων πρέπει να ισούται με το βάρος της αρχικής τροφοδοσίας.

Κεφάλαιο 6: Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

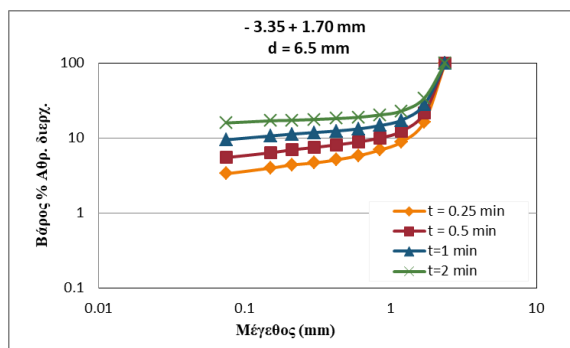
6.1 Τροφοδοσία -3.35+1.70 mm

6.1.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και της διαμέτρου των σφαιρών

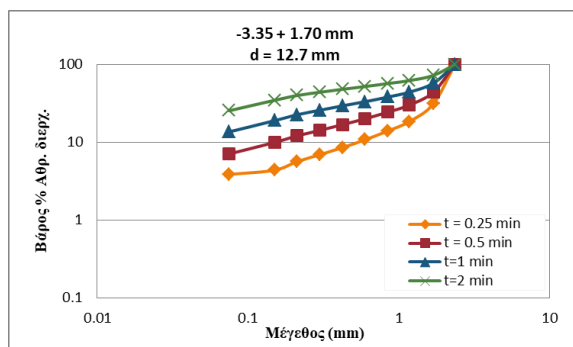
Από τους πίνακες A1, A2, A3 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α προκύπτουν τα διαγράμματα 6.1 – 6.3 του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) των προϊόντων σε συνάρτηση με το μέγεθος του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35 +1.10 mm για τρεις διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm). Για κάθε διάμετρο σφαιρών μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης ($t=0.25$, 0.5, 1 και 2 min).



Διάγραμμα 6.1: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την αυτολειοτρίβηση, $d=0$ (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).



Διάγραμμα 6.2: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου $d=6.5$ mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).

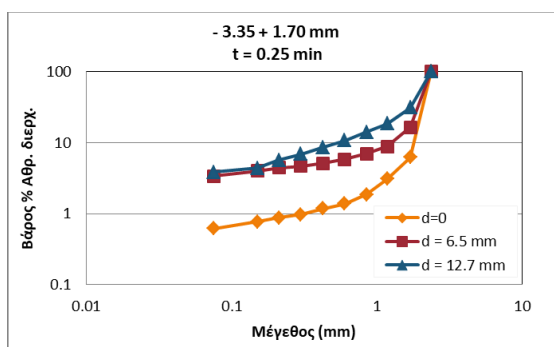


Διάγραμμα 6. 3: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου $d=12.7$ mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm).

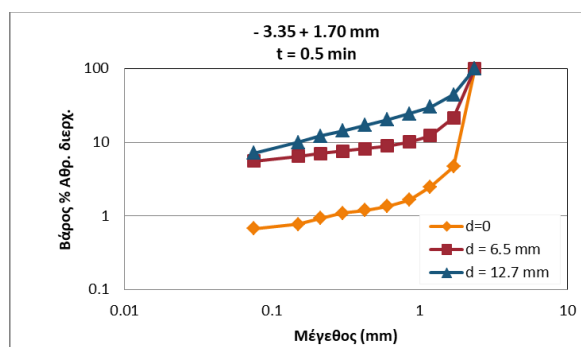
Από τα διαγράμματα 6.1 – 6.3 παρατηρείται ότι αυξάνοντας τον χρόνο λειοτρίβησης, μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη (αριστερά), ειδικότερα χρησιμοποιώντας τις σφαίρες διαμέτρου $d=12.7$ mm.

Στην αυτολειοτρίβηση δεν παρατηρούμε ιδιαίτερη μείωση του μεγέθους του προϊόντος σε αυτούς τους χρόνους.

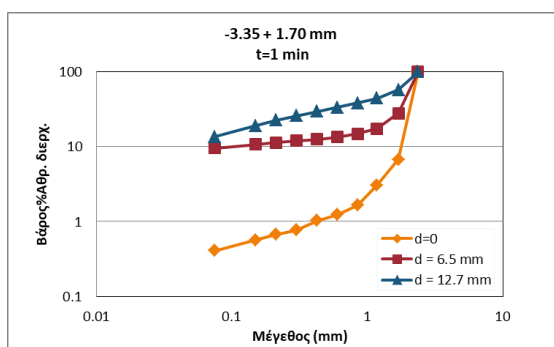
Παρακάτω προέκυψαν τα διαγράμματα 6.4 – 6.7 τα οποία παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος για τέσσερις διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης και διάμετρο σφαιρών.



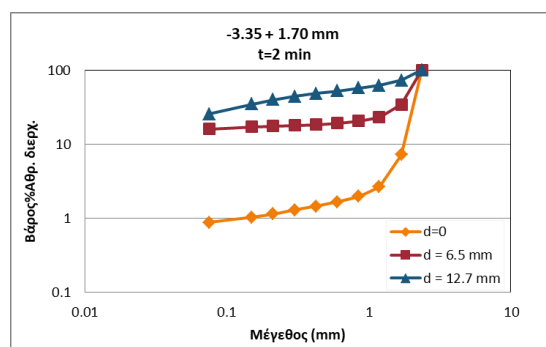
Διάγραμμα 6.4: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=0.25$ min (κλάσμα τροφοδοσίας - 3.35+1.70 mm).



Διάγραμμα 6.5: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=0.5$ min (κλάσμα τροφοδοσίας - 3.35+1.70 mm).



Διάγραμμα 6.6: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=1$ min (κλάσμα τροφοδοσίας - 3.35+1.70 mm).

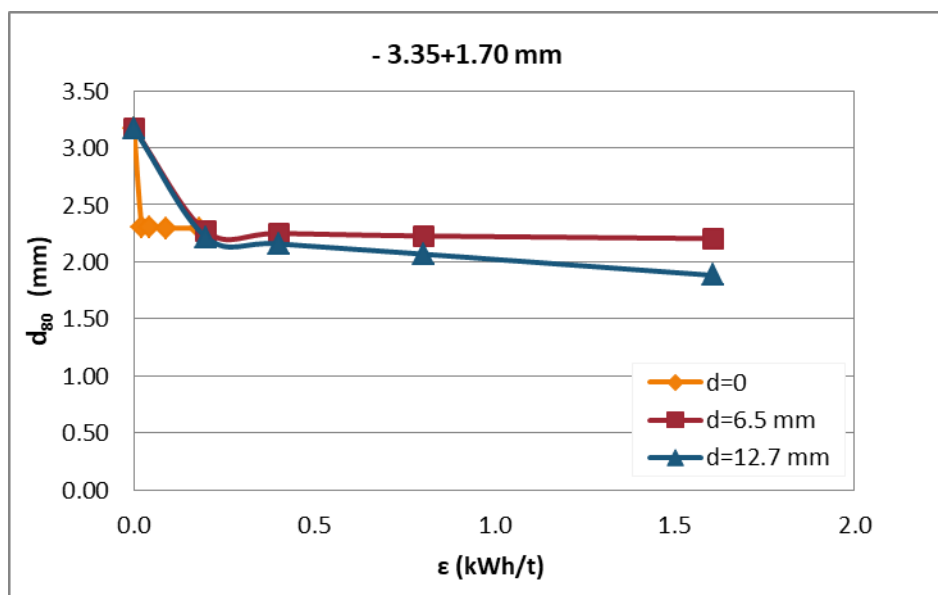


Διάγραμμα 6.7: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min (κλάσμα τροφοδοσίας - 3.35+1.70 mm).

Στα διαγράμματα 6.4 – 6.7 παρατηρείται ότι έχοντας το ίδιο κοκκομετρικό κλάσμα - 3.35+1.70 mm, για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης και για διαφορετικά μεγέθη σφαιρών, λαμβάνονται διαφορετικά ποσοστά λεπτού προϊόντος. Στον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα μεγέθη σφαιρών, λαμβάνεται μεγαλύτερο ποσοστό λεπτού προϊόντος. Το υλικό λειοτριβείται πιο αποδοτικά στον χρόνο λειοτρίβησης $t=2$ min για διάμετρο σφαίρας, $d=12.7$ mm.

6.1.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}

Για κάθε δοκιμή λειοτρίβησης υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια κατανάλωσης (ϵ) (Σχέση 7) και το μέγεθος από το οποίο διέρχεται το 80% (d_{80}) του προϊόντος, σύμφωνα με τον Πίνακα A4 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α . Υπενθυμίζεται ότι στους εργαστηριακούς μύλους η ενέργεια κατανάλωσης είναι ανάλογη του χρόνου λειοτρίβησης και εξαρτάται από την ισχύ P του μύλου. Το διάγραμμα χχχ παρουσιάζει το μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια (ϵ) που καταναλώθηκε για τις τρεις διαμέτρους σφαιρών.



Διάγραμμα 6.8: Μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm, για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

Από το διάγραμμα 6.8 παρατηρείται ότι όσο μειώνεται το μέγεθος d_{80} του προϊόντος, αυξάνεται η ειδική ενέργεια κατανάλωσης ϵ (kWh/t) και ότι η μεγαλύτερη διάμετρος σφαιρών οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν αλλά και σε μεγαλύτερη κατανάλωση της ειδικής ενέργειας ϵ . Τέλος, η αυτολειοτρίβηση δεν οδηγεί πρακτικά σε μείωση του προϊόντος για τους χρόνους (ειδικές ενέργειες) που επιλέχθηκαν.

6.1.3 Χημική ανάλυση προϊόντων

Η χημική ανάλυση των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της φασματοσκοπίας XRF, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την ποιοτική και την ποσοτική στοιχειακή ανάλυση στερεών και υγρών δειγμάτων.

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (6.1– 6.4). Στους πίνακες αυτούς προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα επιλεγμένων οξειδίων με βάση την επίδραση των σφαιρών και του χρόνου λειοτρίβησης για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+1.70 mm, -1.70+0.075 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 6.1: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο $t=0.25$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.25$ min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+ 1.70	93.75	83.46	68.77	1.51	1.48	1.45	33.70	34.16	30.35	16.91	16.86	17.60	22.60	22.26	25.81
- 1.70 + 0.075	5.64	13.18	27.37	1.66	1.64	1.62	30.09	30.87	41.90	16.13	17.02	15.03	26.22	25.53	14.99
- 0.075	0.61	3.36	3.86	1.89	1.92	2.08	29.37	28.54	29.34	15.89	16.13	16.64	30.08	27.05	25.84
	100	100	100	1.52	1.52	1.52	33.47	33.54	33.47	16.86	16.86	16.86	22.85	22.85	22.85

Πίνακας 6.2: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.5$ min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+ 1.70	95.37	78.43	56.00	1.51	1.47	1.27	33.66	34.45	35.87	16.86	17.01	17.72	22.71	22.00	21.81
- 1.70 + 0.075	3.96	16.05	36.92	1.71	1.62	1.81	30.06	30.37	30.64	16.88	16.41	15.57	25.24	25.53	23.96
- 0.075	0.67	5.52	7.08	1.96	2.03	2.03	26.56	29.08	29.22	17.43	16.10	16.80	28.63	27.05	25.27
	100	100	100	1.52	1.52	1.52	33.47	33.50	33.47	16.86	16.86	16.86	22.85	22.85	22.85

Πίνακας 6. 3: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+ 1.70	93.28	72.01	42.57	1.51	1.42	1.24	33.59	34.53	35.87	16.91	16.86	17.85	22.63	21.77	21.62
- 1.70 + 0.075	6.31	18.43	43.81	1.66	1.62	1.66	31.00	31.68	32.49	16.14	17.14	15.94	25.78	25.13	23.38
- 0.075	0.41	9.55	13.62	1.83	2.11	1.94	44.70	29.25	29.11	16.49	16.31	16.74	27.89	26.56	25.01
	100	100	100	1.52	1.52	1.52	33.47	33.50	33.47	16.86	16.86	16.86	22.85	22.85	22.85

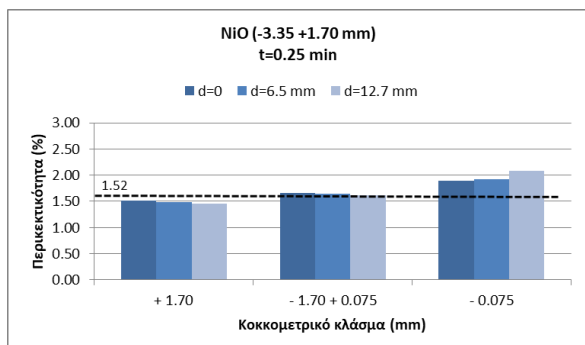
Πίνακας 6.4: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
		mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm
+ 1.70	92.85	65.76	27.69	1.51	1.33	1.12	33.70	34.57	37.15	16.88	17.03	17.64	22.70	22.43	22.59
- 1.70 + 0.075	6.28	18.19	46.88	1.69	1.80	1.54	30.06	33.36	34.09	16.57	16.53	16.94	24.94	20.89	21.01
- 0.075	0.87	16.05	25.43	1.92	2.00	1.91	33.55	29.08	28.31	16.80	16.55	15.86	23.78	26.79	26.52
	100	100	100	1.52	1.52	1.52	33.47	33.47	33.47	16.86	16.86	16.86	22.85	22.85	22.85

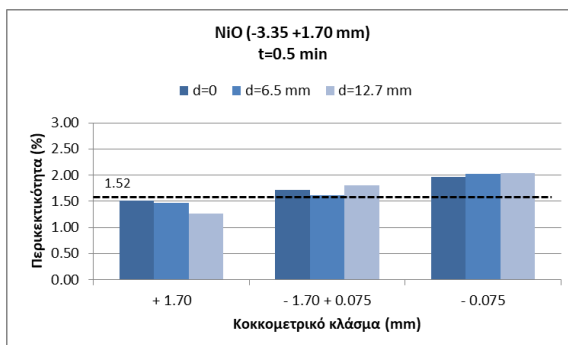
Από τους πίνακες 6.1 – 6.4 παρατηρείται ότι για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό προϊόν (+1.70 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου και του λεπτού (-0.075 mm) προϊόντος, με εξαίρεση την λειοτρίβηση με διάμετρο σφαιρών $d=12.7$ mm, όπου στους μεγαλύτερους χρόνους το ενδιάμεσο προϊόν είναι μεγαλύτερο. Γενικότερα, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, τόσο το βάρος του χονδρού προϊόντος μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού προϊόντος, με εξαίρεση την αυτολειοτρίβηση όπου δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές. Γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η περιεκτικότητα του NiO, όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Η περιεκτικότητα του SiO₂ σε γενικές γραμμές, είναι μεγαλύτερη στο χονδρό προϊόν (+1.70 mm) και μικρότερη στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm), με εξαίρεση τις δοκιμές αυτολειοτρίβησης στους μεγαλύτερους χρόνους, όπου οι μικρότερες τιμές βρίσκονται στο ενδιάμεσο προϊόν (-1.70+0.075 mm). Η περιεκτικότητα του Fe₂O₃ γενικά είναι μικρότερη στο χονδρό προϊόν (+1.70 mm), με εξαίρεση τον χρόνο λειοτρίβησης $t=2$ min, όπου για τις δοκιμές με σφαίρες ($d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm), η περιεκτικότητα είναι μικρότερη στα ενδιάμεσα προϊόντα (-1.70+0.075 mm), όπως επίσης και για τον χρόνο $t=0.25$ min, $d=12.7$ mm. Η περιεκτικότητα του MgO είναι μεγαλύτερη στο χονδρό προϊόν (+1.70 mm), με εξαίρεση τον χρόνο $t=1$ min, $d=6.5$ mm, όπου εκεί είναι στο ενδιάμεσο.

Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του NiO είναι 2.11 % για $t=1$ min στην δοκιμή με διάμετρο σφαιρών $d=6.5$ mm, του SiO₂ είναι 44.70 % για $t=1$ min στην αυτολειοτρίβηση, του Fe₂O₃ είναι 28.63 % για $t=0.25$ min και δοκιμή χωρίς σφαίρες και του MgO είναι 17.85 % για $t=1$ min και διάμετρο σφαιρών $d=12.7$ mm.

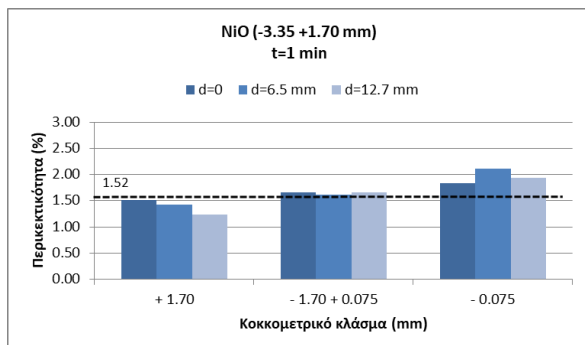
Στην παρούσα διατριβή ασχοληθήκαμε με την περαιτέρω μελέτη του NiO, έτσι με την βοήθεια των παραπάνω πινάκων (6.1 – 6.4) προέκυψαν τα διαγράμματα 6.9 – 6.12, τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+1.70 mm, -1.70+0.075 mm και -0.075 mm).



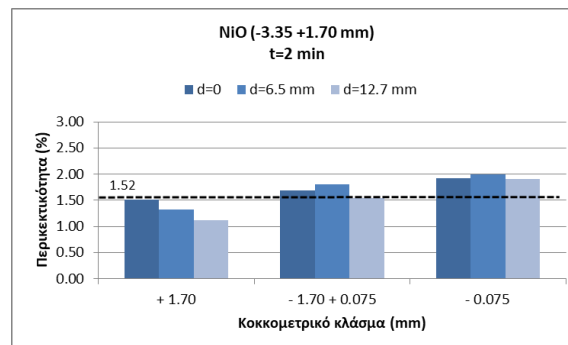
Διάγραμμα 6.9: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=0.25$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.



Διάγραμμα 6.10: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=0.5$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.



Διάγραμμα 6.11: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=1$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.



Διάγραμμα 6.12: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=2$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.

Στα διαγράμματα (6.9 – 6.12) είναι εμφανής η αύξηση της αρχικής περιεκτικότητας σε NiO (1.52%) για τη συγκεκριμένη τροφοδοσία στα λεπτά προϊόντα (-0.075 mm) του κλάσματος τροφοδοσίας. Αντίθετα στο χονδρό προϊόν η περιεκτικότητα σε NiO παραμένει σχεδόν ίση ή μικρότερη της αρχικής τροφοδοσίας. Επίσης, η περιεκτικότητα στο ενδιάμεσο κλάσμα -1.70 +0.075 mm (1.54 - 1.80%), δεν παρουσιάζει μεγάλη αύξηση, ενώ στις περισσότερες δοκιμές κυμαίνεται στην περιεκτικότητα της αρχικής τροφοδοσίας.

Εκτός από την ανάλυση των οξειδίων μελετήθηκε και η κατανομή τους. Τα αποτελέσματα της κατανομής των οξειδίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (6.5 – 6.8)

Πίνακας 6.5: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.25 min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+ 1.70	93.75	83.46	68.77	93.07	81.46	65.62	94.39	85.01	62.35	94.03	83.48	71.78	92.72	81.30	77.67
- 1.70 + 0.075	5.64	13.18	27.37	6.16	14.28	29.09	5.07	12.13	34.26	5.39	13.30	24.40	6.47	14.72	17.96
- 0.075	0.61	3.36	3.86	0.76	4.26	5.29	0.54	2.86	3.39	0.58	3.21	3.81	0.81	3.98	4.37
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 6.6: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.5 min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+ 1.70	95.37	78.43	56.00	94.68	75.60	46.68	95.91	80.66	60.02	95.34	79.11	58.86	94.78	75.53	53.46
- 1.70 + 0.075	3.96	16.05	36.92	4.46	17.06	43.87	3.56	14.55	33.80	3.97	15.62	34.09	4.38	17.93	38.71
- 0.075	0.67	5.52	7.08	0.86	7.34	9.45	0.53	4.79	6.18	0.69	5.27	7.06	0.84	6.54	7.83
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 6.7: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=1 min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+ 1.70	93.28	72.01	42.57	92.61	67.16	34.73	93.61	74.23	45.62	93.56	72.02	45.06	92.38	68.62	45.06
- 1.70 + 0.075	6.31	18.43	43.81	6.90	19.60	47.91	5.84	17.43	42.53	6.04	18.73	41.43	7.12	20.28	41.43
- 0.075	0.41	9.55	13.62	0.49	13.24	17.37	0.55	8.34	11.84	0.40	9.24	13.52	0.50	11.11	13.52
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

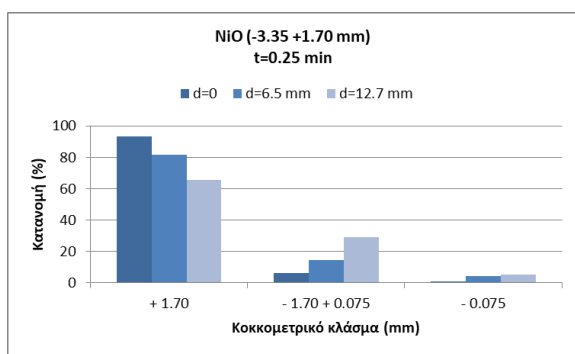
Πίνακας 6.8: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=2 min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+ 1.70	92.85	65.76	27.69	91.93	57.36	20.37	93.48	67.93	30.73	92.96	66.41	28.97	92.24	64.55	27.38
- 1.70 + 0.075	6.28	18.19	46.88	6.96	21.56	47.62	5.64	18.13	47.76	6.17	17.83	47.11	6.85	16.63	43.11
- 0.075	0.87	16.05	25.43	1.11	21.08	32.01	0.88	13.95	21.51	0.87	15.75	23.92	0.91	18.82	29.52
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

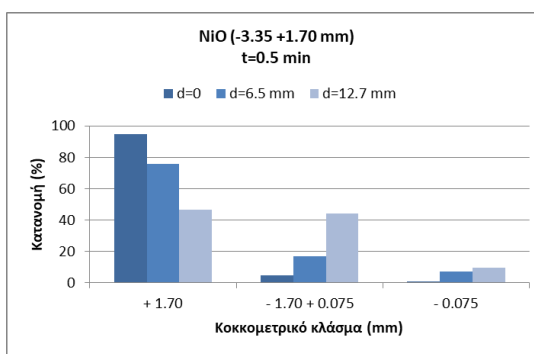
Από τους πίνακες 6.5 – 6.8 παρατηρείται ότι για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό προϊόν (+1.70 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (-1.70+0.075 mm) και του λεπτού (-0.075 mm) προϊόντος, με εξαίρεση τις δοκιμές λειοτρίβησης με διάμετρο σφαιρών d=12.7 mm, στους μεγαλύτερους χρόνους (t=1 min, t=2 min).

Όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτριβήσης, τόσο το βάρος του χονδρού προϊόντος μειώνεται και αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού προϊόντος. Φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται η κατανομή των οξειδίων όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος και γενικότερα, η κατανομή (%) όλων των οξειδίων είναι πολύ μεγαλύτερη στο χονδρό προϊόν (+1.70 mm), εκτός από τον χρόνο $t=2$ min, όπου για χρήση σφαιρών διαμέτρου $d=12.7$ mm, η μεγαλύτερη κατανομή βρίσκεται στο ενδιάμεσο προϊόν. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη κατανομή (%) του NiO είναι 94.68 % για $t=0.5$ min στην αυτολειοτριβήση ($d=0$), του SiO₂ είναι 95.91 % για $t=0.5$ min στην αυτολειοτριβήση ($d=0$), του Fe₂O₃ είναι 94.78 % για $t=0.5$ min και $d=0$ και του MgO είναι 95.34 %, στις ίδιες συνθήκες.

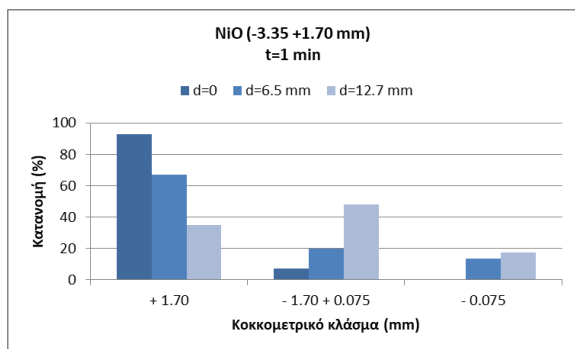
Από τους πίνακες 6.5 – 6.8 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (6.13 – 6.16) τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+1.70 mm, -1.70+0.075 mm, -0.075 mm).



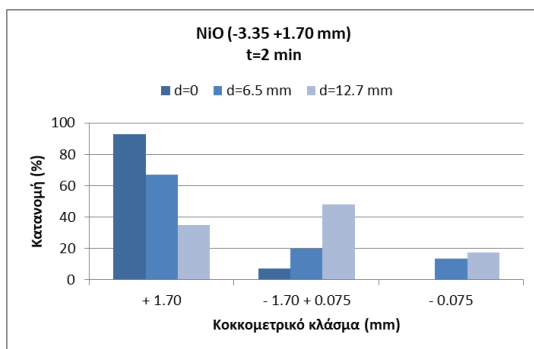
Διάγραμμα 6.13: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.25$ min).



Διάγραμμα 6.14: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.5$ min).



Διάγραμμα 6.15: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=1$ min).



Διάγραμμα 6.16: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=2$ min).

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.13 – 6.16) παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτριβήσης, η κατανομή (%) NiO στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm) αυξάνεται από 5.29 % σε 32.01 % για διάμετρο σφαιρών $d=12.7$ mm, ενώ στο χονδρό προϊόν (+1.70 mm) μειώνεται από 65.62 % σε 20.37 %,

για την ίδια διάμετρο σφαιρών. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στο μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης ($t=2$ min) και για χρήση της μεγαλύτερης διαμέτρου σφαιρών ($d=12.7$ mm) και για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+1.70 mm, -1.70+0.600 mm και -0.075 mm).

Αντίθετα, για μικρούς χρόνους λειοτρίβησης ($t=0.25$ min, $t=0.5$ min) οι τιμές της κατανομής (%) του NiO δεν παρουσιάζουν κάποια ουσιαστική διαφοροποίηση για χρήση σφαιρών $d=0$ και $d=6.5$ mm. Για παράδειγμα, όσον αφορά το λεπτό κλάσμα (-0.075 mm), η κατανομή (%) NiO αυξάνεται από 4.26 % σε 7.34 %, για χρόνους λειοτρίβησης από 0.25 min σε 0.5 min και χρήση σφαιρών διαμέτρου $d=6.5$ mm. Για τις ίδιες συνθήκες, η τιμή της κατανομής (%) του NiO για το χονδρό προϊόν, μειώθηκε από 81.46 % σε 71.60 %.

Στην συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες 6.9 – 6.12 της περιεκτικότητας (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων (-1.70 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 6.9: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο $t=0.25$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.25$ min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm		
Τροφή	100	100	100	1.52	1.52	1.52	33.47	33.54	33.47	16.86	16.86	16.86	22.85	22.85	22.85
- 1.70	6.25	18.59	33.49	1.69	1.70	1.67	30.02	30.40	40.35	16.11	16.84	15.23	26.60	25.84	16.34
- 0.075	0.61	3.28	3.74	1.89	1.92	2.08	29.37	28.54	29.34	15.89	16.13	16.64	30.08	27.05	25.84

Πίνακας 6.10: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.5$ min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm		
Τροφή	100	100	100	1.52	1.52	1.52	33.47	33.50	33.47	16.86	16.86	16.86	22.85	22.85	22.85
- 1.70	4.63	21.57	44.00	1.75	1.72	1.84	29.56	30.04	30.41	16.96	16.33	15.77	25.73	25.92	24.17
- 0.075	0.67	5.52	7.08	1.96	2.03	2.03	26.56	29.08	29.22	17.43	16.10	16.80	28.63	27.05	25.27

Πίνακας 6. 11: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

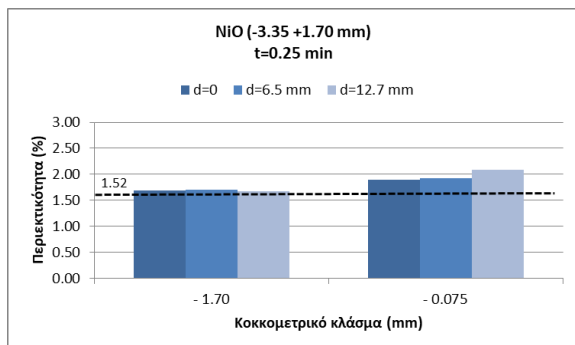
$t=1$ min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm			mm mm mm		
Τροφή	100	100	100	1.52	1.52	1.52	33.47	33.50	33.47	16.86	16.86	16.86	22.85	22.85	22.85
- 1.70	6.72	27.99	57.43	1.67	1.79	1.73	31.84	30.85	31.69	16.17	16.85	16.13	25.90	25.62	23.76
- 0.075	0.41	9.55	13.62	1.83	2.11	1.94	44.67	29.25	29.11	16.48	16.31	16.74	27.87	26.56	25.01

Πίνακας 6..12: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

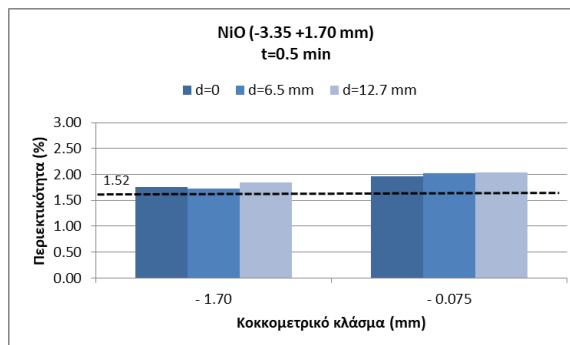
t=2 min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	1.52	1.52	1.52	33.47	33.47	33.47	16.86	16.86	16.86	22.85	22.85	22.85
- 1.70	7.15	34.24	72.31	1.71	1.89	1.67	30.48	31.35	32.06	16.60	16.54	16.56	24.80	23.66	22.95
- 0.075	0.87	16.05	25.43	1.92	2.00	1.91	33.55	29.08	28.31	16.80	16.55	15.86	23.78	26.79	26.52

Από τους πίνακες 6.9 – 6.12 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα (%) του NiO και του Fe₂O₃ είναι μεγαλύτερη στο πιο λεπτό προϊόν -0.075 mm, ενώ του SiO₂ είναι μεγαλύτερη στο προϊόν -1.70 mm. Οι τιμές που λαμβάνει το MgO δεν έχουν μεγάλες μεταβολές σε όλους τους χρόνους, στις διαμέτρους σφαιρών d=0 και d=12.7 mm, με εξαίρεση τις δοκιμές με σφαίρες διαμέτρου d=12.7 mm, όπου στους μικρότερους χρόνους (t=0.25 min, t=0.5 min και t=1 min), το λεπτότερο προϊόν λαμβάνει τις πιο υψηλές τιμές και στον χρόνο t=2 min, το χονδρό. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του NiO είναι 2.53 % για t=0.5 min, στην αυτολειοτρίβηση (d=0), του SiO₂ είναι 44.67 % για t=1 min και d=0, του Fe₂O₃ είναι 30.08 % για t=0.25 min και d=0 και του MgO είναι 16.96 % για t=0.5 min και d=0.

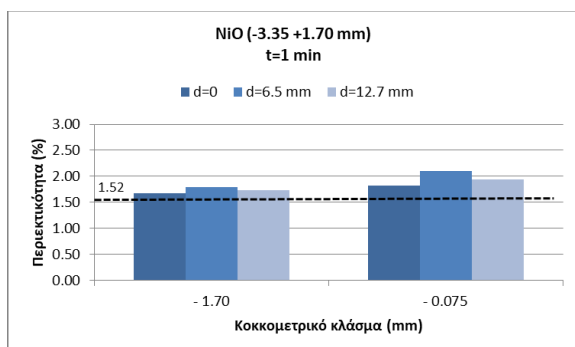
Με την βοήθεια των παραπάνω πινάκων (6.9 – 6.12) προέκυψαν τα διαγράμματα 6.17 – 6.20 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων για αρχική τροφοδοσία -3.35+1.70 mm.



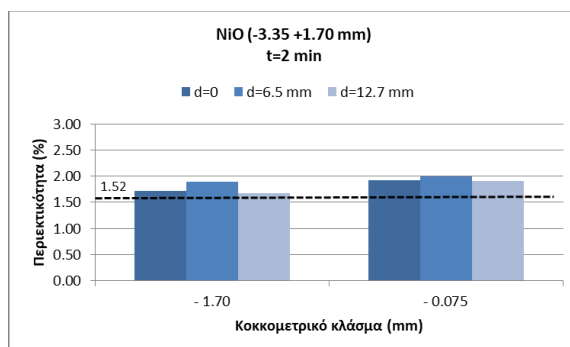
Διάγραμμα 6.17: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.25 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.



Διάγραμμα 6.18: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.



Διάγραμμα 6.19: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.



Διάγραμμα 6.20: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.52 % NiO.

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.17 – 6.20) παρατηρείται ότι το NiO είναι πιο πλούσιο στο προϊόν -0.075 mm. Σε όλους τους χρόνους λειοτρίβησης (t=0.25 min, t=0.5 min, t=1 min και t=2 min), η περιεκτικότητα (%) του NiO στο χονδρό προϊόν (-1.70 mm), δεν έχει σημαντική αύξηση (ανώτατη τιμή 1.89 % με διάμετρο σφαιρών d=6,5 mm σε χρόνο t=2 min). Το λεπτό προϊόν (- 0.075 mm) είναι πιο πλούσιο σε NiO σε όλες τις δοκιμές και για όλες τις συνθήκες χρόνου και διαμέτρου σφαιρών, με μεγαλύτερη τιμή να καταλαμβάνουν οι δοκιμές στην αυτολειοτρίβηση (d=0), ειδικά στους μεγαλύτερους χρόνους.

Ακόμα, υπολογίστηκε η κατανομή (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm, η οποία φαίνεται στους πίνακες (6.13 – 6.16).

Πίνακας 6.13: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 3.35+1.70 mm για χρόνο $t=0.25$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.25$ min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 1.70	6.25	18.59	33.49	6.93	18.54	34.38	5.61	14.99	37.65	5.97	16.52	28.22	7.28	18.70	22.33
- 0.075	0.61	3.28	3.74	0.76	4.26	5.29	0.54	2.86	3.39	0.58	3.21	3.81	0.81	3.98	4.37

Πίνακας 6. 14: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 3.35+1.70 mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.5$ min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 1.70	4.63	21.57	44.00	5.32	24.40	53.32	4.09	19.34	39.98	4.66	20.89	41.14	5.22	24.47	46.54
- 0.075	0.67	5.52	7.08	0.86	7.34	9.45	0.53	4.79	6.18	0.69	5.27	7.06	0.84	6.54	7.83

Πίνακας 6. 15: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 3.35+1.70 mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 1.70	6.72	27.99	57.43	7.39	32.84	65.27	6.39	25.77	54.38	6.44	27.98	54.94	7.62	31.38	59.73
- 0.075	0.41	9.55	13.62	0.49	13.24	17.37	0.55	8.34	11.84	0.40	9.24	13.52	0.50	11.11	14.90

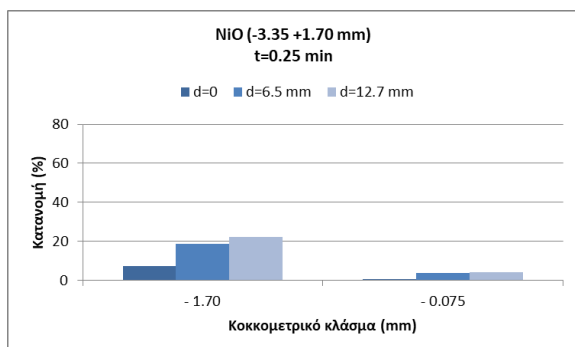
Πίνακας 6. 16: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 3.35+1.70 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 1.70	7.15	34.24	72.31	8.07	42.64	79.63	6.52	32.07	69.27	7.04	33.59	71.03	7.76	35.45	72.62
- 0.075	0.87	16.05	25.43	1.11	21.08	32.01	0.88	13.95	21.51	0.87	15.75	23.92	0.91	18.82	29.52

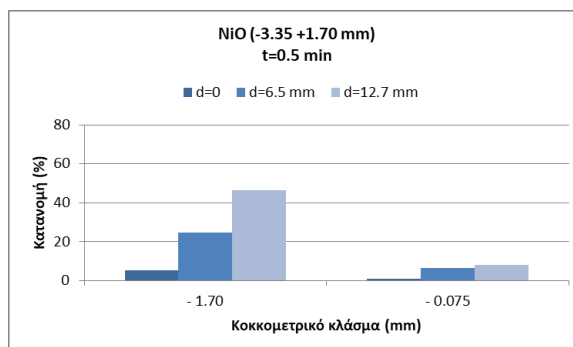
Από τους πίνακες (6.13 – 6.16) παρατηρείται ότι υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η κατανομή (%) των οξειδίων όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης. Η μεγαλύτερη κατανομή (%) για όλα τα οξείδια παρατηρείται στο προϊόν -1.70 mm για τον μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min και τις

μεγαλύτερες σφαίρες διαμέτρου $d=12.7$ mm. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερη κατανομή (%) του NiO είναι 79.63 %, του SiO_2 είναι 69.27 %, του MgO είναι 71.03 % και του Fe_2O_3 72.62 %.

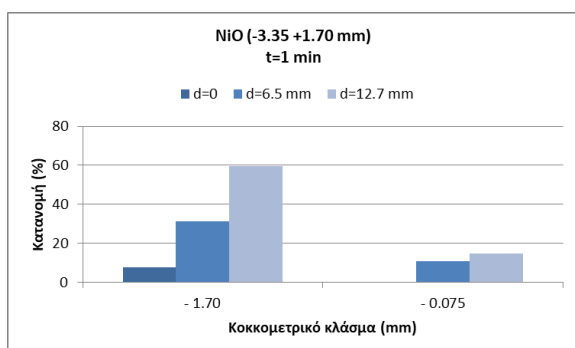
Από τους πίνακες (6.13 – 6.16) προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (6.21 – 6.24), τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm για τα μεγέθη προϊόντων -1.70 mm και -0.075 mm.



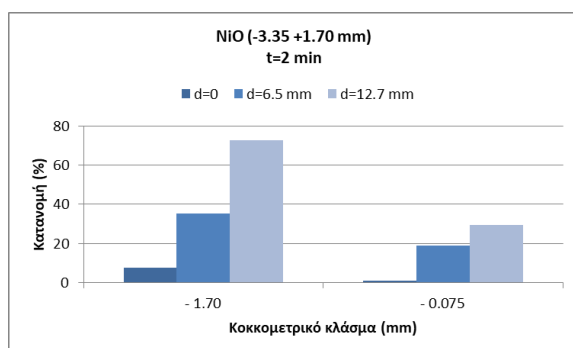
Διάγραμμα 6.21: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.25$ min).



Διάγραμμα 6.22: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.5$ min).



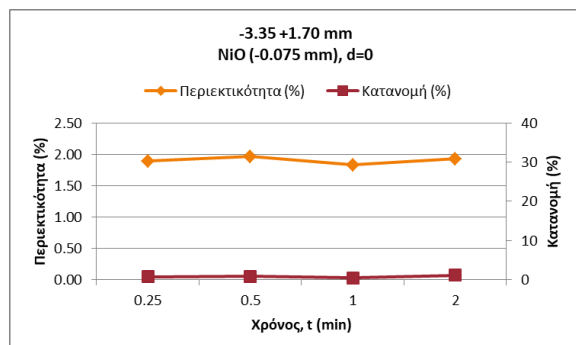
Διάγραμμα 6.23: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=1$ min).



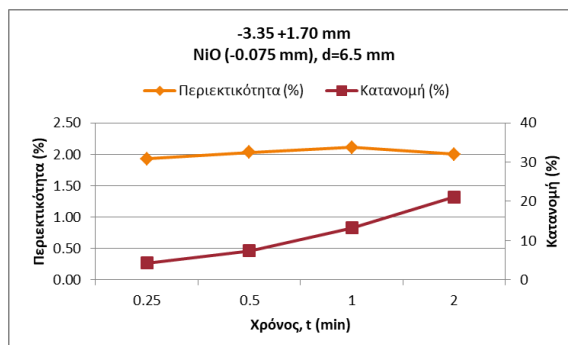
Διάγραμμα 6.24: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=2$ min).

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.21 – 6.24) παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος των σφαιρών και ο χρόνος λειοτρίβησης, αυξάνεται η κατανομή (%) NiO στο προϊόν -1.70 mm αλλά και στο λεπτό προϊόν -0.075 mm. Όπως παρατηρήθηκε στα διαγράμματα (6.1.13 – 6.1.3.16), η μεγαλύτερη κατανομή (%) του NiO παρατηρείται στο κλάσμα -1.70 mm για $d=12.7$ mm και $t=2$ min και είναι 79.63 %. Στην περίπτωση της αυτολειοτρίβησης ($d=0$), παρουσιάζεται πολύ μικρή κατανομή (%), σε όλες τις συνθήκες λειοτρίβησης και στα δύο προϊόντα (-1.70 mm, -0.075 mm).

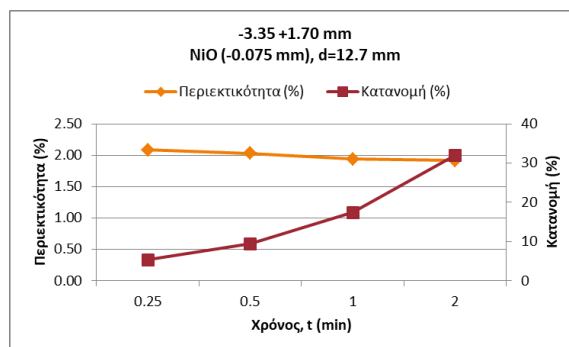
Ο εμπλουτισμός του NiO γίνεται στο λεπτό κλάσμα γεγονός που επιβεβαιώνεται κι από τη θεωρία. Για το λόγο αυτό, καταλήξαμε στα παρακάτω διπλά διαγράμματα (6.25 – 6.27) περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) NiO του λεπτού προϊόντος (-0.075 mm).



Διάγραμμα 6.25: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειτουργίας του κλάσματος -0.075 mm και d=0 (τροφοδοσία -3.35+1.70 mm).



Διάγραμμα 6.26: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειτουργίας του κλάσματος -0.075 mm και d=6.5 mm (τροφοδοσία -3.35+1.70 mm).



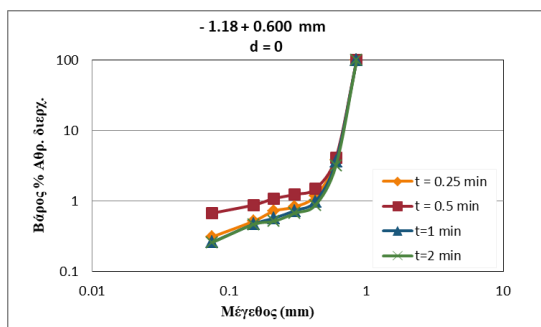
Διάγραμμα 6.27: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειτουργίας του προϊόντος -0.075 mm και d=12.7 mm (τροφοδοσία -3.35+1.70 mm).

Στα διαγράμματα (6.25 – 6.27) παρατηρείται ότι γενικά για το λεπτό προϊόν -0.075 mm και για τις συγκεκριμένες διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm), όσο αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας, η περιεκτικότητα (%) του NiO στην αυτολειτουργία d=0 αυξάνεται αισθητά με πολύ μικρή κατανομή (%). Για διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm, παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα (%) κυμαίνεται σε αυξημένα επίπεδα και υπάρχει σημαντική αύξηση της κατανομής (%) και τέλος για διάμετρο σφαιρών d=12.7, παρατηρείται ότι υπάρχει μια μικρή μείωση της περιεκτικότητας (%), ωστόσο υπάρχει μεγάλη αύξηση της κατανομής (%). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για χρόνο λειτουργίας t=2 min και d=0 η περιεκτικότητα (%) του NiO είναι 2.24 % που αντιστοιχεί σε κατανομή 1.29 %, ενώ για τον ίδιο χρόνο λειτουργίας και d=12.7 mm, η περιεκτικότητα (%) του ίδιου στοιχείου είναι 1.91 % και αντιστοιχεί σε κατανομή 32.01 %.

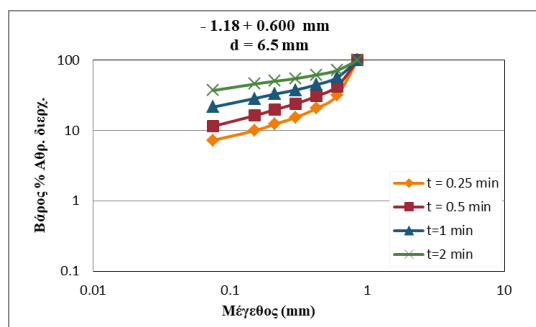
6.2 Τροφοδοσία -1.18+0.600 mm

6.2.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και της διαμέτρου σφαιρών

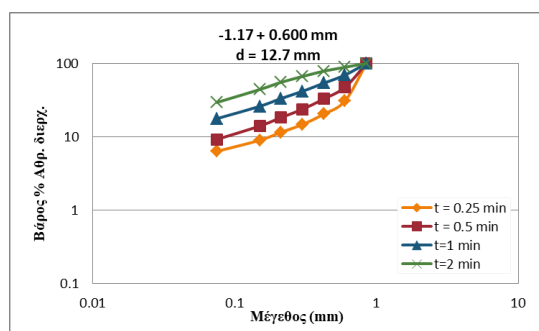
Από τους πίνακες B1, B2, B3 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β προκύπτουν τα διαγράμματα 6.28 – 6.30 του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm για τέσσερις διαφορετικούς χρόνους , για λειοτρίβηση χωρίς σφαίρες και για λειοτρίβηση με δύο διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών.



Διάγραμμα 6.28: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την αυτολειοτρίβηση, d=0 (κλάσμα τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm).



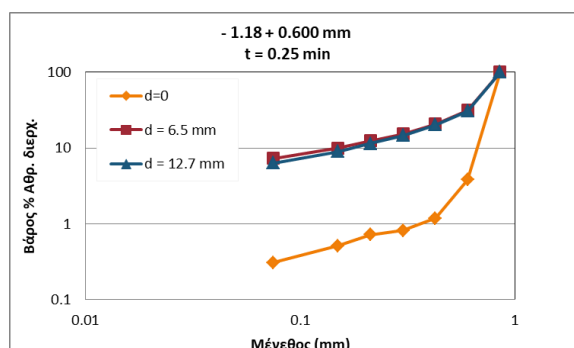
Διάγραμμα 6.29: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου d=6.5 mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm).



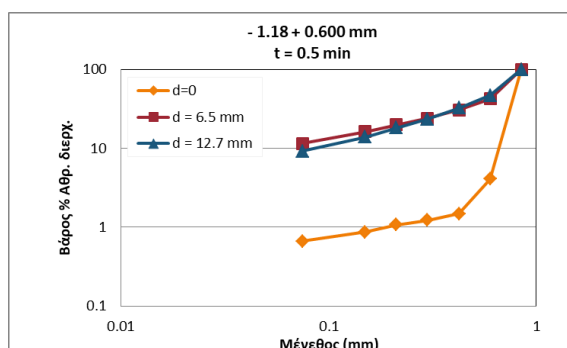
Διάγραμμα 6.30: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης κατά την λειοτρίβηση με χρήση σφαιρών διαμέτρου d=12.7 mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm).

Από τα διαγράμματα (6.28 – 6.30) παρατηρείται ότι αυξάνοντας τον χρόνο λειοτρίβησης, μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη (αριστερά), ειδικότερα χρησιμοποιώντας τις σφαίρες διαμέτρου d=12.7 mm. Στην αυτολειοτρίβηση δεν παρατηρούμε ιδιαίτερη μείωση του μεγέθους του προϊόντος σε αυτούς τους χρόνους.

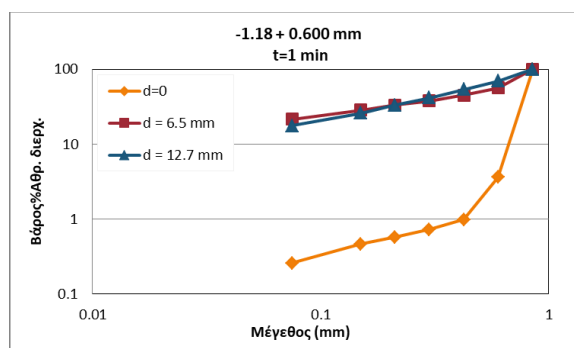
Παρακάτω προέκυψαν τα διαγράμματα (6.31 – 6.34) τα οποία παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος για τέσσερις διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης και διάμετρο σφαιρών.



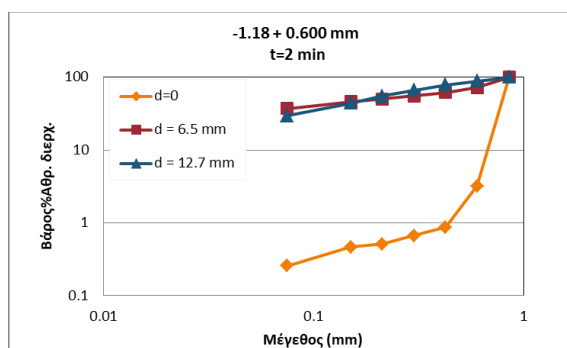
Διάγραμμα 6.31: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=0.25$ min (κλάσμα τροφοδοσίας - $1.18+0.600$ mm).



Διάγραμμα 6.32: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=0.5$ min (κλάσμα τροφοδοσίας - $1.18+0.600$ mm).



Διάγραμμα 6.33: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=1$ min (κλάσμα τροφοδοσίας - $1.18+0.600$ mm).

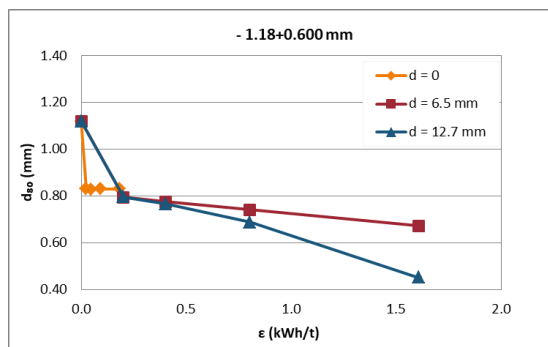


Διάγραμμα 6.34: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min (κλάσμα τροφοδοσίας - $1.18+0.600$ mm).

Στα διαγράμματα (6.31 – 6.34) παρατηρείται ότι έχοντας το ίδιο προϊόν $-1.18+0.600$ mm, για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης ($t=0.25$ min, $t=0.5$ min, $t=1$ min και $t=2$ min) και για διαφορετικά μεγέθη σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm), λαμβάνονται διαφορετικά ποσοστά λεπτού προϊόντος. Στον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα μεγέθη σφαιρών, λαμβάνεται μεγαλύτερο ποσοστό λεπτού προϊόντος. Το υλικό λειοτριβείται πιο αποδοτικά στον χρόνο λειοτρίβησης $t=2$ min για $d=12.7$ mm.

6.2.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}

Για κάθε δοκιμή λειοτρίβησης υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια κατανάλωσης (ϵ) (Σχέση 7) και το μέγεθος από το οποίο διέρχεται το 80% (d_{80}) του προϊόντος, σύμφωνα με τον Πίνακα Β4 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β. Υπενθυμίζεται ότι στους εργαστηριακούς μύλους η ενέργεια κατανάλωσης είναι ανάλογη του χρόνου λειοτρίβησης και εξαρτάται από την ισχύ P του μύλου. Το διάγραμμα 6.35 παρουσιάζει το μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια (ϵ) που καταναλώθηκε για τις τρεις διαμέτρους σφαιρών.



Διάγραμμα 6.35: Μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κλάσμα τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm, για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

Από το διάγραμμα 6.35 παρατηρείται ότι όσο μειώνεται το μέγεθος d_{80} του προϊόντος, αυξάνεται η ειδική ενέργεια κατανάλωσης ϵ (kWh/t) και ότι η μεγαλύτερη διάμετρος σφαιρών οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν αλλά και σε μεγαλύτερη κατανάλωση της ειδικής ενέργειας ϵ . Τέλος, η αυτολειοτρίβηση δεν οδηγεί πρακτικά σε μείωση του προϊόντος για τους χρόνους (ειδικές ενέργειες) που επιλέχθηκαν.

6.2.3 Χημική ανάλυση προϊόντων

Η χημική ανάλυση των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της φασματοσκοπίας XRF, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την ποιοτική και την ποσοτική στοιχειακή ανάλυση στερεών και υγρών δειγμάτων.

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (6.17 – 6.20). Στους πίνακες αυτούς προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα επιλεγμένων οξειδίων με βάση την επίδραση των σφαιρών και του χρόνου λειοτρίβησης για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.600 mm, -0.600+0.075 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 6.17: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.25 min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.600	96.20	68.55	69.19	1.57	1.47	1.50	30.96	30.45	31.40	15.97	15.37	15.67	25.51	26.94	25.41
- 0.600 + 0.075	3.49	24.16	24.50	1.66	1.67	1.66	30.17	32.89	30.19	16.35	17.94	16.88	25.12	20.56	25.36
- 0.075	0.31	7.29	6.32	2.21	2.31	2.08	28.91	28.92	28.74	17.82	15.36	15.89	26.66	28.34	26.97
	100	100	100	1.58	1.58	1.58	30.93	30.93	30.93	15.99	15.99	15.98	25.50	25.50	25.50

Πίνακας 6.18: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.5 min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.600	95.89	57.39	52.71	1.57	1.40	1.39	30.98	31.29	31.20	15.98	15.55	15.74	25.50	26.15	26.11
- 0.600 + 0.075	3.44	31.08	38.09	1.71	1.68	1.74	29.99	30.85	31.01	16.07	16.59	16.30	25.33	23.83	24.36
- 0.075	0.67	11.52	9.21	2.20	2.21	1.99	28.61	29.37	29.07	17.31	16.58	16.15	26.37	26.79	26.73
	100	100	100	1.58	1.58	1.58	30.93	30.93	30.93	15.99	15.99	15.99	25.50	25.50	25.50

Πίνακας 6.19: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=1 min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.600	96.37	43.42	30.71	1.58	1.36	1.95	31.01	32.97	32.20	15.99	15.60	15.43	25.50	24.38	26.37
- 0.600 + 0.075	3.37	34.97	51.64	1.68	1.57	1.21	30.09	29.71	31.20	15.98	15.98	16.60	25.33	26.07	24.16
- 0.075	0.26	21.61	17.65	2.15	2.06	2.03	12.13	28.93	27.94	16.87	16.79	15.18	27.71	26.78	27.90
	100	100	100	1.58	1.58	1.58	30.93	30.96	30.93	15.99	15.99	15.99	25.50	25.49	25.50

Πίνακας 6.20: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

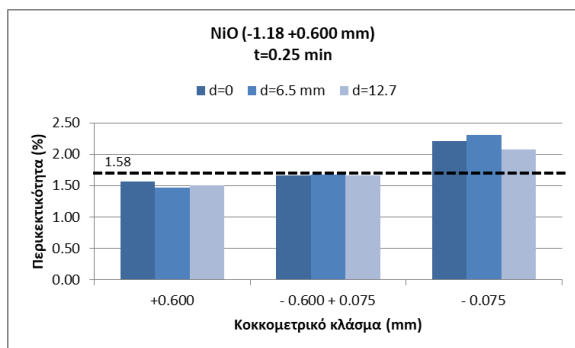
t=2 min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.600	96.82	28.38	11.49	1.58	1.26	1.20	30.97	33.35	34.75	15.99	16.15	15.72	25.51	26.29	24.58
- 0.600 + 0.075	2.92	34.40	59.18	1.67	1.55	1.49	29.96	33.59	31.79	16.02	17.12	16.52	25.11	24.42	24.21
- 0.075	0.26	37.23	29.33	2.21	1.85	1.92	27.63	26.63	27.70	16.43	14.82	15.02	26.12	25.89	28.46
	100	100	100	1.58	1.58	1.58	30.93	30.93	30.93	15.99	15.99	15.99	25.50	25.50	25.50

Από τους πίνακες (6.17 – 6.20) παρατηρείται ότι στους μικρότερους χρόνους λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό προϊόν (+0.600 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με του ενδιάμεσου και του λεπτού (-0.075 mm) προϊόντος. Όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, τόσο το βάρος του

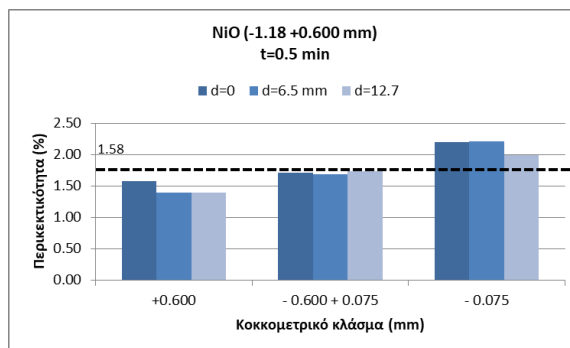
χονδρού προϊόντος μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού προϊόντος, με εξαίρεση την αυτολειοτρίβηση, όπου το βαρύτερο παραμένει το χονδρό προϊόν (+0.600). Γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η περιεκτικότητα του NiO, όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Η περιεκτικότητα του SiO₂ για d=12.7 mm και d=0 (αυτολειοτρίβηση), παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερη στο χονδρό προϊόν σε όλους τους χρόνους λειοτρίβησης και πιο μικρή στα πιο λεπτά προϊόντα. Ενώ για d=6.5 mm, η τιμές που λαμβάνει του SiO₂ στο χονδρό και ενδιάμεσο προϊόν είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το λεπτό προϊόν (-0.075 mm). Η περιεκτικότητα (%) του Fe₂O₃ είναι μεγαλύτερη στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm) και παρουσιάζει μια μείωση στο ενδιάμεσο και στο χονδρό. Η περιεκτικότητα (%) του MgO στις δοκιμές με διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm και d=12.7 mm, παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο ενδιάμεσο προϊόν (-0.600+0.075 mm), ενώ στην αυτολειοτρίβηση (d=0) οι μεγαλύτερες τιμές βρίσκονται στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm),

Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του NiO είναι 2.31 % για t=0.25 min και διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm, του SiO₂ είναι 34.75 % για t=2 min και d=12.7 mm, του Fe₂O₃ είναι 28.46 % για t=2 min και d=12.7 mm και του MgO είναι 17.94 % για t=0.25 και d=6.5 mm.

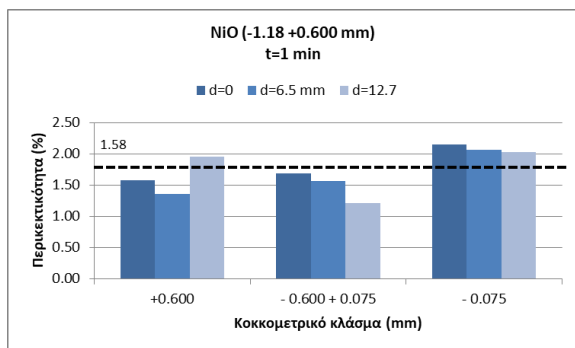
Στην παρούσα διατριβή ασχοληθήκαμε με την περαιτέρω μελέτη του NiO, έτσι με την βοήθεια των παραπάνω πινάκων (6.17 – 6.20) προέκυψαν τα διαγράμματα (6.36 – 6.39), τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.600 mm, -0.600+0.075 mm και -0.075 mm).



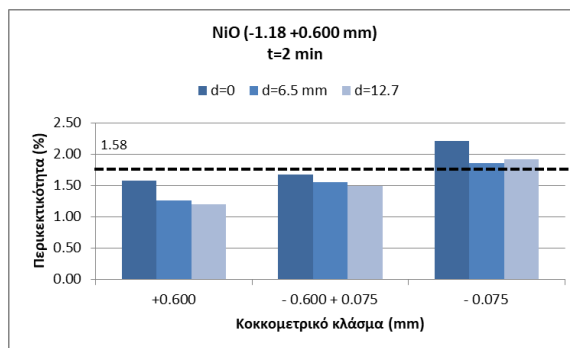
Διάγραμμα 6.36: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για t=0.25 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.



Διάγραμμα 6.37: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για t=0.5 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.



Διάγραμμα 6.38: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=1$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.



Διάγραμμα 6.39: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=2$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.

Στα διαγράμματα (6.36 – 6.39) είναι εμφανής η αύξηση της αρχικής περιεκτικότητας (%) σε NiO (1.58%) για τη συγκεκριμένη τροφοδοσία στα λεπτά κλάσματα του προϊόντος (-0.075 mm). Αντίθετα στο χονδρό κλάσμα και στο ενδιάμεσο κλάσμα (-0.600+0.075 mm), η περιεκτικότητα (%) σε NiO παραμένει σχεδόν ίση ή μικρότερη της αρχικής τροφοδοσίας. Στα ίδια επίπεδα κυμαίνεται η περιεκτικότητα (%) σε NiO στο ενδιάμεσο κλάσμα -1.70+0.075 mm (1.26 - 2.31 %).

Εκτός από την ανάλυση των οξειδίων μελετήθηκε και η κατανομή τους (%). Τα αποτελέσματα της κατανομής (%) των οξειδίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (6.21 – 6.24)

Πίνακας 6.21: Κατανομή (%) οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο $t=0.25$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.25$ min	Παραμένον			Κατανομή											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.600	96.20	68.55	69.19	95.59	63.76	65.88	96.31	67.50	70.23	96.09	65.90	67.85	96.24	72.42	68.95
- 0.600 + 0.075	3.49	24.16	24.50	3.67	25.58	25.79	3.40	25.69	23.90	3.57	27.11	25.87	3.44	19.48	24.37
- 0.075	0.31	7.29	6.32	0.43	10.66	8.33	0.29	6.81	5.87	0.34	7.00	6.28	0.32	8.10	6.68
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 6.22: Κατανομή (%) οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.5$ min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.600	95.89	57.39	52.71	95.34	50.81	46.54	96.04	58.06	53.16	95.81	55.81	51.88	95.89	58.85	53.97
- 0.600 + 0.075	3.44	31.08	38.09	3.73	33.11	41.84	3.34	31.00	38.18	3.46	32.24	38.82	3.42	29.05	36.38
- 0.075	0.67	11.52	9.21	0.93	16.09	11.62	0.62	10.94	8.65	0.72	11.95	9.30	0.69	12.10	9.65
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 6.23: Κατανομή (%) των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.600	96.37	43.42	30.71	96.07	37.28	37.94	96.62	46.25	31.97	96.36	42.37	29.64	96.37	41.53	31.76
- 0.600 + 0.075	3.37	34.97	51.64	3.58	34.61	39.42	3.27	33.56	52.09	3.36	34.94	53.61	3.34	35.77	48.93
- 0.075	0.26	21.61	17.65	0.35	28.12	22.64	0.10	20.19	15.94	0.27	22.69	16.76	0.28	22.70	19.31
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 6.24: Κατανομή (%) οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.600	96.82	28.38	11.49	96.54	22.66	8.69	96.94	30.59	12.91	96.81	28.66	11.30	96.86	29.26	11.07
- 0.600 + 0.075	2.92	34.40	59.18	3.10	33.74	55.62	2.83	37.36	60.83	2.93	36.84	61.15	2.88	32.94	56.19
- 0.075	0.26	37.23	29.33	0.36	43.59	35.68	0.23	32.05	26.26	0.26	34.50	27.55	0.26	37.80	32.74
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

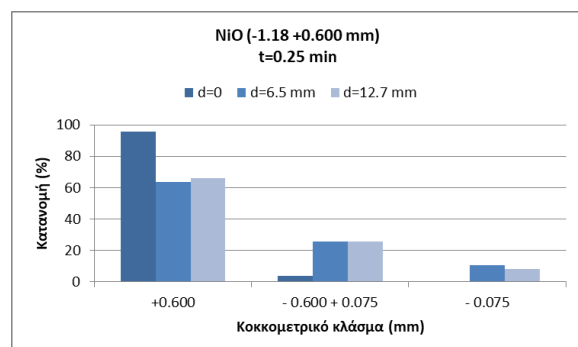
Από τους πίνακες (6.21 – 6.24) παρατηρείται ότι για τους μικρούς χρόνους λειοτρίβησης $t=0.25$ min και $t=0.5$ min, το βάρος του προϊόντος στο χονδρό προϊόν (+0.600 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (-0.600 +0.075 mm) και του λεπτού (-0.075 mm) προϊόντος.

Όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης ($t=0.25$ min και $t=0.5$ min), τόσο το βάρος του χονδρού προϊόντος μειώνεται και αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού προϊόντος. Στην περίπτωση της αυτολειοτρίβησης ($d=0$) το βάρος του χονδρού προϊόντος κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό σε όλους τους χρόνους. Από την άλλη, στην λειοτρίβηση με διάμετρο σφαιρών $d=12.7$ mm, το ενδιάμεσο προϊόν στους μεγαλύτερους χρόνους ($t=1$ min και $t=2$ min) είναι μεγαλύτερο από το πιο χονδρό (+0.600 mm).

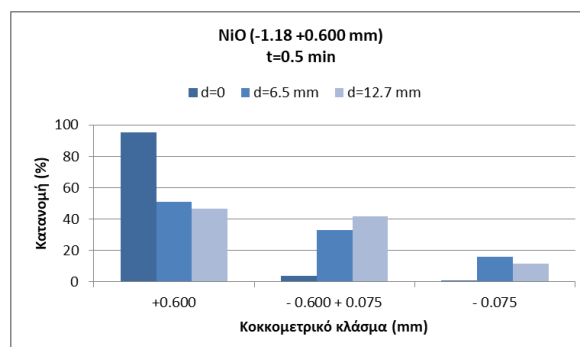
Στους χρόνους λειοτρίβησης $t=0.25$ min, $t=0.5$ min και $t=1$ min, για διάμετρο σφαιρών $d=6.5$ mm, φαίνεται να υπάρχει μια τάση η μεγαλύτερη κατανομή (%) των οξειδίων να βρίσκεται στο χονδρό προϊόν (+0.600 mm). Όσο αυξάνεται ο χρόνος, τόσο η κατανομή (%) στο χονδρό κλάσμα μειώνεται και αυξάνεται στο ενδιάμεσο (-0.600 +0.075 mm), με εξαίρεση τον χρόνο λειοτρίβησης $t=2$ min, όπου η κατανομή (%) του ενδιάμεσου προϊόντος είναι μεγαλύτερη από το χονδρό. Η κατανομή (%) των οξειδίων με χρήση σφαιρών $d=12.7$ mm είναι μεγαλύτερη στο χονδρό προϊόν για μικρούς χρόνους λειοτρίβησης ($t=0.25$ min και $t=0.5$ min) και μεγαλύτερη στο ενδιάμεσο προϊόν για μεγαλύτερους χρόνους ($t=1$ min, $t=2$ min). Στην περίπτωση της αυτολειοτρίβησης ($d=0$), η η μεγαλύτερη κατανομή (%) των οξειδίων για όλες τις συνθήκες των δοκιμών είναι στο χονδρό προϊόν.

Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη κατανομή (%) του NiO είναι 96.54 %, του SiO₂ είναι 96.94 %, του Fe₂O₃ είναι 96.86 % και του MgO είναι 99.81 %, για t=2 min στην αυτολειοτρίβηση.

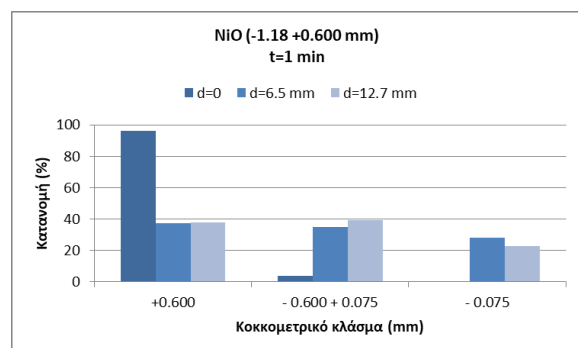
Από τους πίνακες προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (6.40 – 6.43) τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.600 mm, -1.18+0.600 mm, -0.075 mm).



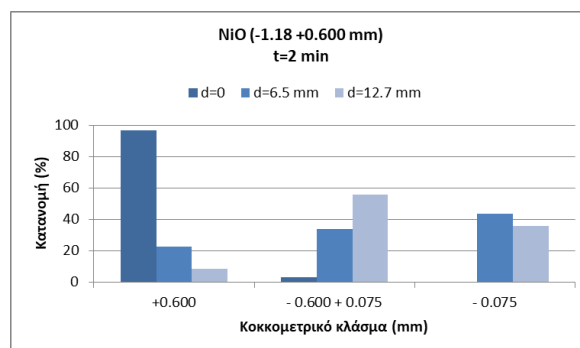
Διάγραμμα 6.40: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.25 min).



Διάγραμμα 6.41: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min).



Διάγραμμα 6.42: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min).



Διάγραμμα 6.43: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min).

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.40 – 6.43) παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η κατανομή (%) του NiO στο λεπτό προϊόν αυξάνεται από 8.33 % σε 35.68 %, ενώ στο χονδρό προϊόν μειώνεται από 65.88 % σε 8.69 %, για χρήση σφαιρών διαμέτρου d=12.7 mm. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στο μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης (t=2 min) και για χρήση της μεγαλύτερης διαμέτρου σφαιρών (d=12.7 mm) και για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.600 mm, -0.600+0.075 mm, -0.075 mm). Στην περίπτωση της αυτολειοτρίβησης (d=0), η κατανομή του NiO για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης έχει την υψηλότερη τιμή στο χονδρό προϊόν (+0.600 mm), στο

ενδιάμεσο παραμένει πολύ χαμηλή, ενώ στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm), αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο χρόνος. Για χρήση σφαιρών διαμέτρου d=6.5 mm, η κατανομή (%) του NiO στο χονδρό προϊόν μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, στο ενδιάμεσο προϊόν κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, ενώ στο λεπτό προϊόν αυξάνεται αναλογικά με τον χρόνο. Για παράδειγμα, όσον αφορά το λεπτό προϊόν, η κατανομή (%) NiO αυξάνεται από 10.66 % σε 16.09 %, για χρόνους λειοτρίβησης από t=0.25 min σε t=0.5 min και χρήση σφαιρών διαμέτρου d=6.5 mm. Για τις ίδιες συνθήκες, η τιμή της κατανομής (%) του NiO για το χονδρό προϊόν, παρουσιάζει μια μείωση από 63.76 % σε 50.81 %.

Στην συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες (6.25 – 6.28) της περιεκτικότητας (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων (-0.600 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 6.25: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.25 min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm			mm			mm			mm			mm		
Τροφή	100	100	100	1.58	1.58	1.58	30.93	30.93	30.93	15.99	15.99	15.98	25.50	25.50	25.50
-0.600	3.80	31.45	30.81	1.71	1.82	1.74	30.07	31.97	29.89	16.47	17.34	16.67	25.25	22.36	25.69
- 0.075	0.31	7.29	6.32	2.21	2.31	2.08	28.91	28.92	28.74	17.82	15.36	15.89	26.66	28.34	26.97

Πίνακας 6.26: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.5 min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm			mm			mm			mm			mm		
Τροφή	100	100	100	1.58	1.58	1.58	30.93	30.93	30.93	15.99	15.99	15.99	25.50	25.50	25.50
-0.600	4.11	42.61	47.29	1.79	1.82	1.79	29.76	30.45	30.63	16.27	16.58	16.27	25.50	24.63	24.82
- 0.075	0.67	11.52	9.21	2.20	2.21	1.99	28.61	29.37	29.07	17.31	16.58	16.15	26.37	26.79	26.73

Πίνακας 6.27: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

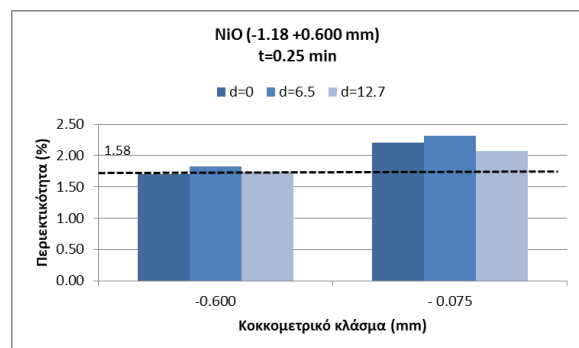
t=1 min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm			mm			mm			mm			mm		
Τροφή	100	100	100	1.58	1.58	1.58	30.93	30.96	30.93	15.99	15.99	15.99	25.50	25.49	25.50
-0.600	3.63	42.61	69.29	1.71	1.76	1.42	28.80	29.41	30.37	16.04	16.29	16.24	25.50	26.35	25.11
- 0.075	0.26	11.52	17.65	2.15	2.06	2.03	12.13	28.93	27.94	16.87	16.79	15.18	27.71	26.78	27.90

Πίνακας 6.28: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

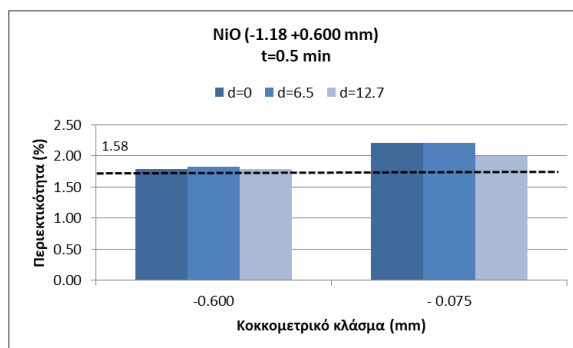
$t=2$ min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
		mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm
Τροφή	100	100	100	1.58	1.58	1.58	30.93	30.93	30.93	15.99	15.99	15.99	25.50	25.50	25.50
-0.600	3.18	56.58	88.51	1.72	1.71	1.63	29.77	29.97	30.43	16.05	15.93	16.02	25.20	25.19	25.62
-0.075	0.26	21.61	29.33	2.21	1.85	1.92	27.63	26.63	27.70	16.43	14.82	15.02	26.12	25.89	28.46

Από τους πίνακες (6.25 – 6.28) παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα (%) των συγκεκριμένων οξειδίων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm είναι μεγαλύτερη στο προϊόν -0.075 mm για το NiO, ενώ για το Fe₂O₃, MgO και SiO₂ είναι μεγαλύτερη στο -0.600 mm. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του NiO είναι 2.31 % για $t=0.25$ min και $d=6.5$ mm, του SiO₂ είναι 30.96 % για $t=1$ min και $d=6.5$ mm, του Fe₂O₃ είναι 28.46 % για $t=2$ min και $d=12.7$ mm και του MgO είναι 17.31 % για $t=0.25$ min και $d=0$.

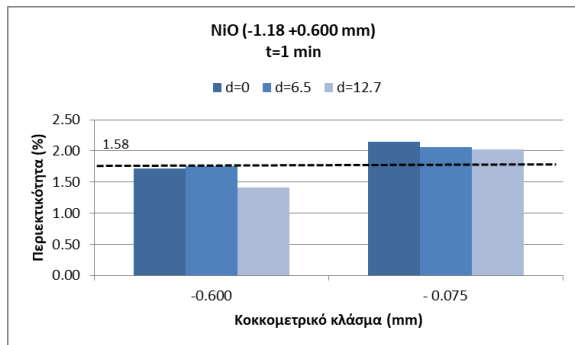
Με την βοήθεια των παραπάνω πινάκων (6.25 – 6.28) προέκυψαν τα διαγράμματα 6.44 – 6.47 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων για αρχική τροφοδοσία -1.18+0.600 mm.



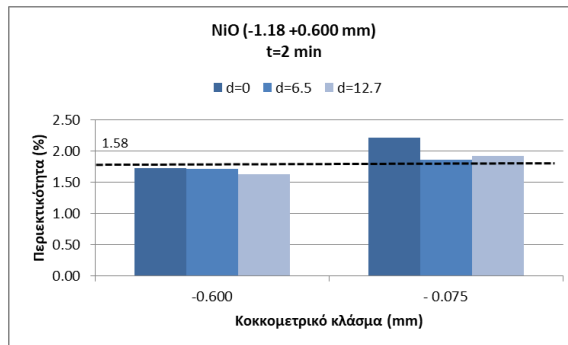
Διάγραμμα 6.44: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.25$ min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.



Διάγραμμα 6.45: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.5$ min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.



Διάγραμμα 6.46: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.



Διάγραμμα 6.47: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.58 % NiO.

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.44 – 6.47) παρατηρείται ότι το NiO είναι πιο πλούσιο στο λεπτό προϊόν -0.075 mm και όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η περιεκτικότητα (%) μειώνεται σε ένα μικρό ποσοστό, με εξαίρεση τις δοκιμές της αυτολειοτρίβησης (d=0), όπου αυξάνεται στους μεγαλύτερους χρόνους. Επίσης, ενώ αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης (t=1 min και t=2 min) το χονδρό προϊόν -0.600 mm δεν γίνεται πιο πλούσιο, παραμένει στα ίδια επίπεδα ή πιο χαμηλά. Για παράδειγμα, η τιμή της περιεκτικότητας (%) NiO για t=2 min και d=0 mm είναι 1.92% στο προϊόν -0.600 mm και 2.21 % στο κλάσμα -0.075 mm.

Ακόμα, από τους παραπάνω πίνακες (6.25 – 6.28) υπολογίστηκε η κατανομή (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm, η οποία φαίνεται στους πίνακες (6.29 – 6.2.32).

Πίνακας 6.29: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για χρόνο t=0.25 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.25 min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 0.600	3.80	31.45	30.81	4.12	36.24	34.12	3.69	32.50	29.77	3.91	34.10	32.15	3.76	27.58	31.05
- 0.075	0.31	7.29	6.32	0.43	10.66	8.33	0.29	6.81	5.87	0.34	7.00	6.28	0.32	8.10	6.68

Πίνακας 6.30: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 1.18+0.600 mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.5$ min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 0.600	4.11	42.61	47.29	4.66	49.19	53.46	3.96	41.94	46.84	4.19	44.19	48.12	4.11	41.15	46.03
- 0.075	0.67	11.52	9.21	0.93	16.09	11.62	0.62	10.94	8.65	0.72	11.95	9.30	0.69	12.10	9.65

Πίνακας 6.31: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 1.18+0.600 mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

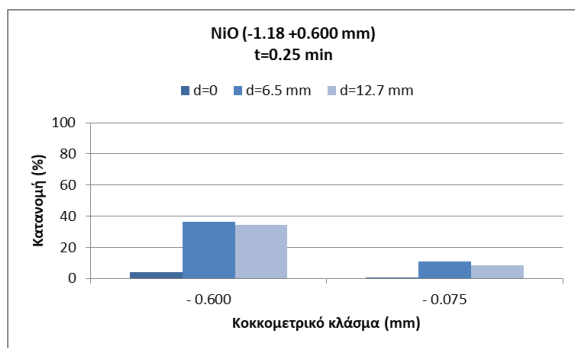
$t=1$ min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 0.600	3.63	42.61	69.29	3.93	62.72	62.06	3.38	53.75	68.03	3.64	57.63	70.36	3.63	58.47	68.24
- 0.075	0.26	11.52	17.65	0.35	28.12	22.64	0.10	20.19	15.94	0.27	22.69	16.76	0.28	22.70	19.31

Πίνακας 6.32: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 1.18+0.600 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

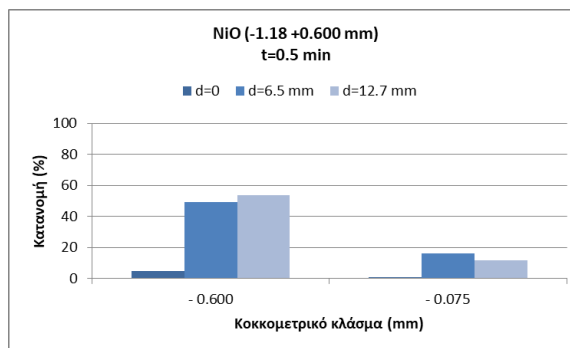
$t=2$ min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	26	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 0.600	3.38	18.20	88.79	3.46	77.34	91.31	3.06	69.41	87.09	3.19	71.34	88.70	3.14	70.74	88.93
- 0.075	0.26	9.43	28.62	0.36	43.59	35.68	0.23	32.05	26.26	0.26	34.50	27.55	0.26	37.80	32.74

Από τους πίνακες (6.29 – 6.32) παρατηρείται ότι υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η κατανομή (%) των οξειδίων όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης. Η μεγαλύτερη κατανομή (%) για όλα τα οξείδια παρατηρείται στο προϊόν -0.600 mm για τον μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min και τις μεγαλύτερες σφαίρες διαμέτρου $d=12.7$ mm. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερη κατανομή (%) του NiO είναι 91.31 %, του SiO₂ είναι 87.09 %, του MgO είναι 88.70 % και του Fe₂O₃ 88.93 %.

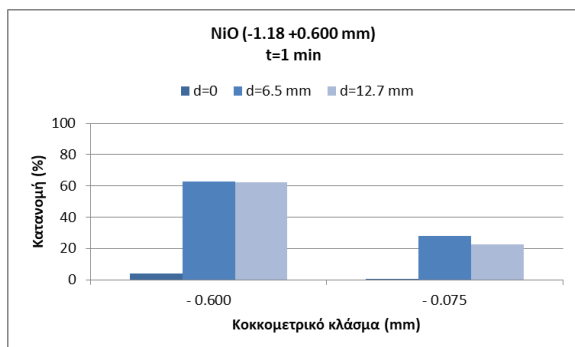
Από τους πίνακες (6.29 – 6.32) προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (6.48 – 6.51), τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για τα μεγέθη προϊόντων -0.600 mm και -0.075 mm.



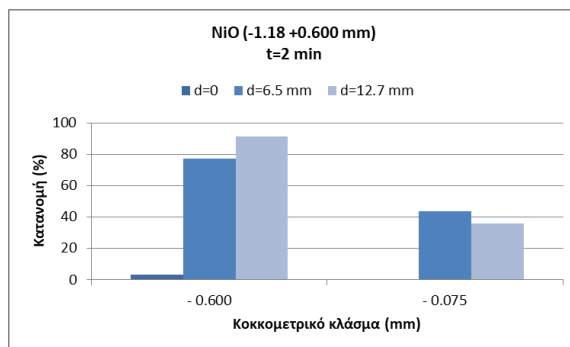
Διάγραμμα 6.48: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.25 min).



Διάγραμμα 6.49: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min).



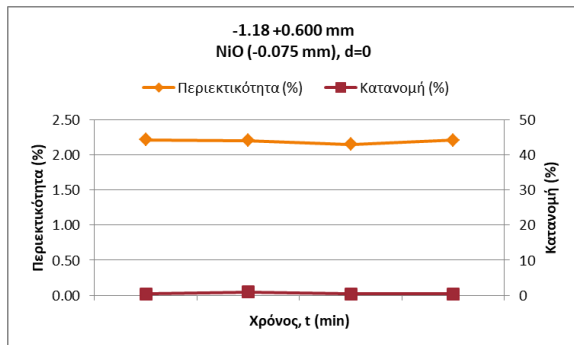
Διάγραμμα 6.50: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min).



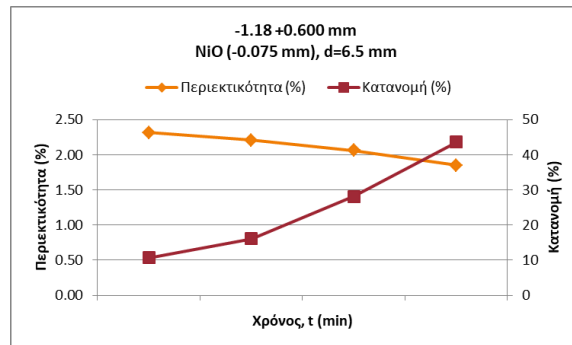
Διάγραμμα 6.51: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min).

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.48– 6.51) παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος των σφαιρών, αυξάνεται η κατανομή (%) NiO στο ενδιάμεσο προϊόν -0.600+0.075 mm. Στο λεπτό προϊόν -0.075 mm, η μεγαλύτερη κατανομή (%) παρατηρείται στις δοκιμές με διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm. Όπως παρατηρήθηκε στα διαγράμματα (6.48 – 6.51), η μεγαλύτερη κατανομή (%) του NiO παρατηρείται στο προϊόν -0.600 mm για d=12.7 mm και t=2 min και είναι 91.31 %.

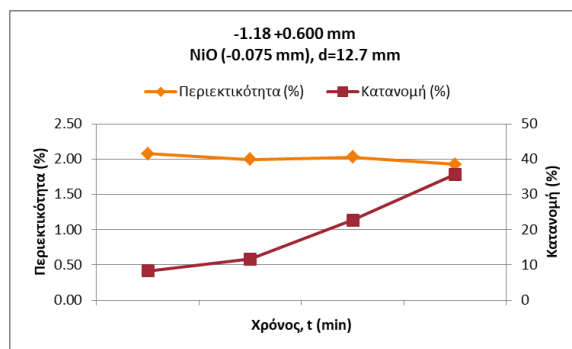
Ο εμπλουτισμός του NiO γίνεται στο λεπτό προϊόν, γεγονός που επιβεβαιώνεται κι από τη θεωρία. Για το λόγο αυτό, καταλήξαμε στα παρακάτω διπλά διαγράμματα 6.52 – 6.54 περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) NiO του λεπτού προϊόντος (-0.075 mm).



Διάγραμμα 6.52: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=0 (τροφοδοσία -1.18+0.600 mm).



Διάγραμμα 6.53: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=6.5 mm (τροφοδοσία -1.18+0.600 mm).



Διάγραμμα 6.54: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=12.7 mm (τροφοδοσία -1.18+0.600 mm).

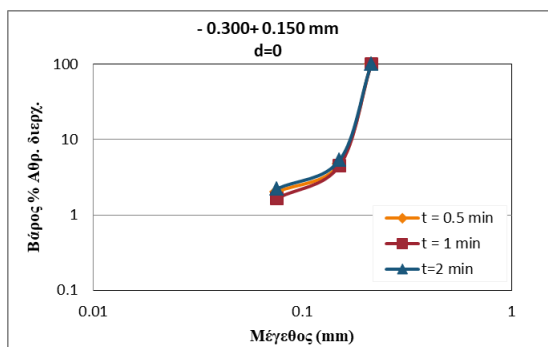
Στα διαγράμματα 6.52 – 6.54 παρατηρείται ότι γενικά για το λεπτό προϊόν -0.075 mm και για τις συγκεκριμένες διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm), όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η περιεκτικότητα (%) του NiO για d=0 κυμαίνεται σε παραπλήσιες τιμές με πολύ μικρή κατανομή (%), για d=6.5 mm παρατηρείται μια μείωση της περιεκτικότητας (%) αλλά μεγάλη αύξηση της κατανομής (%) και τέλος για d=12.7 η περιεκτικότητα (%) έχει μια ελάχιστη μείωση και υπάρχει επίσης μεγάλη αύξηση της κατανομής (%).

Η ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και με την αύξηση της διαμέτρου των σφαιρών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για χρόνο λειοτρίβησης t=2 min και d=0 η περιεκτικότητα (%) του NiO είναι 2.21 % που αντιστοιχεί σε κατανομή 0.36 %, ενώ για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης και d=12.7 mm, η περιεκτικότητα (%) του ίδιου στοιχείου είναι 1.92 % και αντιστοιχεί σε κατανομή 35.68 %.

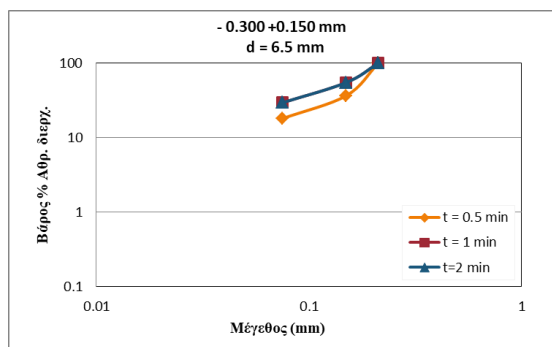
6.3 Τροφοδοσία -0.300+0.150 mm

6.3.1 Επίδραση του χρόνου λειοτριβήσης και της διαμέτρου σφαιρών

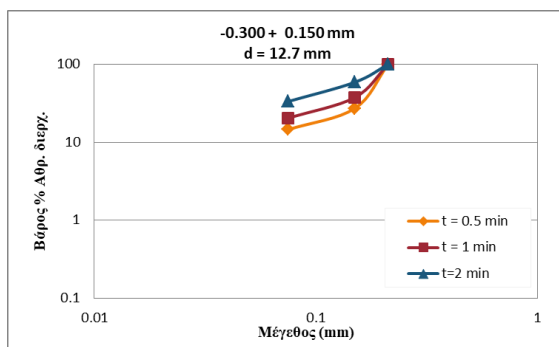
Από τους πίνακες Γ1, Γ2, Γ3 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Γ προκύπτουν τα διαγράμματα 6.55 – 6.57 του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300+0.150 mm για τρεις διαφορετικούς χρόνους , για λειοτριβήση χωρίς σφαίρες και για λειοτριβήση με δύο διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών.



Διάγραμμα 6.55: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτριβήσης κατά την αυτολειοτριβήση, d=0 (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm).



Διάγραμμα 6.56: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτριβήσης κατά την λειοτριβήση με χρήση σφαιρών διαμέτρου d=6.5 mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm).

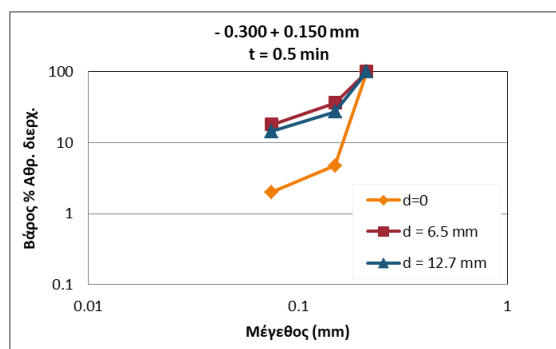


Διάγραμμα 6.57: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτριβήσης κατά την λειοτριβήση με χρήση σφαιρών διαμέτρου d=12.7 mm, (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm).

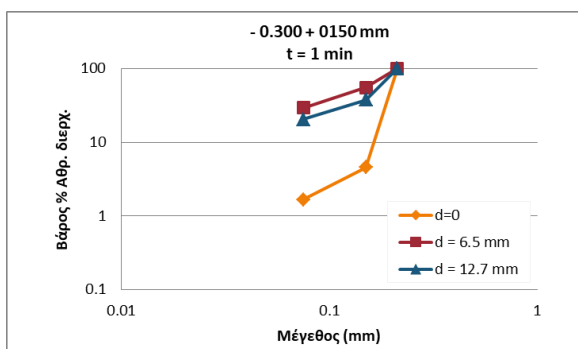
Από τα διαγράμματα 6.55 – 6.57 παρατηρείται ότι αυξάνοντας τον χρόνο λειοτριβήσης, μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό σε σχέση με τα κλάσματα -

3.35+1.70 και -1.18+0.600 mm. Η μεταβολή που υφίσταται στην αυτολειοτρίβηση ($d=0$) είναι αμελητέα. Οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη (αριστερά), ειδικότερα χρησιμοποιώντας τις σφαίρες διαμέτρου $d=12.7$ mm.

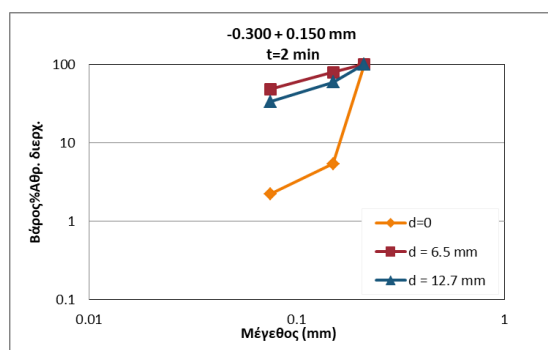
Παρακάτω προέκυψαν τα διαγράμματα 6.58 – 6.60 τα οποία παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος για τρεις διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης και διάμετρο σφαιρών.



Διάγραμμα 6.58: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=0.5$ min (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150mm).



Διάγραμμα 6.59: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=1$ min (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150mm).

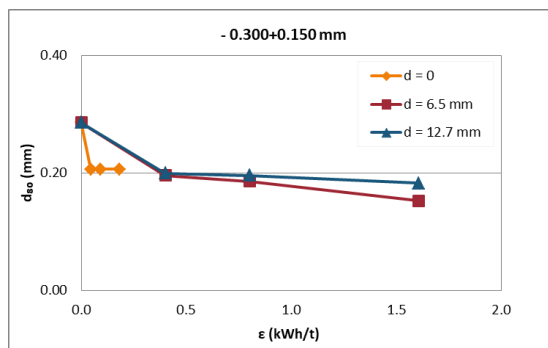


Διάγραμμα 6.60: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών για χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min (κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150mm).

Στα διαγράμματα 6.58 – 6.60 παρατηρείται ότι έχοντας το ίδιο προϊόν -0.300+0.150 mm, για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης και για διαφορετικά μεγέθη σφαιρών, λαμβάνονται διαφορετικά ποσοστά λεπτού προϊόντος. Στον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα μεγέθη σφαιρών, λαμβάνεται μεγαλύτερο ποσοστό λεπτού προϊόντος και ειδικότερα στην διάμετρο σφαιρών $d=6.5$ m. Το υλικό λειοτριβείται πιο αποδοτικά στον χρόνο λειοτρίβησης $t=2$ min για $d=6.5$ mm.

6.3.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}

Για κάθε δοκιμή λειοτρίβησης υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια κατανάλωσης (ϵ) (Σχέση 7) και το μέγεθος από το οποίο διέρχεται το 80% (d_{80}) του προϊόντος, σύμφωνα με τον Πίνακα Γ4 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Γ. Υπενθυμίζεται ότι στους εργαστηριακούς μύλους η ενέργεια κατανάλωσης είναι ανάλογη του χρόνου λειοτρίβησης και εξαρτάται από την ισχύ P του μύλου. Το διάγραμμα χχχ παρουσιάζει το μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια (ϵ) που καταναλώθηκε για τις τρεις διαμέτρους σφαιρών.



Διάγραμμα 6.61: Μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm, για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

Από το διάγραμμα 6.61 παρατηρείται ότι όσο μειώνεται το μέγεθος d_{80} του προϊόντος, αυξάνεται η ειδική ενέργεια κατανάλωσης ϵ (kWh/t) και ότι η μεγαλύτερη διάμετρος σφαιρών οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν αλλά και σε μεγαλύτερη κατανάλωση της ειδικής ενέργειας ϵ . Τέλος, η αυτολειοτρίβηση δεν οδηγεί πρακτικά σε μείωση του προϊόντος για τους χρόνους (ειδικές ενέργειες) που επιλέχθηκαν.

6.3.3 Χημική ανάλυση προϊόντων

Η χημική ανάλυση των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της φασματοσκοπίας XRF, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την ποιοτική και την ποσοτική στοιχειακή ανάλυση στερεών και υγρών δειγμάτων.

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 6.33 – 6.35. Στους πίνακες αυτούς προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα επιλεγμένων οξειδίων με βάση την επίδραση των σφαιρών και του χρόνου λειοτρίβησης για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.150 mm, -0.150+0.075 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 6.33: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.5 min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.150	95.26	63.36	72.80	1.61	1.45	1.56	32.26	28.05	29.18	16.52	14.82	15.75	25.71	25.09	26.03
- 0.150 + 0.075	2.73	18.64	12.65	1.30	1.85	1.68	52.93	41.32	37.11	15.17	24.70	21.20	16.42	26.26	21.16
- 0.075	2.01	18.01	14.55	2.18	1.97	1.83	29.91	24.83	27.54	15.78	13.74	15.97	27.30	26.10	26.53
	100	100	100	1.62	1.62	1.62	29.95	29.95	29.95	16.47	16.47	16.47	25.49	25.49	25.49

Πίνακας 6.34: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=1 min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.150	95.46	44.96	62.40	1.56	1.42	1.55	30.52	29.10	30.39	16.03	15.44	16.24	24.91	25.85	25.53
- 0.150 + 0.075	2.89	25.67	17.18	1.69	1.58	1.96	31.35	33.65	29.38	15.97	18.87	17.68	25.59	22.29	23.86
- 0.075	1.65	29.38	20.42	2.15	1.95	1.53	29.95	28.00	29.07	16.35	15.94	16.15	27.05	27.73	26.73
	100	100	100	1.62	1.62	1.62	29.95	29.95	29.95	16.47	16.47	16.47	25.49	25.49	25.49

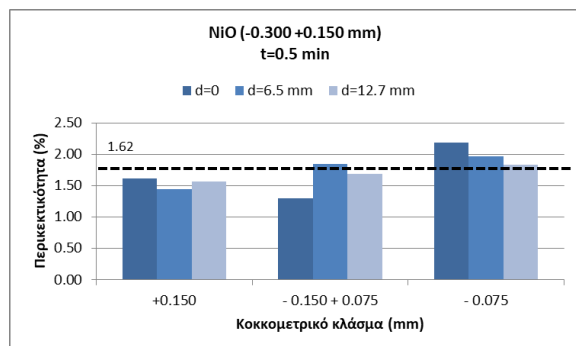
Πίνακας 6.35: Χημική ανάλυση προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=2 min	Παραμένον			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.150	94.64	20.97	41.04	1.64	1.32	1.52	28.91	29.92	29.65	15.20	15.05	16.17	26.00	25.44	25.38
- 0.150 + 0.075	3.14	31.22	25.56	1.68	1.34	1.52	31.85	32.92	33.11	15.98	18.84	19.35	25.29	21.36	23.20
- 0.075	2.22	47.80	33.40	2.22	1.92	1.81	30.20	28.02	27.89	16.16	15.54	14.63	27.42	28.20	27.36
	100	100	100	1.62	1.62	1.62	29.95	29.95	29.95	16.47	16.47	16.47	25.49	25.49	25.49

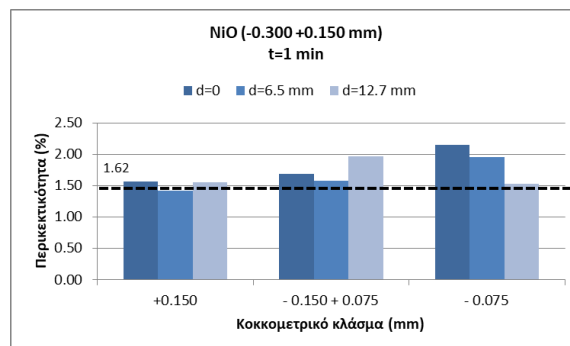
Από τους πίνακες 6.33 – 6.35 παρατηρείται ότι το βάρος του προϊόντος στο χονδρό προϊόν (+ 0.150 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με του ενδιάμεσου (-0.150+0.075 mm) και του λεπτού (-0.075 mm) προϊόντος. Όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, τόσο το βάρος του χονδρού προϊόντος μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού προϊόντος. Στην λειοτρίβηση με διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm σε χρόνο t=2 min το βάρος του λεπτού προϊόντος κατέχει την μεγαλύτερη τιμή. Γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να αυξάνεται ελάχιστα η περιεκτικότητα (%) του NiO, όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος ή σε κάποιες δοκιμές να παραμένει στα ίδια επίπεδα. Η περιεκτικότητα (%) του SiO₂ για d=12.7 mm παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερη στο ενδιάμεσο προϊόν σε όλους τους χρόνους λειοτρίβησης και πιο μικρή στα πιο λεπτά προϊόντα. Η περιεκτικότητα (%) του Fe₂O₃ σε γενικές γραμμές είναι μεγαλύτερη στο πιο λεπτό (-0.075 mm) και μειώνεται στο ενδιάμεσο και στο λεπτό. Η περιεκτικότητα (%) του MgO για διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm και d=12.7 mm, είναι μεγαλύτερη στο ενδιάμεσο προϊόν (-0.150+0.075 mm) ενώ πιο μικρή στο χονδρό και στο πιο λεπτό. Στην περίπτωση της αυτολειοτρίβησης δεν υπάρχουν έντονες μεταβολές

μεταξύ των τιμών. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του NiO είναι 2.22 % για $t=2$ min και δοκιμές χωρίς σφαίρες, του SiO_2 είναι 41.32 % για $t=0.5$ min και $d=6.5$ mm, του Fe_2O_3 είναι 28.20 % για $t=2$ min και $d=6.5$ mm και του MgO είναι 24.70 % για $t=0.5$ min και $d=6.5$ mm.

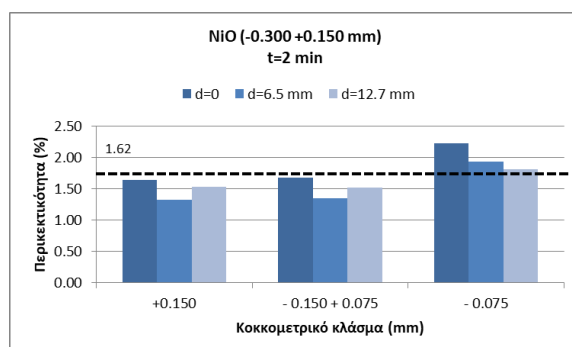
Στην παρούσα διατριβή ασχοληθήκαμε με την περεταίρω μελέτη του NiO, έτσι με την βοήθεια των παραπάνω πινάκων (6.33 – 6.35) προέκυψαν τα διαγράμματα (6.62 – 6.64), τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.150 mm, -0.150+0.075 mm και -0.075 mm).



Διάγραμμα 6.62: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=0.5$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.



Διάγραμμα 6.63: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=1$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.



Διάγραμμα 6.64: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο των σφαιρών για $t=2$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.

Στα διαγράμματα (6.62 – 6.64), είναι εμφανής η αύξηση της αρχικής περιεκτικότητας σε NiO (1.62%) για τη συγκεκριμένη τροφοδοσία στα λεπτά προϊόντα (-0.075 mm) του κλάσματος τροφοδοσίας. Αντίθετα στο χονδρό προϊόν η περιεκτικότητα (%) σε NiO παραμένει σχεδόν ίση ή μικρότερη της αρχικής τροφοδοσίας. Στα ίδια επίπεδα κυμαίνεται η περιεκτικότητα (%) στο ενδιάμεσο

προϊόν -1.70+0.075 mm, με εξαίρεση την τιμή που παρουσιάζεται στον χρόνο t=1 min, για χρήση σφαιρών διαμέτρου d=12.7 mm, όπου παρατηρείται μεγάλη αύξηση.

Εκτός από την ανάλυση των οξειδίων μελετήθηκε και η κατανομή τους (%), η οποία υπολογίστηκε από τους πίνακες (6.33 – 6.35). Τα αποτελέσματα της κατανομής (%) των οξειδίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (6.36 – 6.38).

Πίνακας 6.36: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.5 min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.150	95.26	63.36	72.80	95.08	56.78	70.39	93.50	59.36	70.94	95.56	57.03	69.61	96.08	62.36	74.35
- 0.150 + 0.075	2.73	18.64	12.65	2.20	21.29	13.17	4.83	25.71	15.67	2.52	27.95	16.28	1.76	19.20	10.50
- 0.075	2.01	18.01	14.55	2.71	21.93	16.44	1.67	14.93	13.38	1.93	15.02	14.11	2.15	18.44	15.15
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 6.37: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=1 min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.150	95.46	44.96	62.40	92.24	39.43	59.85	97.28	43.69	63.32	92.93	42.15	61.53	93.29	45.59	62.50
- 0.150 + 0.075	2.89	25.67	17.18	5.56	25.10	20.85	1.07	28.84	16.86	5.43	29.41	18.45	4.96	22.45	16.08
- 0.075	1.65	29.38	20.42	2.19	35.47	19.30	1.65	27.47	19.82	1.64	28.44	20.03	1.75	31.97	21.42
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 6.38: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

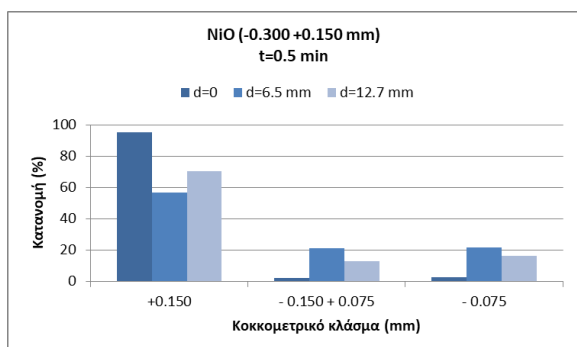
t=2 min	Παραμένον			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
+0.150	94.64	20.97	41.04	96.02	17.16	38.64	91.37	20.95	40.64	87.37	19.17	40.29	96.55	20.94	40.87
- 0.150 + 0.075	3.14	31.22	25.56	0.94	25.90	24.00	6.40	34.32	28.26	10.46	35.72	30.03	1.07	26.17	23.27
- 0.075	2.22	47.80	33.40	3.04	56.94	37.36	2.23	44.73	31.11	2.17	45.11	29.68	2.38	52.89	35.86
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Από τους πίνακες 6.36 – 6.38 παρατηρείται ότι το βάρος του προϊόντος στο χονδρό προϊόν (+0.150 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (-0.150+0.075 mm) και του λεπτού (-0.075 mm) προϊόντος, με εξαίρεση τον χρόνο λειοτρίβησης t=2 min και διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm, όπου το μεγαλύτερο βάρος έχει το λεπτό προϊόν. Με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης το βάρος του χονδρού προϊόντος μειώνεται και αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού προϊόντος.

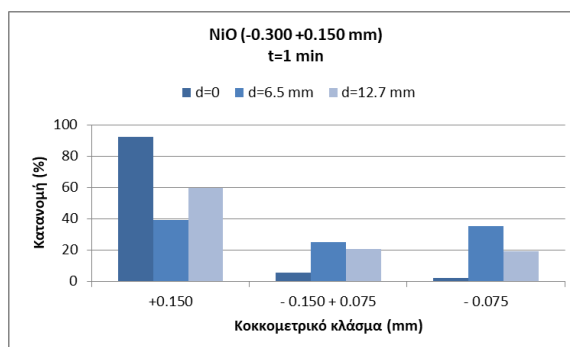
Γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται η κατανομή (%) των οξειδίων όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος, και γενικότερα, η κατανομή (%) όλων των οξειδίων στους μικρούς χρόνους ($t=0.5$ min και $t=1$ min) είναι μεγαλύτερη στο χονδρό προϊόν (+0.150 mm), ενώ στον χρόνο $t=2$ min, η μεγαλύτερη κατανομή (%) είναι στο λεπτό προϊόν με εξαίρεση την αυτολειοτριβήση ($d=0$).

Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη κατανομή (%) του NiO είναι 96.02 % στην αυτολειοτριβήση ($d=0$) για $t=2$ min, του SiO_2 είναι 97.28 % στην αυτολειοτριβήση ($d=0$) σε χρόνο $t=1$ min, του Fe_2O_3 είναι 96.55% στην αυτολειοτριβήση ($d=0$) για $t=2$ min, του MgO είναι 95.56 % στην αυτολειοτριβήση ($d=0$) για $t=0.5$ min και του SiO_2 97.28 % στην αυτολειοτριβήση ($d=0$) για $t=1$ min.

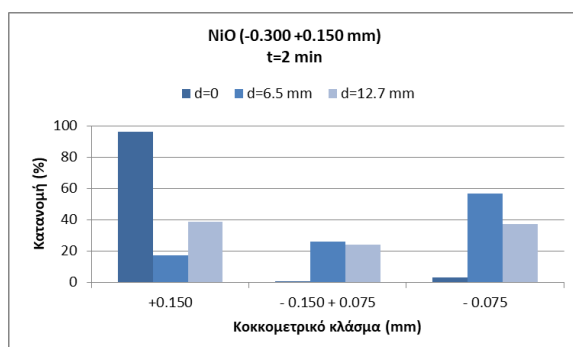
Από τους πίνακες προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (6.65 – 6.67) τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.300 mm, -1.150 +0.300 mm, -0.075 mm).



Διάγραμμα 6.65: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=0.5$ min).



Διάγραμμα 6.66: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=1$ min).



Διάγραμμα 6.67: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($t=2$ min).

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.65 – 6.67). παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτριβήσης, η κατανομή (%) NiO στο λεπτό προϊόν αυξάνεται από 17.16 % σε 56.94 %, ενώ στο χονδρό μειώνεται από 21.93 % σε 56.94 %, για χρήση σφαιρών διαμέτρου 6.5 mm. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο έντονα στο μεγαλύτερο χρόνο λειοτριβήσης ($t=2$ min) και για χρήση διαμέτρου σφαιρών 6.5 mm, για το ενδιάμεσο (-0.150+0.075 mm) και το λεπτό προϊόν (-0.075 mm).

Γενικότερα παρατηρείται ότι οι σφαίρες διαμέτρου $d=6.5$ mm και η αυτολειοτρίβηση ($d=0$), επιφέρουν καλύτερα αποτελέσματα στην κατανομή (%), επομένως όσο μειώνεται το μέγεθος, τόσο πιο αποτελεσματικές είναι οι σφαίρες μικρότερης διαμέτρου.

Στην συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες (6.39 – 6.41). της περιεκτικότητας (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων (-0.150 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 6.39: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=0.5$ min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	1.62	1.62	1.62	29.95	29.95	29.95	16.47	16.47	16.47	25.49	25.49	25.49
- 0.150	4.74	36.64	27.20	1.67	1.91	1.76	41.03	33.22	31.99	15.43	19.31	18.40	21.03	26.18	24.03
- 0.075	2.01	18.01	14.55	2.18	1.97	1.83	24.86	24.83	27.54	15.78	13.74	15.97	27.30	26.10	26.53

Πίνακας 6.40: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

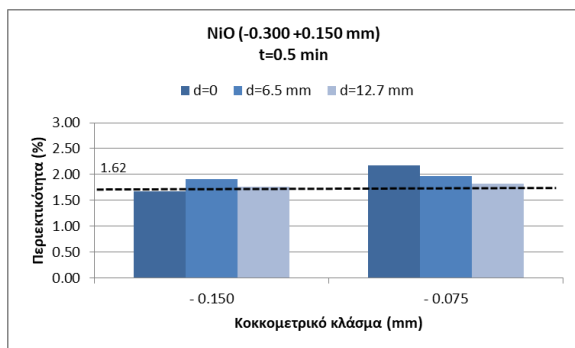
$t=1$ min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	1.62	1.62	1.62	29.95	29.95	29.95	16.47	16.47	16.47	25.49	25.49	25.49
- 0.150	4.54	55.04	37.60	2.76	1.78	1.73	17.93	30.63	29.21	25.66	17.31	16.85	37.67	25.19	25.42
- 0.075	1.65	29.38	20.42	2.15	1.95	1.53	29.95	28.00	29.07	16.35	15.94	16.15	27.05	27.73	26.73

Πίνακας 6.41: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

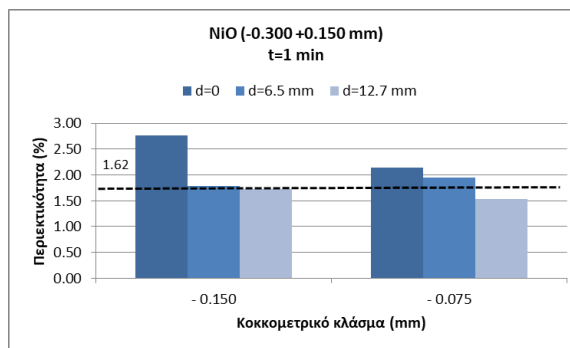
$t=2$ min	Αθρ. Διερχομένων			Ανάλυση (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	1.62	1.62	1.62	29.95	29.95	29.95	16.47	16.47	16.47	25.49	25.49	25.49
- 0.150	5.36	79.03	58.96	1.20	1.69	1.68	48.26	29.95	30.15	38.83	16.84	16.68	16.43	25.50	25.56
- 0.075	2.22	47.80	33.40	2.22	1.92	1.81	30.20	28.02	27.89	16.16	15.54	14.63	27.42	28.20	27.36

Από τους πίνακες 6.39 – 6.41 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα (%) των συγκεκριμένων οξειδίων του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300 mm είναι μεγαλύτερη στο ενδιάμεσο προϊόν -0.150 mm για το NiO, όπως και για το Fe₂O₃, MgO και το SiO₂. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) NiO είναι 2.22 % για $t=2$ min και $d=0$, του SiO₂ είναι 46.36 % για $t=2$ min και $d=0$, του Fe₂O₃ είναι 35.91 % για $t=1$ min και $d=0$ και του MgO είναι 36.51 % για $t=2$ min και $d=0$.

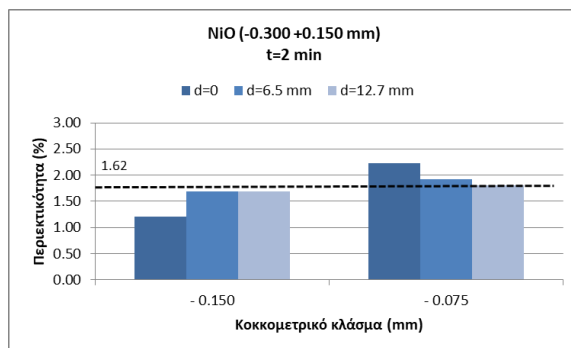
Με την βοήθεια των παραπάνω πινάκων (6.39 – 6.41). προέκυψαν τα διαγράμματα (6.68 – 6.70). τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων για αρχική τροφοδοσία $-0.300+0.150$ mm.



Διάγραμμα 6.68: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.



Διάγραμμα 6.69: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.



Διάγραμμα 6.70: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min). Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 1.62 % NiO.

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.68 – 6.70) παρατηρείται ότι το NiO είναι πιο πλούσιο στο λεπτό προϊόν -0.075 mm. Επίσης, όσο αυξάνει η διάμετρος των σφαιρών για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης, το λεπτό προϊόν εμπλουτίζεται λιγότερο σε NiO. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) NiO παρατηρείται για t=2 min και d=0 και είναι 2.22 %

Ακόμα, από τους παραπάνω πίνακες (6.39 – 6.41) υπολογίστηκε η κατανομή (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300 mm, η οποία φαίνεται στους πίνακες (6.42 – 6.44).

Πίνακας 6.42: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 0.300+0.150 mm για χρόνο t=0.5 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

t=0.5 min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 0.150	4.74	36.64	27.20	4.92	43.22	29.61	6.50	40.64	29.06	4.44	42.97	30.39	3.92	37.64	25.65
- 0.075	2.01	18.01	14.55	2.71	21.93	16.44	1.67	14.93	13.38	1.93	15.02	14.11	2.15	18.44	15.15

Πίνακας 6.43: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 0.300+0.150 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

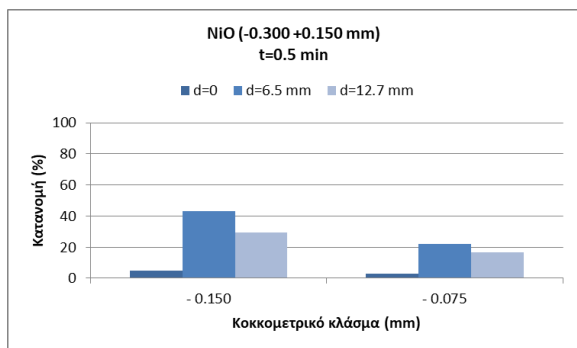
t=1 min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 0.150	4.54	55.04	37.60	7.76	60.57	40.15	2.72	56.31	36.68	7.07	57.85	38.47	6.71	54.41	37.50
- 0.075	1.65	29.38	20.42	2.19	35.47	19.30	1.65	27.47	19.82	1.64	28.44	20.03	1.75	31.97	21.42

Πίνακας 6.44: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας - 0.300+0.150 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

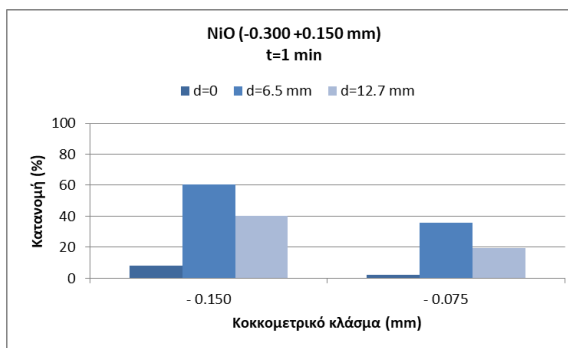
t=2 min	Αθρ. Διερχομένων			Κατανομή (%)											
	Βάρος, W (%)			NiO (%)			SiO ₂ (%)			MgO (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
- 0.150	5.36	79.03	58.96	3.98	82.84	61.36	8.63	79.05	59.36	12.63	80.83	59.71	3.45	79.06	59.13
- 0.075	2.22	47.80	33.40	3.04	56.94	37.36	2.23	44.73	31.11	2.17	45.11	29.68	2.38	52.89	35.86

Από τους πίνακες 6.42 – 6.44 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, τόσο αυξάνεται η κατανομή (%) των οξειδίων τόσο στο ενδιάμεσο προϊόν (-0.300 mm) όσο και στο λεπτό (-0.075 mm). Η μεγαλύτερη κατανομή (%) για όλα τα οξείδια παρατηρείται στο προϊόν -0.150 mm για το μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης, t=2 min και τις σφαίρες διαμέτρου d=6.5 mm. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερη κατανομή (%) του NiO είναι 82.84 %, του SiO₂ είναι 79.05 %, του MgO είναι 80.83 % και του Fe₂O₃ 79.06 % για χρόνο λειοτρίβησης t=2 min και διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm.

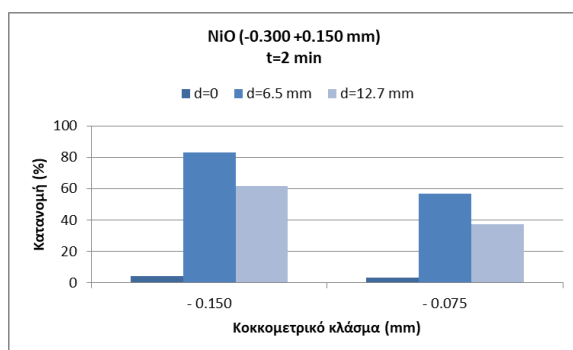
Από τους πίνακες 6.42 – 6.44 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (6.71 – 6.73), τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300 mm για τα μεγέθη προϊόντων -0.150 mm και -0.075 mm.



Διάγραμμα 6.71: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=0.5 min).



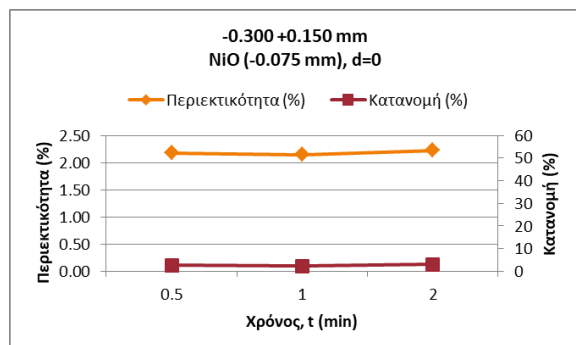
Διάγραμμα 6.72: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=1 min).



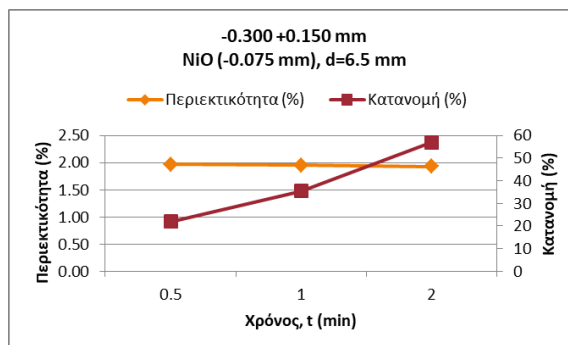
Διάγραμμα 6.73: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχομένων προϊόντων του κλάσματος τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (t=2 min).

Στα παραπάνω διαγράμματα (6.71 – 6.73) παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη κατανομή (%) είναι στο προϊόν -0.150 mm με διάμετρο σφαιρών d=6.5 mm. Όπως παρατηρήθηκε στα διαγράμματα 6.3.3.10 – 6.3.3.12, η μεγαλύτερη κατανομή (%) NiO παρατηρείται στο προϊόν -0.150 mm για d=6.5 mm και t=2 min και είναι 82.84 %.

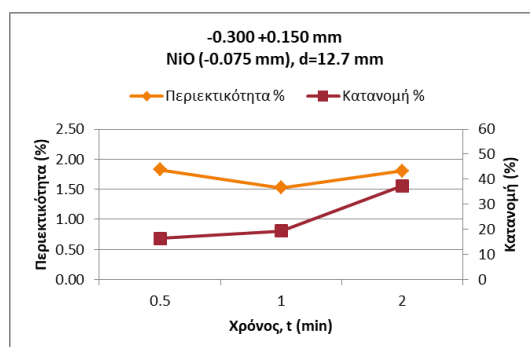
Ο εμπλουτισμός του NiO γίνεται στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm) γεγονός που επιβεβαιώνεται κι από τη θεωρία. Για το λόγο αυτό, καταλήξαμε στα παρακάτω διπλά διαγράμματα (6.74 – 6.76) περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) NiO του λεπτού κλάσματος (-0.075 mm).



Διάγραμμα 6.74: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=0 (τροφοδοσία -0.300+0.150 mm).



Διάγραμμα 6.75: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=6.5 mm (τροφοδοσία -0.300+0.150 mm).



Διάγραμμα 6.76: Περιεκτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του προϊόντος -0.075 mm και d=12.7 mm (τροφοδοσία -0.300+0.150 mm).

Στα διαγράμματα 6.74 – 6.76 παρατηρείται ότι γενικά για το λεπτό προϊόν -0.075 mm και για τις συγκεκριμένες διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm), όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η περιεκτικότητα (%) του NiO για d=0 έχει μια μικρή αύξηση με σχετικά μικρή κατανομή (%), για d=6.5 mm παρατηρείται σταθερή περιεκτικότητα (%) αλλά αύξηση της κατανομής (%) και τέλος για διάμετρο σφαιρών d=12.7 η περιεκτικότητα (%) μειώνεται λίγο και υπάρχει μεγάλη αύξηση της κατανομής (%).

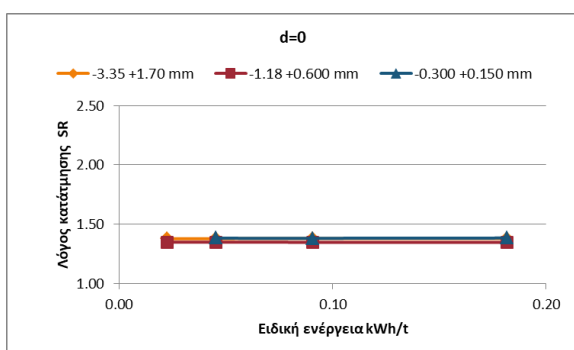
Η ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και με την αύξηση της διαμέτρου των σφαιρών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για χρόνο λειοτρίβησης t=2 min και d=0 η περιεκτικότητα (%) NiO είναι 1.62 % που αντιστοιχεί σε κατανομή 0.38 %, ενώ για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης και d=12.7 mm, η περιεκτικότητα (%) του ίδιου στοιχείου είναι 1.62 % και αντιστοιχεί σε κατανομή 34.82 %.

Κεφάλαιο 7: Λόγος κατάτμησης

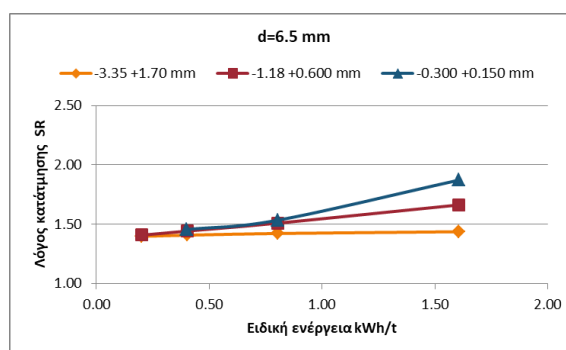
Από τα διαγράμματα της αθροιστικής διερχόμενης μάζας % σε συνάρτηση με το μέγεθος του κοσκίνου (6.1 – 6.3 και 6.28 – 6.30 και 6.55 – 6.57), για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης, υπολογίστηκε το μέγεθος d_{80} , όπου διέρχεται το 80% του υλικού για τις τρεις διαμέτρους σφαιρών.

Η επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών λειοτρίβησης μπορεί να μελετηθεί με την εισαγωγή του αδιάστατου μεγέθους d_{180}/d_{280} , που ονομάζεται λόγος κατάτμησης (reduction ratio). Το d_{180} και το d_{280} είναι τα μεγέθη που διέρχεται το 80% της μάζας της τροφοδοσίας και του προϊόντος, αντίστοιχα (Πετράκης, 2017). Ο λόγος κατάτμησης είναι ένα μέτρο της μείωσης του μεγέθους του υλικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα από το μέγεθος της τροφοδοσίας. Επομένως τα αποτελέσματα μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με τη χρήση του λόγου κατάτμησης.

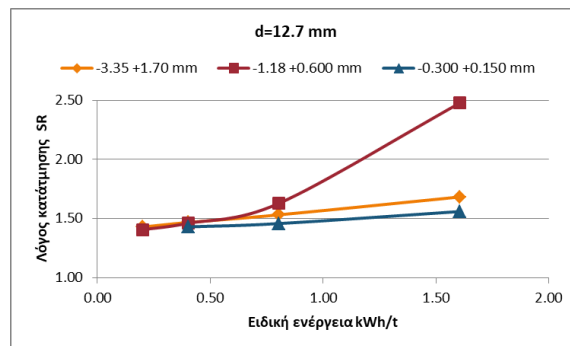
Τα διαγράμματα 7.1 – 7.3 παρουσιάζουν την σχέση του λόγου κατάτμησης (d_{180}/d_{280}) του λατερίτη Καστοριάς σε σχέση με την ειδική ενέργεια ϵ (Kwh/t) που καταναλώθηκε, για χρόνο $t=0.25$ min, $t=0.5$ min, $t=1$ min και $t=2$ min, για τις τροφοδοσίες: -3.35+1.70 mm, -1.18+0.600 mm και για χρόνο $t=0.5$ min, $t=1$ min και $t=2$ min για την τροφοδοσία -0.300+0.150 mm, για κάθε μέγεθος σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).



Διάγραμμα 7.1: Σχέση του λόγου κατάτμησης με την ειδική ενέργεια για τις τροφοδοσίες (-3.35+1.70 mm, -1.18+0.600 mm, -0.300+0.150 mm) στην αυτολειοτρίβηση ($d=0$).



Διάγραμμα 7.2: Σχέση του λόγου κατάτμησης με την ειδική ενέργεια για τις τροφοδοσίες (-3.35+1.70 mm, -1.18+0.600 mm, -0.300+0.150 mm) με χρήση διαμέτρου σφαιρών $d=6.5$ mm.



Διάγραμμα 7.3: Σχέση του λόγου κατάτμησης με την ειδική ενέργεια για τις τροφοδοσίες (-3.35+1.70 mm, -1.18+0.600 mm, -0.300+0.150 mm) με χρήση διαμέτρου σφαιρών d=12.7 mm.

Τα διαγράμματα 7.1 – 7.3 που προέκυψαν ακολουθούν την γενικευμένη μορφή φυσικής εκθετικής συνάρτησης, σύμφωνα με την σχέση.

$$d_{180} / d_{280} = a \times e^{c \varepsilon}$$

, όπου a και c σταθερές. Η σταθερά a δείχνει την τιμή του λόγου κατάτμησης της αρχικής τροφοδοσίας και εξ' ορισμού ισούται με τη μονάδα. Για το λόγο αυτό τα διαγράμματα που προέκυψαν, θεωρητικά θα ξεκινούν από το ίδιο σημείο και θα διαφοροποιούνται ανάλογα με την τιμή της σταθεράς c . Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της c , τόσο τα αντίστοιχα διαγράμματα θα συμπιέζονται προς τον άξονα y . Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας ε , ο λόγος κατάτμησης θα μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και το c . Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι τιμές της σταθεράς c .

Από τα διαγράμματα 7.1 – 7.3 προκύπτει ότι σε μικρούς χρόνους λειοτρίβησης, άρα συνεπώς και σε χαμηλές ενέργειες κατανάλωσης ε , ο λόγος κατάτμησης των διαφορετικών μεγεθών τροφοδοσίας δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές. Στις δοκιμές αυτολειοτρίβησης $d=0$, ο λόγος κατάτμησης παραμένει σταθερός και ανεξάρτητος του μεγέθους τροφοδοσίας και της ενέργειας που καταναλώνεται.

Στις δοκιμές με χρήση σφαιρών $d=6.5$ mm και σε ειδική ενέργεια $\varepsilon= 1.61$ (kWh/t) ($t=2$ min), ο λόγος κατάτμησης είναι μεγαλύτερος όταν χρησιμοποιείται το πιο λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας (-0.300+0.150 mm, $d_{180}/d_{280}=1.87$) και μικρότερος στο ενδιάμεσο (-1.18+0.600 mm, $d_{180}/d_{280}=1.66$) και στο πιο χονδρό προϊόν (-3.35+1.70 mm, $d_{180}/d_{280}=1.44$).

Από την άλλη, στις δοκιμές με χρήση μεγαλύτερων σφαιρών ($d=12.7$ mm) και σε ειδική ενέργεια $\varepsilon= 1.61$ (kWh/t) ($t=2$ min), ο λόγος κατάτμησης είναι μεγαλύτερος στο ενδιάμεσο προϊόν (-1.18+0.600 mm, $d_{180} / d_{280}=2.48$), ενώ μικρότερος στο πιο χονδρό (-3.35+1.70 mm, $d_{180}/d_{280}=1.68$) και λεπτό προϊόν (-0.300+0.150 mm, $d_{180}/d_{280}=1.56$).

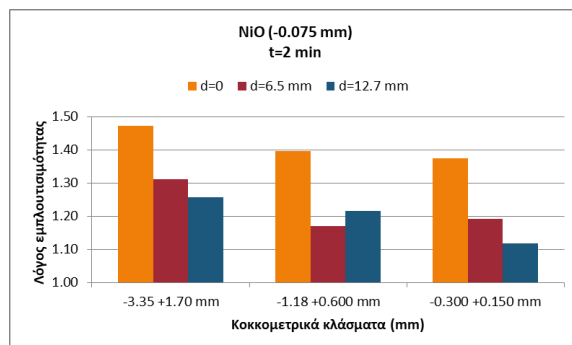
Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος της τροφοδοσίας, τόσο πιο μικρές σφαίρες απαιτούνται για να λειοτριβηθεί πιο αποδοτικά το υλικό και το αντίστροφο. Ενδεχομένως, εάν χρησιμοποιούνταν μεγαλύτερες διαμέτρου σφαίρες από τις $d=12.7\text{ mm}$, θα παρατηρούταν ότι πιο αποδοτικά θα λειοτριβόταν το μεγαλύτερο σε μέγεθος κλάσμα τροφοδοσίας ($-3.35+1.70\text{ mm}$).

Πίνακας 7.1: Τιμές της σταθεράς c για τα τρία κλάσματα τροφοδοσίας

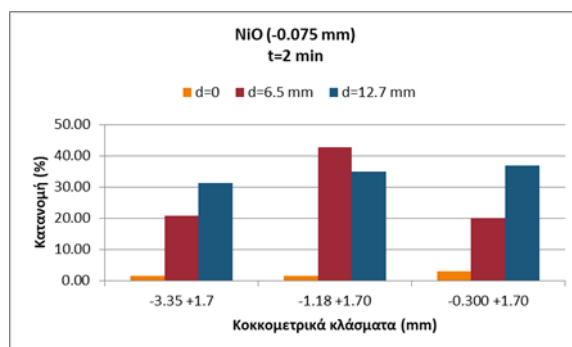
Τροφοδοσία	Διάμετρος σφαιρών		
	$d=0$	$d=6.5\text{ mm}$	$d=12.7\text{ mm}$
$-3.35+1.70\text{ mm}$	0.1	0.02	0.12
$-1.18+0.600\text{ mm}$	0	0.12	0.41
$-0.300+0.150\text{ mm}$	0.01	0.21	0.07

Κεφάλαιο 8: Λόγος Εμπλουτισιμότητας

Ο λόγος εμπλουτισιμότητας (ER, Enrichment Ratio), ορίζεται ως ο λόγος της περιεκτικότητας ενός στοιχείου ή οξειδίου (στην περίπτωση μας το NiO) στο προϊόν προς την περιεκτικότητά του στην αρχική τροφοδοσία. Ο λόγος εμπλουτισιμότητας του NiO υπολογίστηκε για το λεπτό προϊόν -0.075 mm σε χρόνο λειοτριβήσης $t=2\text{ min}$, για κάθε κλάσμα τροφοδοσίας ($-3.35+1.70\text{ mm}$, $-1.17+0.600\text{ mm}$, $-0.300+0.150\text{ mm}$).



Διάγραμμα 8.1: Λόγος εμπλουτισιμότητας των λεπτών προϊόντων (-0.075 mm) των κλασμάτων τροφοδοσίας ($-3.35+1.70\text{ mm}$, $-1.70+0.600\text{ mm}$, $-0.300+0.150\text{ mm}$).



Διάγραμμα 8.2: Κατανομή των λεπτών προϊόντων (-0.075 mm) των κλασμάτων τροφοδοσίας ($-3.35+1.70\text{ mm}$, $-1.70+0.600\text{ mm}$, $-0.300+0.150\text{ mm}$).

Από τα παραπάνω διαγράμματα (8.1 και 8.2) παρατηρείται ότι, παρ' ότι το πιο χονδρό προϊόν ($-3.35+1.70\text{ mm}$) έχει τον μεγαλύτερο λόγο εμπλουτισιμότητας, η κατανομή (%) του είναι πολύ μικρή, ενώ τα δύο πιο λεπτά κλάσματα τροφοδοσίας ($-1.18+0.600\text{ mm}$, $-0.300+0.150\text{ mm}$) έχουν πολύ μεγαλύτερη κατανομή (%) και αξιόλογο λόγο εμπλουτισιμότητας.

Στην αυτολειοτριβήση ($d=0$), ο λόγος εμπλουτισιμότητας NiO του προϊόντος -0.075 mm στο χονδρό κλάσμα τροφοδοσίας ($-3.35+1.70\text{ mm}$, NiO=1.52 %) είναι $ER=1.47$ που αντιστοιχεί σε κατανομή 1.60 %, ενώ για την δοκιμή με χρήση σφαιρών $d=6.5\text{ mm}$ είναι $ER=1.71$ με κατανομή NiO 20.71 %.

Στον ενδιάμεσο κλάσμα τροφοδοσίας (-1.18+0.600 mm, NiO=1.58 %), στην δοκιμή της αυτολειτουργίβησης ($d=0$), ο λόγος εμπλουτισιμότητας του NiO είναι $ER=1.40$ που αντιστοιχεί σε κατανομή 1.66 %, ενώ στην δοκιμή με χρήση διαμέτρου σφαιρών $d= 6.5$ mm, είναι $ER=1.17$ με κατανομή NiO 42.64 %.

Τέλος, στο πιο λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας (-0.300+0.150 mm, NiO=1.62 %), στην δοκιμή της αυτολειτουργίβησης ($d=0$), ο λόγος εμπλουτισιμότητας του NiO είναι $ER=1.37$ που αντιστοιχεί σε κατανομή 3.02 %, ενώ στην δοκιμή με χρήση διαμέτρου σφαιρών $d=6.5$ mm, είναι $ER= 1.19$ και κατανομή NiO 20.01 %.

Η ανώτατη τιμή της κατανομής στο κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm είναι 31.25 % ($d=12.7$ mm, $t=2$ min), όπου ο λόγος εμπλουτισιμότητας είναι $ER=1.26$ %, ενώ η ανώτατη κατανομή στο κλάσμα τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm είναι 42.64 % ($d=6.5$ mm, $t=2$ min) με λόγο εμπλουτισιμότητας $ER=1.17$ %. Ολοκληρώνοντας, η ανώτατη τιμή της κατανομής στο κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm είναι 36.82 % ($d=12.7$ mm, $t=2$ min), που αντιστοιχεί σε λόγο εμπλουτισιμότητας $ER=1.12$ %.

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο εμπλουτισμός νικελίου σε λατερίτη Καστοριάς με τη μέθοδο της εκλεκτικής λειοτρίβησης σε σφαιρόμυλο. Αρχικά, προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια, άρα και ο χρόνος λειοτρίβησης, τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Η αυτολειοτρίβηση από την άλλη δεν οδηγεί σε σημαντική μείωση του μεγέθους του προϊόντος, τουλάχιστον για τους χρόνους που επιλέχθηκαν.

Από τις χημικές αναλύσεις των προϊόντων λειοτρίβησης, προέκυψε ότι και στα τρία κλάσματα τροφοδοσίας (-3.35+1.70 mm, -1.18+0.600 mm, -0.300+0.150 mm), υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η περιεκτικότητα (%) του NiO, για μικρότερους χρόνους λειοτρίβησης και όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Από τις χημικές αναλύσεις του NiO και τις αντίστοιχες κατανομές του στα προϊόντα λειοτρίβησης, φάνηκε ότι η μεγαλύτερη περιεκτικότητα NiO (%) λαμβάνεται στο λεπτό και ενδιάμεσο προϊόν. Παρατηρήθηκε ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η περιεκτικότητα (%) NiO παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ αυξάνεται σημαντικά η κατανομή (%) του. Το μεγαλύτερο μέρος των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η αυτολειοτρίβηση ($d=0$) οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της περιεκτικότητας (%) του NiO στο προϊόν της λειοτρίβησης με πολύ όμως μικρή κατανομή ($<1\%$). Η μεγαλύτερη κατανομή (56.94%) παρατηρήθηκε στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm) της τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm, στη λειοτρίβηση με σφαίρες διαμέτρου $d=6.5$ mm και χρόνο $t=2$ min, με περιεκτικότητα NiO 1.92 % (αύξηση 18.6% σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία). Ικανοποιητική περιεκτικότητα και κατανομή NiO υπάρχει ακόμη στο προϊόν -0.075 mm της τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm, στη δοκιμή με σφαίρες διαμέτρου $d=6.5$ m και χρόνο $t=2$ min, όπου η κατανομή είναι 43.59 % και αντίστοιχα η περιεκτικότητα NiO 1.85 % (αύξηση 17.1%). Επίσης, το λεπτό προϊόν (-0.075 mm) της τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm, για $d=6.5$ mm και $t=2$ min έδωσε περιεκτικότητα NiO 1.81 % (αύξηση 11.7%) που αντιστοιχεί σε κατανομή NiO 37.36 %.

Από την μελέτη του λόγου κατάτμησης προέκυψε ότι σε μικρούς χρόνους λειοτρίβησης, συνεπώς και σε χαμηλές ενέργειες κατανάλωσης, ο λόγος κατάτμησης των διαφορετικών μεγεθών τροφοδοσίας δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές. Στις δοκιμές αυτολειοτρίβησης ($d=0$), ο λόγος κατάτμησης ($\frac{d_{180}}{d_{280}}$) παραμένει σταθερός και ανεξάρτητος του μεγέθους τροφοδοσίας και της ενέργειας που καταναλώνεται. Στις δοκιμές με χρήση σφαιρών $d=6.5$ mm και σε ειδική ενέργεια $\epsilon=1.61$ (kWh/t) ($t=2$ min), ο λόγος κατάτμησης είναι μεγαλύτερος όταν χρησιμοποιείται το πιο λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας (-0.300 +0.150 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.87$) και μικρότερος στο ενδιάμεσο (-1.18 +0.600 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.66$) και στο πιο χονδρό προϊόν (-3.35 +1.70 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.44$). Από την άλλη, στις δοκιμές με χρήση μεγαλύτερων σφαιρών ($d=12.7$ mm) και σε ειδική ενέργεια $\epsilon=1.61$ (kWh/t) ($t=2$ min), ο λόγος κατάτμησης είναι μεγαλύτερος στο ενδιάμεσο κλάσμα (-1.18 +0.600 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=2.48$), ενώ μικρότερος στο πιο χονδρό (-3.35+1.70 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.68$) και λεπτό προϊόν (-0.300+0.150 mm, $\frac{d_{180}}{d_{280}}=1.56$).

Από τη μελέτη του λόγου εμπλουτισμότητας του NiO (ER, Enrichment Ratio) στα προϊόντα των λειοτριβήσεων προέκυψε ότι, ότι στο πιο χονδρό κλάσμα τροφοδοσίας (-3.35+1.70 mm) εμφανίζεται ο μεγαλύτερος λόγος εμπλουτισμότητας (ER=1.31, d=6.5 mm, t=2 min), η κατανομή του είναι 20.71 %. Στα λεπτότερα κλάσματα τροφοδοσίας (-1.18+0.600 mm, -0.300+0.150 mm) παρατηρείται μεγαλύτερη κατανομή (%) NiO (42.64 για d=6.5 mm, t=2 min και 36.82% για d=12.7 mm, t=2 min αντίστοιχα) και αξιόλογος λόγος εμπλουτισμότητας (ER=1.17 και ER=1.12 αντίστοιχα).

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή προτείνονται οι ακόλουθες δοκιμές/συνθήκες για μελλοντική έρευνα:

- Μελέτη εκλεκτικής λειοτρίβησης λατερίτη Καστοριάς κάτω από ένα συγκεκριμένο μέγεθος (π.χ. -4.0 mm) ως αρχική τροφοδοσία στο μύλο.
- Αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης στις δοκιμές αυτολειοτρίβησης (d=0), με στόχο την αύξηση της κατανομής στα πιο λεπτά κλάσματα προϊόντος.
- Χρήση μεγαλύτερης ποσότητας αρχικής τροφοδοσίας, με σκοπό την αύξηση της ποσότητας στα επιμέρους κλάσματα προϊόντος για πιο λεπτομερή μελέτη των αποτελεσμάτων (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 37.0 kg τροφοδοσίας).
- Μελέτη εκλεκτικής λειοτρίβησης με χρήση διαφορετικών μεγεθών σφαιρών σε κάθε δοκιμή, π.χ. αναμιγνύοντας σφαίρες διαμέτρου d=6.5 mm και d=12.7 mm.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Διεθνείς Αναφορές

- Dalvi, Ashok D.; Bacon, W. Gordon; Osborne, Robert C. (2004), *The Past and the Future of Nickel Laterites*, PDAC 2004 International Convention
- Eliopoulos D.G., Economou-Eliopoulos M. (2000), *Geochemical and mineralogical characteristics of Fe–Ni- and bauxitic-laterite deposits of Greece*, Ore Geology Reviews, 16, 41–58
- Gkoutzioupa K., Alevizos G., Stratakis A., Petrakis E., Apostolikas A. (2016), *Quality Characteristics and Washability Treatment of Nickeliferous Iron Ore of Agios Athanasios Deposit (Kastoria, Greece)*, Geomaterials, 6, 39-49
- Maasch, K.A. (1988), *Statistical Detection of the mid-Pleistocene Transition*, Climate Dynamics, Springer Berlin: Heidelberg , Climate Dynamics (1988) 2:133--143
- Quast K., Connor J.N., Skinner W., Robinson D.J., Addai-Mensah J. (2015), Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores, Part 1: Literature Review, Minerals Engineering 79, 261–268.
- Schellmann, W. (2007) ,*An Introduction in Laterite*
- Tardy Y. (1997), *Petrology of Laterites and Tropical Soils*, Rotterdam
- Thurston E. (1913), *The Madras Presidency, With Mysore, Coorg and the Associated States, Provincial Geographies of India*, Cambridge: Cambridge University Press
- Whittington, B.I.; Muir, D. (2000), *Pressure Acid Leaching of Nickel Laterites: A Review*, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Volume 21:527-599
- Yamaguchi Kosei E. (2003–2004), *Iron isotope compositions of Fe-oxide as a measure of water-rock interaction: An example from Precambrian tropical laterite in Botswana*, Frontier Research on Earth Evolution vol. 2
- Chemical properties of nickel, (<https://www.lenntech.com/periodic/elements/ni.htm>, τελευταία πρόσβαση στις 26/06/2018)

Ελληνικές Αναφορές

- Αποστολίκας, Α. (2010): *Κοιτασματολογία Νικελίου*, Καστοριά: Εκδόσεις Εφύρα
- Αποστολίκας Α., Κουντουρέλλης Ι. (2014), *GMMSA LARCO Mineral Resources. Present, future, opportunities Laterite – Nickel Industry*
- Βαζούκης Αμ. (2017), *Συγκριτική μελέτη εμφάνισης σιδηρονικελιούχου μεταλλοφορίας στις περιοχές Αιγάλεω και Νίκαιας Αττικής με τα σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα της περιοχής Αγίου Ιωάννη Θηβών*, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα: Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- Ζευγώλης Μ. Ν. (1989), *Εισαγωγή στην Εξαγωγική Μεταλλουργία*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Καρμάλης Β. (2018), *Εμπλουτισμός Λατεριτών με Εκλεκτική Λειοτρίβηση*, Διπλωματική εργασία, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης

- Νέου-Συγκούνα, Π., *Εξαγωγική Μεταλλουργία: Πυρομεταλλουργικές και Υδρομεταλλουργικές Διεργασίες*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Κομνίτσας Κ. (2010), *Μεταλλουργικές Διεργασίες*, Σημειώσεις του μαθήματος, σελ.11, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- Πετράκης Ε. (2004), *Σχέση ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την λειοτρίβηση ψαθυρών υλικών*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- Πετράκης Ε. (2017), *Μοντελοποίηση της σχέσης ενέργειας - διαστασιακών ιδιοτήτων των προϊόντων κατάτμησης σε σφαιρόμυλο*, Διδακτορική διατριβή, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- Σκλαβούνος Γ. Μ. (1999), *Διερεύνηση της δυνατότητας εμπλουτισμού σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος της περιοχής Ευβοίας*, Διπλωματική εργασία, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- Σταμπολιάδης Η., (1993), *Εμπλουτισμός Μεταλλευμάτων Ι*, Σημειώσεις του μαθήματος, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- Σταμπολιάδης Η., (2008), *Μηχανική των τεμαχιδίων*, Σημειώσεις του μαθήματος, σελ. 66, 68, 88-90, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- Σταμπολτζής Γ. Α., (1994), *Μηχανική προπαρασκευή μεταλλευμάτων βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων (υδροαυτοκαθαρισμός – κατάτμηση – ταξινόμηση)*, Αθήνα: Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Φραγκίσκος Α & Κατράκης Σ. (1979), *Εισαγωγή εις τον Εμπλουτισμόν των Μεταλλευμάτων και Βιομηχανικών Ορυκτών*, Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας
- Φραγκίσκος, Α. Ζ. (1990), *Μελέτη του εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών*, Αθήνα: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
- Σκαρπέλης Ν. (2014), *Κοιτασματολογία Λατερίτη*, (<http://www.orykta.gr/oryktes-protes-yles-tis-ellados/metalleytika-orykta/127-lateritis-sidironikeliouha-metalleymata>, τελευταία πρόσβαση στις 26/06/2018)

Παράρτημα Α

Πίνακας Α1: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm μετά από αυτολειοτρίβηση, d=0.

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2
3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	93.75	94.49	93.28	92.85	6.25	5.51	6.72	7.15
1.18	3.18	2.14	3.64	4.53	3.07	3.37	3.08	2.62
0.850	1.23	0.82	1.44	0.67	1.84	2.55	1.64	1.96
0.600	0.46	0.31	0.41	0.31	1.38	2.24	1.23	1.65
0.425	0.20	0.15	0.21	0.21	1.18	2.09	1.03	1.44
0.300	0.20	0.10	0.26	0.15	0.97	1.99	0.77	1.29
0.212	0.10	0.15	0.10	0.15	0.87	1.84	0.67	1.13
0.150	0.10	0.15	0.10	0.10	0.77	1.68	0.56	1.03
0.075	0.15	0.10	0.15	0.15	0.61	1.58	0.41	0.87
-0.075	0.61	1.58	0.41	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας Α2: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm με χρήση σφαιρών, d=6.5.

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2
3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	83.46	78.43	72.01	65.76	16.54	21.57	27.99	34.24
1.180	7.66	9.24	10.59	11.20	8.87	12.33	17.39	23.03
0.850	1.89	2.22	2.60	2.50	6.98	10.11	14.80	20.53
0.600	1.15	1.19	1.45	1.46	5.83	8.93	13.34	19.07
0.425	0.68	0.77	0.83	0.73	5.14	8.15	12.51	18.34
0.300	0.47	0.62	0.57	0.52	4.67	7.53	11.94	17.82
0.212	0.26	0.52	0.57	0.42	4.41	7.02	11.37	17.40
0.150	0.42	0.62	0.62	0.31	3.99	6.40	10.75	17.09
0.075	0.63	0.88	1.19	1.04	3.36	5.52	9.55	16.05
-0.075	3.36	5.52	9.55	16.05	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας A3: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm με χρήση σφαιρών, d=12.7.

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2
3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	68.77	56.00	42.57	27.69	31.23	44.00	57.43	72.31
1.180	12.71	13.84	13.25	10.17	18.53	30.15	44.18	62.14
0.850	4.50	5.72	6.03	5.24	14.03	24.44	38.15	56.90
0.600	3.23	4.35	4.89	4.82	10.80	20.08	33.26	52.07
0.425	2.22	3.20	3.85	4.04	8.58	16.89	29.42	48.03
0.300	1.64	2.67	3.59	4.04	6.93	14.21	25.83	44.00
0.212	1.27	2.10	3.22	4.09	5.66	12.11	22.61	39.91
0.150	1.27	2.15	3.64	5.30	4.39	9.96	18.97	34.61
0.075	0.53	2.88	5.35	9.18	3.86	7.08	13.62	25.43
-0.075	3.86	7.08	13.62	25.43	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας A4: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm

	d=0		d=6.5 mm		d=12.7 mm	
Χρόνος	Ειδική ενέργεια	D80	Ειδική ενέργεια	D80	Ειδική ενέργεια	D80
Min	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)
0.00	0.0	3.2	0.0	3.2	0.0	3.2
0.25	0.02	2.3	0.2	2.3	0.2	2.2
0.50	0.05	2.3	0.4	2.3	0.4	2.2
1.00	0.09	2.3	0.8	2.2	0.8	2.1
2.00	0.18	2.3	1.6	2.2	2.8	1.9

Παράρτημα Β

Πίνακας Β1: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm μετά από αυτολειοτρίβηση, d=0.

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2
1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	96.20	95.86	96.37	96.82	3.80	4.14	3.63	3.18
0.425	2.62	2.61	2.64	2.31	1.18	1.53	0.98	0.87
0.300	0.36	0.36	0.26	0.21	0.82	1.18	0.73	0.67
0.212	0.10	0.10	0.16	0.15	0.72	1.07	0.57	0.51
0.150	0.21	0.20	0.10	0.05	0.51	0.87	0.47	0.46
0.075	0.21	0.20	0.21	0.21	0.31	0.66	0.26	0.26
-0.075	0.31	0.66	0.26	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας Β2: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm με χρήση σφαιρών, d=6.5 mm.

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2
1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	68.55	57.39	43.42	28.38	31.45	42.61	56.58	71.62
0.425	10.80	11.83	11.74	9.95	20.65	30.77	44.83	61.68
0.300	5.29	6.69	7.10	6.86	15.36	24.08	37.73	54.82
0.212	2.99	4.20	4.65	4.50	12.37	19.88	33.09	50.31
0.150	2.41	3.58	4.54	4.55	9.96	16.29	28.55	45.76
0.075	2.67	4.77	6.94	8.53	7.29	11.52	21.61	37.23
-0.075	7.29	11.52	21.61	37.23	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας Β3: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm με χρήση σφαιρών, d=12.7 mm.

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2	t=0.25	t=0.5	t=1	t=2
1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	69.44	52.71	30.71	11.49	30.56	47.29	69.29	88.51
0.425	10.55	14.62	15.56	10.28	20.01	32.67	53.72	78.23
0.300	5.30	9.00	12.18	12.12	14.71	23.67	41.54	66.11
0.212	3.17	5.42	8.38	10.97	11.54	18.25	33.16	55.14
0.150	2.55	4.26	7.18	11.18	8.99	13.99	25.98	43.97
0.075	2.65	4.79	8.33	14.64	6.34	9.21	17.65	29.33
-0.075	6.34	9.21	17.65	29.33	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας Β4: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας -1.18+0.600 mm.

Χρόνος	d=0		d=6.5 mm		d=12.7 mm	
	Ειδική ενέργεια	D80	Ειδική ενέργεια	D80	Ειδική ενέργεια	D80
Min	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)
0.00	0.0	1.1	0.0	1.1	0.0	1.1
0.25	0.02	0.8	0.2	0.8	0.2	0.8
0.50	0.05	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
1.00	0.09	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7
2.00	0.18	0.8	1.6	0.7	2.8	0.5

Παράρτημα Γ

Πίνακας Γ1: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300+0.150 mm μετά από αυτολειοτρίβηση, d=0.

Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. Διερχ. Βάρος %		
	t=0.5	t=1	t=2	t=0.5	t=1	t=2
0.300	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.150	95.26	95.46	94.64	4.74	4.54	5.36
0.075	2.73	2.89	3.14	2.01	1.65	2.22
-0.075	2.01	1.65	2.22	0.00	0.00	0.00

Πίνακας Γ2: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300+0.150 mm με χρήση σφαιρών, d=6.5.

Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. Διερχ. Βάρος %		
	t=0.5	t=1	t=2	t=0.5	t=1	t=2
0.300	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.150	63.36	44.96	20.97	36.64	55.04	79.03
0.075	18.64	25.67	31.22	18.01	29.38	47.80
-0.075	18.01	29.38	47.80	0.00	0.00	0.00

Πίνακας Γ3: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300+0.150 mm με χρήση σφαιρών, d=12.7.

Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. Διερχ. Βάρος %		
	t=0.5	t=1	t=2	t=0.5	t=1	t=2
0.300	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.150	72.80	69.69	41.04	27.20	30.31	58.96
0.075	12.65	12.11	25.56	14.55	18.21	33.40
-0.075	14.55	18.21	33.40	0.00	0.00	0.00

Πίνακας Γ4: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας -0.300+0.150 mm.

Χρόνος	Ειδική ενέργεια	D80	Ειδική ενέργεια	D80	Ειδική ενέργεια	D80
Min	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)
0.00	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.3
0.50	0.05	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2
1.00	0.09	0.2	0.8	0.2	0.8	0.2
2.00	0.18	0.2	1.6	0.2	1.6	0.2

