



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ
ΠΟΡΩΝ

ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΛΑΤΕΡΙΤΩΝ ΜΕ ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Καρμάλη Βασιλική

Εξεταστική Επιτροπή:

Κομνίτσας Κων/νος, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Αλεβίζος Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Δρ. Πετράκης Ευάγγελος, ΕΔΙΠ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κ. Κομνίτσα. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκλεκτική λειοτρίβηση λατερίτη της περιοχής Εύβοιας σε σφαιρόμυλο. Η εκλεκτική λειοτρίβηση επιλέχθηκε γιατί εκμεταλλεύεται τη διαφορετική συμπεριφορά κατά τη λειοτρίβηση μεταξύ των μαλακών και σκληρών ορυκτών με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του νικελίου. Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος είναι ότι το νικέλιο αποτελεί ένα ιδιαίτερος σημαντικό μέταλλο. Επίσης, για την Ελλάδα η βιομηχανία νικελίου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς της.

Αρχικά, με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Κομνίτσα Κωνσταντίνο για την εμπιστοσύνη και την ανάθεση της παρούσας εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Γεώργιο Αλεβίζο και το Δρ. Ευάγγελο Πετράκη, μέλη της τριμελούς επιτροπής, για την αποδοχή τους να αξιολογήσουν την παρούσα εργασία.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Πετράκη Ευάγγελο κυρίως για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, την πολύτιμη βοήθειά του σε όλα τα στάδια καθώς και την κατανόησή του και την άριστη συνεργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Αντώνη Στρατάκη και τη Μηχανικό Ορυκτών Πόρων κα. Πάολα Ροτόντο για την πολύτιμη βοήθειά τους στις αναλύσεις XRD και XRF, αντίστοιχα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε και με στηρίζει πάντα καθώς και τους φίλους μου που είναι πάντοτε δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η εκλεκτική λειοτρίβηση λατερίτη της περιοχής Εύβοιας σε σφαιρόμυλο με σκοπό τον εμπλουτισμό του σε νικέλιο. Παρά τη μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα που έχει αναπτυχθεί με σκοπό την ανάκτηση του νικελίου, ακόμα και σήμερα αποτελεί μεγάλη πρόκληση η εύρεση αποδοτικότερων μεθόδων εμπλουτισμού. Αυτό συμβαίνει διότι α) ο λατερίτης αποτελεί ένα ετερογενές υλικό με πολύπλοκη χημική και ορυκτολογική σύσταση και β) το νικέλιο δεν αποτελεί ξεχωριστή ορυκτολογική φάση αλλά ενδομείται στο πλέγμα πολλών 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 μέθοδο εμπλουτισμού του νικελίου.

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λειοτρίβησης σε διαφορετικές συνθήκες με τη χρήση εργαστηριακού σφαιρόμυλου. Αρχικά, προετοιμάστηκαν 3 κοκκομετρικά κλάσματα ($-3.35+1.70$ mm, $-1.18+0.600$ mm και $-0.300+0.150$ mm) τα οποία αποτέλεσαν τις αρχικές τροφοδοσίες του μύλου. Λόγω του εύθρυπτου συνδετικού υλικού επιλέχθηκαν ήπιες συνθήκες λειοτρίβησης, δηλαδή μικροί χρόνοι λειοτρίβησης και σφαίρες μικρής διαμέτρου. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν 3 σειρές δοκιμών λειοτρίβησης, όπου η παράμετρος η οποία μεταβαλλόταν ήταν το μέγεθος των σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm). Κάθε μια από τις δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκε για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (0.25 min, 0.5 min, 1 min και 2 min), που αντιστοιχούσαν σε διαφορετικές ειδικές ενέργειες κατανάλωσης.

Από τα διαγράμματα του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος και για κάθε μέγεθος σφαίρας προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Αντίθετα, η αυτολειοτρίβηση ($d=0$) πρακτικά δεν οδηγεί σε μείωση του μεγέθους του προϊόντος, τουλάχιστον για τους συγκεκριμένους χρόνους που επιλέχθηκαν. Επίσης, από τα διαγράμματα αυτά και με βάση το μέγεθος από το οποίο διέρχεται το 80% του υλικού (d_{80}) προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια τόσο μειώνεται και το μέγεθος d_{80} του προϊόντος. Στα χονδρότερα κλάσματα τροφοδοσίας η μεγαλύτερη διάμετρο σφαιρών 12.7 mm οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν, ενώ στα λεπτότερα κλάσματα η χρήση μικρότερης διαμέτρου σφαιρών 6.5 mm λειοτριβεί το υλικό πιο αποδοτικά.

Όσον αφορά τις χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του XRF και του XRD, αντίστοιχα. Για κάθε μέγεθος τροφοδοσίας δημιουργήθηκαν διαγράμματα περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) του NiO σε σχέση με τα 3 κοκκομετρικά κλάσματα προϊόντος, το χονδρό το οποίο αποτελεί την τάξη μεγέθους της τροφοδοσίας, το λεπτό που αποτελεί το κλάσμα -0.075 mm και το ενδιάμεσο το οποίο περιλαμβάνει τα κλάσματα μεταξύ του χονδρού και λεπτού κλάσματος. Από τα διαγράμματα αυτά, προέκυψε ότι κυρίως η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του NiO εμφανίζεται στο λεπτό προϊόν -0.075 mm . Σε αυτό το κλάσμα όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης μειώνεται ελάχιστα η περιεκτικότητα (%) του NiO, ενώ αντίθετα αυξάνεται σημαντικά η κατανομή (%) του. Η τάση αυτή παρατηρήθηκε για όλα τα μεγέθη τροφοδοσίας και τις διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5\text{ mm}$ και $d=12.7\text{ mm}$) που επιλέχθηκαν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για όλες τις αρχικές τροφοδοσίες που επιλέχθηκαν η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) NiO παρατηρείται στο μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης (0.25 min) και για αυτολειοτρίβηση ($d=0$) με μικρή όμως κατανομή. Ειδικότερα, για αυτές τις συνθήκες λειοτρίβησης, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) NiO παρατηρήθηκε στο λεπτό προϊόν -0.075 mm της τροφοδοσίας $-1.18+0.600\text{ mm}$ και η τιμή της έφτασε το 1.60% από 0.81% της αρχικής τροφοδοσίας (αύξηση 97.53%) που αντιστοιχεί σε κατανομή 3.80% . Η μεγαλύτερη κατανομή (%) NiO παρατηρήθηκε στην ίδια τροφοδοσία και για τις ίδιες συνθήκες λειοτρίβησης στο χονδρό προϊόν ($+0.600\text{ mm}$) με την τιμή της να φτάνει το 94.3% που αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα 0.81% και είναι ίση με εκείνη της αρχικής τροφοδοσίας ($-1.18+0.600\text{ mm}$). Ακόμα, από τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων προέκυψε ότι τα χονδρά κλάσματα του προϊόντος είναι πλούσια σε χαλαζία (SiO_2), τα ενδιάμεσα σε χρωμίτη ($\text{Cr}_2\text{O}_3\cdot\text{NiO}$), ενώ τα πιο λεπτά κλάσματα σε νιμίτη $(\text{Ni,Mg,Fe,Al})_6\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ για όλα τα μεγέθη τροφοδοσίας.

Επίσης, από τη μελέτη του ρυθμού θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας προέκυψε ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος της τροφοδοσίας τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του, μέχρι όμως ένα συγκεκριμένο μέγεθος πέρα από το οποίο μειώνεται σημαντικά. Το βέλτιστο μέγεθος (x_m) υπολογίστηκε στα 1.53 mm , το οποίο αντιστοιχεί σε μέγιστο ρυθμό θραύσης (S_m) με τιμή 0.56 min^{-1} .

Ακόμα, μελετήθηκε ο ρυθμός θραύσης επιλεγμένων οξειδίων και ορυκτολογικών φάσεων στις διαφορετικές συνθήκες λειοτρίβησης και συγκρίθηκε με το ρυθμό θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας. Η μελέτη έγινε σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους λειοτρίβησης ($0-0.25$, $0.25-0.5$, $0.5-1$ και $1-2\text{ min}$). Γενικά, τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει διαφοροποίηση ως προς το ρυθμό θραύσης μεταξύ των κλασμάτων τροφοδοσίας, των οξειδίων και ορυκτολογικών φάσεων και μάλιστα η διαφοροποίηση αυτή εξαρτάται από τη χρονική περίοδο που διεξήχθη η δοκιμή λειοτρίβησης. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση του ρυθμού θραύσης μεταξύ των οξειδίων και των προϊόντων των κοκκομετρικών κλασμάτων εμφανίστηκε στο μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης ($t=0.25$ min) και με χρήση της μεγαλύτερης διαμέτρου σφαιρών 12.7 mm, για τα χονδρότερα και τα ενδιάμεσα κλάσματα προϊόντων. Στο λεπτό κλάσμα -0.075 mm, η μεγαλύτερη διαφοροποίηση εμφανίστηκε, επίσης, στο μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης ($t=0.25$ min) και με χρήση της διαμέτρου σφαιρών 6.5 mm. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του NiO (1.195 min^{-1}), για τις διαφορετικές συνθήκες λειοτρίβησης που εφαρμόστηκαν, παρατηρήθηκε στο λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας ($-0.300+0.600$ mm) και για διάμετρο σφαιρών 6.5 mm.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΝΙΚΕΛΙΟ	8
2.1 Εφαρμογές – Χρήσεις Νικελίου	8
2.2 Ελληνική και Παγκόσμια Βιομηχανία Νικελίου	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΛΑΤΕΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ	10
3.1 Προέλευση Νικελίου.....	10
3.2 Γένεση λατεριτικών κοιτασμάτων	10
3.3 Νικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα	11
3.4 Σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα	11
3.4.1 Κατηγορίες σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΛΑΤΕΡΙΤΗ	13
4.1 Γεωλογία περιοχής δείγματος	13
4.2 Κοκκομετρική ανάλυση λατερίτη	14
4.3 Χημική και Ορυκτολογική Ανάλυση αρχικού δείγματος.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ.....	19
5.1 Μέθοδοι Εμπλουτισμού.....	19
5.2 Μεταλλουργικές μέθοδοι εξαγωγής νικελίου από λατερίτες.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	24
6.1 Κατάτμηση	24
6.2 Μηχανές Κατάτμησης	25
6.3 Παράμετροι Λειοτρίβησης	27
6.4 Μαθηματικά μοντέλα κατάτμησης	30
6.4.1 Ειδικός Ρυθμός Θραύσης (Specific rate of breakage)	30
6.4.2 Μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού (PBM)	33
6.4.3 Συνάρτηση θραύσης (Breakage function).....	34
6.5 Επίδραση μεγέθους Σφαίρας (Effect of ball size).....	35
6.5.1 Ειδικός ρυθμός θραύσης σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών	37
6.6 Πειραματική Μεθοδολογία	40
6.6.1 Θραύση	40
6.6.2 Λειοτρίβηση.....	41
6.6.3 Κοσκίνιση	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	45
7.1 Τροφοδοσία – 3.35 + 1.70 mm.....	45
7.1.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και της διαμέτρου σφαιρών	45

7.1.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}	47
7.1.3 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του χρόνου λειοτριβήσης	47
7.1.4 Χημική ανάλυση προϊόντων	49
7.1.5 Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων	59
7.2 Τροφοδοσία – 1.18 + 0.600 mm.....	61
7.2.1 Επίδραση του χρόνου λειοτριβήσης και της διαμέτρου σφαιρών	61
7.2.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}	63
7.2.3 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του χρόνου λειοτριβήσης	64
7.2.4 Χημική ανάλυση προϊόντων	65
7.2.5 Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων	76
7.3 Τροφοδοσία – 0.300 + 0.150 mm.....	78
7.3.1 Επίδραση του χρόνου λειοτριβήσης και της διαμέτρου σφαιρών	78
7.3.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}	80
7.3.3 Ρυθμός θραύσης τροφοδοσίας συναρτήσει του χρόνου.....	80
7.3.4 Χημική ανάλυση προϊόντων	81
7.3.5 Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων	92
7.4 Επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών στην περιεκτικότητα του NiO	94
7.5 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας.....	95
7.6 Ρυθμός θραύσης οξειδίων και ορυκτολογικών φάσεων συναρτήσει του χρόνου λειοτριβήσης.....	97
7.6.1 Τροφοδοσία – 3.35 + 1.70 mm	97
7.6.2 Τροφοδοσία – 1.18 + 0.600 mm	103
7.6.3 Τροφοδοσία – 0.300 + 0.150 mm	108
7.7 Επίδραση του μεγέθους τροφοδοσίας και της διαμέτρου σφαιρών στο ρυθμό θραύσης...	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	117
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	119
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	128
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	133
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξημένη ζήτηση για νικέλιο σε παγκόσμιο επίπεδο οδήγησε στην ανάγκη εκμετάλλευσης κοιτασμάτων χαμηλής περιεκτικότητας, με πολύπλοκη ορυκτολογική σύσταση, όπως οι λατερίτες. Η ποικιλία των ορυκτολογικών φάσεων αλλά και το γεγονός ότι δεν υπάρχει κάποιο διακριτό ορυκτό μέσα στο λατερίτη που να περιέχει νικέλιο αποτελεί μεγάλη πρόκληση ως προς την ανάκτησή του με τις συμβατικές φυσικές ή φυσικοχημικές μεθόδους εμπλουτισμού. Η διαδικασία του εμπλουτισμού περιλαμβάνει αρκετές μεθόδους όπως είναι η εκλεκτική λειοτρίβηση, η επίπλευση, ο μαγνητικός διαχωρισμός, η εκλεκτική μείωση που ακολουθείται από μαγνητικό διαχωρισμό κ.α. Ο εμπλουτισμός του Ni εξαρτάται κυρίως από την ορυκτολογία του λατερίτη (Agatzini-Leonardou et al., 2004; Zhu et al., 2012; Tong et al., 2012). Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί αρκετές ερευνητικές προσπάθειες όσον αφορά τον εμπλουτισμό των λατεριτών σε νικέλιο. Για παράδειγμα, οι Agatzini-Leonardou et al. (2004) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο του μαγνητικού διαχωρισμού με σκοπό τον προ-εμπλουτισμό ενός λατερίτη της περιοχής Καστοριάς σε νικέλιο. Από την άλλη, οι Tong et al. (2013) μελέτησαν την επίδραση της εκλεκτικής λειοτρίβησης για τον εμπλουτισμό Ni εξετάζοντας το χρόνο λειοτρίβησης, το μέγεθος τροφοδοσίας και το μέγεθος του προϊόντος.

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια εμπλουτισμού του *λατερίτη της περιοχής Εύβοιας (LE)* σε νικέλιο μέσω εκλεκτικής λειοτρίβησης. Το υλικό χωρίστηκε σε τρία κοκκομετρικά κλάσματα τροφοδοσίας ($-3.35 \text{ } 1.70 \text{ mm}$, $-1.18+0.600 \text{ mm}$ και $-0.300+0.150 \text{ mm}$), στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές λειοτρίβησης. Γενικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εκλεκτική λειοτρίβηση εκμεταλλεύεται τη διαφορετική συμπεριφορά κατά τη λειοτρίβηση μεταξύ των μαλακών και σκληρών ορυκτών που περιέχει ο λατερίτης. Το τελευταίο έχει ως συνέπεια τα μεγέθη των τεμαχιδίων των διαφορετικών ορυκτών να διαφοροποιούνται στο τελικό προϊόν, δηλαδή τα πιο μαλακά ορυκτά θα παράγουν περισσότερα λεπτομερή και θα εμπλουτίζονται στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα, ενώ τα σκληρότερα ορυκτά θα συγκεντρώνονται κυρίως στα μεγαλύτερα κλάσματα.

Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η διαδικασία λειοτρίβησης αποτελεί μια εξαιρετικά ενεργοβόρα διεργασία. Για το λόγο αυτό, εκτός από τη μελέτη εμπλουτισμού του λατερίτη σε νικέλιο μέσω εκλεκτικής λειοτρίβησης απαραίτητο

ήταν να μελετηθούν και οι παράγοντες που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της λειοτρίβησης.

Αρχικά, μελετάται η ενέργεια η οποία καταναλώνεται για τη λειοτρίβηση του υλικού σε συνάρτηση με το μέγεθος του προϊόντος καθώς και ο ρυθμός θραύσης του υλικού, εφαρμόζοντας το κινητικό μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού (Austin et al., 1984). Οι παράγοντες οι οποίοι εξετάζονται είναι το μέγεθος της αρχικής τροφοδοσίας καθώς και το μέγεθος των σφαιρών που χρησιμοποιούνται στο σφαιρόμυλο.

Επίσης, μελετήθηκε ο χρόνος λειοτρίβησης, η χρήση ή μη σφαιρών και ο ρυθμός θραύσης σε σχέση με τις διάφορες ορυκτολογικές φάσεις και τα οξείδια. Ο ρυθμός θραύσης των ορυκτολογικών φάσεων και οξειδίων δείχνει το ρυθμό με τον οποίο η ποσότητα του εκάστοτε ορυκτού ή οξειδίου μεταβαίνει σε μικρότερες τάξεις μεγέθους από εκείνη της αρχικής τροφοδοσίας. Εάν ο ρυθμός θραύσης τους είναι μεγαλύτερος από εκείνον του κλάσματος τροφοδοσίας τότε έχουμε εκλεκτικότητα στην λειοτρίβηση. Λόγω της φύσης του υλικού επιλέχθηκαν μικροί χρόνοι λειοτρίβησης (0.25 min, 0.5 min, 1 min και 2 min) καθώς και σφαίρες μικρής διαμέτρου ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm). Σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μεγάλοι χρόνοι λειοτρίβησης και σφαίρες μεγάλης διαμέτρου χάνεται η εκλεκτικότητα κι έτσι λειοτριβούνται μαζί με τα μαλακά και πιο σκληρά ορυκτά.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν ορυκτολογικές αναλύσεις με περιθλασιμετρία ακτίνων – X (XRD), καθώς επίσης και μικροσκοπική εξέταση των ορυκτολογικών φάσεων με χρήση του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου. Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της μεθόδου φασματομετρίας ακτίνων – X (XRF).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΝΙΚΕΛΙΟ

Το Νικέλιο αποτελεί ένα ιδιαίτερος σημαντικό εμπορικό μέταλλο. Η ανάκτησή του από τους λατερίτες αποτελεί αντικείμενο μελέτης για πολλούς ερευνητές λόγω της πολύπλοκης ορυκτολογικής σύστασης των κοιτασμάτων που προέρχεται. Οι πρώτες ύλες από τις οποίες προέρχεται είναι ο λατερίτης (σιδηρονικελιούχο κοίτασμα).

2.1 Εφαρμογές – Χρήσεις Νικελίου

Η κυριότερη χρήση του νικελίου είναι για την παρασκευή κραμάτων. Τα κράματα του νικελίου χαρακτηρίζονται από αντοχή, ολκιμότητα και αντίσταση στη διάβρωση και τη θερμότητα. Περίπου το 65% του νικελίου που καταναλώνεται στο δυτικό κόσμο χρησιμοποιείται για την παρασκευή ανοξείδωτου χάλυβα, του οποίου η σύσταση μπορεί να διαφέρει, αλλά συνήθως είναι σίδηρος με περίπου 18% χρώμιο και 8% νικέλιο. Το 12% του συνολικού καταναλισκόμενου νικελίου χρησιμοποιείται στα υπέρ – κράματα. Το υπόλοιπο 23% της κατανάλωσης νικελίου αφορά κράματα χάλυβα, επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, καταλύτες, χημική βιομηχανία, νομισματοκοπία, προϊόντα χυτηρίου κ.α.

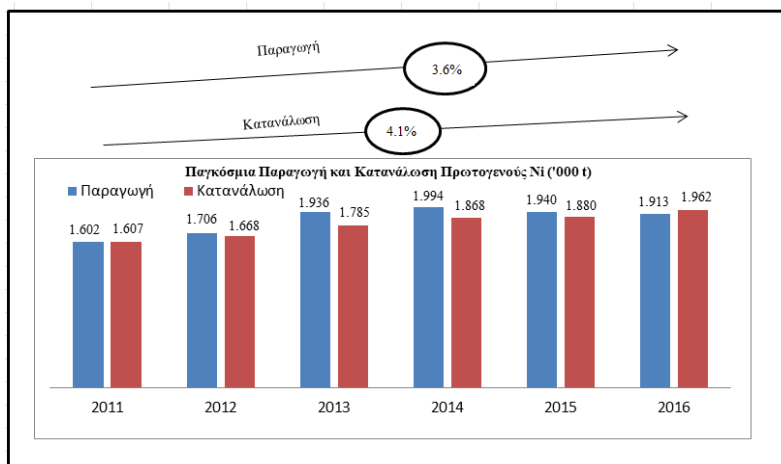
Σημαντικές φυσικές ιδιότητες είναι η μαγνητική συμπεριφορά και η αντοχή του σε μεγάλες πιέσεις. Επίσης, σε θερμοκρασίες δωματίου έχει ιδιότητες όμοιες με αυτές του χάλυβα, είναι ελατό και όλκιμο και ανθεκτικό στη διάβρωση από τα αλκάλια (www.lenntech.com).

2.2 Ελληνική και Παγκόσμια Βιομηχανία Νικελίου

Το νικέλιο είναι ένα από τα σημαντικότερα μεταλλουργικά προϊόντα της Ελλάδας. Στην Ελλάδα, η ‘Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ’ είναι από τις μεγαλύτερες παραγωγούς σιδηρονικελίου στην Ευρώπη καθώς εκμεταλλεύεται, εξορρύσει, παράγει κι εμπορεύεται το προϊόν της.

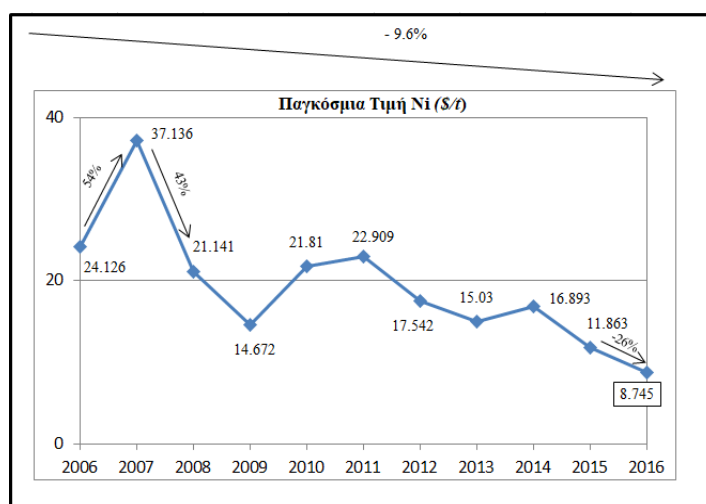
Όσον αφορά την παγκόσμια βιομηχανία, οι κυριότερες χώρες παραγωγής νικελίου είναι η Νέα Καληδονία, ο Καναδάς, η Αυστραλία, η Ρωσία, η Βραζιλία, η Κίνα, η Κολομβία, η Κούβα, η Ελλάδα και η Ν. Αφρική. Αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντικές μονάδες εμπλουτισμού νικελίου λειτουργούν στη Νορβηγία, Φινλανδία, Γαλλία, Ιαπωνία και στο Ηνωμένο Βασίλειο (www.nickelinstitute.org).

Αναλυτικότερα, στις παρακάτω Εικόνες 2.1 και 2.2 παρουσιάζεται η παγκόσμια παραγωγή και κατανάλωση Ni καθώς και η μέση τιμή του.



Εικόνα 2.1: Παγκόσμια παραγωγή και κατανάλωση Ni για την περίοδο 2011 – 2016 (Πηγή: www.insg.org, Τροποποιημένη).

Στην Εικόνα 2.1 παρατηρείται ότι για τη χρονική περίοδο 2011 – 2016 η παραγωγή και η κατανάλωση Ni είχαν ανοδική πορεία.



Εικόνα 2.2: Παγκόσμια μέση τιμή Ni για την περίοδο 2006 – 2016 (Πηγή: www.indexmundi.com, Τροποποιημένη).

Στην Εικόνα 2.2 παρατηρείται μια γενική μείωση στη τιμή του Ni. Γενικά, η μέση τιμή του την περίοδο 2006 – 2016 είναι 8.700 \$/t . Η μέση μείωση της τιμής του την ίδια περίοδο είναι 9.6%.

Τέλος, η σημερινή τιμή του (13/02/2018) είναι 13,105 USD/t. (<http://gr.worldscrap.com/price/lme.php?lang=gr&type=1>).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΛΑΤΕΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Τα λατεριτικά κοιτάσματα είναι πλούσια σε σίδηρο (Fe) και αργίλιο (Al). Τα κοιτάσματα αυτά είναι προϊόντα λατεριτίωσης υπερβασικών πετρωμάτων σε συνθήκες τροπικού – υποτροπικού κλίματος και αποτελούνται κατά κύριο λόγο από οξειδία. Τα λατεριτικά εδάφη των εύκρατων κλιμάτων είναι πλούσια σε πυριτικές ενώσεις (Σταμπολιάδης, 2001).

3.1 Προέλευση Νικελίου

Οι τύποι κοιτασμάτων από τους οποίους προέρχεται το νικέλιο (Ni) είναι οι εξής δύο:

1. Οι λατερίτες, οι οποίοι συνεισφέρουν κατά 60% στην παγκόσμια παραγωγή νικελίου. Συγκεκριμένα, οι σημαντικότερες χώρες παραγωγής νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα είναι η Ρωσία, η Ελλάδα, η Αυστραλία, η Νέα Καληδονία και η Κούβα.
2. Τα θειούχα κοιτάσματα, τα οποία προσφέρουν το υπόλοιπο 40% στην παγκόσμια παραγωγή. Η σύσταση των θειούχων κοιτασμάτων περιλαμβάνει πυροτίνη (Fe_{1-x}S), πετλανδίτη $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$, χαλκοπυρίτη (CuFeS_2) και μαγνητίτη (Fe_3O_4). Ο πετλανδίτης είναι το κύριο ορυκτό του νικελίου. Οι κυριότερες χώρες παραγωγής νικελίου από θειούχα κοιτάσματα είναι ο Καναδάς, η Ρωσία, η Ν. Αφρική, η Κίνα και οι Η.Π.Α. (Σταθογιάννη, 2007).

3.2 Γένεση λατεριτικών κοιτασμάτων

Οι λατερίτες είναι πετρώματα που σχηματίζονται από χημική αποσάθρωση υπερβασικών, βασικών ή/και όξινων πετρωμάτων σε τροπικά ή υποτροπικά περιβάλλοντα (Χρηστίδης, 2002).

Τα λατεριτικά κοιτάσματα κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι τα νικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα, τα σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα και οι βωξίτες.

3.3 Νικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα

Τα νικελιούχα κοιτάσματα συνδέονται γενικά με πλούσια σε σίδηρο και μαγνήσιο μαγματικά πετρώματα. Τα μεταλλεύματα απαντούν είτε ως σουλφίδια, είτε ως λατερίτες. Το νικέλιο παράγεται από την εκχύλιση του ολιβίνη, του σερπεντίνη ή του νικελιούχου μαγνητίτη.

Οι νικελιούχοι λατερίτες από την λατεριτική αποσάθρωση διακρίνονται σε δύο ζώνες μεταλλευμάτων:

- Την ανώτερη ζώνη που είναι πλούσια σε οξείδια και υδροξείδια σιδήρου (λειμονιτική ζώνη). Η ζώνη αυτή περιέχει ένυδρα ή μη οξείδια του σιδήρου (γκαιτίτης, αιματίτης) κι ένυδρα οξείδια του αλουμινίου. Επίσης, υπάρχουν καολινίτες, χρωμίτες κι ένυδρα οξείδια μαγγανίου. Το νικέλιο βρίσκεται στο πλέγμα του γκαϊτίτη ή σε άμορφα υδροξείδια του σιδήρου.
- Την κατώτερη ζώνη που είναι εμπλουτισμένη σε οξείδια μαγνησίου και πυριτίου και είναι φτωχή σε σίδηρο (σαπρολιθική ζώνη). Η ζώνη αυτή περιέχει κυρίως νικελιούχα πυριτικά ορυκτά (σερπεντίνη, τάλκη, χλωρίτη κ.α). Το νικέλιο βρίσκεται συνήθως σε αυτή την ζώνη (Αρβανιτάκη, 2015).

3.4 Σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα

Τα ελληνικά σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα προήλθαν από λατεριτίωση υπερβασικών πετρωμάτων του Μεσοζωικού. Χαρακτηρίζονται ως ‘απολιθωμένα’ και καλύπτονται από ασβεστολίθους Α. Κρητιδικού (Κενομάνιο – Σενώνιο) ή ιζήματα Μειόκαινου. Μεγάλα κέντρα εκμετάλλευσης αποτελούν η Κεντρική Εύβοια, η Βοιωτία, η Λοκρίδα καθώς και η Καστοριά με περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος την Κοζάνη, τα Γρεβενά, τη Σκύρο, την Έδεσσα, την Πάρνηθα και τη Μυτιλήνη. Συνολικά απαντώνται πάνω από 110 εμφανίσεις κοιτασμάτων νικελίου στον ελλαδικό χώρο με περιεκτικότητα σε νικέλιο από 0.4 έως 1.2% και σε σίδηρο από 20 έως 79%. Επίσης, τα συνολικά αποθέματα ξεπερνούν τους 500 Mt, από τα οποία οι 200 Mt περίπου είναι εκμεταλλεύσιμοι. (www.geo.auth.gr).

3.4.1 Κατηγορίες σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων

Τα σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα της Ελλάδας διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους στις εξής κατηγορίες:

- Αυτόχθονα κοιτάσματα: κοιτάσματα τα οποία σχηματίστηκαν από χημική αποσάθρωση υπερβασικών πετρωμάτων (οφιόλιθων), κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Δηλαδή, είναι τα κοιτάσματα που δεν έχουν μετακινηθεί ή μετακινήθηκαν ελάχιστα από το μητρικό πέτρωμα (οφιόλιθος) πάνω στο οποίο έλαβε χώρα ο σχηματισμός του σιδηρονικελιούχου κοιτάσματος, μέσω της λατεριτικής αποσάθρωσης. Κοιτάσματα τέτοιου τύπου είναι αυτά που απαντούν στην περιοχή της Τσούκας Λοκρίδας και Καστοριάς.
- Αλλόχθονα ή δευτερογενή κοιτάσματα: οι ιζηματογενείς (μεταφερμένοι) λατερίτες, που έχουν διαβρωθεί και το υλικό τους μεταφέρθηκε από το μητρικό πέτρωμα κατά την περίοδο της άνω κρητιδικής επίκλησης με τη βοήθεια της βαρύτητας ή του νερού κι αποτέθηκε εκ νέου σε άλλη περιοχή. Τα κοιτάσματα αυτά είναι υπερκείμενα σε ιουρασικούς ή τριαδικούς ασβεστόλιθους. Επίσης, οι λατερίτες αυτού του τύπου είναι ομοιόμορφοι κι επομένως εξορύσσονται πιο εύκολα. Ωστόσο, έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε νικέλιο. Κοιτάσματα τέτοιου τύπου είναι του Αγ. Ιωάννη, της Εύβοιας και της Λοκρίδας (Λάρυμνα, Μαρμέικο).

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τον Augustithis (1962) υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία. Η κατηγορία αυτή αποτελείται από τα ψευδοαυτόχθονα κοιτάσματα τα οποία συναντώνται στην Έδεσσα. Τα κοιτάσματα αυτά έχουν μεταφερθεί αλλά βρίσκονται πάλι πάνω σε οφιόλιθους και δίνουν την εντύπωση πρωτογενών κοιτασμάτων (www.larco.gr).

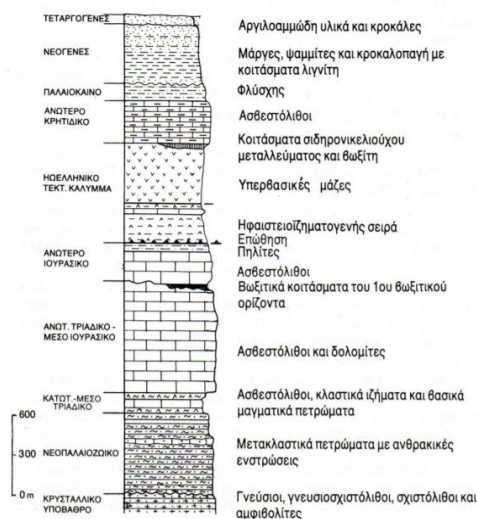
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΛΑΤΕΡΙΤΗ

4.1 Γεωλογία περιοχής δείγματος

Όπως έχει προαναφερθεί, ο λατερίτης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή είναι ο λατερίτης Εύβοιας (LE). Στα κοιτάσματα της Εύβοιας βασικό ορυκτό συστατικό είναι ο αιματίτης που συναντάται με τη μορφή πisolίθου ή με τη μορφή συνδευτικής ύλης. Ανήκει στη γεωλογική ζώνη της Ανατολικής Ελλάδας και χαρακτηρίζεται από την παρουσία οφιόλιθων και σχιστοκερατολίθων. Συνήθως περιέχει αιματίτη, λειμωνίτη (γκαιίτη, λεπιδοκροκίτη), χλωρίτη, χαλαζία, χρωμίτη, μαγνητίτη και ίχνη μαλαχίτη, μαρκασίτη. Κύριος φορέας του νικελίου είναι ο νικελιούχος χλωρίτης (νιμίτης), ο οποίος συμμετέχει στην συνδευτική ύλη του μεταλλεύματος με περιεχόμενο νικέλιο 5%.

Η χημική σύσταση του μεταλλεύματος αποτελείται κυρίως από οξείδια του σιδήρου (Fe_2O_3), πυριτίου (SiO_2), αργιλίου (Al_2O_3), χρωμίου (Cr_2O_3), μαγνησίου (MnO) και νικελίου (NiO). Επίσης, περιέχει και οξείδια μαγανίου (MgO), ασβεστίου (CaO), θείου (SO_2), χαλκού (CuO), κοβαλτίου (CoO) και αρσενικού (As_2O_3) (www.geo.auth.gr).

Γενικά, η Κεντρική και Βόρεια Εύβοια ανήκουν γεωλογικά στην Πελαγονική ζώνη μη μεταμορφωμένων σχηματισμών (Εικόνα 4.1).



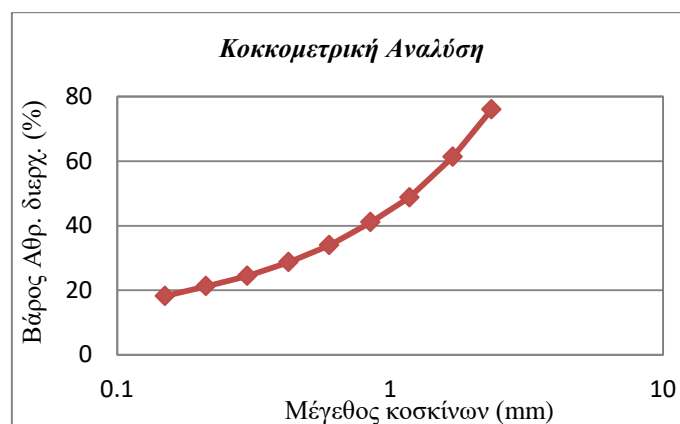
Εικόνα 4.1: Στρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών της Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας (Κατσικάτσος, 1992).

4.2 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 0.150 mm. Το υλικό -0.150 mm φυλάχθηκε ενώ το +0.150 mm τοποθετήθηκε στο 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 ήταν η δημιουργία 10 κοκκομετρικών κλασμάτων, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Επομένως, γνωρίζοντας το βάρος που παρέμεινε σε κάθε κόσκινο και υπολογίζοντας το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) δημιουργήθηκε η καμπύλη κοκκομετρικής ανάλυσης (Διάγραμμα 4.1).

Πίνακας 4.1: Βάρη κοκκομετρικών κλασμάτων του αρχικού δείγματος.

<i>Κοκκομετρικά κλάσματα (mm)</i>	<i>Κωδικός κλασμάτων</i>	<i>Βάρος (g)</i>	<i>Βάρος (%)</i>	<i>Αθρ. Διερχ. Βάρος (%)</i>
2.36	LE1	248.31	23.94	76.06
1.70	LE2	152.29	14.68	61.38
1.18	LE3	131.12	12.64	48.74
0.850	LE4	79.39	7.65	41.08
0.600	LE5	74.02	7.14	33.94
0.425	LE6	54.87	5.29	28.65
0.300	LE7	43.94	4.24	24.42
0.212	LE8	33.10	3.19	21.23
0.150	LE9	31.20	3.01	18.22
-0.150	LE10	188.96	18.22	
Σύνολο		1037.20	100	



Διάγραμμα 4.1: Καμπύλη κοκκομετρικής ανάλυσης αρχικού δείγματος.

4.3 Χημική και Ορυκτολογική Ανάλυση αρχικού δείγματος

Όλες οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση του XRF.

Για την διεξαγωγή των αναλύσεων πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία:

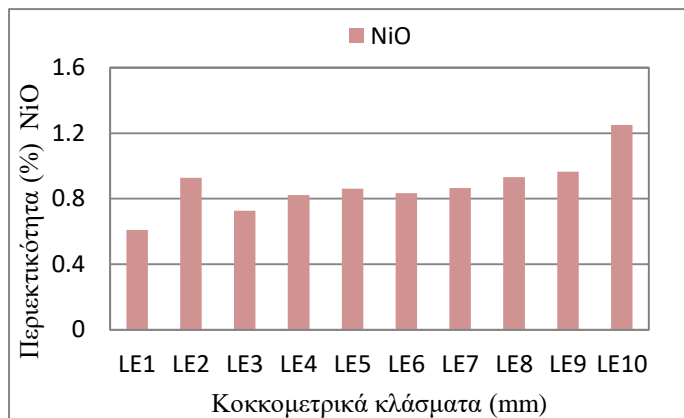
- Λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από το προς ανάλυση υλικό.
- Λειοτρίβηση δείγματος στη συσκευή του πλανητικού μύλου.
- Λήψη 5g δείγματος.
- Προσθήκη 0.5g Wax.
- Ανάμιξη δείγματος και δημιουργία ταμπλέτας.

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης για τα κοκκομετρικά κλάσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 4.2. και διαγράμματα 4.2 – 4.6.

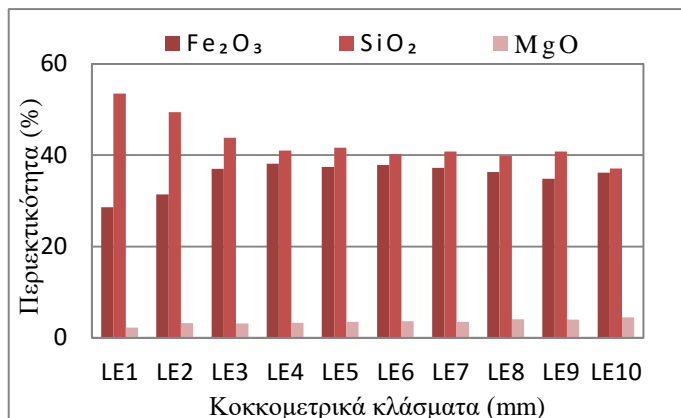
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα Χημικής Ανάλυσης δειγμάτων LE1 – LE10.

Δείγματα	Χημική Ανάλυση (%)														
	NiO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	MgO	CoO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Sum
LE1	0.61	28.58	53.47	2.52	2.81	1.42	2.23	0.03	0.20	0.00	0.17	0.19	0.01	5.27	100.00
LE2	0.93	31.36	49.44	3.25	3.03	2.15	3.21	0.03	0.19	0.03	0.26	0.26	0.01	5.88	100.00
LE3	0.73	37.01	43.78	3.17	4.16	1.92	3.15	0.03	0.26	0.01	0.31	0.28	0.01	5.20	100.00
LE4	0.82	38.09	41.02	3.27	4.70	1.99	3.26	0.03	0.26	0.01	0.35	0.30	0.01	5.91	100.00
LE5	0.86	37.43	41.65	3.56	4.87	2.02	3.51	0.03	0.27	0.00	0.37	0.31	0.02	5.13	100.00
LE6	0.83	37.84	40.22	3.48	4.43	2.06	3.60	0.03	0.28	0.01	0.39	0.31	0.02	6.53	100.00
LE7	0.86	37.20	40.79	3.39	4.48	2.21	3.50	0.03	0.29	0.01	0.38	0.31	0.02	6.55	100.00
LE8	0.93	36.31	39.84	3.85	4.64	2.40	4.08	0.03	0.30	0.01	0.42	0.32	0.02	6.88	100.00
LE9	0.97	34.79	40.82	3.79	4.82	2.71	3.97	0.03	0.35	0.01	0.43	0.33	0.02	6.98	100.00
LE10	1.25	36.15	37.09	4.21	5.87	3.20	4.44	0.03	0.40	0.00	0.54	0.40	0.02	6.41	100.00

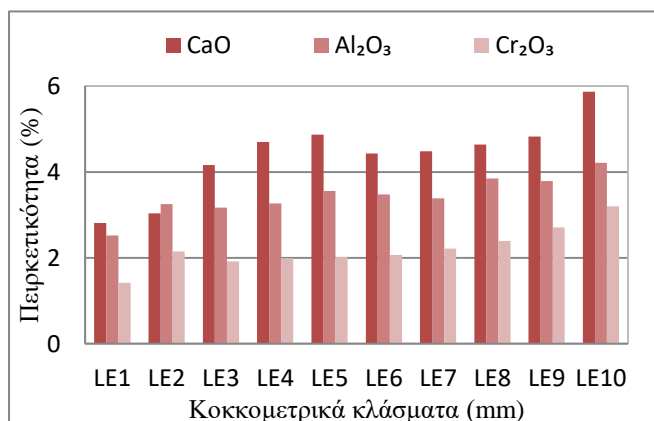
Από τον πίνακα 4.2 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 4.2 – 4.6 τα οποία παριστάνουν τις χημικές αναλύσεις ανά κοκκομετρικό κλάσμα LE1 – LE10.



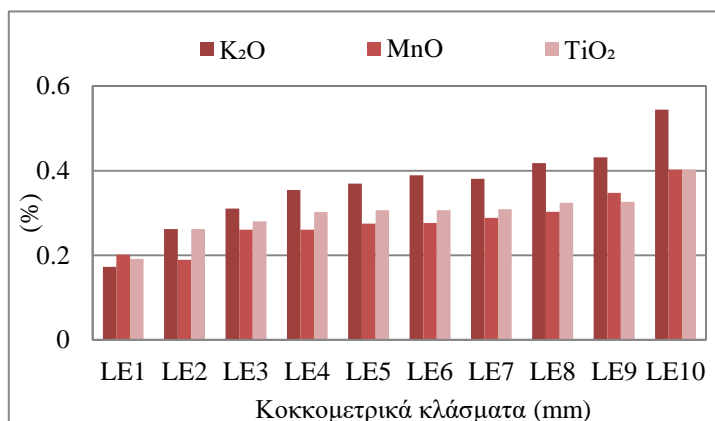
Διάγραμμα 4.2: Περιεκτικότητα των κοκκομετρικών κλασμάτων σε NiO



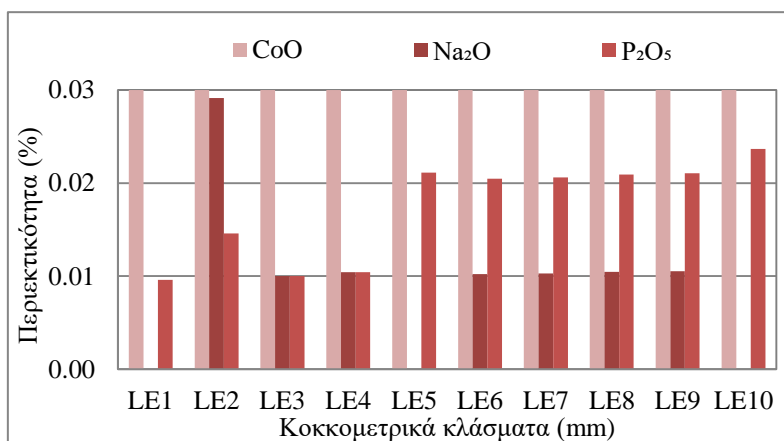
Διάγραμμα 4.3: Περιεκτικότητα των κοκκομετρικών κλασμάτων σε Fe₂O₃, SiO₂ και MgO.



Διάγραμμα 4.4: Περιεκτικότητα των κοκκομετρικών κλασμάτων σε CaO, Al₂O₃ και Cr₂O₃.



Διάγραμμα 4.5 Περιεκτικότητα των κοκκομετρικών κλασμάτων σε K₂O, MnO και TiO₂.

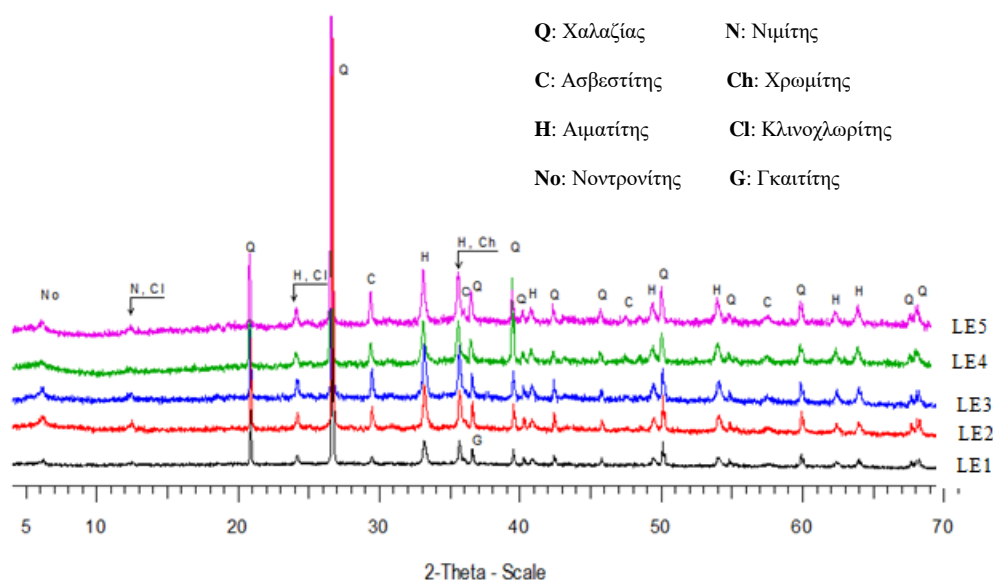


Διάγραμμα 4.6: Περιεκτικότητα των κοκκομετρικών κλασμάτων σε CoO, Na₂O και P₂O₅.

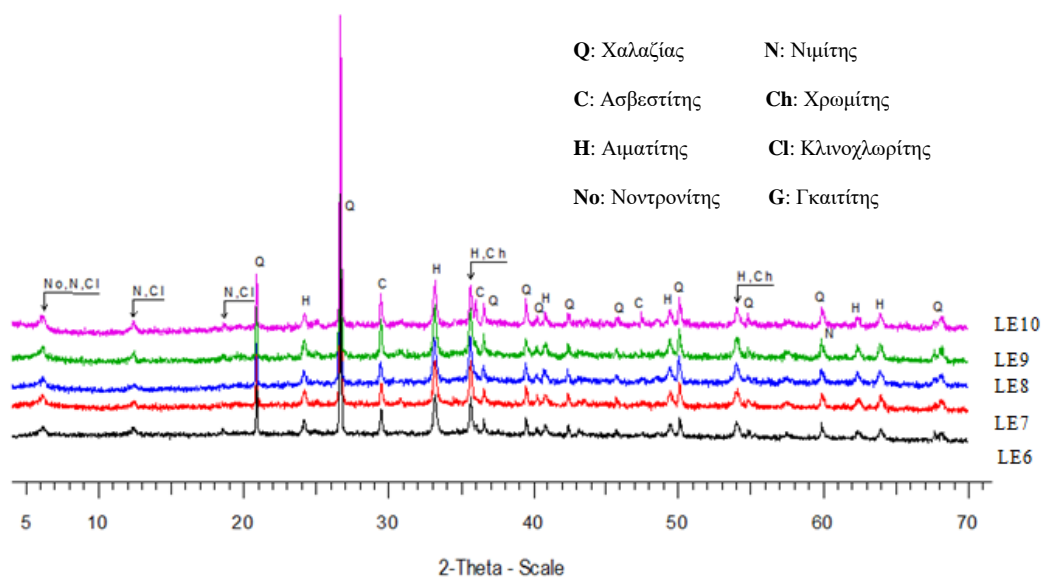
Από τα διαγράμματα 4.2 – 4.6 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα των περισσότερων οξειδίων (NiO, Fe₂O₃, CaO, Al₂O₃, Cr₂O₃, K₂O, MnO, P₂O₅ και TiO₂) έχει μια τάση να αυξάνεται με τη μείωση του μεγέθους του κοκκομετρικού κλάσματος. Αντίθετα, η περιεκτικότητα του SiO₂ και του Na₂O μειώνεται με τη

μείωση του μεγέθους του κοκκομετρικού κλάσματος. Τέλος, οι περιεκτικότητες του CoO και του MgO παραμένουν σχεδόν ίδιες σε όλα τα μεγέθη του κλάσματος.

Η ορυκτολογική ανάλυση των κοκκομετρικών κλασμάτων (LE1 – LE10) του Πίνακα 4.1 πραγματοποιήθηκε με περιθλασίμετρο ακτίνων – Χ στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα (4.7 – 4.8).



Διάγραμμα 4.7: Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικών φάσεων για τα κοκκομετρικά κλάσματα LE1 – LE5.



Διάγραμμα 4.8: Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικών φάσεων για τα κοκκομετρικά κλάσματα LE6 – LE10.

Από τα παραπάνω διαγράμματα 4.7 – 4.8 παρατηρείται ότι οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις για τα 10 κοκκομετρικά κλάσματα (LE1 – LE10) είναι οι εξής:

- Χαλαζίας (Quartz, Q) με χημικό τύπο SiO_2
- Ασβεστίτης (Calcite, C) με χημικό τύπο CaCO_3
- Αιματίτης (Hematite, H) με χημικό τύπο Fe_2O_3
- Νοντρονίτης (Nontronite, No) με χημικό τύπο $\text{Na}_{0,33}\text{Fe}_2+3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$
- Νιμίτης ή νικελιούχος χλωρίτης (Nimite, N) με χημικό τύπο $(\text{Ni},\text{Mg},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
- Χρωμίτης (Chromite, Ch) με χημικό τύπο $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{NiO}$
- Κλινοχλωρίτης (Clinochlore Ia chromian, Cl) με χημικό τύπο $(\text{Mg}_{5,0}\text{Fe}_{0,1}\text{Cr}_{0,7}\text{Al}_{0,2})(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH}_{0,9875})_8$ και
- Γκαιτίτης (Goethite, G) με χημικό τύπο $\text{FeO}(\text{OH})$.

Από τις παραπάνω ορυκτολογικές φάσεις ο νιμίτης αποτελεί φορέα νικελίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

5.1 Μέθοδοι Εμπλουτισμού

Ο εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων αποτελεί σημαντική διαδικασία πριν τη μεταλλουργική επεξεργασία κι αποσκοπεί στην αύξηση της περιεκτικότητας σε Ni του μεταλλεύματος. Όσο εμπλουτίζεται η τροφοδοσία σε Ni, τόσο μεγαλώνει η παραγωγή και μικραίνει το κόστος επεξεργασίας ανά μονάδα παραγόμενου Ni. Επομένως, ο εμπλουτισμός πριν τη μεταλλουργική επεξεργασία στοχεύει:

- Στην αναβάθμιση της ποιότητας του μεταλλεύματος σε περιεκτικότητα Ni.
- Στην απόρριψη στείρου υλικού, το οποίο περιέχει την ελάχιστη περιεκτικότητα σε Ni και
- στην επιλογή της οικονομικότερης μεθόδου εμπλουτισμού.

Σύμφωνα με τους Quast et al. (2015), η πιο κοινή διαδικασία προ-επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για την υδρομεταλλουργική επεξεργασία των νικελιούχων λατεριτών είναι η απομάκρυνση ενός χονδρόκοκκου κλάσματος από την τροφοδοσία που περιέχει λιγότερο νικέλιο από το λεπτότερο υλικό.

Οι Zhu Y. et al. (2010) μελέτησαν την επίδραση των χαρακτηριστικών των μέσων λειοτρίβησης για βωξίτη που προέρχεται από την Κίνα. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με εκλεκτική λειοτρίβηση βωξίτη αναλογίας $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (A/S) ίση με 4.4 σε σφαιρόμυλο διαστάσεων 100 X 150 cm και όγκου 1.18 L. Αρχικά το δείγμα θραύτηκε σε σιαγωνινό σπαστήρα και στη συνέχεια λειοτριβήθηκε για διάφορες συνθήκες (διάμετρος σφαιρών $d=15\text{ mm}$, $d=20\text{ mm}$, $d=30\text{ mm}$ και χρόνοι λειοτρίβησης $t=16\text{ min}$, $t=20\text{ min}$, $t=23\text{ min}$). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το Al_2O_3 εμπλουτίζεται στα χονδρότερα κλάσματα, ενώ το SiO_2 στα λεπτότερα. Επίσης, οι δοκιμές λειοτρίβησης με $d=15\text{ mm}$ ήταν πιο αποτελεσματικές απ' ότι οι δοκιμές με $d=20\text{ mm}$ και $d=30\text{ mm}$. Πιο συγκεκριμένα, στην εκλεκτική λειοτρίβηση με $d=15\text{ mm}$ του κλάσματος $-0.5+0.28\text{ mm}$ η αναλογία A/S ήταν 7.5.

Οι Tong et al. (2013) μελέτησαν κατά πόσο οι συνθήκες λειοτρίβησης επηρεάζουν το ρυθμό θραύσης σε σχέση με τη μάζα του δείγματος και τα κύρια ορυκτά που υπάρχουν στο νικελιούχο λατερίτη, ο οποίος προέρχεται από την Αυστραλία. Επίσης, μελέτησαν την επίδραση της εκλεκτικής λειοτρίβησης στον

εμπλουτισμό Ni εξετάζοντας το χρόνο λειοτρίβησης, το μέγεθος τροφοδοσίας και το μέγεθος του προϊόντος. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι ο καλύτερος εμπλουτισμός σε Ni ήταν για κοκκομετρικό κλάσμα μεγέθους $-1.18+0.850$ mm του προϊόντος -38 μ m (400 mesh) μετά από λειοτρίβηση σε χρόνο 0.25 min. Στις συγκεκριμένες συνθήκες ο βαθμός Ni αυξήθηκε από 0.73% σε 1.30% με ανάκτηση Ni 14.4%, ο βαθμός Mg αυξήθηκε από 1.30% σε 3.96%, ενώ το Si μειώθηκε από 28.7% σε 16.2%.

Επίσης, οι Tong et al. (2015) έκαναν μια σύγκριση για τρεις διαφορετικούς λατερίτες από την Αυστραλία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν έναν γκαιτιτικό λατερίτη πλούσιο σε πυρίτιο (SG), έναν γκαιτιτικό λατερίτη (G) κι έναν σαπρολιτικό λατερίτη (SAP) και μελέτησαν τον εμπλουτισμό τους σε Ni μέσω εκλεκτικής λειοτρίβησης. Από τη μελέτη αυτή συμπέραναν ότι το Ni περιέχεται στα κλάσματα των 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 Ni. Τα αποτελέσματα της έρευνας για τον εμπλουτισμό του Ni έδειξαν ότι στο μέταλλευμα SG το Ni εμπλουτίστηκε από 0.73% σε 1.22% στο προϊόν λειοτρίβησης -38μ m με ανάκτηση Ni 12%. Για το μέταλλευμα SAP, ο βαθμός Ni εμπλουτίστηκε περίπου 49% με ανάκτηση Ni 33% στο προϊόν -38 μ m. Αντίθετα, στο μέταλλευμα G, η εκλεκτική λειοτρίβηση δεν ήταν αποτελεσματική διότι περιείχε πολύ λίγο χαλαζία.

Από την άλλη, οι Agatzini-Leonardou et al. (2004) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο του μαγνητικού διαχωρισμού με σκοπό τον εμπλουτισμό λατερίτη Καστοριάς σε Ni. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι κανένα τμήμα του θραυσμένου μεταλλεύματος δεν θα μπορούσε να απορριφθεί. Επίσης, στο μη μαγνητικό προϊόν οι απώλειες Ni ήταν περίπου 5%, ενώ το ποσοστό απομάκρυνσης του CaO ήταν περίπου 37%. Τέλος, ο κύριος στόχος της επεξεργασίας ορυκτών ήταν η απομάκρυνση του ασβεστίου που καταναλώνει αρκετή ποσότητα οξέος στο στάδιο της εκχύλισης.

5.2 Μεταλλουργικές μέθοδοι εξαγωγής νικελίου από λατερίτες

Περίπου το 80% των παγκόσμιων αποθεμάτων νικελίου βρίσκεται σε οξειδωμένα μεταλλεύματά του, όμως το 80% της παραγωγής του μετάλλου προέρχεται από τα θειούχα μεταλλεύματα (Κομνίτσας, 1988). Γενικά, οι μέθοδοι που

εφαρμόζονται σήμερα για την εξαγωγή νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα διακρίνονται σε πυρομεταλλουργικές και υδρομεταλλουργικές.

Γενικά, οι πυρομεταλλουργικές διεργασίες εφαρμόζονται κατά την παραγωγή των μετάλλων από τα μεταλλεύματα και λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως 800 – 1600°C, απουσία υδατικής φάσης. Τέτοιες διεργασίες αποτελούν η ξήρανση, η πύρωση, η φρύξη, η τήξη, η απόσταξη και η ηλεκτρόλυση τήγματος. Αντίθετα, οι υδρομεταλλουργικές διεργασίες διεξάγονται σε χαμηλές θερμοκρασίες, συνήθως από 25 μέχρι 150°C περίπου και περιλαμβάνουν τη χρήση ύδατος ή υδατικών διαλυμάτων για την εξαγωγή των μετάλλων από τα μεταλλεύματα ή άλλα υλικά. Επίσης, η πίεση στην υδρομεταλλουργική μέθοδο μπορεί να είναι υψηλή σε αντίθεση με την πυρομεταλλουργική η οποία διεξάγεται συνήθως σε ατμοσφαιρική πίεση. Το κόστος στην πυρομεταλλουργία είναι ανάλογο με το βάρος του κατεργαζόμενου μεταλλεύματος κι αυξάνει όταν η περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι χαμηλή, ενώ το κόστος στην υδρομεταλλουργία είναι κατά ένα μέρος ανάλογο με το βάρος του ανακτώμενου μετάλλου. Επομένως, η υδρομεταλλουργία ενδείκνυται περισσότερο για χαμηλές περιεκτικότητες νικελίου.

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).

Αναλυτικότερα, οι υδρομεταλλουργικές μέθοδοι κατεργασίας του λατερίτη αναφέρονται στην εκχύλιση με αμμωνία και στην εκχύλιση με θειικό οξύ σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Κύρια λειτουργική επιβάρυνση της μεθόδου είναι το κόστος του θειικού οξέος, του οποίου η κατανάλωση αυξάνει όσο αυξάνει η περιεκτικότητα του μεταλλεύματος σε μαγνήσιο. Η εκχύλιση είναι η μέθοδος κατά την οποία διαλυτοποιούμε σε υδατικό διάλυμα το ορυκτό που περιέχει το χρήσιμο συστατικό το οποίο στην συνέχεια ανακτούμε υπό καθαρή ή συμπυκνωμένη μορφή. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές μελέτες για την εκχύλιση λατεριτών, οι οποίες έχουν ως σκοπό την ανάκτηση νικελίου.

Από την άλλη, το 75% του παραγόμενου νικελίου από οξειδωμένα μεταλλεύματα παράγεται με πυρομεταλλουργικές μεθόδους. Όπως έχει προαναφερθεί, το Ni είναι ένα από τα σημαντικότερα μεταλλουργικά προϊόντα της Ελλάδας. Για το λόγο αυτό, η ΛΑΡΚΟ χρησιμοποιεί συγκεκριμένη μέθοδο για την εξαγωγή Ni από λατερίτες. Η πυρομεταλλουργική μέθοδος της ΛΑΡΚΟ ανήκει στις

μεθόδους που συνδυάζουν προαναγωγική φρύξη σε περιστροφική κάμινο με αναγωγική τήξη σε ηλεκτρική κάμινο κι εξευγενισμό του παραγόμενου μετάλλου σε μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου. Ειδικότερα, τα στάδια επεξεργασίας της μεθόδου είναι (Κορνίτσας, 2010):

- i. Θραύση και ομοιογενοποίηση των λατεριτικών νικελιούχων μεταλλευμάτων και ελεγχόμενη ανάμειξή τους με στερεά καύσιμα για τη δημιουργία μείγματος καθορισμένης σύστασης.
- ii. Θέρμανση μέχρι τους 870°C περίπου και μερική αναγωγή των μεταλλευμάτων του μεταλλουργικού μείγματος σε Π/Κ.
- iii. Αναγωγική θέρμανση και τήξη μέχρι τους 1450°C του προϊόντος εξαγωγής των περιστροφικών καμίνων σε Η/Κ εμβαπτισμένου τόξου ανοικτού λουτρού για την παραγωγή τηγμένου κράματος Fe – Ni (12 – 16% Ni) και θαλάσσια απόρριψη της παραγόμενης σκωρίας στον Ευβοϊκό Κόλπο μετά από κοκκοποίησή της με θαλασσινό νερό.
- iv. Εξευγενισμός του τηγμένου κράματος Fe – Ni (12 – 16% Ni) των ηλεκτρικών καμίνων σε μεταλλάκτες OBM με εμφύσηση οξυγόνου και προσθήκη ασβέστη σε θερμοκρασίες μέχρι 1700°C για την παραγωγή κοκκοποιημένου κράματος Fe - Ni (18 - 24% Ni) με χρήση θαλασσινού νερού.

Το βασικό προϊόν της παραγωγικής διαδικασίας είναι το κοκκοποιημένο Fe – Ni 22%, ενώ παραπροϊόντα αποτελούν οι παραγόμενες σκωρίες από τις Η/Κ (ηλεκτροκαμίνους) και τους μεταλλάκτες OBM. Οι ελληνικοί λατερίτες διαφέρουν από τους υπόλοιπους λόγω της σχετικά χαμηλότερης περιεκτικότητας τους σε νερό και την υψηλότερη περιεκτικότητα σε Al_2O_3 .

Αρκετές έρευνες έχουν γίνει για την ανάκτηση Ni είτε με υδρομεταλλουργικές είτε με πυρομεταλλουργικές μεθόδους. Για παράδειγμα, οι Büyükkakinci και Topkaya (2009) μελέτησαν τους λατερίτες τύπου Gördes που βρίσκονται στην Δυτική Τουρκία για να προσδιορίσουν τις βέλτιστες συνθήκες κατά την εκχύλιση. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα στα οποία μελετήθηκαν διάφορες παράμετροι όπως ο χρόνος, η συγκέντρωση οξέος, η θερμοκρασία και το μέγεθος των σωματιδίων. Τα πειράματα της εκχύλισης με ανάδευση υπό ατμοσφαιρική πίεση έδειξαν ότι η εξαγωγή νικελίου μπορεί να φτάσει και το 96%.

Από την άλλη, η Αρβανιτάκη Χ. (2015) μελέτησε την ανάκτηση νικελίου από μετάλλευμα λατερίτη Καστοριάς με τη μέθοδο της εκλεκτικής διαλυτοποίησης. Αρχικά, χώρισε το υλικό σε δύο κλάσματα (χονδρό και λεπτό). Στο χονδρό κλάσμα πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός με αποτέλεσμα, η περιεκτικότητα του Ni να αυξηθεί από 0.68% σε 0.79%. Όμως, το ποσοστό αυτό δεν ήταν ικανοποιητικό για να χρησιμοποιηθεί η πυρομεταλλουργική μέθοδος για την ανάκτησή του. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε εκχύλιση στο μαγνητικό προϊόν, η οποία αποτελεί υδρομεταλλουργική μέθοδο, από όπου τελικά προέκυψε ανάκτηση Ni 80% και λόγος Fe/Ni 7:1. Αντίθετα, στο λεπτό κλάσμα στο οποίο λόγω της κοκκομετρίας του δεν πραγματοποιήθηκε απευθείας εκχύλιση σε στήλες, αλλά αρχικά έγινε σβολοποίηση και συσσωμάτωση του σβόλου πριν την εκχύλιση, η περιεκτικότητα του Ni και ο λόγος Fe/Ni ήταν 0.90% και 36:1, αντίστοιχα. Η ανάκτηση Ni που επιτεύχθηκε στο λεπτό κλάσμα ήταν μόνο 10% και πραγματοποιήθηκε με υδρομεταλλουργική μέθοδο, ενώ ο λόγος Fe/Ni βελτιώθηκε σε αναλογία 10:1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 Κατάτμηση

Κατάτμηση καλείται η μείωση του μεγέθους των τεμαχιδίων των πετρωμάτων και βιομηχανικών ορυκτών σε μεγέθη κατάλληλα για τον εμπλουτισμό, την επεξεργασία και τη χρήση του υλικού. Ο όρος κατάτμηση περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ελάττωσης του μεγέθους των υλικών, δηλαδή τη θραύση και τη λειοτρίβηση.

Η κατάτμηση πραγματοποιείται με την εφαρμογή μηχανικών δυνάμεων στα στερεά τεμαχίδια με αποτέλεσμα τη διάσπαση της συνοχής τους και την παραγωγή νέων τεμαχιδίων με μικρότερο μέγεθος. Κάθε υλικό συμπεριφέρεται ξεχωριστά σε αυτές τις δυνάμεις. Πιο συγκεκριμένα, τα υλικά παραμορφώνονται με την εφαρμογή μιας εξωτερικής δύναμης μέχρι ένα όριο κι όταν η δύναμη σταματήσει να ασκείται, επανέρχονται στην ίδια διαδικασία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ελαστική παραμόρφωση και το όριο που μπορεί να φθάσει σε συνάρτηση με τη δύναμη εξαρτάται από το υλικό. Όταν η δύναμη υπερβεί το όριο της ελαστικής παραμόρφωσης τότε η παραμόρφωση είναι μόνιμη. Τέλος, καθώς η δύναμη αυξάνεται, η παραμόρφωση μεγαλώνει και στα περισσότερα υλικά προκαλείται θραύση από ένα σημείο και μετά (Σταμπολιάδης, 2008).

Οι κυριότερες δυνάμεις που εξασκούν οι μηχανές κατάτμησης ταξινομούνται σε δυνάμεις θλίψης, κρούσης και τριβής. Αναλυτικότερα:

- **Θλίψη:** είναι η συνηθέστερη μορφή δύναμης που χρησιμοποιείται στην κατάτμηση κι εφαρμόζεται με συμπίεση των σωμάτων μεταξύ δύο επιφανειών, από τις οποίες συνήθως η μια είναι ακίνητη και στην άλλη επιφάνεια ασκείται πίεση (Σταμπολιάδης, 2008). Αποτέλεσμα της θλίψης είναι η δημιουργία δύο προϊόντων τα οποία διαφέρουν ως προς το μέγεθος. Συγκεκριμένα, το ένα προϊόν αποτελείται από μεγάλα τεμαχίδια που αστοχούν λόγω εφελκυσμού και το δεύτερο από μικρά τεμαχίδια που αστοχούν λόγω θλίψης στα όρια εφαρμογής της δύναμης (Wills and Napier-Munn, 2006).
- **Κρούση:** είναι η απλούστερη δύναμη κατάτμησης κι εξασκείται με την απότομη πρόσκρουση τεμαχιδίου κινούμενου στην επιφάνεια ή αντιστρόφως με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του τεμαχιδίου (Σταμπολιάδης, 2008). Αποτέλεσμα της κρούσης είναι η εφελκυστική αστοχία του τεμαχιδίου και η

παραγωγή προϊόντων μεγέθους και σχήματος κοντά στο αρχικό τεμάχιο (Kelly and Spottiswood, 1982).

- **Τριβή:** είναι η δύναμη κατάτμησης που εφαρμόζεται όταν το υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων κι αντίθετα κινούμενων επιφανειών που δημιουργούν διατμητικές τάσεις μέσα στο σώμα και ολίσθηση σε εσωτερικές επιφάνειες του σώματος.

6.2 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 ότι 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 (Taşdemir, 2009).

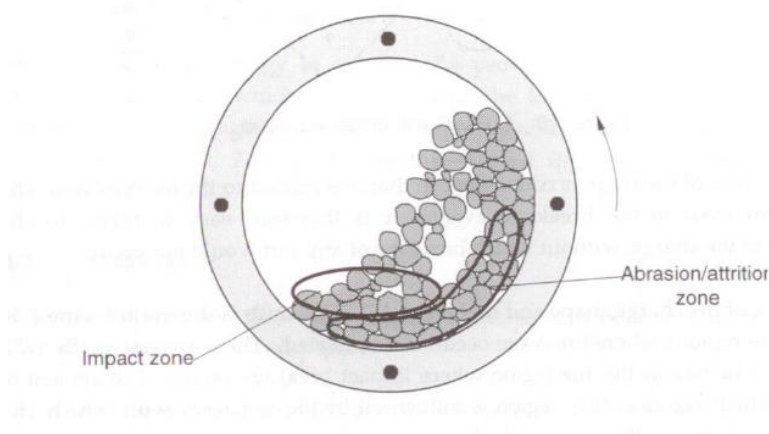
Οι μηχανές θραύσης χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος της τροφοδοσίας που μπορούν να θραύσουν. Στην παρούσα εργασία για τις ανάγκες θραύσης του υλικού χρησιμοποιήθηκε ο *σιαγωνοτός σπαστήρας* ο οποίος αποτελείται από μια ακίνητη επιφάνεια, σχεδόν κατακόρυφη, απέναντι στην οποία βρίσκεται μια δεύτερη κινητή 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 σιαγωνοτοί σπαστήρες χρησιμοποιούνται στην πρωτογενή και δευτερογενή θραύση (Σταμπολιάδης, 2008).

Οι μηχανές λειοτρίβησης χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος της τροφοδοσίας που μπορούν να χωριστούν κι ανάλογα με τα μέσα λειοτρίβησης (μεταλλικές σφαίρες ή μεταλλικές ράβδοι) που χρησιμοποιούν. Οι κυριότερες μηχανές λειοτρίβησης είναι οι ραβδόμυλοι και οι σφαιρόμυλοι, οι οποίοι στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε λειοτρίβηση του υλικού με τη χρήση *σφαιρόμυλου*.

Γενικότερα, οι συγκεκριμένες μηχανές λειοτρίβησης, λειοτριβούν το μέταλλευμα με πτώση και κύλιση των μέσων λειοτρίβησης που περιέχουν.

Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό κέλυφος που στηρίζεται στα δύο άκρα και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Μέσα στο κέλυφος υπάρχει ένα μόνιμο φορτίο από μεταλλικές ράβδους ή σφαίρες ή και κροκάλες, που βρίσκονται σε συνεχή κίνηση λόγω της περιστροφής του κελύφους του μύλου. Η αποτελεσματικότητα της λειοτριβήσης εξαρτάται από τη συμπεριφορά των μέσων λειοτριβήσης μέσα στο μύλο (Σταμπολιάδης, 2008).

Κατά τη διαδικασία της λειοτριβήσης δημιουργούνται τρεις ζώνες λειοτριβήσης. Οι ζώνες αυτές βασίζονται στους μηχανισμούς της λειοτριβήσης και είναι η ζώνη της κρούσης (impact zone), η ζώνη της τριβής (abrasion zone) και η ζώνη που οι σφαίρες βρίσκονται σε ελεύθερη πτώση (empty zone) και δεν έρχονται σε επαφή με τα τεμαχίδια ώστε να προκληθεί λειοτριβήση (Εικόνα 6.1)



Εικόνα 6.1: Μηχανισμός αυτολειοτριβήσης (Πηγή: Napier-Munn *et al.*, 1996).

Μια από τις σημαντικότερες διεργασίες ελάττωσης του μεγέθους στη μεταλλευτική έρευνα είναι η αυτολειοτριβήση ή αυτογενής λειοτριβήση (autogenous grinding, AG) και η ήμι – αυτογενής λειοτριβήση (semi autogenous – grinding, SAG). Η αυτολειοτριβήση αποτελεί μια ολοκληρωμένη μορφή διεργασίας κατά την οποία εκτελούνται όλες οι φάσεις της κατάτμησης. Στη διαδικασία της αυτολειοτριβήσης ο μύλος περιστροφής χρησιμοποιεί το ίδιο το μετάλλευμα ως μέσο άλεσης. Το μετάλλευμα θα πρέπει να περιέχει επαρκή ικανά κομμάτια ώστε να ενεργεί ως μέσο άλεσης. Επίσης, η αυτολειοτριβήση μπορεί να είναι ξηρή ή υγρή. Η τροφοδοσία που εισέρχεται στο μύλο είναι μεγέθους –300 ή –200 mm κι εξέρχεται ως προϊόν μεγέθους 0.1 mm (Wills, 2005). Οι μύλοι αυτογενούς λειοτριβήσης αποτελούν ολοκληρωμένες μορφές μηχανημάτων θραύσης και λειοτριβήσης. Πλεονέκτημα τους

είναι η μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης, του κόστους από τη φθορά των μέσων λειοτρίβησης κ.α. Από την άλλη, το αυξημένο κόστος ενέργειας κατά 25 – 100% αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για του μύλους αυτογενούς λειοτρίβησης. Γενικά, οι συγκεκριμένοι μύλοι λειοτρίβησης σχεδιάζονται για μεγάλες παροχές κι έχουν δυναμικότητα 500 – 800 t/h και ισχύ 6 – 8 MW.

Τέλος, όσον αφορά την εκλεκτική λειοτρίβηση σε σφαιρόμυλο, αυτή είναι μια ήπια διαδικασία η οποία υποβοηθείται από την παρουσία νερού. Δηλαδή, η κίνηση των κόκκων του μεταλλεύματος γίνεται με την παρουσία νερού στον μύλο. Συνήθως το νερό περιέχεται σε ποσότητα 30 – 40%. Περισσότερο νερό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία λεπτομερέστερου προϊόντος. Κατά τη διαδικασία εκλεκτικής λειοτρίβησης ενός υλικού εάν αυτό έχει σαφή κρυσταλλική δομή τότε τείνει να σπάσει στα όρια των κρυστάλλων, οι οποίοι αποδεσμεύονται χωρίς να κατακερματίζονται με αποτέλεσμα να παράγεται ομοιόμορφο υλικό στο μέγεθος των κρυστάλλων με λίγα ψιλομερή. Στην περίπτωση που το υλικό έχει άμορφη μάζα τα ψιλά που δημιουργούνται είναι πολλά.

6.3 Παράμετροι Λειοτρίβησης

Οι παράμετροι λειοτρίβησης είναι πολύ σημαντικοί για την ομαλή διαδικασία λειοτρίβησης του μεταλλεύματος. Οι σημαντικότεροι παράμετροι είναι τα χαρακτηριστικά του μύλου, τα μέσα λειοτρίβησης, το κλάσμα μάζας υλικού και σφαιρών στο μύλο καθώς και η πλήρωση των κενών των μέσων λειοτρίβησης με υλικό. Κάποιες από τις παραμέτρους αναλύονται στην συνέχεια.

1. Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών, J

Ο συντελεστής πλήρωσης σφαιρών είναι το κλάσμα του μύλου το οποίο έχει πληρωθεί από σφαίρες, δηλαδή δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνουν οι σφαίρες σε σχέση με το διαθέσιμο όγκο του μύλου και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$J = \left(\frac{\text{μάζα σφαιρών} / \text{πυκνότητα σφαιρών}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \cdot \frac{1}{1-\phi} \quad (\%) \quad (6.1)$$

όπου, ϕ : το πορώδες στρώματος των σφαιρών και του υλικού μέσα στο μύλο.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το ϕ διαφέρει ελάχιστα ανάλογα με το μέγεθος σφαιρών, την πλήρωση σε υλικό κλπ., αλλά συνήθως ορίζεται ως σταθερά. Οι Austin et al. (1984) έχουν προτείνει μια τυπική τιμή του πορώδους 0.4 ή 40%. Αυτό συμβαίνει για να μπορεί να γίνεται σύγκριση τόσο στη βιομηχανία όσο και σε ερευνητικό επίπεδο.

2. Συντελεστής πλήρωσης υλικού, f_c

Ο συντελεστής πλήρωσης του υλικού δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνει το υλικό σε σχέση με τον όγκο του μύλου και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_c = \left(\frac{\text{μάζα υλικού} / \text{πυκνότητα υλικού}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \cdot \frac{1}{1-\phi} \quad (\%) \quad (6.2)$$

3. Συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό, U

Ο συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό είναι συνάρτηση των J και f_c και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$U = \frac{f_c}{0.4 \cdot J} \quad (6.3)$$

4. Ισχύς μύλου

Η καθαρή ισχύς εργαστηριακού μύλου $P(W)$, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Σταμπολτζής, 1990):

$$P = 0.109 \cdot W \cdot N^{1.124} \cdot D^{1.078} \quad (6.4)$$

όπου,

W : βάρος του φορτίου σε kg.

N : συχνότητα περιστροφής του μύλου σε rpm.

D : εσωτερική διάμετρος του μύλου σε m.

5. Ενέργεια λειοτρίβησης

Η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων 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 τεμαχιδίων 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 (Petrakis and Komnitsas, 2017). Από την ενέργεια που παράγουν οι μηχανές θραύσης και λειοτρίβησης μόνο ένα μικρό ποσοστό διατίθεται για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων, ενώ η περισσότερη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα (Wills and Napier – Munn, 2006).

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

Η ενέργεια E (kJ), η οποία καταναλώνεται σε εργαστηριακούς μύλους υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = P \cdot t \quad (6.5)$$

όπου,

P : η ισχύς του σφαιρόμυλου σε kW.

t : ο χρόνος λειοτρίβησης σε s.

Όπως φαίνεται από την σχέση 6.5 η ενέργεια είναι ανάλογη του χρόνου κι αν τη διαιρέσουμε με τη μάζα του υλικού προκύπτει η ειδική ενέργεια κατανάλωσης ε (kJ/kg) για το μύλο. Επομένως, η σχέση 6.5 γίνεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{P \cdot t}{M} \quad (6.6)$$

όπου,

M : η τροφή του υλικού στο μύλο σε kg.

Τέλος, αν διαιρεθεί η σχέση 6.6 με το 3.6, η ειδική ενέργεια (ε , kJ/kg) μετατρέπεται σε kWh/t.

6.4 Μαθηματικά μοντέλα κατάτμησης

Τα μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας κατάτμησης είναι τα κινητικά μοντέλα. Συνήθως, είναι μαθηματικές προσεγγίσεις της διαδικασίας θραύσης, ώστε να χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά για το σχεδιασμό και τον έλεγχο ολοκλήρωσης της διαδικασίας.

Γενικά, η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους σε μύλους λειοτρίβησης επιτυγχάνεται μέσω επαναλαμβανόμενων ενεργειών θραύσης. Για την κατανόηση της διαδικασίας αυτής δημιουργήθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο προβλέπει την κατανομή του μεγέθους του προϊόντος σε συνάρτηση με την αρχική τροφοδοσία, την ενέργεια που καταναλώνεται καθώς και με τις μεταβλητές λειτουργίας του μύλου. Θεωρητικά υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες προσομοίωσης μοντέλων, τα μοντέλα πίνακα (Lynch, 1977) και τα κινητικά μοντέλα.

Όλα τα μοντέλα προσομοίωσης στηρίζονται σε 2 βασικές λειτουργίες, οι οποίες είναι: α) η πιθανότητα θραύσης ενός τεμαχιδίου μεγέθους y και β) η κατανομή μάζας των τεμαχιδίων που προκύπτουν από τη θραύση του μεγέθους y (Lynch 1977, Πετράκης, 2017).

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το κινητικό μοντέλο προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα το **Μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού (Population Balance Model, PBM).** Τα κινητικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη το ρυθμό θραύσης κάθε τάξης μεγέθους καθώς και τη μάζα του υλικού που παράχθηκε κάτω από ένα μέγεθος (αθροιστική συνάρτηση κ.α.).

6.4.1 Ειδικός Ρυθμός Θραύσης (Specific rate of breakage)

Το υλικό τροφοδοσίας αποτελείται από ένα μέγεθος τεμαχιδίων. Μετά τη διαδικασία λειοτρίβησης το προϊόν που παράγεται είναι τεμαχίδια μικρότερου μεγέθους. Συνεπώς, η κοκκομετρική κατανομή των μεγεθών των τεμαχιδίων που θα υπάρχει στο μύλο σε κάθε χρονική στιγμή μπορεί να υπολογιστεί αν γνωρίζουμε το ρυθμό θραύσης. Ως μέγεθος εννοούμε ένα στενό κλάσμα κόκκων που προκύπτει με κοσκίνιση και περιέχεται μεταξύ δυο συνεχόμενων κοσκίνων. Το κλάσμα αυτό των κόκκων το ονομάζουμε τάξη μεγέθους i και περιέχει κόκκους διαμέτρου μεταξύ του ανοίγματος οπών x_i του επάνω κόσκινου και του ανοίγματος οπών x_{i+1} του αμέσως κάτω απ' αυτό κόσκινου. Εάν εισάγουμε υλικό τάξης μεγέθους $i=1$ μέσα στο μύλο και

λειτουργιβήσουμε το υλικό για χρονικό διάστημα t , τότε είναι δυνατόν να υπολογίσουμε το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους αυτής. Αν M είναι η μάζα του υλικού στο μύλο και $m_1(t)$ είναι το κλάσμα των κόκκων της τάξης μεγέθους $i=1$ μετά από χρόνο t , έχει βρεθεί ότι ο ρυθμός θραύσης της τάξης μεγέθους 1 είναι ανάλογος της ποσότητας $m_i(t)$ που έχει το μέγεθος αυτό. Αυτό, μας το δείχνει η ακόλουθη σχέση (Austin and Luckie, 1972; Klimpel, 1997; Deniz, 2013):

$$\frac{d[m_i(t) \cdot M]}{dt} = -S_i m_i(t) \cdot M \quad (6.7)$$

Εφόσον, η μάζα του υλικού M μέσα στο μύλο είναι σταθερή τότε η σχέση 6.7 παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d[m_i(t)]}{dt} = -S_i m_i(t) \quad (6.8)$$

όπου,

m_i : το κλάσμα μάζας του υλικού του μεγέθους i μετά τη λειοτριβήση σε χρόνο t .

S_i : ειδικός ρυθμός θραύσης σε min^{-1} .

i : ακέραιος αριθμός.

Επίσης, αν το S_i είναι ανεξάρτητο του χρόνου, με ολοκλήρωση της σχέσης 6.8 προκύπτει η ακόλουθη σχέση 6.9:

$$\frac{m_i(t)}{m_i(0)} = \exp(-S_i t) \quad (6.9)$$

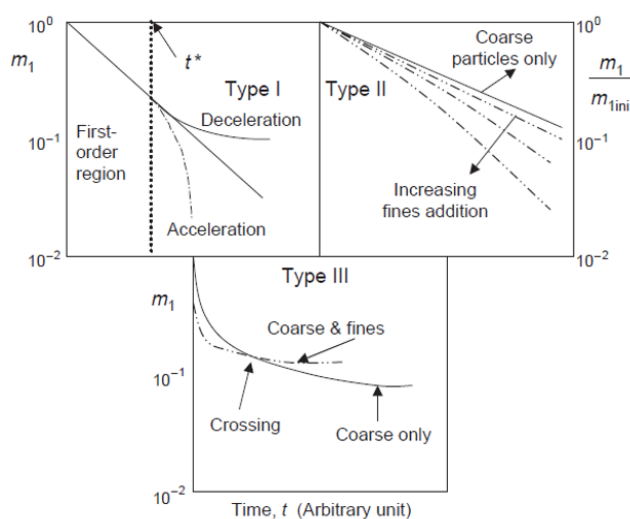
Τέλος, λογαριθμίζοντας τη σχέση 6.9 προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\log \left[\frac{m_i(t)}{m_i(0)} \right] = \frac{-S_i t}{2.3} \quad (6.10)$$

Η σχέση 6.10 δείχνει ότι από το ημιλογαριθμικό διάγραμμα του βάρους που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους I σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης, η κλίση της ευθείας που προκύπτει είναι ο ρυθμός θραύσης (S_i) της τάξης μεγέθους I .

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η απόκλιση του ρυθμού θραύσης από την εξίσωση πρώτης τάξης έχει απασχολήσει αρκετούς ερευνητές. Ο Austin et al. (1981) διαπίστωσαν ότι ο ρυθμός θραύσης μειώνεται όσο εξελίσσεται η λειοτρίβηση. Από την άλλη, οι Gupta and Kapur (1974) και οι Herbst and Fuerstenau (1973 & 1980) έδειξαν ότι όταν οι συνθήκες λειτουργίας της ξηρής λειοτρίβησης σε σφαιρόμυλο είναι σταθερές, ο ρυθμός θραύσης παραμένει σταθερός και ανεξάρτητος από το χρόνο λειοτρίβησης ή το μέγεθος του υλικού.

Οι Bilgili and Scarlett (2005) κατηγοριοποίησαν τα πειραματικά τους αποτελέσματα σε τρεις τύπους (τύπος I, II και III) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.2



Εικόνα 6.2: Οι τρεις τύποι απόκλισης (I, II και III) του ρυθμού θραύσης από την εξίσωση πρώτης τάξης (Bilgili and Scarlett, 2005).

Σύμφωνα με αυτούς, η απόκλιση του ρυθμού θραύσης από την ευθεία γραμμή επέρχεται μετά από χρόνο $t > t^*$, όπου t^* εξαρτάται από τον τύπο του μύλου, τις συνθήκες λειοτρίβησης (υγρή ή ξηρή) και τις ιδιότητες του υλικού που λειοτριβείται.

Επίσης, ο Πετράκης Ε. (2017) μελέτησε την κινητική της λειοτρίβησης στα υλικά μάρμαρο και χαλαζίτη που προήλθαν από κατάσταση ισορροπίας του συστήματος, με εφαρμογή της μεθόδου Bond. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στην περίπτωση που υπάρχει παρουσία λεπτομερών στο μύλο, ο ρυθμός θραύσης του χονδρομερούς κλάσματος ($-3.35+2.36 \text{ mm}$) είναι μεγαλύτερος σε σχέση με το ρυθμό θραύσης του ίδιου του κλάσματος χωρίς την παρουσία λεπτομερών. Επίσης, ο ίδιος ερευνητής κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός θραύσης των χονδρομερών αυξάνεται όσο το μέγεθος των λεπτομερών μέσα στο μύλο μειώνεται.

Τέλος, είναι γνωστό ότι ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται στην υγρή λειοτρίβηση σε σύγκριση με την ξηρή κι αυτό διότι η παρουσία νερού στο μύλο έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη ή μείωση της συσσωμάτωσης των λεπτών τεμαχιδίων (Ozkan et al., 2009). Από την άλλη, καθώς τα λεπτά τεμαχίδια συσσωρεύονται στο σφαιρόμυλο, το ιξώδες του πολφού μεγαλώνει με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού θραύσης (Klimpel, 1982; Tangsathitkulchai, 2003). Γενικά, ο Bond (1960) έδειξε ότι σε βιομηχανική κλίμακα για τις ίδιες συνθήκες λειοτρίβησης, η απόδοση της υγρής λειοτρίβησης ήταν 1.3 φορές υψηλότερη από την ξηρή. Οι Austin et al. (1984) έδειξαν ότι η αύξηση του ρυθμού θραύσης της υγρής έναντι της ξηρής κυμαίνεται από 1.1 – 2.0 για διαφορετικά υλικά.

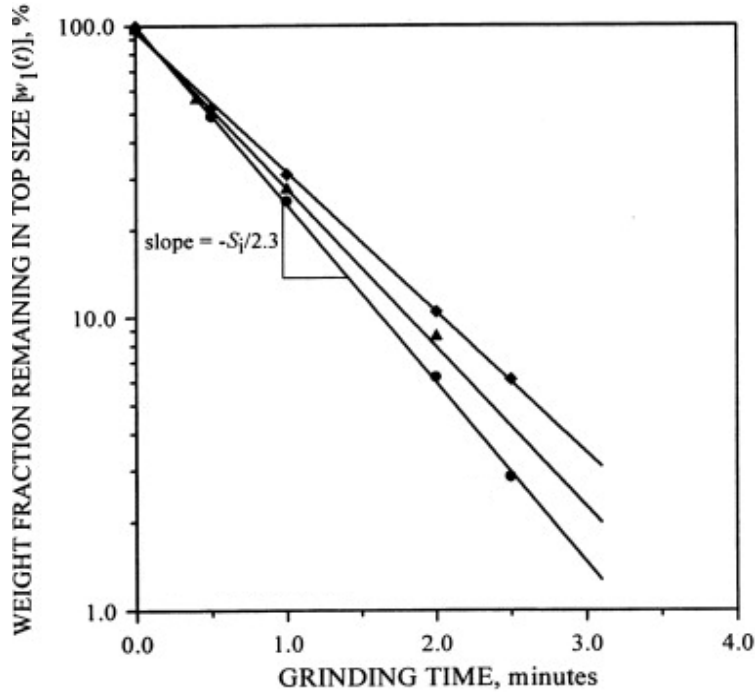
6.4.2 Μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού (PBM)

Το μοντέλο ισοζύγιου πληθυσμού αποτελεί ένα πλήρες ισοζύγιο μάζας για κάθε τάξη μεγέθους που συμμετέχει σε ένα μύλο πλήρους ανάμιξης κι έχει σκοπό την εξήγηση του φαινομένου της διαδικασίας λειοτρίβησης. Λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό θραύσης κάθε τάξης μεγέθους και τη μάζα του υλικού που παράχθηκε κάτω από το μέγεθος αυτό (Καρμάλη, 2015). Επίσης, βασίζεται στον πρώτο νόμο τάξης λειοτρίβησης και γι' αυτό πολλές φορές αναφέρεται ως 'μοντέλο πρώτης τάξης' (Napier – Munn et al, 1996). Το 'μοντέλο πρώτης τάξης' εφαρμόζεται σε κάθε δεδομένη κατάσταση λειοτρίβησης κι όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.3 ο ρυθμός θραύσης είναι ανεξάρτητος του χρόνου.

Τα προϊόντα της λειοτρίβησης αποτελούνται από ένα ευρύ φάσμα μεγεθών τεμαχιδίων από τα οποία κάποια είναι χονδρότερα κι απαιτούν περαιτέρω λειοτρίβηση. Η πιθανότητα να θραυτούν ξανά επηρεάζεται από το σχεδιασμό της μηχανής και το μέγεθος των τεμαχιδίων (Katubilwa, 2008).

Σύμφωνα με το μοντέλο, ο ρυθμός παραγωγής της τάξης μεγέθους i ισούται με το άθροισμα του ρυθμού εμφάνισης μεγέθους i που παράγεται από τη θραύση μεγαλύτερου μεγέθους j μείον το ρυθμό μετατροπής του i σε μικρότερα μεγέθη λόγω θραύσης, όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση (Austin and Bhatia, 1972):

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ i > j}}^{i-1} b_{i,j} S_j w_j(t) \quad n \geq i \geq j \geq 1 \quad (6.11)$$



Εικόνα 6.3: Μοντέλο πρώτης τάξης (Πηγή: Ozkan et. al, 2009, Τροποποιημένη).

6.4.3 Συνάρτηση θραύσης (Breakage function)

Η συνάρτηση θραύσης ορίζεται ως η μέση κατανομή μεγέθους που προκύπτει από τη θραύση ενός ενιαίου τεμαχιδίου (Kelly and Spottiswood, 1990). Χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κατανομής του μεγέθους των τεμαχιδίων που παράγονται κατά την κατάτμηση ενός υλικού.

Είναι πλέον κατανοητό, ότι η σχετική κατανομή της κάθε τάξης μεγέθους μετά από θραύση δίνει μια πλήρη περιγραφή του προϊόντος. Συνεπώς η συνάρτηση θραύσης για ένα τεμάχιο της τάξης μεγέθους j που έσπασε και παρέμεινε στη τάξη μεγέθους i ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$b_{i,j} = \frac{\text{μάζα του υλικού μεγέθους } j \text{ που έσπασε και παρέμεινε στη τάξη μεγέθους } i}{\text{μάζα του υλικού μεγέθους } j \text{ που έσπασε}} \quad (6.12)$$

Επίσης, η συνάρτηση θραύσης παρουσιάζεται με την αθροιστική της μορφή ως εξής:

$$B_{i,j} = \sum_{k=n}^i b_{k,j} \quad (6.13)$$

όπου, $b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j}$

Η συνάρτηση αυτή ορίζεται ως το αθροιστικό κλάσμα βάρους του υλικού μεγέθους j που έσπασε και το οποίο διέρχεται κάτω από το μέγεθος i , όπου $i > j$ (Austin et al., 1984).

Οι Austin και Bagga (1981), έδειξαν ότι οι τιμές του $B_{i,j}$ μπορούν να υπολογιστούν από την ανάλυση του μεγέθους των προϊόντων για ένα σύντομο χρονικό διάστημα λειοτρίβησης, χρησιμοποιώντας ως αρχική τροφοδοσία μια στενή τάξη μεγέθους τεμαχιδίων j . Η προτεινόμενη μέθοδος είναι γνωστή κι ως *BII* μέθοδος (the one size fraction *BII* method). Για να το δείξουν αυτό, χρησιμοποίησαν την ακόλουθη σχέση:

$$B_{i,j} = \frac{\log[(1 - P_i(0))/(1 - P_i(t))]}{\log[(1 - P_{j+1}(0))/(1 - P_{j+1}(t))]} \quad (6.14)$$

όπου, $P_i(t)$: είναι το κλάσμα μάζας κάτω από το μέγεθος x_i μετά από χρόνο t .

Η παραπάνω σχέση 6.14 προϋποθέτει ότι μια μικρή ποσότητα μικρότερων μεγεθών θα χρησιμοποιηθεί για να ξανασπάσει. Για το λόγο αυτό η *BII* μέθοδος εφαρμόζεται για μικρούς χρόνους λειοτρίβησης. Από έρευνες που έχουν γίνει παρατηρήθηκε ότι τα σωστά αποτελέσματα λαμβάνονται όταν ο χρόνος της θραύσης έχει επιλεγεί για να δώσει μια ποσότητα από 20 έως 30% θραυσμένου υλικού κάτω από το μέγεθος j (Austin et al., 1984).

6.5 Επίδραση μεγέθους Σφαίρας (*Effect of ball size*)

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

$$x_m = k \cdot d^A \quad (6.15a)$$

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. Η σχέση η οποία δείχνει το μέγιστο ρυθμό θραύσης (S_m) με τη διάμετρο της σφαίρας (d) είναι η ακόλουθη:

$$S_m = k' \cdot d^B \quad (6.15\beta)$$

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 $10^{-3} - 0.7 \cdot 10^{-3}$ για μαλακά μέχρι σκληρά υλικά, ενώ οι Napier – Munn et al. (1996) βρήκαν ότι η σταθερά k είναι της τάξης $0.44 \cdot 10^{-3}$. Για άλλα υλικά έχει βρεθεί ότι $k = 0.17$ για το χαλαζίτη (Καρμάλη, 2015) και $k = 0.10$ για το μάρμαρο (Τσούκαλου, 2016).

Επίσης, ο εκθέτης A της σχέσης 6.15α 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. Για το χαλαζίτη έχει βρεθεί ότι ο εκθέτης παίρνει τιμή 0.75 (Καρμάλη, 2015), ενώ για το μάρμαρο 1.00 (Τσούκαλου, 2016).

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, $d \leq 20 \text{ mm}$ 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. Τέλος, βρήκαν ότι για δοκιμές με διάμετρο σφαίρας, $d \leq 10 \text{ mm}$ σε τάλκη η σταθερά k' παίρνει τιμή 0.082 και ο

εκθέτης B παίρνει τιμή 0.89. Μια άλλη σειρά πειραμάτων έδειξε ότι για το χαλαζίτη η σταθερά k' παίρνει τιμή 0.32 και ο εκθέτης B παίρνει τιμή 0.39 (Καρμάλη, 2015). Τέλος, για το μάρμαρο βρέθηκε ότι η σταθερά k' ισούται με 0.21 και ο εκθέτης B με 0.62 (Τσούκαλου, 2016).

6.5.1 Ειδικός ρυθμός θραύσης σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών

Η διάμετρος των σφαιρών εκτός από το μέγεθος των τεμαχιδίων που παράγονται μετά τη λειοτρίβηση επηρεάζει και τον ειδικό ρυθμό θραύσης. Σύμφωνα με τη θεωρία θραύσης του Griffith (Austin et al., 1984), πολύ λεπτά τεμαχίδια είναι δύσκολο να θραυτούν με το ίδιο μέγεθος σφαιρών στο μύλο. Αυτό, υποδηλώνει ότι όσο το μέγεθος των τεμαχιδίων αυξάνεται πρέπει να αυξάνεται συνεχώς και ο ρυθμός θραύσης.

Ο Austin et al. (1984) μελέτησαν κι έδειξαν ότι ο ειδικός ρυθμός θραύσης αυξάνεται όσο αυξάνεται και το μέγεθος των τεμαχιδίων αλλά μέχρι ένα σημείο όπου γίνεται μέγιστος και στη συνέχεια μειώνεται. Ο ρυθμός θραύσης σε συνάρτηση με το μέγεθος της τροφοδοσίας του μύλου υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_i = a_T x_i^a \cdot Q_i \quad (6.16)$$

όπου,

x_i : είναι το ανώτερο μέγεθος της τάξης μεγέθους i σε mm.

a_T : είναι ο ρυθμός θραύσης στο μέγεθος $x_i = 1 \text{ mm (min}^{-1})$ και εξαρτάται από τις συνθήκες λειοτρίβησης.

a : είναι χαρακτηριστική παράμετρος που εξαρτάται από το υλικό. Η παράμετρος a είναι θετικός αριθμός και η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ 0.5 – 1.5. Αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού και είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής, του φορτίου των σφαιρών και του μεγέθους των σφαιρών.

Το Q_i είναι ένας συντελεστής διόρθωσης που εξαρτάται από το μέγεθος του υλικού τροφοδοσίας του μύλου. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στη σχέση 6.16 στα μεγαλύτερα μεγέθη τροφοδοσίας το $Q(x)$ παίρνει τιμές μικρότερες του 1 και έχουμε μη – ομαλή λειοτρίβηση διότι τα τεμαχίδια είναι πολύ μεγάλα και τα συγκεκριμένα μέσα λειοτρίβησης, δηλαδή οι σφαίρες, δεν είναι ικανά να θραύσουν

αποδοτικά τα τεμαχίδια αυτά. Εάν το μέγεθος τροφοδοσίας είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος των σφαιρών τότε $Q_i=1$ (ομαλή περιοχή λειοτριβήσης). Στη μη ομαλή περιοχή λειοτριβήσης κάθε υλικό συμπεριφέρεται έτσι ώστε να αποτελείται από ένα κλάσμα μαλακού κι ένα σκληρού υλικού (Ipek and Göktepe, 2011). Το Q_i υπολογίζεται από τη σχέση 6.17:

$$Q_i = \frac{1}{1 + (x_i/\mu)^A} \quad (6.17)$$

όπου,

μ : είναι το μέγεθος των τεμαχιδίων όταν ο συντελεστής διόρθωσης είναι 0.5

A : είναι ένα θετικός αριθμός που εξαρτάται από το υλικό κι εκφράζει πόσο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός θραύσης μετά από το μέγιστο μέγεθος ($A \geq 1$). Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του A , τόσο πιο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός θραύσης πέρα από το μέγιστο μέγεθος.

Μια άλλη θεωρία των Austin et al. (1984) δείχνει ότι ο ρυθμός θραύσης για το ίδιο υλικό μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος της σφαίρας. Η επίδραση του μεγέθους της σφαίρας εκφράζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\alpha_T = \alpha_o \left(\frac{d_o}{d} \right)^\xi \quad (6.18)$$

$$\mu = \mu_o \left(\frac{d}{d_o} \right)^\eta \quad (6.19)$$

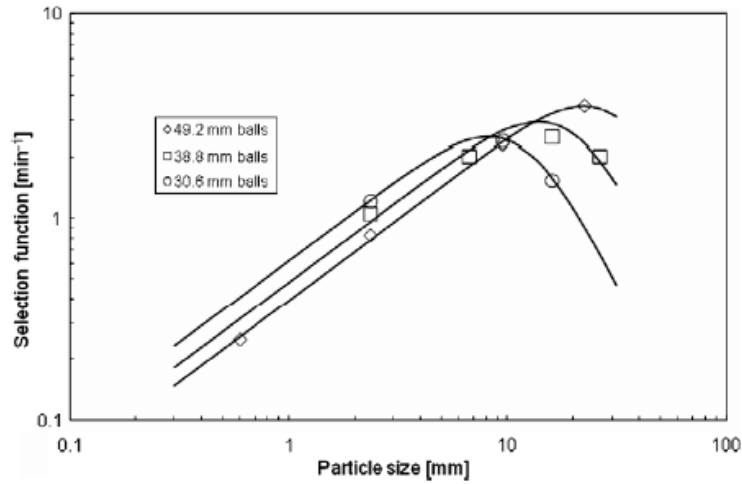
όπου,

α_o και μ_o : παράμετροι θραύσης που αντιστοιχούν στη διάμετρο σφαίρας d_o σε δοκιμές εργαστηρίου.

α και μ : οι προβλεπόμενες παράμετροι θραύσης για διάμετρο σφαίρας d .

ξ και η : σταθεροί εκθετικοί παράγοντες που αφορούν τη διάμετρο σφαίρας d στις παράμετρους θραύσης α και μ αντίστοιχα.

Οι σχέσεις 6.16, και 6.17 περιγράφουν τη σχέση του ρυθμού θραύσης σε συνάρτηση με το μέγεθος τροφοδοσίας (Εικόνα 6.5). Στην ίδια εικόνα φαίνεται και η επίδραση του μεγέθους των σφαιρών.



Εικόνα 6.5: Επίδραση μεγέθους σφαίρας στο ρυθμό θραύσης (Πηγή: Katubilwa and Moys, 2009).

Σύμφωνα με την εικόνα 6.5 τόσο ο μέγιστος ρυθμός θραύσης (S_m) όσο και το αντίστοιχο βέλτιστο μέγεθος τροφοδοσίας (x_m) εξαρτώνται από το μέγεθος των τεμαχιδίων όπου ο ρυθμός θραύσης παίρνει τη μέγιστη τιμή, η οποία διαφέρει ανάλογα με τη διάμετρο της σφαίρας.

Το βέλτιστο μέγεθος των τεμαχιδίων συνδέεται με την παράμετρο μ σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Austin et al., 1984; Katubilwa et.al., 2009):

$$x_m = \mu \left(\frac{\alpha}{\Lambda - \alpha} \right)^{1/\Lambda}, \quad \Lambda > \alpha \quad (6.20)$$

Η σχέση 6.20 δείχνει ότι το βέλτιστο μέγεθος x_m είναι ανάλογο του μ , θεωρώντας ότι οι α και το Λ παράμετρες είναι σταθερές για το ίδιο υλικό.

Με παρόμοιο τρόπο και για διαφορετική διάμετρο σφαίρας d , η τιμή του μ^* μετατρέπεται στην ακόλουθη σχέση (Austin et al., 2007):

$$\mu^* = \mu_T \left(\frac{d}{d_T} \right)^n \quad (6.21)$$

όπου, το d_T είναι η διάμετρος των σφαιρών που χρησιμοποιήθηκε στο μύλο του εργαστηρίου, ενώ d είναι η διάμετρος των σφαιρών των βιομηχανικών μύλων.

Επίσης, ο εκθέτης n της σχέσης 6.21 έχει προσδιοριστεί από πολλούς ερευνητές. Πιο συγκεκριμένα, οι Kelsall et al. (1968) έδειξαν ότι η τιμή του n κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2 κι εξαρτάται από το υλικό. Οι Austin et al. (1984) και οι Napier – Munn et al. (1996) ανέφεραν ότι η τιμή 2 είναι η καλύτερη επιλογή όσον

αφορά την τιμή του n . Για δοκιμές χαλαζία έχει αποδειχθεί ότι η τιμή του n κυμαίνεται από 1 – 2 (Yildirim et al., 1999; Austin et al., 2007). Τέλος, οι Katubilwa and Moys (2009) βρήκαν ότι για δοκιμές άνθρακα της Νότιας Αμερικής το $n = 2$.

6.6 Πειραματική Μεθοδολογία

6.6.1 Θραύση

Η πρώτη πειραματική διαδικασία που έγινε ήταν η θραύση, η οποία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η θραύση περιλαμβάνει την πρωτογενή θραύση του λατερίτη (Εύβοιας) σε σιαγωνινό σπαστήριο.

Αρχικά, το υλικό θραύστηκε στο σιαγωνινό σπαστήριο (Εικόνα 6.6) στο μέγιστο άνοιγμα αποκένωσης (θέση 5) και η θραύση του υλικού γινόταν σταδιακά. Αφού θραύστηκε όλη η ποσότητα του υλικού, στη συνέχεια το υλικό κοσκινίστηκε σε κόσκινο με άνοιγμα βρόγχου 3.35 mm. Το παραμένον υλικό στο κόσκινο κρατήθηκε και τοποθετήθηκε πάλι στο σιαγωνινό σπαστήριο για θραύση σε μικρότερο άνοιγμα αποκένωσης (θέση 1), ώστε όλο το υλικό να διέρχεται από το κόσκινο 3.35 mm.



Εικόνα 6.6: Εργαστηριακός Σιαγωνινός Σπαστήρας.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε υγρή κοσκίνιση σε κόσκινο 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, όπως αναφέρεται σε επόμενο κεφάλαιο, για τη λήψη των κοκκομετρικών κλασμάτων.

Γενικά, ελήφθησαν τα 10 αρχικά κοκκομετρικά κλάσματα, τα οποία έχουν προαναφερθεί και φαίνονται στον πίνακα 4.1 του κεφαλαίου 4.

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

Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τα εξής 3 στενά κοκκομετρικά κλάσματα:

- $-3.35+1.70\text{ mm}$ (LE21)
- $-1.18+0.600\text{ mm}$ (LE22)
- $-0.300+0.150\text{ mm}$ (LE23)

Όλες οι επόμενες πειραματικές διαδικασίες καθώς και η επεξεργασία αφορούν τα 3 παραπάνω κοκκομετρικά κλάσματα με κωδικούς LE21, LE22 και LE23.

6.6.2 Λειοτρίβηση

Για τη λειοτρίβηση χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός σφαιρόμυλος του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης που φαίνεται στην Εικόνα 6.7. Ο συγκεκριμένος σφαιρόμυλος περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του, με τη βοήθεια ενός συστήματος περιστρεφόμενων ράουλων.



Εικόνα 6.7: Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος με το σύστημα περιστροφής.

Κάθε κοκκομετρικό κλάσμα λειοτριβήθηκε εν υγρώ στο σφαιρόμυλο για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας. Όπως έχει προαναφερθεί στη θεωρία, οι συνθήκες λειοτρίβησης που επιλέχθηκαν ήταν ήπιες ώστε να επιτευχθεί εκλεκτική λειοτρίβηση του λατερίτη. Συγκεκριμένα, οι χρόνοι που επιλέχθηκαν για τη λειοτρίβηση του υλικού ήταν 0.25 min, 0.5 min, 1 min και 2 min. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο χρόνος 0 αντιστοιχεί στο αρχικό δείγμα τροφοδοσίας του σφαιρόμυλου. Οι διάμετροι των σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 12.7 mm, 6.5

mm, ενώ η τρίτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε χωρίς σφαίρες ($d=0$), δηλαδή έγινε αυτολειοτρίβηση του υλικού.

Η ποσότητα του υλικού καθώς και των σφαιρών που τοποθετήθηκαν στο σφαιρόμυλο για κάθε δοκιμή υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις (6.22) και (6.23) αντίστοιχα.

$$M = 0.6 \cdot f_c \cdot \text{πυκνότητα υλικού} \cdot \text{όγκος μύλου} \quad (6.22)$$

$$m_b = 0.6 \cdot J \cdot \text{πυκνότητα σφαιρών} \cdot \text{όγκος μύλου} \quad (6.23)$$

Τα χαρακτηριστικά της λειοτρίβησης (μύλος, σφαίρες, υλικό) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 6.1.

Πιο συγκεκριμένα, για το σφαιρόμυλο ο όγκος υπολογίστηκε από την ακόλουθη σχέση 6.24:

$$V = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot L \quad (6.24)$$

Η συχνότητα περιστροφής (N) και η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής (N_c) υπολογίστηκαν από τις σχέσεις 6.25 και 6.24, αντίστοιχα.

$$N = 70\% N_c \quad (6.25)$$

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (6.26)$$

Η αναλογία στερεών και νερού για κάθε δοκιμή ήταν 60% και 40%, αντίστοιχα. Επομένως, η ποσότητα του νερού ήταν 400.4 g.

Τέλος, 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 6.1: Χαρακτηριστικά Λειοτριβήσης.

Σφαιρόμυλος	Εσωτερική διάμετρος, D (cm)	20.4		
	Μήκος, L (cm)	16.6		
	Όγκος, V (cm ³)	5.423		
	Συχνότητα περιστροφής, (rpm)	66		
	Κρίσιμη συχνότητα περιστροφής, N_c (rpm)	93.7		
Σφαίρες	Διάμετρος, d (mm)	12.7	6.5	-
	Αριθμός	457	1480	-
	Μάζα (kg)	3,827.8	3,828.5	-
	Πυκνότητα(g/cm ³)		7.64	
	Πορώδες (%)		40	
	Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών, J (%)		15	
	Πυκνότητα, ρ_b (g/mL)		1.64	
Υλικό	Συντελεστής πλήρωσης υλικού στο σφαιρόμυλο, f_c (%)		3	
	Συντελεστής πλήρωσης κενών, (%)		50	
	Πορώδες υλικού (%)		40	

6.6.3 Κοσκίνιση

Αρχικά, το τελικό προϊόν κοσκινίστηκε σε κόσκινο 75 μm εν υγρώ για το διαχωρισμό του ψιλού υλικού. Η διαδικασία της υγρής κοσκίνισης γίνεται ως εξής:

Υγρή κοσκίνιση: Το υλικό τοποθετείται επί του συγκεκριμένου κόσκινου (75 μm) και με την προσθήκη νερού ξεπλένεται το υλικό $-75\mu\text{m}$. Αντίθετα, το υλικό $+75\mu\text{m}$ τοποθετήθηκε στον εργαστηριακό φούρνο για ξήρανση. Ο πολφός με μέγεθος κόκκων $-75 \mu\text{m}$ τοποθετήθηκε σε ένα δοχείο όπου παρέμεινε περίπου για 2 – 3 ημέρες μέχρι να καθιζάνει και στη συνέχεια τοποθετήθηκε κι αυτός στον εργαστηριακό φούρνο για ξήρανση. Τέλος, το βάρος του υλικού $-75 \mu\text{m}$ προστέθηκε στο αντίστοιχο υλικό $-75 \mu\text{m}$ της ξηρής κοσκίνισης.

Ξηρή κοσκίνιση: Η ξηρή κοσκίνιση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια εργαστηριακού δονητή κοσκίνων τύπου RETSCH VE 1000. Σύμφωνα με τη διαδικασία το $+75 \mu\text{m}$ υλικό που προέκυψε από την υγρή κοσκίνιση μετά από ξήρανση τοποθετήθηκε στη μηχανή κοσκίνισης. Γενικότερα, η διαδικασία της ξηρής κοσκίνισης πραγματοποιήθηκε κι αυτή για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα. Ο διαχωρισμός των υλικών σε κλάσματα διαφόρων μεγεθών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας κόσκινα, των οποίων το άνοιγμα βρόγχου μειωνόταν από πάνω προς τα κάτω με λόγο $\sqrt{2}$.

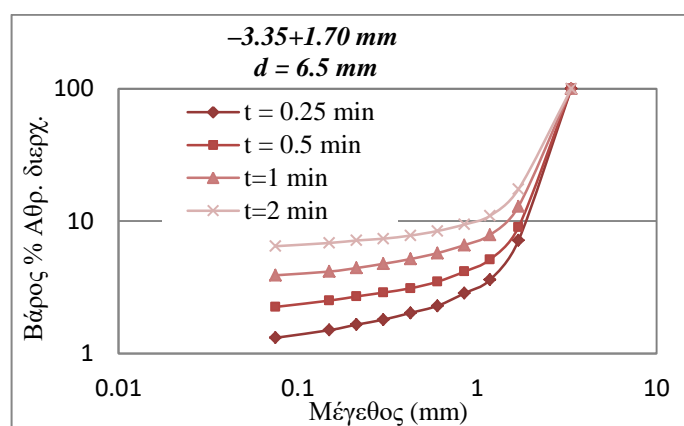
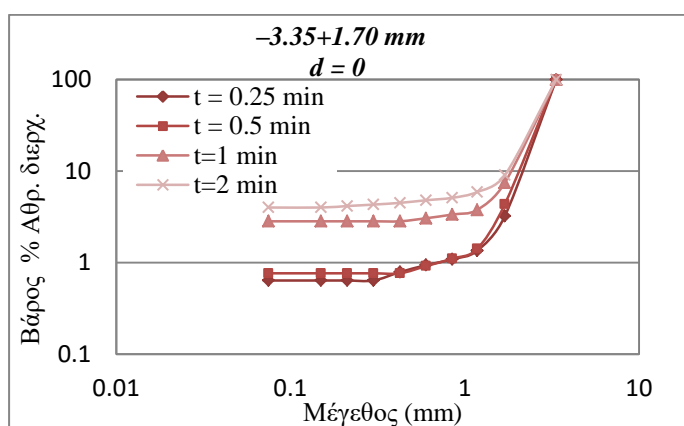
Για παράδειγμα, τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν για την κοσκίνιση του πρώτου κοκκομετρικού κλάσματος ($-3.35+1.70$ mm) ήταν τα εξής: 1.70 mm, 1.18 mm, 0.850 mm, 0.600 mm, 0.425, 0.300 mm, 0.212 mm, 0.150 mm, 0.075 mm. Τα κόσκινα τοποθετούνταν στη συσκευή κοσκίνισης για 7 min και η δόνηση ρυθμιζόταν στα 0.80 mm. Μετά το τέλος της κοσκίνισης, μετρήθηκε το βάρος του υλικού το οποίο παρέμενε σε κάθε κόσκινο σε ζυγαριά ακριβείας. Το συνολικό άθροισμα των βαρών που παρέμειναν στα κόσκινα δε θα πρέπει να διαφέρει από την αρχική τροφοδοσία της κοσκίνισης. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τα άλλα δυο κοκκομετρικά κλάσματα ($-1.18+0.600$ mm και $-0.300+0.150$ mm).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

7.1 Τροφοδοσία – $3.35 + 1.70 \text{ mm}$

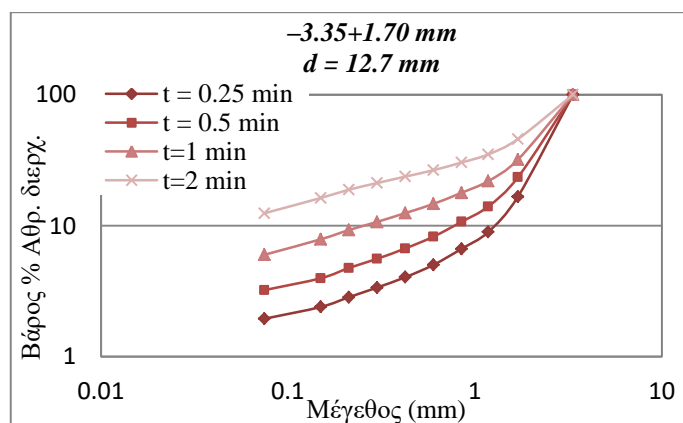
7.1.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και της διαμέτρου σφαιρών

Αρχικά, από τους πίνακες Α1 – Α3 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα 7.1 – 7.3 που παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετική διάμετρο σφαιρών.



Διάγραμμα 7.1: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης για το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70 \text{ mm}$ (δοκιμή αυτολειοτρίβησης, $d=0$).

Διάγραμμα 7.2: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης για το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70 \text{ mm}$ (διάμετρος σφαιρών $d=6.5 \text{ mm}$).

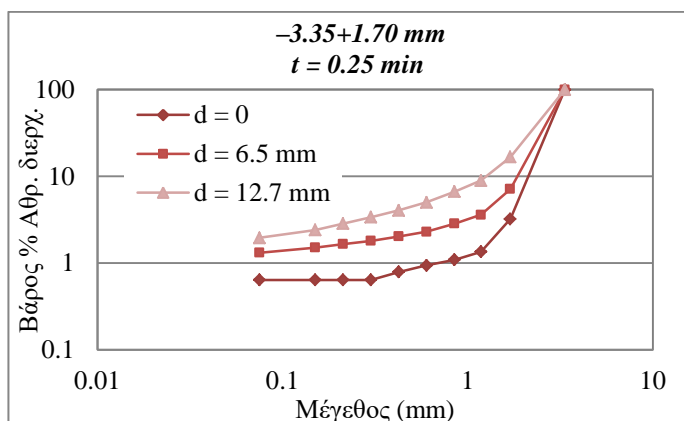


Διάγραμμα 7.3: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης για το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70 \text{ mm}$ (διάμετρος σφαιρών $d=12.7 \text{ mm}$).

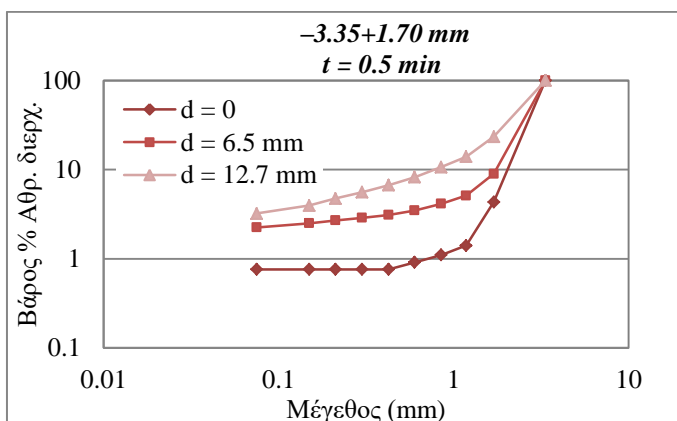
Από τα διαγράμματα 7.1 – 7.3 παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Συνεπώς, οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη (αριστερά). Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο με χρήση της μεγαλύτερης διαμέτρου σφαιρών 12.7 mm . Αντίθετα, η αυτολειοτρίβηση πρακτικά

δεν οδηγεί σε μείωση του μεγέθους του προϊόντος, τουλάχιστον για τους συγκεκριμένους χρόνους που επιλέχθηκαν.

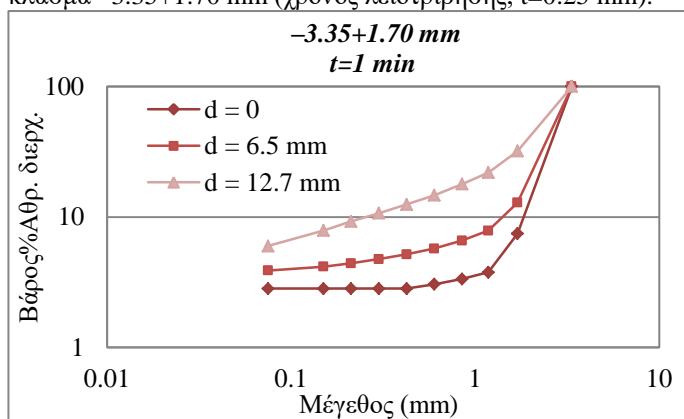
Στη συνέχεια, προέκυψαν τα διαγράμματα 7.4 – 7.7 τα οποία παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης και διάμετρο σφαιρών.



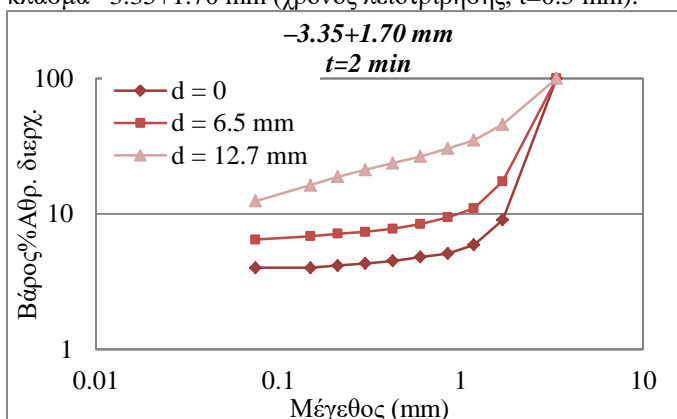
Διάγραμμα 7.4: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα -3.35+1.70 mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=0.25$ min).



Διάγραμμα 7.5: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα -3.35+1.70 mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=0.5$ min).



Διάγραμμα 7.6: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα -3.35+1.70 mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=1$ min).



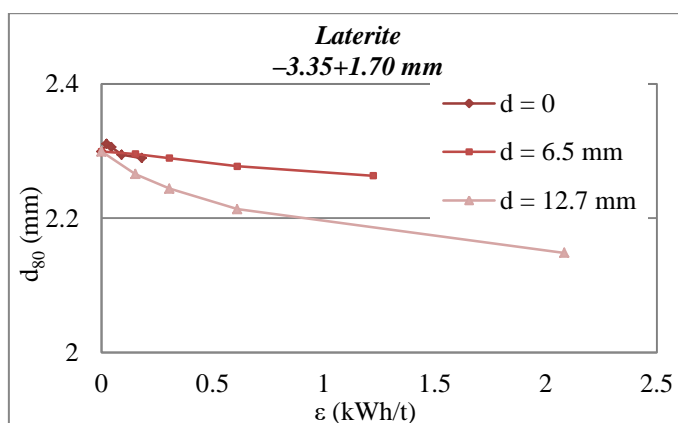
Διάγραμμα 7.7: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα -3.35+1.70 mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=2$ min).

Στα διαγράμματα 7.4 – 7.7 παρατηρείται ότι το προϊόν του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm συμπεριφέρεται διαφορετικά με τη χρήση διαφορετικών διαμέτρων σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm). Για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης η αύξηση της διαμέτρου των σφαιρών οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν. Αυτό φαίνεται πιο έντονα σε μεγαλύτερους χρόνους λειοτρίβησης, δηλαδή για $t=2$ min και για διάμετρο σφαίρας, $d=12.7$ mm το υλικό λειοτριβείται πιο αποδοτικά.

7.1.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}

Από τα παραπάνω διαγράμματα 7.4 – 7.7 υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια (ϵ) και το μέγεθος από το οποίο διέρχεται το 80% (d_{80}) του προϊόντος. Η ειδική ενέργεια (ϵ) υπολογίστηκε σύμφωνα με τις σχέσεις (6.5) και (6.6) που αναφέρονται στο θεωρητικό μέρος.

Στον πίνακα Α4 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ειδικής ενέργειας για κάθε χρόνο λειοτριβήσης και διάμετρο σφαιρών από τα οποία προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα του μεγέθους d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια (ϵ) που καταναλώθηκε. Υπενθυμίζεται ότι στους εργαστηριακούς μύλους η ενέργεια κατανάλωσης είναι ανάλογη του χρόνου λειοτριβήσης και εξαρτάται από την ισχύ P του μύλου.



Διάγραμμα 7.8: Μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70$ mm, για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

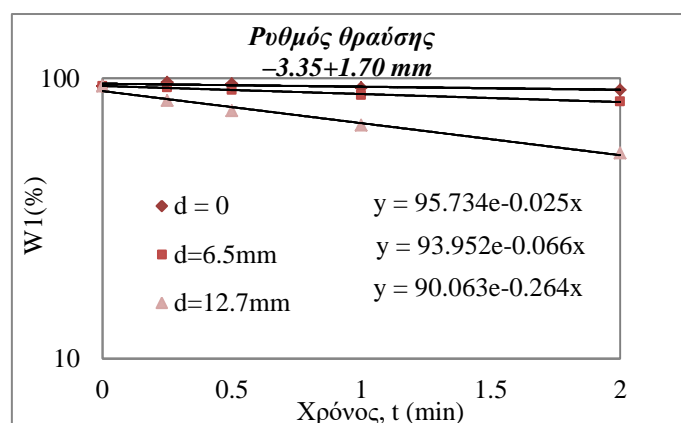
Στο διάγραμμα 7.8 παρατηρείται ότι α) προφανώς όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια κατανάλωσης τόσο μειώνεται και το μέγεθος d_{80} του προϊόντος, β) η μεγαλύτερη διάμετρος σφαιρών οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν, αλλά με μεγαλύτερη κατανάλωση ειδικής ενέργειας και γ) η αυτολειοτριβήση δεν οδηγεί πρακτικά σε μείωση του μεγέθους προϊόντος για τους χρόνους (ειδικές ενέργειες) που επιλέχθηκαν.

7.1.3 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του χρόνου λειοτριβήσης

Αρχικά, μελετήθηκε ο ρυθμός θραύσης με τον οποίο θραύεται το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70$ mm για τις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία, εάν ο ρυθμός θραύσης

θεωρηθεί σταθερός και ανεξάρτητος του χρόνου λειοτρίβησης τότε μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής του βάρους (%) που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους I σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης (σχέση 6.10), σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα.

Από τη μελέτη του ρυθμού του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm προέκυψε ο πίνακας Α5 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α και στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα 7.9 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) προϊόντος που έχει παραμείνει στην αντίστοιχη τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης, για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).



Διάγραμμα 7.9: Ρυθμός θραύσης σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm, για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

Από το παραπάνω διάγραμμα 7.9 κι από την κλίση κάθε ευθείας υπολογίστηκαν οι ρυθμοί θραύσης για το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών που χρησιμοποιήθηκε και παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

d (mm)	Si (min^{-1})
0	0.025
6.5	0.066
12.7	0.264

Από τον παραπάνω πίνακα 7.1 παρατηρείται ότι για το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70$ mm όσο αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών, αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης της αντίστοιχης τάξης μεγέθους. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι 0.264 min^{-1} για $d = 12.7$ mm.

7.1.4 Χημική ανάλυση προϊόντων

Η χημική ανάλυση των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του XRF. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 7.2 – 7.5. Στους πίνακες αυτούς προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα επιλεγμένων οξειδίων με βάση την επίδραση των σφαιρών και του χρόνου λειοτρίβησης για τα τρία μεγέθη προϊόντων ($+1.7$ mm, $-1.7+0.075$ mm και -0.075 mm).

Πίνακας 7.2: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+1.70	96.78	92.87	83.33	45.0	46.34	45.59	0.74	0.82	0.73	36.25	35.50	35.69
-1.70+0.075	2.59	5.82	14.72	40.96	23.48	41.95	2.43	0.20	1.04	48.34	53.74	41.69
-0.075	0.64	1.31	1.95	30.11	30.40	32.53	1.55	1.29	1.38	34.93	34.64	34.32
	100	100	100	44.8	44.80	44.8	0.79	0.79	0.79	36.55	36.55	36.55

Πίνακας 7.3: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+1.70	95.65	91.00	76.57	44.72	43.19	49.52	0.73	0.78	0.86	35.22	35.08	31.04
-1.70+0.075	3.59	6.75	20.20	49.51	70.64	28.52	2.34	0.71	1.10	72.32	57.35	57.91
-0.075	0.76	2.25	3.22	32.55	32.28	34.7	1.52	1.35	1.35	34.75	33.65	33.6
	100	100	100	44.80	44.80	44.80	0.79	0.79	0.79	36.55	36.55	36.55

Πίνακας 7.4: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

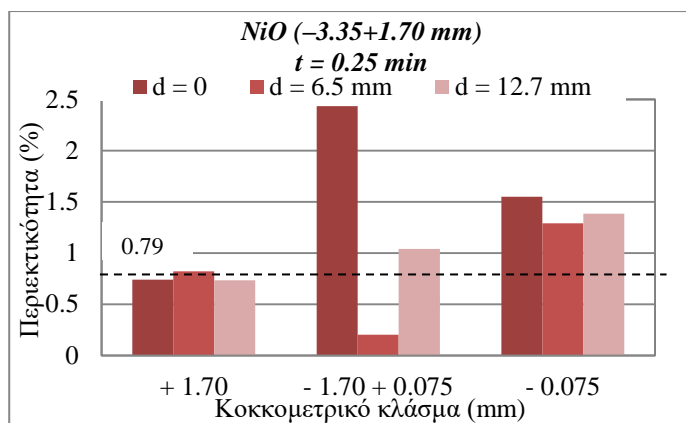
$t=1$ min	Παραμένον			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+1.70	92.54	87.11	68.03	44.63	43.86	45.89	0.73	0.76	0.70	35.02	36.04	34.34
-1.70+0.075	4.64	9.00	25.97	55.72	58.75	44.90	1.52	0.78	0.77	68.08	42.02	41.85
-0.075	2.83	3.90	6.00	32.46	33.62	32.06	1.56	1.38	1.13	34.85	35.34	38.68
	100	100	100	44.80	44.80	44.80	0.79	0.79	0.79	36.55	36.55	36.55

Πίνακας 7.5: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

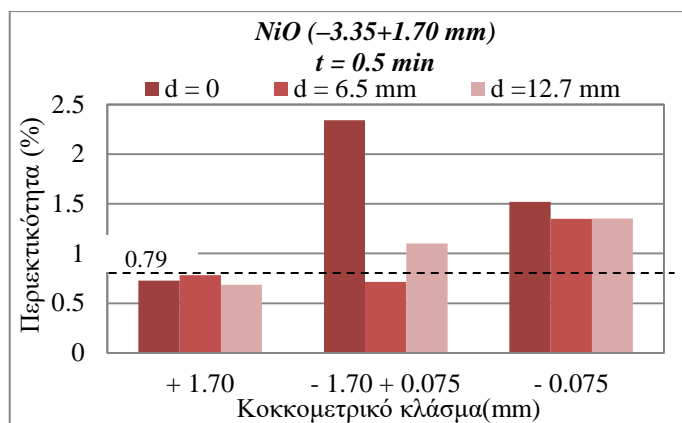
$t=2$ min	Παραμένον			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO_2			NiO			Fe_2O_3		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+1.70	90.97	82.60	54.11	45.02	44.07	45.76	0.72	0.76	0.69	33.55	36.92	34.96
-1.70+0.075	5.03	10.94	33.43	46.60	68.04	47.02	1.47	0.77	0.80	92.46	33.93	39.21
-0.075	4.00	6.46	12.46	33.44	35.23	34.68	1.53	1.4	1.21	34.55	36.29	36.33
	100	100	100	44.80	44.80	44.80	0.79	0.79	0.79	36.55	36.55	36.55

Από τους πίνακες 7.2 – 7.5 παρατηρείται ότι α) για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό κλάσμα (+1.70 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (-1.70+0.075 mm) και του λεπτού (-0.075 mm) κλάσματος, β) προφανώς, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο το βάρος του χονδρού κλάσματος μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού κλάσματος, γ) γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η περιεκτικότητα του NiO όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος, με εξαίρεση στις δοκιμές αυτολειοτρίβησης, όπου η περιεκτικότητα του NiO παρουσιάζει μέγιστη τιμή κυρίως στο ενδιάμεσο κλάσμα, δ) όσον αφορά την περιεκτικότητα του SiO_2 είναι μεγαλύτερη στο ενδιάμεσο κλάσμα (-1.70+0.075 mm) και μικρότερη στο λεπτό κλάσμα (-0.075 mm), ε) η περιεκτικότητα του Fe_2O_3 γενικά είναι μικρότερη στο λεπτό κλάσμα (-0.075 mm) για μικρούς χρόνους λειοτρίβησης, με εξαίρεση τις δοκιμές για $d=12.7$ mm καθώς και τις δοκιμές για $t=2$ min, στ) η μεγαλύτερη περιεκτικότητα των παραπάνω οξειδίων (SiO_2 , NiO και Fe_2O_3) παρατηρείται στο ενδιάμεσο κλάσμα (-1.70+0.075 mm). Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του NiO είναι 2.43% για $t = 0.25$ min και δοκιμές χωρίς σφαίρες, του SiO_2 είναι 70.64% για $t=0.5$ min και $d=6.5$ mm και του Fe_2O_3 είναι 92.46% για $t = 2$ min και δοκιμές χωρίς σφαίρες (αυτολειοτρίβηση).

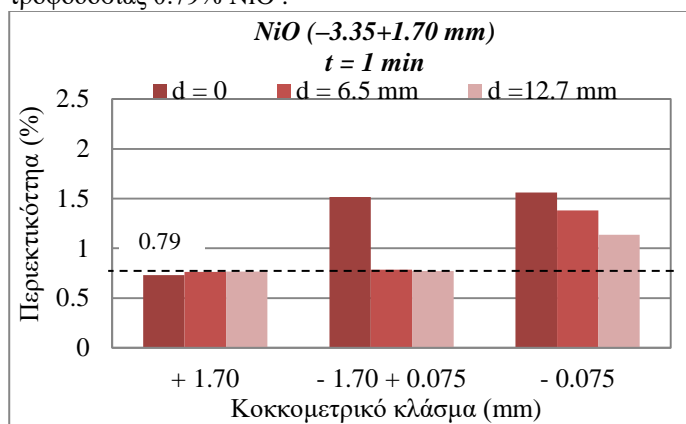
Στην παρούσα διατριβή ασχοληθήκαμε με την περαιτέρω μελέτη του NiO , έτσι με τη βοήθεια των παραπάνω πινάκων 7.2 – 7.5 προέκυψαν τα διαγράμματα 7.10 – 7.13 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+1.70 mm, -1.70+0.075 mm και -0.075 mm).



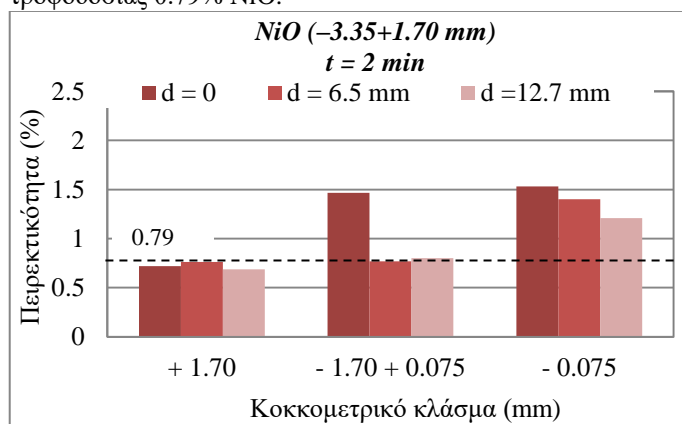
Διάγραμμα 7.10: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70\text{mm}$ σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.25\text{ min}$. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.79% NiO.



Διάγραμμα 7.11: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70\text{mm}$ σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.5\text{ min}$. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.79% NiO.



Διάγραμμα 7.12: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70\text{mm}$ σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=1\text{ min}$. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.79% NiO.



Διάγραμμα 7.13: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70\text{mm}$ σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=2\text{ min}$. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.79% NiO.

Στα διαγράμματα 7.10 – 7.13 είναι εμφανής η αύξηση της αρχικής περιεκτικότητας σε NiO (0.79%) για τη συγκεκριμένη τροφοδοσία στα λεπτά κλάσματα του προϊόντος (-0.075 mm). Αντίθετα, στο χονδρό κλάσμα η περιεκτικότητα σε NiO παραμένει σχεδόν ίση ή μικρότερη της αρχικής τροφοδοσίας. Αξιοσημείωτη είναι, επίσης, η υψηλή περιεκτικότητα στο ενδιάμεσο κλάσμα $-1.70+0.075\text{ mm}$ (1.47 – 2.43%) στην αυτολειοτρίβηση. Εκτός από την ανάλυση των οξειδίων μελετήθηκε και η κατανομή τους η οποία υπολογίστηκε από τους πίνακες 7.2 – 7.5. Τα αποτελέσματα της κατανομής των οξειδίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 7.6 – 7.9.

Πίνακας 7.6: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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 (%)			SiO_2		NiO		Fe_2O_3				
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+1.70	96.78	92.87	83.33	97.20	96.06	84.8	90.76	96.36	77.21	95.96	90.2	81.38
-1.70+0.075	2.59	5.82	14.72	2.37	3.05	13.78	7.98	1.49	19.37	3.43	8.56	16.79
-0.075	0.64	1.31	1.95	0.43	0.89	1.41	1.26	2.15	3.41	0.61	1.25	1.83
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 7.7: Κατανομή οξειδίων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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 (%)			SiO_2		NiO		Fe_2O_3				
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+1.70	95.65	91.00	76.57	95.48	87.74	84.64	87.9	90.05	66.30	92.17	87.34	65.03
-1.70+0.075	3.59	6.75	20.2	3.97	10.64	12.86	10.64	6.10	28.18	7.10	10.59	32.00
-0.075	0.76	2.25	3.22	0.55	1.62	2.50	1.45	3.84	5.51	0.72	2.07	2.96
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 7.8: Κατανομή οξειδίων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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 (%)			SiO_2		NiO		Fe_2O_3				
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+1.70	92.54	87.11	68.03	92.18	85.28	69.68	85.5	84.26	66.03	88.66	85.89	63.92
-1.70+0.075	4.64	9.00	25.97	5.77	11.80	26.03	8.91	8.93	25.35	8.64	10.34	29.73
-0.075	2.83	3.90	6.00	2.05	2.93	4.30	5.59	6.81	8.63	2.70	3.77	6.35
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

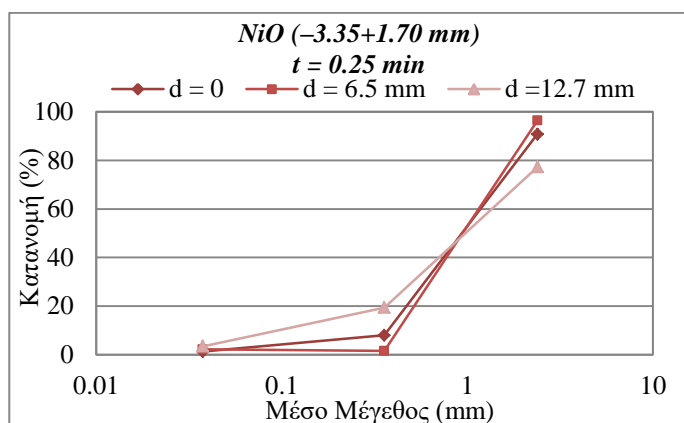
Πίνακας 7.9: Κατανομή οξειδίων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO_2		NiO		Fe_2O_3				
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+1.70	90.97	82.60	54.11	91.78	81.25	55.26	82.91	79.78	46.99	83.49	83.43	51.75
-1.70+0.075	5.03	10.94	33.43	5.23	13.66	35.09	9.34	8.76	33.95	12.72	10.15	35.86
-0.075	4.00	6.46	12.46	2.99	5.08	9.64	7.75	11.45	19.06	3.78	6.42	12.38
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

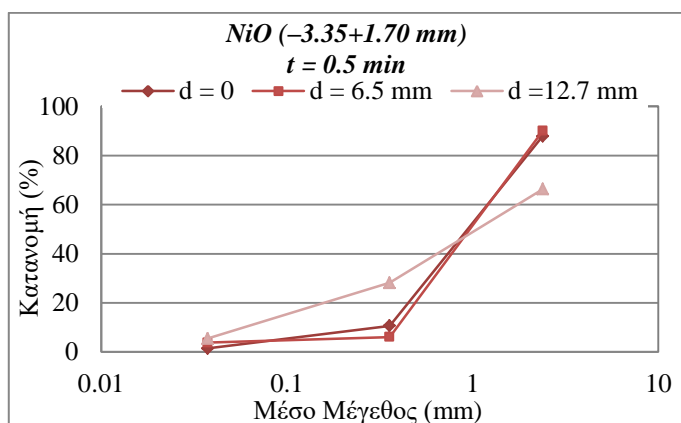
Από τους πίνακες 7.6 – 7.9 παρατηρείται ότι α) για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό κλάσμα (+1.70 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (-1.70+0.075 mm) και του λεπτού (-0.075 mm) κλάσματος, β) προφανώς, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο το βάρος του χονδρού κλάσματος μειώνεται και αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του

ενδιάμεσου και του λεπτού κλάσματος, γ) φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται η κατανομή των οξειδίων όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος δ) γενικότερα, η κατανομή (%) όλων των οξειδίων είναι πολύ μεγαλύτερη στο χονδρό κλάσμα (+1.70 mm). Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη κατανομή του NiO είναι 90.76%, του SiO₂ είναι 97.2% και του Fe₂O₃ είναι 95.96%.

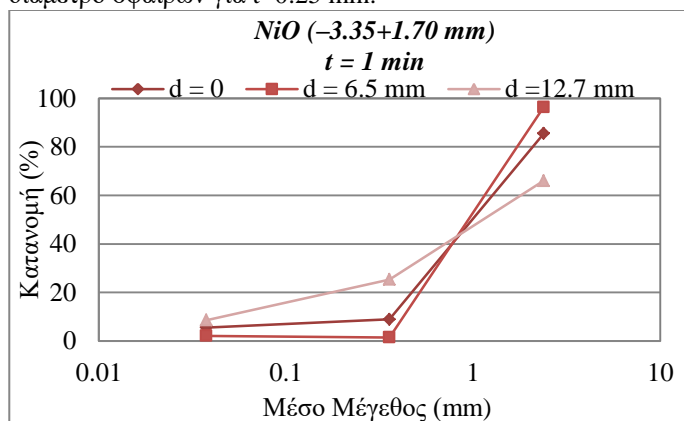
Επίσης, από τους πίνακες 7.6 – 7.9 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 7.14 -7.17 τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+1.70 mm, -1.70+0.075 mm και -0.075 mm).



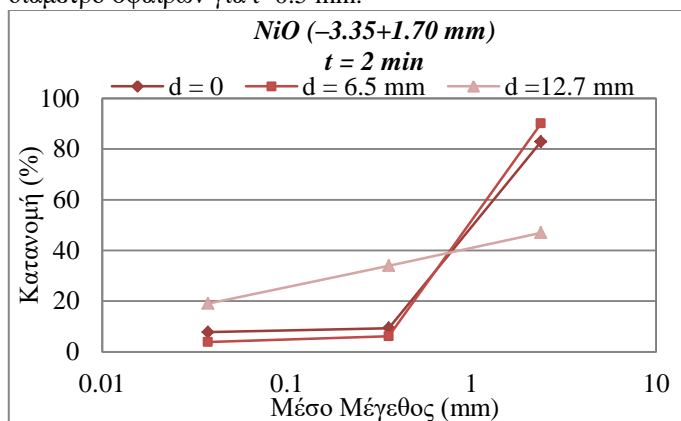
Διάγραμμα 7.14: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=0.25 min.



Διάγραμμα 7.15: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=0.5 min.



Διάγραμμα 7.16: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=1 min.



Διάγραμμα 7.17: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=2 min.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.14 – 7.17 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η κατανομή NiO στο λεπτό κλάσμα αυξάνεται από 3.41% σε 19.06%, ενώ στο χονδρό κλάσμα μειώνεται από 77.21% σε 46.99%, 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 (+1.70 mm, -1.70+0.075 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, η κατανομή NiO αυξάνεται από 2.15% σε 3.84%, για χρόνους λειοτρίβησης από 0.25 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 κλάσμα, μειώθηκε από 90.05% σε 84.26%.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες 7.10 – 7.13 της περιεκτικότητας (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων (-1.70 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 7.10: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -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	Αθροιστικώς						Χημική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	44.8	44.8	44.8	0.79	0.79	0.79	36.55	36.55	36.55
- 1.70	3.22	7.13	16.67	38.93	24.76	40.84	2.27	0.40	1.08	48.53	50.22	40.82
- 0.075	0.63	1.31	1.95	30.59	30.4	32.46	1.57	1.29	1.38	35.48	34.64	34.24

Πίνακας 7.11: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -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	Αθροιστικώς						Χημική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	44.8	44.8	44.8	0.79	0.79	0.79	36.55	36.55	36.55
-1.70	4.35	9	23.43	46.52	61.05	29.37	2.20	0.87	1.14	65.72	51.43	54.56
-0.075	0.76	2.25	3.23	32.37	32.28	34.67	1.51	1.35	1.35	34.56	33.65	33.58

Πίνακας 7.12: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

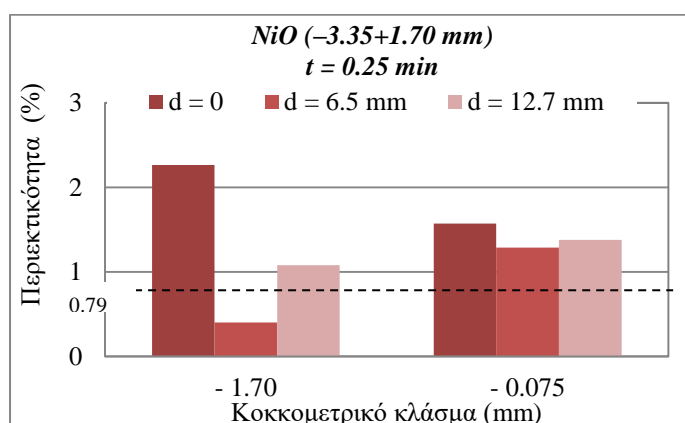
t=1 min	Αθροιστικώς						Χημική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	44.8	44.8	44.8	0.79	0.79	0.79	36.55	36.55	36.55
-1.70	7.46	12.89	31.97	46.97	51.15	42.49	1.54	0.96	0.84	55.56	40.00	41.26
-0.075	2.82	3.9	6.00	32.58	33.62	32.08	1.57	1.38	1.14	34.97	35.34	38.7

Πίνακας 7.13: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

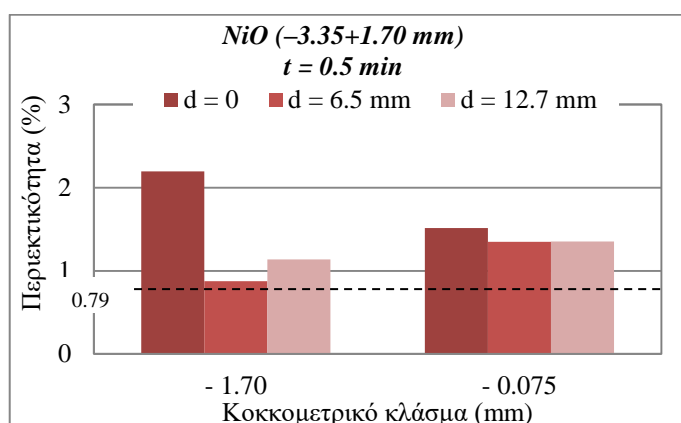
$t=2$ min	Αθροιστικώς						Χημική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO_2			NiO			Fe_2O_3		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	44.8	44.80	44.8	0.79	0.79	0.79	36.55	36.55	36.55
-1.70	9.03	17.4	45.89	40.77	48.27	43.67	1.50	0.92	0.91	66.81	34.8	38.42
-0.075	4.00	6.46	12.46	33.44	35.23	34.67	1.53	1.40	1.21	34.55	36.29	36.32

Από τους πίνακες 7.10 – 7.13 παρατηρείται ότι γενικά, η περιεκτικότητα (%) των συγκεκριμένων οξειδίων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm είναι μεγαλύτερη στο κλάσμα -1.70 mm. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του NiO είναι 2.27% για $t=0.25$ min και $d=0$, του SiO_2 είναι 78.18% για $t=1$ min και $d=6.5$ mm και του Fe_2O_3 είναι 66.81% για $t=2$ min και $d=0$.

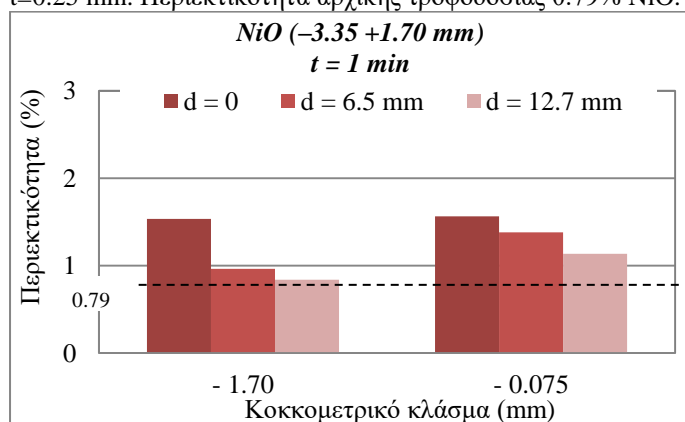
Με τη βοήθεια των παραπάνω πινάκων 7.10 – 7.13 προέκυψαν τα διαγράμματα 7.18 – 7.21 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων για αρχική τροφοδοσία $-3.35+1.70$ mm.



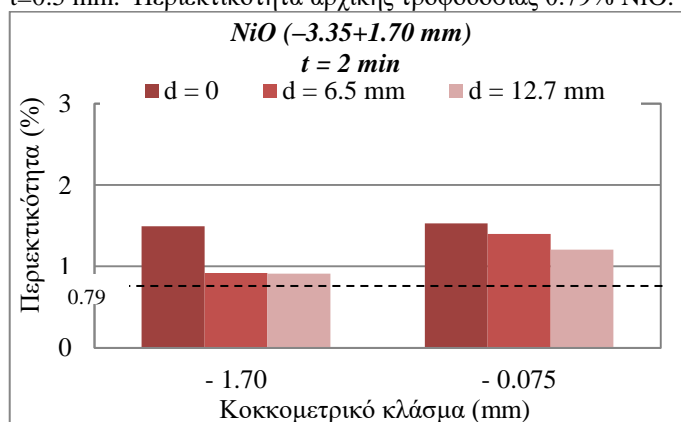
Διάγραμμα 7.18: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.25$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.79% NiO.



Διάγραμμα 7.19: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.5$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.79% NiO.



Διάγραμμα 7.20: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=1$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.79% NiO.



Διάγραμμα 7.21: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=2$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.79% NiO.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.18 – 7.21 παρατηρείται ότι, το NiO είναι πιο πλούσιο στο κλάσμα -1.70 mm για μικρούς χρόνους λειοτρίβησης ($t=0.25\text{ min}$ και $t=0.5\text{ min}$), ενώ όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης ($t=1\text{ min}$ και $t=2\text{ min}$) γίνεται πιο πλούσιο το λεπτό κλάσμα -0.075 mm . Για παράδειγμα, η τιμή της περιεκτικότητας NiO για $t=0.25$ και $d=0\text{ mm}$ είναι 2.27% στο κλάσμα -1.70 mm και 1.57% στο κλάσμα -0.075 mm . Αντίθετα, για $t=2\text{ min}$ και $d=0$ η τιμή της περιεκτικότητας NiO στο κλάσμα -1.70 mm είναι 1.50% και στο λεπτό κλάσμα -0.075 mm είναι 1.53%. Επίσης, όσο μικραίνει η διάμετρος των σφαιρών, για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης, τόσο το κλάσμα -1.70 mm όσο και το λεπτό κλάσμα -0.075 mm εμπλουτίζεται περισσότερο σε NiO.

Ακόμα, από τους παραπάνω πίνακες 7.10 – 7.13 υπολογίστηκε η κατανομή (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70\text{ mm}$, η οποία φαίνεται στους πίνακες 7.14 – 7.17.

Πίνακας 7.14: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70\text{ mm}$ για χρόνο $t=0.25\text{ min}$ και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5\text{ mm}$ και $d=12.7\text{ mm}$).

$t=0.25\text{ min}$	Αθροιστικώς			Κατανομή (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO_2			NiO			Fe_2O_3		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-1.70	3.22	7.13	16.67	2.80	3.94	15.20	9.24	3.64	22.78	4.04	9.80	18.62
-0.075	0.63	1.31	1.95	0.43	0.89	1.41	1.26	2.15	3.41	0.61	1.25	1.83

Πίνακας 7.15: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70\text{ mm}$ για χρόνο $t=0.5\text{ min}$ και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5\text{ mm}$ και $d=12.7\text{ mm}$).

$t=0.5\text{ min}$	Αθροιστικώς			Κατανομή (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO_2			NiO			Fe_2O_3		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-1.70	4.35	9.00	23.43	4.52	12.26	15.36	12.09	9.95	33.69	7.82	12.66	34.97
-0.075	0.76	2.25	3.23	0.55	1.62	2.50	1.45	3.84	5.51	0.72	2.07	2.96

Πίνακας 7.16: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70\text{ mm}$ για χρόνο $t=1\text{ min}$ και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5\text{ mm}$ και $d=12.7\text{ mm}$).

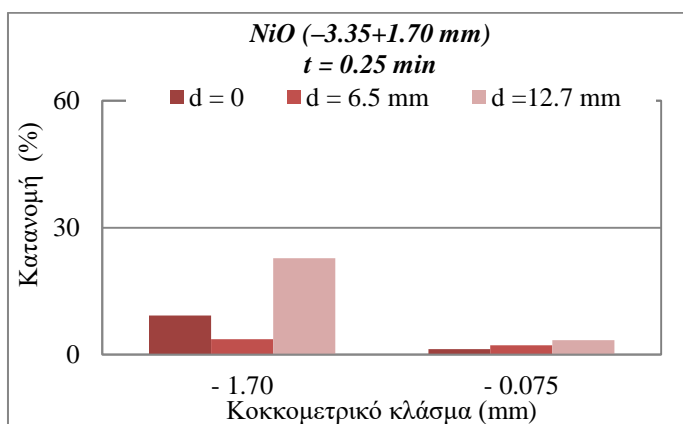
$t=1\text{ min}$	Αθροιστικώς			Κατανομή (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO_2			NiO			Fe_2O_3		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-1.70	7.46	12.89	31.97	7.82	14.72	30.32	14.5	15.74	33.97	11.34	14.11	36.08
-0.075	2.82	3.90	6.00	2.05	2.93	4.30	5.59	6.81	8.63	2.7	3.77	6.35

Πίνακας 7.17: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

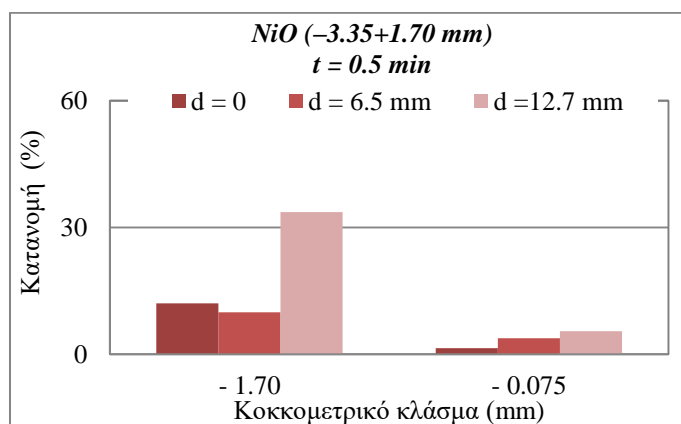
$t=2$ min	Αθροιστικώς			Κατανομή (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO_2			NiO			Fe_2O_3		
Μέγεθος (mm)	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7	0	6.5	12.7
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-1.70	9.03	17.4	45.89	8.22	18.75	44.73	17.09	20.22	53.01	16.51	16.57	48.25
-0.075	4.00	6.46	12.46	2.99	5.08	9.64	7.75	11.45	19.06	3.78	6.42	12.38

Από τους πίνακες 7.14 – 7.17 παρατηρείται ότι α) υπάρχει μια τάση να μειώνεται η κατανομή των οξειδίων όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος, β) η μεγαλύτερη κατανομή για όλα τα οξείδια παρατηρείται στο κλάσμα -1.70 mm για το μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min και τις μεγαλύτερες σφαίρες διαμέτρου 12.7 mm. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερη κατανομή του NiO είναι 53.01%, του SiO_2 είναι 44.73% και του Fe_2O_3 είναι 48.25%.

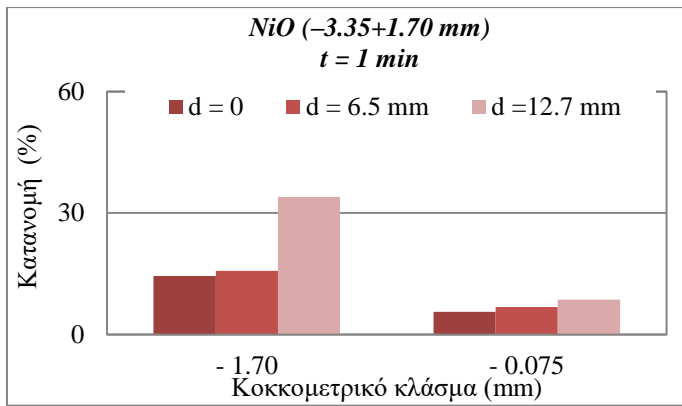
Από τους πίνακες 7.14 – 7.17 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 7.22 – 7.25 τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για τα μεγέθη προϊόντων (-1.70 mm και -0.075 mm).



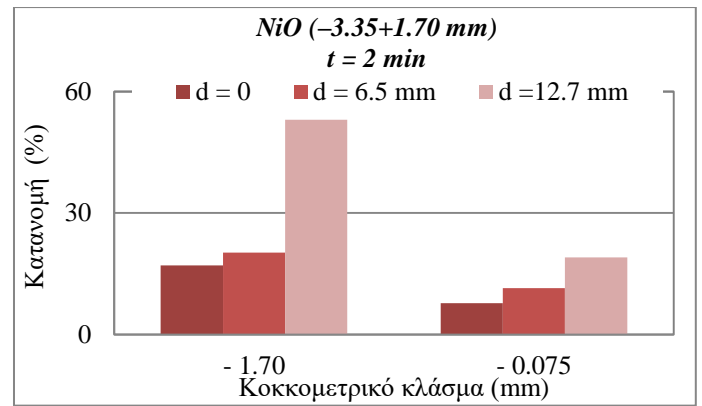
Διάγραμμα 7.22: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.25$ min.



Διάγραμμα 7.23: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.5$ min.



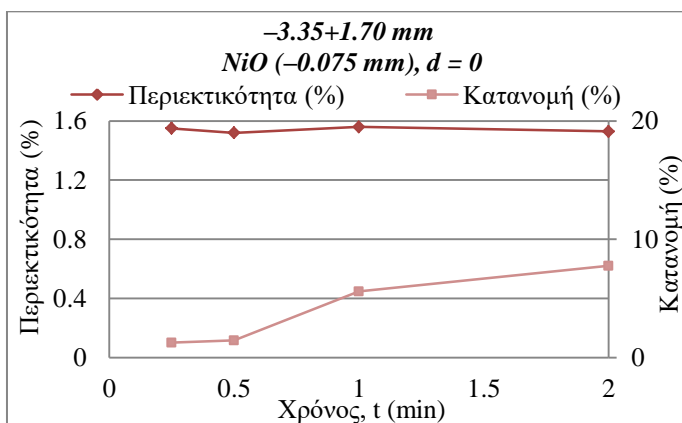
Διάγραμμα 7.24: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=1$ min.



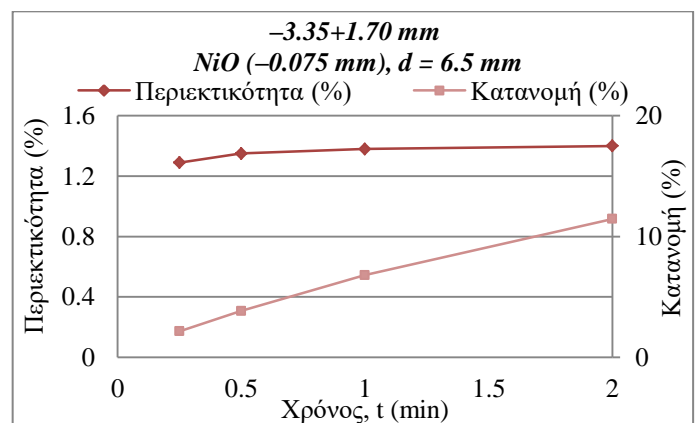
Διάγραμμα 7.25: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=2$ min.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.22 – 7.25 παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται η κατανομή (%) NiO στο κλάσμα -1.70 mm αλλά και στο λεπτό κλάσμα -0.075 mm. Όπως παρατηρήθηκε κι από τους παραπάνω πίνακες 7.14 – 7.17 αλλά φαίνεται και στα διαγράμματα 7.22 – 7.25 η μεγαλύτερη κατανομή του NiO παρατηρείται στο κλάσμα -1.70 mm για $d=12.7$ mm και $t=2$ min και είναι 53.01%.

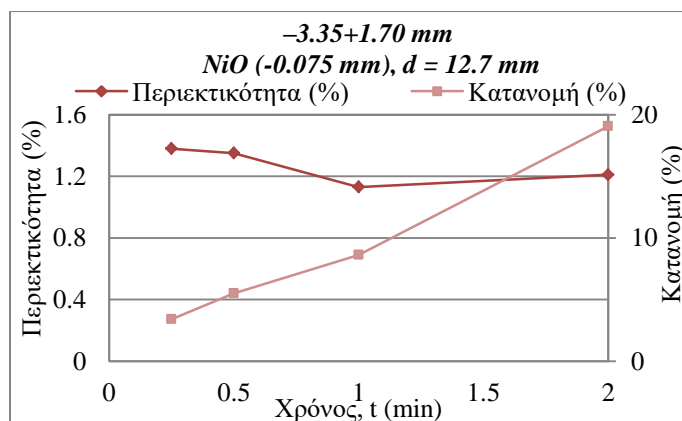
Τέλος, κατά κύριο λόγο, ο εμπλουτισμός του NiO γίνεται στο λεπτό κλάσμα γεγονός που επιβεβαιώνεται κι από τη θεωρία. Για το λόγο αυτό, καταλήξαμε στα παρακάτω διπλά διαγράμματα περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) NiO του λεπτού κλάσματος (-0.075 mm).



Διάγραμμα 7.26: 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 7.27: 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 7.28: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και d=12.7 mm (Τροφοδοσία: -3.35+1.70 mm).

Στα διαγράμματα 7.26 – 7.28 παρατηρείται ότι α) γενικά, για το λεπτό κλάσμα -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 μειώνεται ελάχιστα η περιεκτικότητα (%) του NiO, ενώ αντίθετα αυξάνεται αισθητά η κατανομή του, β) 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 1.53% που αντιστοιχεί σε κατανομή 7.75%, ενώ για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης και d=12.7 mm η περιεκτικότητα του ίδιου στοιχείου είναι 1.21% που αντιστοιχεί σε κατανομή 19.06%.

7.1.5 Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων

Από τις ημιποσοτικές αναλύσεις του XRD μελετήθηκε η επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών και του χρόνου λειοτρίβησης σε συγκεκριμένες ορυκτολογικές φάσεις. Τα ορυκτά που επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση είναι τα εξής:

- Χαλαζίας (Quartz) με χημικό τύπο: SiO_2
- Νιμίτης ή νικελιούχος χλωρίτης (Nimite) με χημικό τύπο: $(\text{Ni,Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
- Χρωμίτης (Chromite) με χημικό τύπο: $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{NiO}$.

Ο νιμίτης και ο χρωμίτης επιλέχθηκαν γιατί είναι φορείς νικελίου, ενώ ο χαλαζίας γιατί αποτελεί κύριο ορυκτό και απόρριμμα της διαδικασίας εμπλουτισμού του νικελίου.

Επίσης, από τα διπλά διαγράμματα 7.26 – 7.28 (υποκεφάλαιο 7.1.4) παρατηρήθηκε ότι για $d=12.7$ mm και $t=2$ min το NiO εμπλουτίζεται περισσότερο, για το λόγο αυτό στους παρακάτω πίνακες 7.18 και 7.19 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα (%) και η κατανομή (%) των ορυκτολογικών φάσεων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Πίνακας 7.18: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Παραμένον						Ορυκτολογική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-1.70	90.97	82.60	54.11	37.00	33.00	39.30	10.00	9.70	11.30	3.10	3.00	0.00
-1.70+0.075	5.03	10.94	33.43	15.45	58.74	32.62	6.66	8.42	7.26	21.31	10.37	10.40
-0.075	4.00	6.46	12.46	15.60	20.40	22.70	14.20	16.50	11.70	2.70	6.00	4.20
	100	100	100	35.00	35.00	35.00	10.00	10.00	10.00	4.00	4.00	4.00

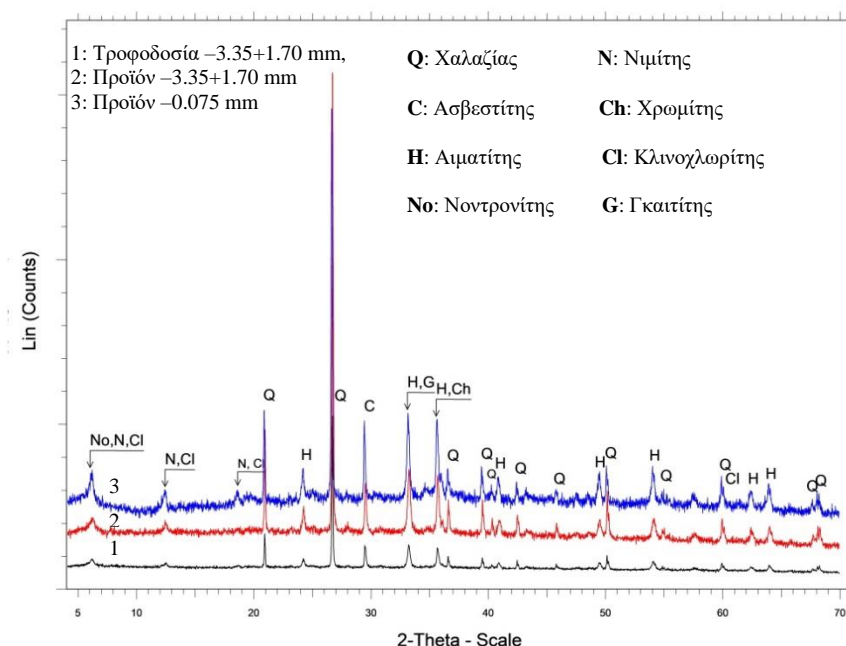
Πίνακας 7.19: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Παραμένον						Κατανομή					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-1.70	90.97	82.60	54.11	96.16	77.88	60.76	90.96	8.12	61.15	70.49	61.95	0.00
-1.70+0.075	5.03	10.94	33.43	2.05	18.35	31.16	3.35	9.21	24.28	26.80	28.35	86.92
-0.075	4.00	6.46	12.46	1.78	3.77	8.08	5.68	10.67	14.58	2.70	9.70	13.08
	100	100	100	99.99	100	100	99.99	100	100	99.99	100	100

Από τον πίνακα 7.18 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα (%) του χαλαζία για $t=2$ min είναι μεγαλύτερη στο χονδρό κλάσμα και μικρότερη στο ενδιάμεσο και στο λεπτό κλάσμα, με εξαίρεση τη δοκιμή για $d=6.5$ mm όπου η περιεκτικότητα του χαλαζία φτάνει το 58.74%. Αντίθετα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του νιμίτη παρατηρείται στο λεπτό κλάσμα και συγκεκριμένα στις δοκιμές με διάμετρο σφαιρών 6.5 mm και φτάνει το 16.50%, ενώ του χρωμίτη παρατηρείται στο ενδιάμεσο κλάσμα για $d=0$ και τιμή 21.31%. Όσον αφορά την κατανομή (%), από τον πίνακα 7.19, παρατηρείται ότι για τα συγκεκριμένα ορυκτά έχει μια τάση να μειώνεται όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος.

Οι αντίστοιχοι πίνακες για τις υπόλοιπες δοκιμές καθώς και οι πίνακες της περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) των ορυκτολογικών αναλύσεων των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α (Πίνακες Α6. – Α19).

Τέλος, παρουσιάζονται τα ακτινοδιαγράμματα της τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm και του λεπτού προϊόντος (-0.075 mm).



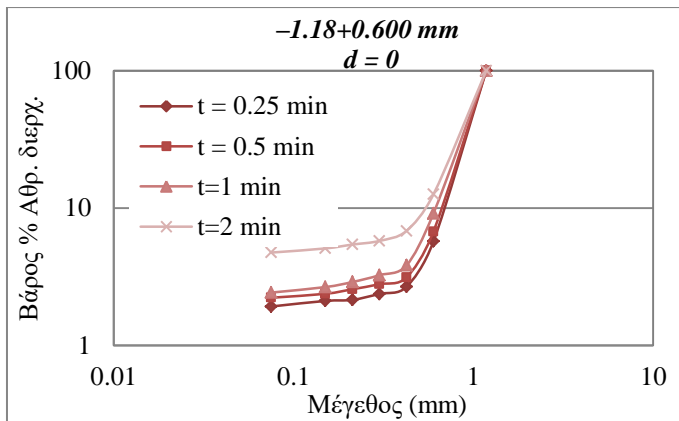
Διάγραμμα 7.29: Ορυκτολογική ανάλυση του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm, του προϊόντος $-3.35+1.70$ mm και του προϊόντος -0.075 mm, Τροφοδοσία: $-3.35+1.70$ mm. Συνθήκες λειοτρίβησης: $t=2$ min, $d=12.7$ mm.

Από το διάγραμμα 7.29 παρατηρείται ότι οι κορυφές του χαλαζία είναι μεγαλύτερες για την τροφοδοσία $-3.35+1.70$ mm καθώς και για το προϊόν $-3.35+1.70$ mm. ενώ στο λεπτό προϊόν -0.075 mm οι κορυφές του νοντρονίτη, νιμίτη, χρωμίτη και κλινοχλωρίτη είναι μεγαλύτερες. Γεγονός που επιβεβαιώθηκε κι από τους παραπάνω πίνακες 7.18 και 7.19.

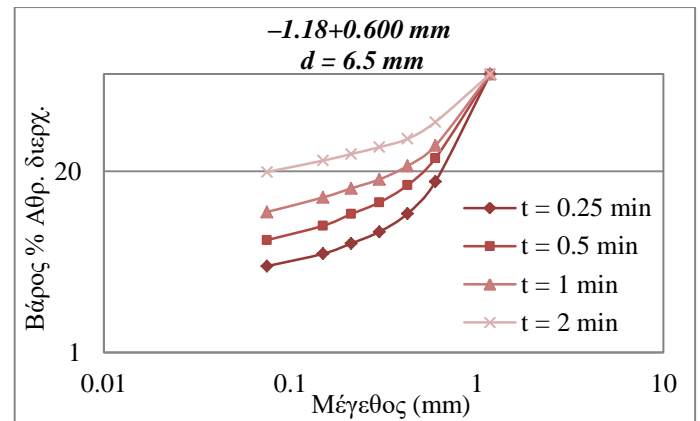
7.2 Τροφοδοσία – $1.18 + 0.600$ mm

7.2.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και της διαμέτρου σφαιρών

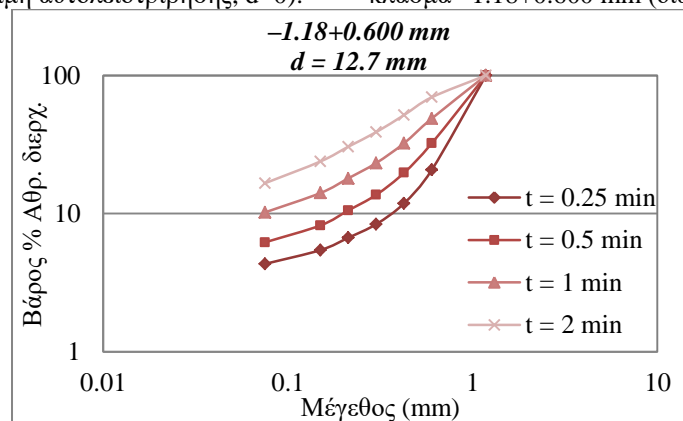
Από τους πίνακες B1 – B3 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα 7.30 – 7.32 που παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετική διάμετρο σφαιρών.



Διάγραμμα 7.30: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβίσης για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600\text{ mm}$ (δοκιμή αυτολειοτριβίσης, $d=0$).



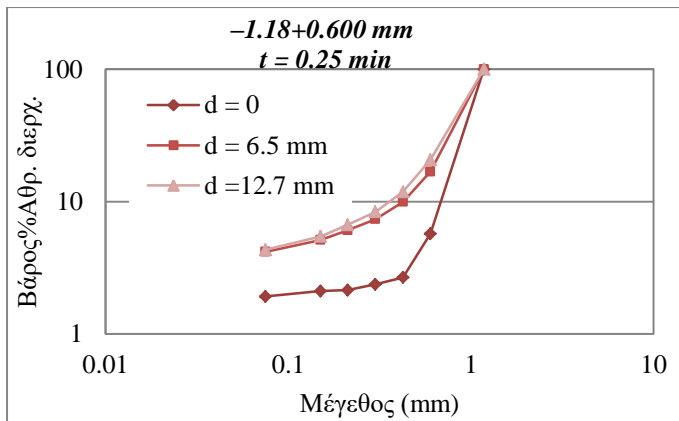
Διάγραμμα 7.31: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβίσης για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600\text{ mm}$ (διάμετρος σφαιρών $d=6.5\text{ mm}$).



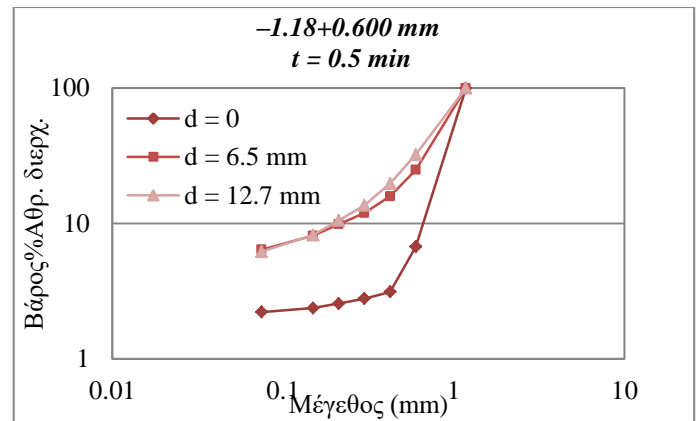
Διάγραμμα 7.32: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβίσης για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600\text{ mm}$ (διάμετρος σφαιρών $d=12.7\text{ mm}$).

Από τα διαγράμματα 7.30 – 7.32 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτριβίσης τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Συνεπώς, οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη (αριστερά). Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο με χρήση της μεγαλύτερης διαμέτρου σφαιρών 12.7 mm . Αντίθετα, η αυτολειοτριβίση πρακτικά δεν οδηγεί σε μείωση του μεγέθους του υλικού, με εξαίρεση το χρόνο λειοτριβίσης, $t=2\text{ min}$.

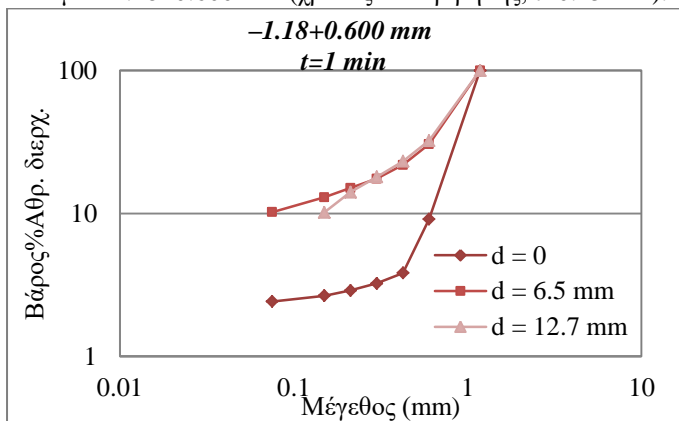
Στη συνέχεια, προέκυψαν τα διαγράμματα 7.35 – 7.38 τα οποία παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτριβίσης και διάμετρο σφαιρών.



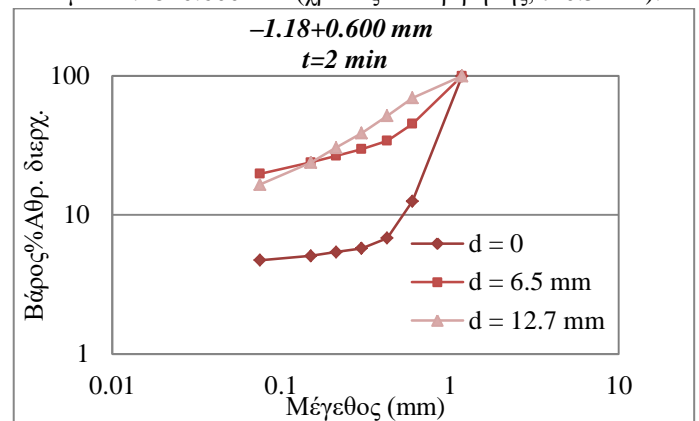
Διάγραμμα 7.35: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600$ mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=0.25$ min).



Διάγραμμα 7.36: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600$ mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=0.5$ min).



Διάγραμμα 7.37: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600$ mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=1$ min).



Διάγραμμα 7.38: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600$ mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=2$ min).

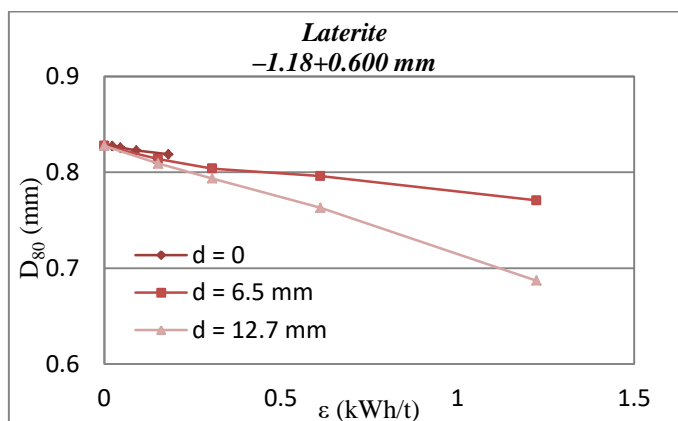
Στα διαγράμματα 7.36 – 7.38 παρατηρείται ότι το προϊόν του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm συμπεριφέρεται διαφορετικά στη χρησιμοποίηση διαφορετικών διαμέτρων σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm). Για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης η αύξηση της διαμέτρου των σφαιρών οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν. Αυτό φαίνεται πιο έντονα σε μεγαλύτερους χρόνους λειοτρίβησης, δηλαδή για $t=2$ min και για διάμετρο σφαίρας $d=12.7$ mm, το προϊόν λειοτριβείται πιο αποδοτικά.

7.2.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}

Από τα παραπάνω διαγράμματα 7.36 – 7.38 υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια (ϵ) και το μέγεθος όπου διέρχεται το 80% του υλικού (d_{80}).

Στον πίνακα B4 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ειδικής ενέργειας για κάθε χρόνο λειοτρίβησης και διάμετρο σφαιρών από όπου

προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα του μεγέθους d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια (ε) που καταναλώθηκε.



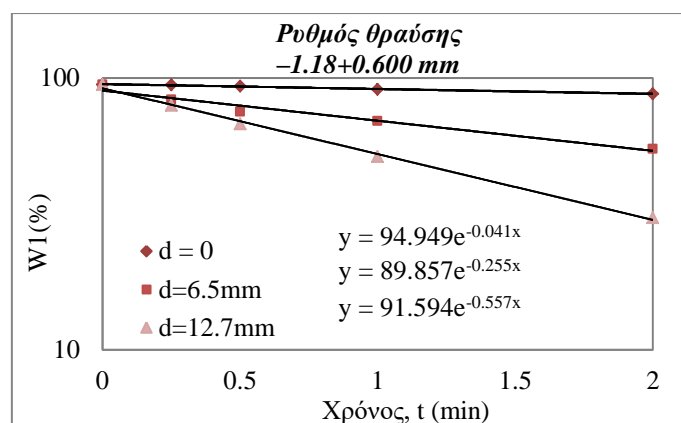
Διάγραμμα 7.39: Μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

Στο διάγραμμα 7.39 παρατηρείται ότι α) προφανώς όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια κατανάλωσης τόσο μειώνεται και το μέγεθος d_{80} του προϊόντος, β) η μεγαλύτερη διάμετρο σφαιρών οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν, αλλά με μεγαλύτερη κατανάλωση ειδικής ενέργειας και γ) η αυτολειοτριβήδη δεν οδηγεί πρακτικά σε μείωση του μεγέθους προϊόντος για τους χρόνους (ειδικές ενέργειες) που επιλέχθηκαν. Το ίδιο παρατηρήθηκε και στην προηγούμενη τροφοδοσία $-3.35+1.70$ mm.

7.2.3 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του χρόνου λειοτριβήσης

Ο ρυθμός θραύσης με τον οποίο θραύεται το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600$ mm μελετήθηκε όπως και το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70$ mm του υποκεφαλαίου 7.1.4.

Αρχικά, από τη μελέτη του ρυθμού του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm προέκυψε ο πίνακας B5 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β και στη συνέχεια παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 7.40 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) προϊόντος που έχει παραμείνει στην αντίστοιχη τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης.



Διάγραμμα 7.40: Ρυθμός θραύσης σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5 \text{ mm}$, $d=12.7 \text{ mm}$).

Από το παραπάνω διάγραμμα 7.40 κι από την κλίση κάθε ευθείας υπολογίστηκαν οι ρυθμοί θραύσης για το κοκκομετρικό κλάσμα -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών που χρησιμοποιήθηκε και παρουσιάζονται στον πίνακα 7.20.

Πίνακας 7.20: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

$d \text{ (mm)}$	$Si \text{ (min}^{-1}\text{)}$
0	0.041
6.5	0.255
12.7	0.557

Από τον παραπάνω πίνακα 7.20 παρατηρείται ότι για το κοκκομετρικό κλάσμα -1.18+0.600 mm όσο αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών, αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης της αντίστοιχης τάξης μεγέθους. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι 0.557 min^{-1} για $d=12.7 \text{ mm}$.

7.2.4 Χημική ανάλυση προϊόντων

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18 +0.600 mm φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 7.21 – 7.24. Στους πίνακες αυτούς προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα επιλεγμένων οξειδίων με βάση την επίδραση των σφαιρών και του χρόνου λειοτρίβησης για τα τρία μεγέθη των προϊόντων (+0.600, -0.600+0.075 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 7.21: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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						Χημική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	94.29	83.18	79.32	35.35	36.68	33.67	0.81	0.78	0.78	45.50	43.07	46.47
-0.600+0.075	3.80	12.66	16.37	7.81	18.77	37.51	0.41	0.77	0.80	41.44	62.18	41.62
-0.075	1.92	4.17	4.32	31.54	32.39	32.17	1.60	1.47	1.39	37.71	36.10	35.36
	100.01	100.00	100.01	34.23	34.23	34.23	0.81	0.81	0.81	45.20	45.20	45.20

Πίνακας 7.22: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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						Χημική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	93.26	75.16	67.77	34.07	33.30	33.65	0.81	0.72	0.76	45.77	47.28	47.46
-0.600+0.075	4.52	18.43	26.04	38.38	38.42	35.92	0.44	0.96	0.82	36.84	40.04	41.63
-0.075	2.22	6.41	6.18	32.70	33.16	33.53	1.52	1.42	1.31	37.91	35.59	35.38
	100.00	100.00	99.99	34.23	34.23	34.23	0.81	0.81	0.81	45.20	45.20	45.20

Πίνακας 7.23: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Παραμένον						Χημική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	90.86	69.42	51.29	34.80	35.67	34.54	0.82	0.71	0.72	44.42	45.09	47.43
-0.600+0.075	6.72	20.38	38.52	27.79	29.28	34.03	0.38	0.86	0.78	59.17	50.85	44.50
-0.075	2.42	10.21	10.19	30.82	34.36	33.46	1.57	1.34	1.36	35.52	34.63	36.57
	100.00	100.00	100.00	34.23	34.23	34.23	0.81	0.81	0.81	45.20	45.20	45.20

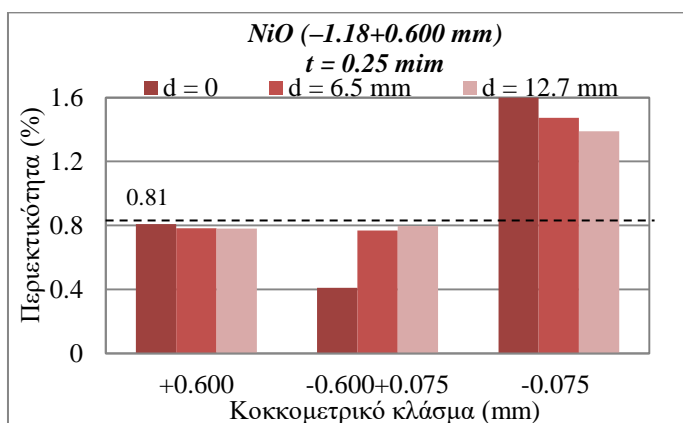
Πίνακας 7.24: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Παραμένον						Χημική Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	87.42	54.80	30.58	34.39	34.98	32.87	0.82	0.66	0.65	45.26	47.26	51.21
-0.600+0.075	7.84	25.42	52.85	34.29	32.08	35.17	0.21	0.72	0.74	49.48	48.48	44.38
-0.075	4.73	19.79	16.57	31.23	34.94	33.78	1.59	1.33	1.30	36.87	35.25	36.69
	99.99	100.00	100.00	34.23	34.23	34.23	0.81	0.81	0.81	45.20	45.20	45.20

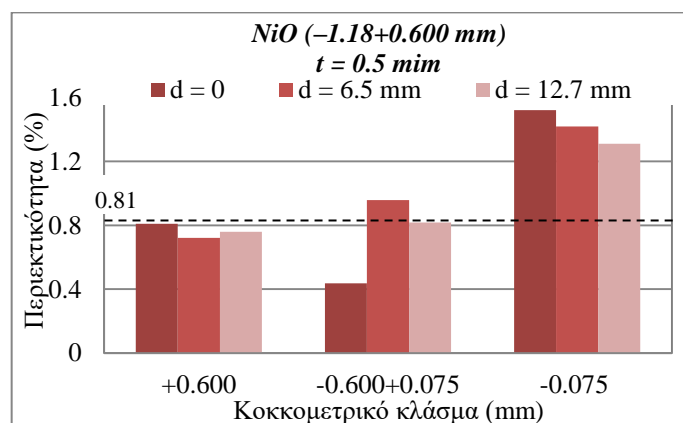
Στους πίνακες 7.21 – 7.34 παρατηρείται ότι α) για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό κλάσμα (+0.600 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (–0.600+0.075 mm) και του λεπτού (–0.075 mm).β) προφανώς, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο το βάρος του χονδρού κλάσματος μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και

του λεπτού κλάσματος, γ) γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η περιεκτικότητα του NiO όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος, με εξαίρεση στις δοκιμές αυτολειοτριβήσης όπου η περιεκτικότητα του NiO μειώνεται στο ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.600+0.075$ mm) και στη συνέχεια αυξάνεται στο λεπτό κλάσμα (-0.075 mm), δ) όσον αφορά την περιεκτικότητα του SiO₂ είναι μεγαλύτερη στο χονδρό κλάσμα ($+0.600$ mm), με εξαίρεση τις δοκιμές με τη μεγαλύτερη διάμετρο σφαιρών ($d = 12.7$ mm) όπου η μεγαλύτερη περιεκτικότητα εμφανίζεται στο ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.600+0.075$ mm), ε) η περιεκτικότητα του Fe₂O₃ είναι μεγαλύτερη στο χονδρό κλάσμα ($+0.600$ mm) για $d=12.7$ mm και όλους τους χρόνους λειοτριβήσης. Για τις δοκιμές με διάμετρο σφαιρών, $d=0$ και $d=6.5$ mm η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Fe₂O₃ παρατηρείται στο ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.600+0.075$ mm) για μικρούς χρόνους λειοτριβήσης, ενώ για μεγάλους χρόνους λειοτριβήσης παρατηρείται στο χονδρό κλάσμα ($+0.600$) με εξαίρεση τη δοκιμή με $d=6.5$ mm και $t=0.25$ min όπου παρατηρείται και η μέγιστη περιεκτικότητα του (62.18%). Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του NiO είναι 1.60% για $t=0.25$ min και δοκιμές χωρίς σφαίρες, του SiO₂ είναι 38.42% για $t=0.5$ min και $d=6.5$ mm και του Fe₂O₃ είναι 62.18% για $t=0.25$ min και $d=6.5$ mm.

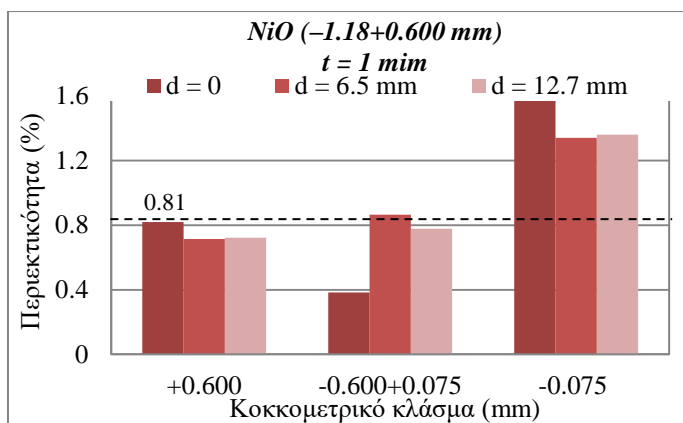
Από τους παραπάνω πίνακες 7.27 – 7.30 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 7.41 – 7.44 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων ($+0.600$ mm, $-0.600 +0.075$ και -0.075 mm).



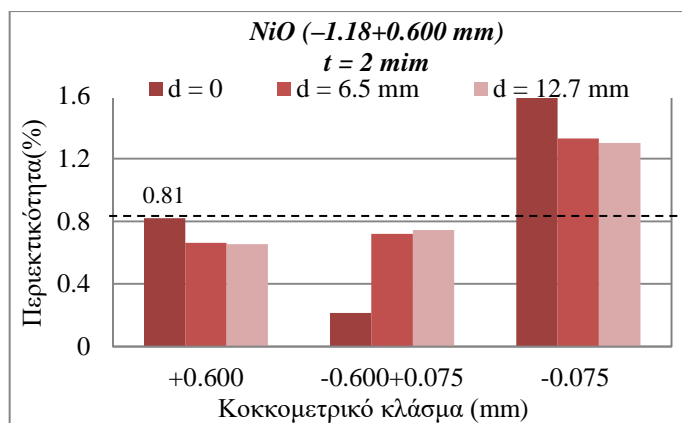
Διάγραμμα 7.41: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.25$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.81% NiO.



Διάγραμμα 7.42: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.5$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.81% NiO.



Διάγραμμα 7.43: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=1 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.81% NiO.



Διάγραμμα 7.44: Περιεκτικότητα (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=2 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.81% NiO.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.41 – 7.44 είναι εμφανής η αύξηση της αρχικής περιεκτικότητας σε NiO (0.81%) της συγκεκριμένης τροφοδοσίας στα λεπτά κλάσματα του προϊόντος (-0.075 mm). Αντίθετα, στο χονδρό κλάσμα η περιεκτικότητα σε NiO παραμένει σχεδόν ίση ή μικρότερη της αρχικής τροφοδοσίας. Όσον αφορά το ενδιάμεσο κλάσμα (-0.600+0.075) για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης η περιεκτικότητα του NiO είναι αρκετά μικρότερη στην αυτολειοτρίβηση ενώ για d=6.5 mm και d=12.7 mm είναι σχεδόν ίση ή μικρότερη της τροφοδοσίας, με εξαίρεση τη δοκιμή για d=6.5 mm και t=0.5 min στο ενδιάμεσο κλάσμα (-0.600+0.075 mm) όπου η τιμή του είναι 0.96%, δηλαδή μεγαλύτερη από της τροφοδοσίας (0.81%). Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο συγκεκριμένο οξείδιο (1.60%) παρατηρείται στο λεπτό προϊόν (-0.075 mm) και στο μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης (0.25 min) που επιλέχθηκε στις δοκιμές χωρίς σφαίρες. Εκτός από την περιεκτικότητα (%) των οξειδίων μελετήθηκε και η κατανομή (%) τους η οποία υπολογίστηκε από τους πίνακες 7.21 – 7.24. Τα αποτελέσματα της κατανομής των οξειδίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 7.25 – 7.28.

Πίνακας 7.25: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -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).

$t=0.25\text{ min}$	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO_2			NiO			Fe_2O_3		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	94.29	83.18	79.32	97.37	89.12	78.01	94.29	80.38	76.48	94.92	79.26	81.56
-0.600+0.075	3.80	12.66	16.37	0.87	6.94	17.94	1.92	12.04	16.10	3.48	17.42	15.07
-0.075	1.92	4.17	4.32	1.77	3.94	4.06	3.80	7.59	7.42	1.60	3.33	3.38
	100.01	100.00	100.01	100.01	100.00	100.01	100.01	100.00	100.01	100.01	100.00	100.01

Πίνακας 7.26: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	93.26	75.16	67.77	92.81	73.11	66.61	93.38	66.97	63.67	94.45	78.62	71.16
-0.600+0.075	4.52	18.43	26.04	5.07	20.68	27.32	2.44	21.80	26.31	3.68	16.33	23.99
-0.075	2.22	6.41	6.18	2.12	6.21	6.05	4.17	11.23	10.01	1.86	5.05	4.84
	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	99.99

Πίνακας 7.27: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

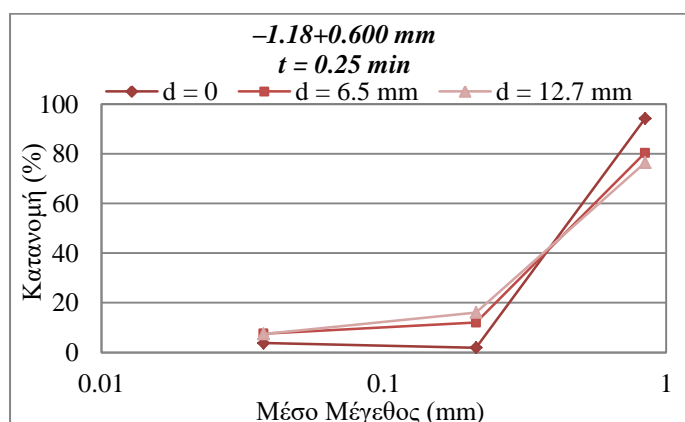
$t = 1$ min	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	90.86	69.42	51.29	92.37	72.33	51.75	92.10	61.31	45.83	89.30	69.26	53.83
-0.600+0.075	6.72	20.38	38.52	5.45	17.43	38.30	3.19	21.79	37.04	8.80	22.93	37.93
-0.075	2.42	10.21	10.19	2.18	10.25	9.96	4.71	16.91	17.13	1.90	7.82	8.25
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Πίνακας 7.28: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

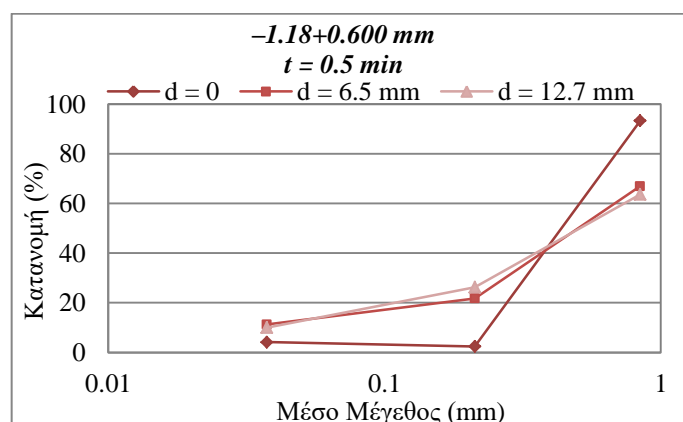
$t = 2$ min	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	87.42	54.80	30.58	87.82	55.99	29.36	88.62	44.86	24.71	87.55	57.30	34.65
-0.600+0.075	7.84	25.42	52.85	7.85	23.82	54.29	2.08	22.63	48.66	8.58	27.27	51.90
-0.075	4.73	19.79	16.57	4.31	20.20	16.35	9.30	32.51	26.63	3.86	15.43	13.45
	99.99	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00

Από τους πίνακες 7.26 – 7.28 παρατηρείται ότι α) για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό κλάσμα (+0.600 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (–0.600+0.075 mm) και του λεπτού (–0.075 mm) κλάσματος, β) προφανώς, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο το βάρος του χονδρού κλάσματος μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού κλάσματος, γ) φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται η κατανομή των οξειδίων όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος, η ίδια τάση παρατηρείται και με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης δ) γενικότερα, κατανομή όλων των οξειδίων είναι μεγαλύτερη στο χονδρό κλάσμα (+0.600 mm). Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη κατανομή του NiO είναι 94.29%, του SiO₂ είναι 97.37%, και του Fe₂O₃ είναι 94.92% για $t=0.25$ min και $d=0$ (αυτολειοτρίβηση).

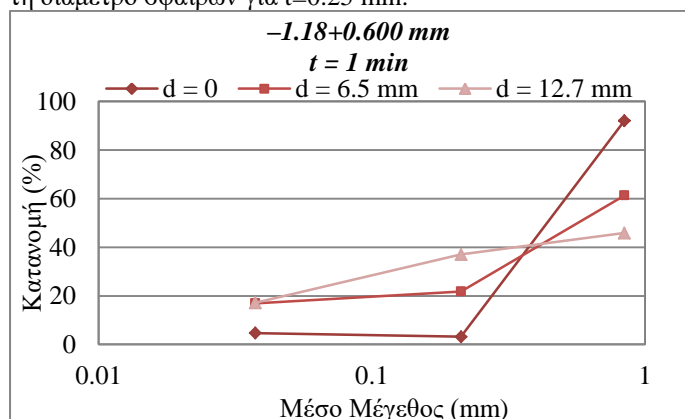
Επίσης, από τους πίνακες 7.31 – 7.34 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 7.45 -7.48 τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.600 mm, -0.600 +0.075 και -0.075 mm).



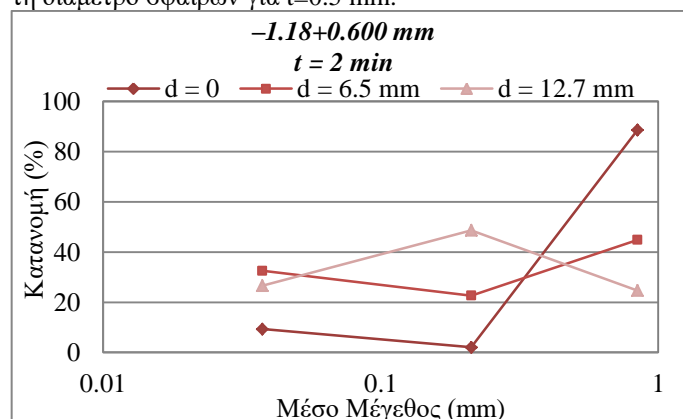
Διάγραμμα 7.45: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=0.25 min.



Διάγραμμα 7.46: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=0.5 min.



Διάγραμμα 7.47: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=1 min.



Διάγραμμα 7.48: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=2 min.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.45 – 7.48 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η κατανομή του NiO στο λεπτό κλάσμα αυξάνεται από 7.42% σε 26.63%, ενώ στο χονδρό κλάσμα μειώνεται από 76.48% σε 24.71%, για χρήση σφαιρών διαμέτρου 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 κοκκομετρικά κλάσματα (λεπτό, ενδιάμεσο και χονδρό). 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 διαμέτρου d=0 και d=6.5 mm. Για παράδειγμα, όσον αφορά το λεπτό κλάσμα, η κατανομή NiO αυξάνεται από 7.59% σε 11.23%, για χρόνους λειοτρίβησης από 0.25 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 κλάσμα, παρουσιάζει μία μείωση από 80.38% σε 66.97%.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες 7.29 – 7.32 της περιεκτικότητας (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων (–0.600 mm και –0.075 mm).

Πίνακας 7.29: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –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		Αθροιστικώς			Χημική Ανάλυση (%)							
		Βάρος, W (%)			SiO ₂		NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	34.23	34.23	34.23	0.81	0.81	0.81	45.20	45.20	45.20
-0.600	5.71	16.82	48.71	15.80	22.15	36.41	0.81	0.94	0.92	40.26	55.73	40.33
-0.075	1.91	4.16	10.19	31.71	32.42	32.24	1.61	1.47	1.39	37.91	36.13	35.44

Πίνακας 7.30: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –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		Αθροιστικώς			Χημική Ανάλυση (%)							
		Βάρος, W (%)			SiO ₂		NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	34.23	34.23	34.23	0.81	0.81	0.81	45.20	45.20	45.20
-0.600	6.74	24.84	32.23	36.51	37.06	35.45	0.79	1.08	0.91	37.20	38.88	40.42
-0.075	2.22	6.41	6.19	32.70	33.14	33.48	1.52	1.42	1.31	37.91	35.57	35.32

Πίνακας 7.31: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –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		Αθροιστικώς			Χημική Ανάλυση (%)							
		Βάρος, W (%)			SiO ₂		NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	34.23	34.23	34.23	0.81	0.81	0.81	45.20	45.20	45.20
-0.600	9.14	30.58	48.71	28.59	30.98	33.91	0.70	1.02	0.90	52.91	45.44	42.84
-0.075	2.42	10.20	10.19	30.82	34.38	33.46	1.57	1.34	1.36	35.52	34.65	36.57

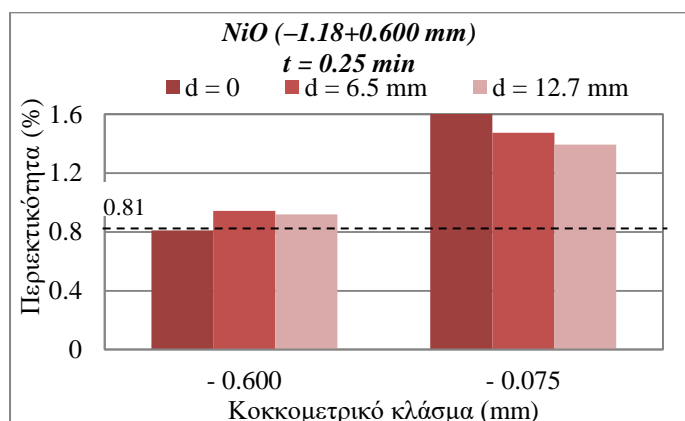
Πίνακας 7.32: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –1.18+0.600 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min		Αθροιστικώς			Χημική Ανάλυση (%)							
		Βάρος, W (%)			SiO ₂		NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	34.23	34.23	34.23	0.81	0.81	0.81	45.20	45.20	45.20
-0.600	12.58	45.20	69.42	33.11	33.34	34.84	0.73	0.99	0.88	44.70	42.69	42.55
-0.075	4.74	19.78	16.57	31.16	34.95	33.78	1.59	1.33	1.30	36.80	35.26	36.69

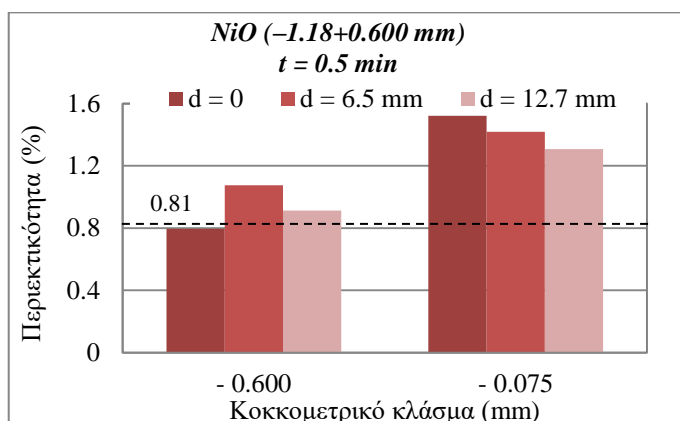
Από τους πίνακες 7.29 – 7.32 παρατηρείται ότι γενικά, η περιεκτικότητα (%) των συγκεκριμένων οξειδίων του κοκκομετρικού κλάσματος –1.18+0.600 mm είναι μεγαλύτερη στο κλάσμα –0.075 mm για το NiO και στο κλάσμα –0.600 mm για το

SiO₂ και το Fe₂O₃. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του NiO είναι 1.60% για t=0.25 min και d=0 του SiO₂ είναι 37.06% για t=0.25 min και d=6.5 mm και του Fe₂O₃ είναι 55.73% για t=0.25 min και d=6.5 mm.

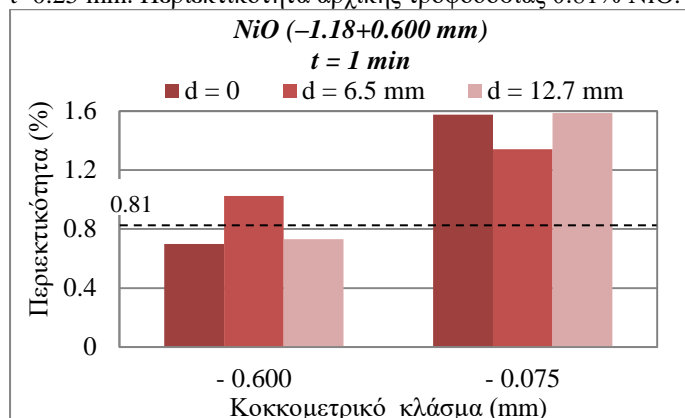
Με τη βοήθεια των παραπάνω πινάκων 7.29 – 7.32 προέκυψαν τα διαγράμματα 7.49 – 7.52 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων για αρχική τροφοδοσία -1.18+0.600 mm.



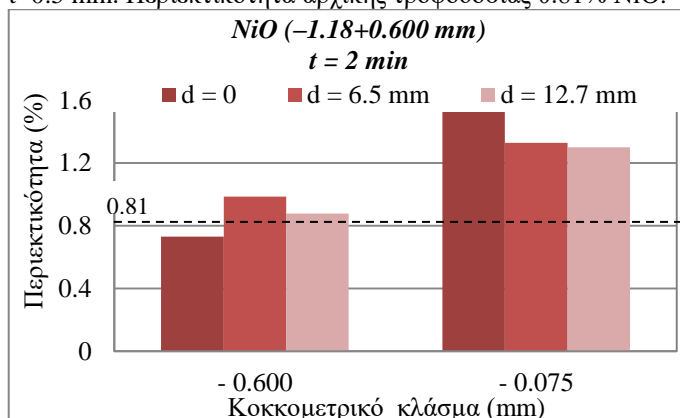
Διάγραμμα 7.49: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=0.25 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.81% NiO.



Διάγραμμα 7.50: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=0.5 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.81% NiO.



Διάγραμμα 7.51: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=1 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.81% NiO.



Διάγραμμα 7.52: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=2 min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.81% NiO.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.49 – 7.52 παρατηρείται ότι, το NiO είναι πιο πλούσιο στο λεπτό προϊόν -0.075 mm για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης και για δοκιμές αυτολειοτρίβησης. Δηλαδή, όσο μικραίνει η διάμετρος των σφαιρών για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης το λεπτό κλάσμα εμπλουτίζεται περισσότερο σε NiO, με εξαίρεση τις δοκιμές για t=1 min και d=12.7 mm, όπου παρατηρείται μια αύξηση της περιεκτικότητας του NiO. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, η τιμή της περιεκτικότητας NiO για t=2 min και για d=0 είναι 1.59%.

Ακόμα, από τους παραπάνω πίνακες 7.29 – 7.32 υπολογίστηκε η κατανομή (%) των οξειδίων για των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm, η οποία φαίνεται στου πίνακες 7.33 – 7.36.

Πίνακας 7.33: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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	Αθροιστικώς				Κατανομή (%)							
	Βάρος, W (%)				SiO ₂		NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.600	5.71	16.82	48.71	2.64	10.89	21.99	5.72	19.62	23.52	5.09	20.75	18.45
-0.075	1.91	4.16	10.19	1.77	3.94	4.06	3.80	7.59	7.42	1.60	3.33	3.38

Πίνακας 7.34: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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	Αθροιστικώς				Κατανομή (%)							
	Βάρος, W (%)				SiO ₂		NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.600	6.74	24.84	32.23	7.19	26.89	33.38	6.62	33.03	36.32	5.55	21.37	28.83
-0.075	2.22	6.41	6.19	2.12	6.21	6.05	4.17	11.23	10.01	1.86	5.05	4.84

Πίνακας 7.35: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Αθροιστικώς				Κατανομή (%)							
	Βάρος, W (%)				SiO ₂		NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.600	9.14	30.58	48.71	7.63	27.67	48.25	7.90	38.69	54.17	10.70	30.75	46.17
-0.075	2.42	10.20	10.19	2.18	10.24	9.96	4.71	16.91	17.13	1.90	7.82	8.25

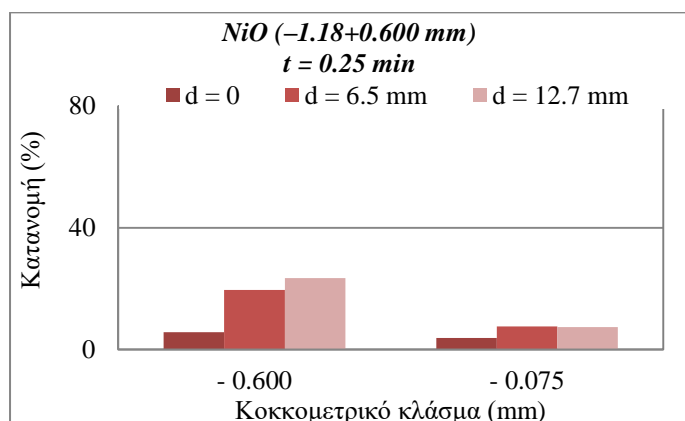
Πίνακας 7.36: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Αθροιστικώς				Κατανομή (%)							
	Βάρος, W (%)				SiO ₂		NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.600	12.58	45.20	69.42	12.17	44.02	70.64	11.37	55.14	75.29	12.44	42.70	65.35
-0.075	4.74	19.783	16.57	4.32	20.20	16.35	9.30	32.51	26.63	3.86	15.43	13.45

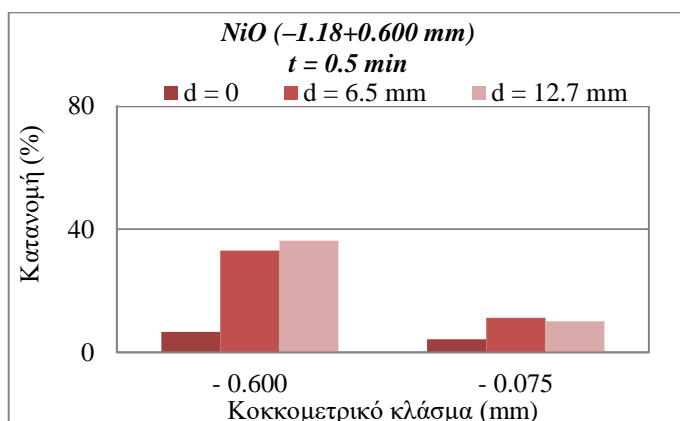
Από τους πίνακες 7.33 – 7.36 παρατηρείται ότι α) φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται η κατανομή των οξειδίων όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος, β) η μεγαλύτερη κατανομή για όλα τα οξείδια παρατηρείται στο κλάσμα

–0.600 mm για το μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min και τις μεγαλύτερες σφαίρες διαμέτρου, $d=12.7$ mm. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη κατανομή του NiO είναι 75.29%, του SiO₂ είναι 70.64% και του Fe₂O₃ είναι 65.35%.

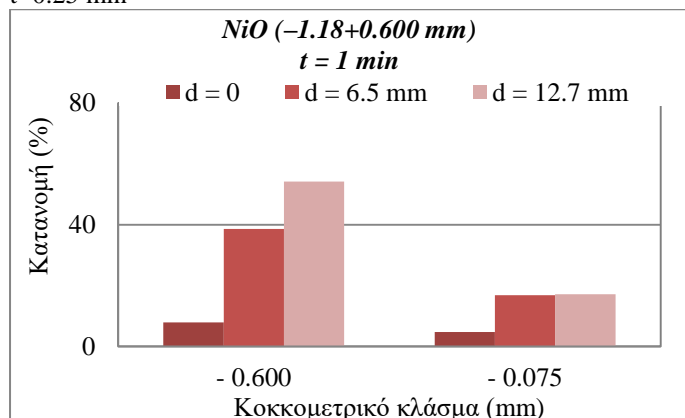
Από τους πίνακες 7.33 – 7.36 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 7.53 – 7.56, τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO του κοκκομετρικού κλάσματος – 1.18+0.600 mm για τα μεγέθη προϊόντων (–0.600 mm και –0.075 mm).



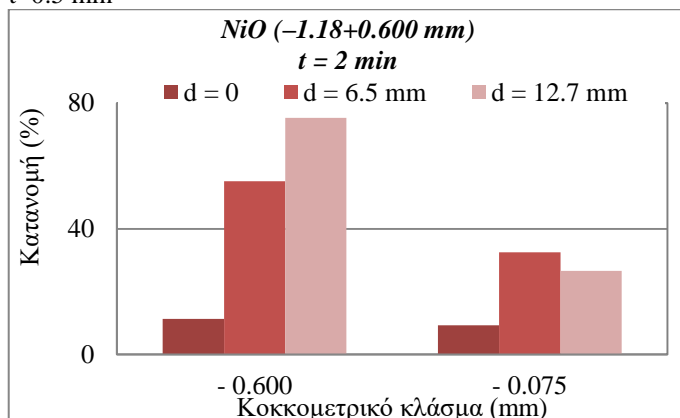
Διάγραμμα 7.53: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.25$ min



Διάγραμμα 7.54: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.5$ min



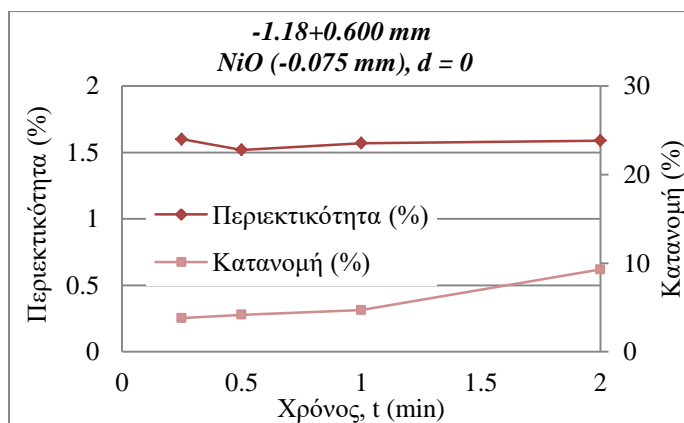
Διάγραμμα 7.55: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=1$ min



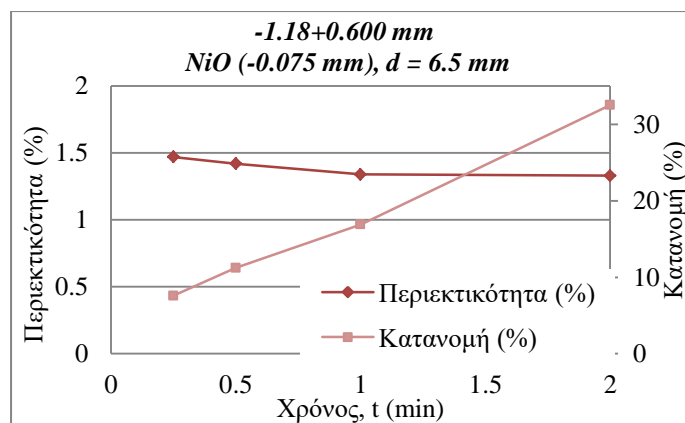
Διάγραμμα 7.56: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –1.18+0.600 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=2$ min

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.52 – 7.56 παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος μεγαλώνει η κατανομή στο κλάσμα –0.600 mm αλλά και στο λεπτό κλάσμα –0.075 mm. Όπως παρατηρήθηκε κι από τους παραπάνω πίνακες 7.39 – 7.42 αλλά φαίνεται και στα διαγράμματα 7.53 – 7.56, η μεγαλύτερη κατανομή NiO παρατηρείται στο κλάσμα –0.600 mm για $d=12.7$ mm και $t=2$ min και είναι 75.29%.

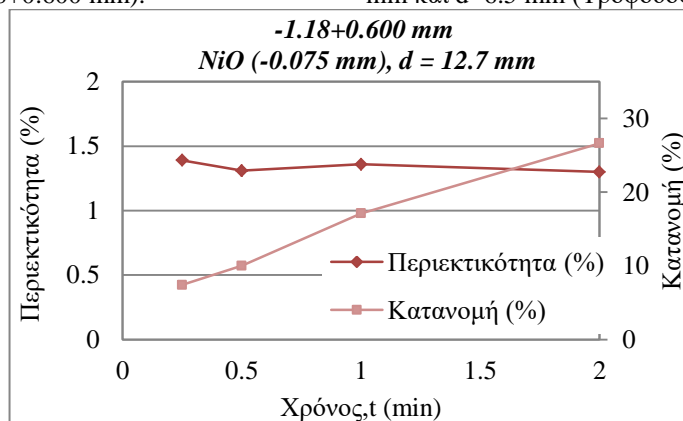
Τέλος, παρουσιάζονται τα διπλά διαγράμματα περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) του NiO του λεπτού κλάσματος (–0.075 mm).



Διάγραμμα 7.57: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και $d=0$ (Τροφοδοσία: $-1.18+0.600$ mm).



Διάγραμμα 7.58: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και $d=6.5$ mm (Τροφοδοσία: $-1.18+0.600$ mm).



Διάγραμμα 7.59: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και $d=12.7$ (Τροφοδοσία: $-1.18+0.600$ mm).

Στα διαγράμματα 7.57 – 7.59 παρατηρείται ότι α) γενικά, για το λεπτό κλάσμα -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 μειώνεται ελάχιστα η περιεκτικότητα (%) του NiO, ενώ αντίθετα αυξάνεται αισθητά η κατανομή του, β) η ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και με την αύξηση της διαμέτρου των σφαιρών. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι για χρόνο λειοτρίβησης 2 min και $d=0$, η περιεκτικότητα του NiO είναι 1.59% που αντιστοιχεί σε κατανομή 9.30%, ενώ για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης και $d=12.7$ mm η περιεκτικότητα του ίδιου στοιχείου είναι 1.30% που αντιστοιχεί σε κατανομή 26.63%.

7.2.5 Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων

Από τις ημιποσοτικές αναλύσεις του XRD μελετήθηκε η επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών και του χρόνου λειοτρίβησης για συγκεκριμένες ορυκτολογικές φάσεις.

Από τα διπλά διαγράμματα 7.57 – 7.59 (υποκεφάλαιο 7.2.4) παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες τιμές περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) του NiO αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο χρόνο $t=2$ min. Για το λόγο αυτό, κι εφόσον τα ορυκτά που αναλύονται είναι φορείς νικελίου, στους παρακάτω πίνακες 7.37 και 7.38 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα (%) και η κατανομή (%) των ορυκτολογικών φάσεων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Πίνακας 7.37: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 (%)			Χαλαζία			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	87.42	54.80	30.58	25.30	28.80	31.50	11.00	14.10	10.20	3.10	1.20	1.40
-0.600+0.075	7.84	25.42	52.85	57.81	30.45	27.57	32.47	6.50	15.22	14.16	9.02	4.94
-0.075	4.73	19.789	16.57	13.70	19.10	18.70	17.70	18.30	11.10	3.80	5.30	5.80
	99.99	100	100	27.30	27.30	27.30	13.00	13.00	13.00	4.00	4.00	4.00

Πίνακας 7.38: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

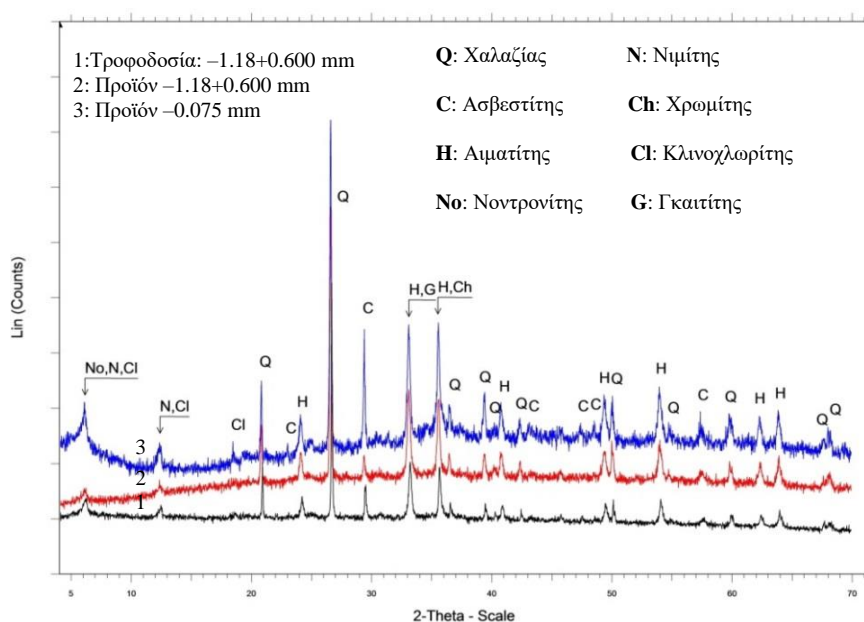
$t=2$ min	Παραμένον			Κατανομή (%)								
	Βάρος, W (%)			Χαλαζία			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	87.42	54.80	30.58	81.01	57.80	35.28	73.96	59.43	23.99	67.74	16.44	10.70
-0.600+0.075	7.84	25.42	52.85	16.60	28.35	53.36	19.58	12.72	61.85	27.74	57.34	65.26
-0.075	4.73	19.79	16.57	2.37	13.84	11.35	6.44	27.86	14.15	4.49	26.22	24.02
	99.99	100.00	100.00	99.98	100.00	99.99	99.98	100.00	99.99	99.98	100.00	99.99

Από τον πίνακα 7.37 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα (%) του χαλαζία για $t=2$ min είναι μεγαλύτερη στο χονδρό και στο ενδιάμεσο κλάσμα και μικρότερη στο λεπτό κλάσμα, με μεγαλύτερη τιμή το 57.81% για $d=0$ στο ενδιάμεσο κλάσμα. Αντίθετα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του νιμίτη παρατηρείται στο λεπτό κλάσμα και συγκεκριμένα στις δοκιμές με διάμετρο σφαιρών 6.5 mm και φτάνει το 18.30%, ενώ του χρωμίτη στο ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.600+0.075$ mm) για $d=0$ και τιμή 14.16%. Όσον αφορά την κατανομή (%), από τον πίνακα 7.38, παρατηρείται ότι

για τα συγκεκριμένα ορυκτά έχει μια τάση να μειώνεται όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος.

Οι αντίστοιχοι πίνακες για τις υπόλοιπες δοκιμές καθώς και οι πίνακες της περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) των ορυκτολογικών αναλύσεων των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β (Πίνακες Β6. – Β19).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα ακτινοδιαγράμματα της τροφοδοσίας $-1.18+0.600$ mm, του χονδρού προϊόντος ($-1.18+0.600$ mm) και του λεπτού προϊόντος (-0.075 mm).



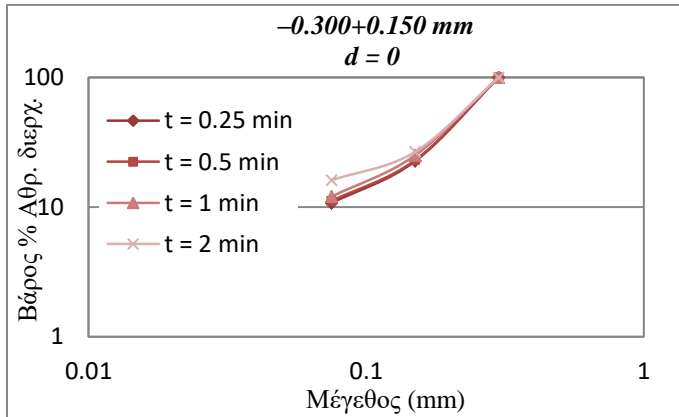
Διάγραμμα 7.60: Ορυκτολογική ανάλυση του κλάσματος τροφοδοσίας $-1.18+0.600$ mm, του προϊόντος $-1.18+0.600$ mm και του προϊόντος -0.075 mm, Τροφοδοσία: $-1.18+0.600$ mm, Συνθήκες λειοτριβήσης: $t=2$ min, $d=12.7$ mm.

Από το διάγραμμα 7.60 παρατηρείται ότι οι κορυφές του χαλαζία είναι μεγαλύτερες για την τροφοδοσία $-1.18+0.600$ mm καθώς και για το προϊόν $-1.18+0.600$ mm, ενώ στο λεπτό προϊόν -0.075 mm οι κορυφές του νοντρονίτη, νιμίτη, χρωμίτη και κλινοχλωρίτη είναι μεγαλύτερες. Γεγονός που επιβεβαιώθηκε κι από τους παραπάνω πίνακες 7.37 και 7.38.

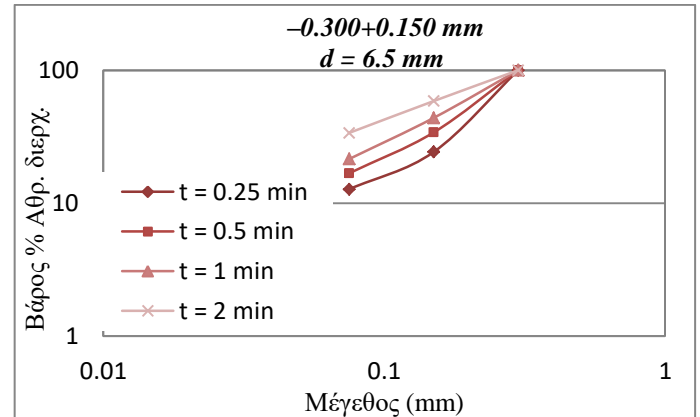
7.3 Τροφοδοσία – 0.300 + 0.150 mm

7.3.1 Επίδραση του χρόνου λειοτριβήσεως και της διαμέτρου σφαιρών

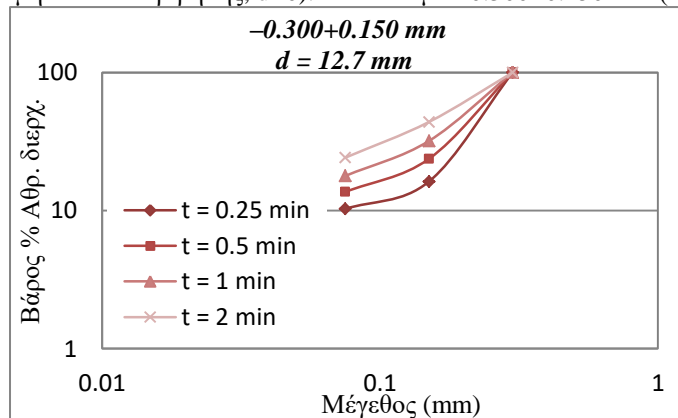
Από τους πίνακες Γ1 – Γ3 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Γ προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα 7.61 – 7.63 που παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετική διάμετρο σφαιρών.



Διάγραμμα 7.61: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσεως για το κοκκομετρικό κλάσμα -0.300+0.150 mm (δοκιμή αυτολειοτριβήσεως, d=0).



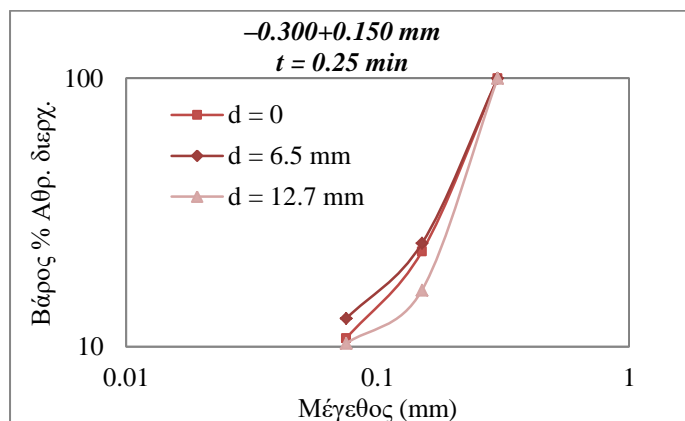
Διάγραμμα 7.62: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσεως για το κοκκομετρικό κλάσμα -0.300+0.150 mm (διάμετρος σφαιρών d=6.5 mm).



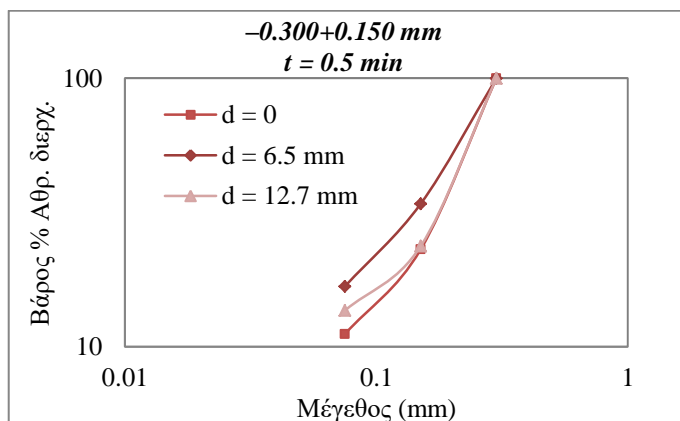
Διάγραμμα 7.63: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσεως για το κοκκομετρικό κλάσμα -0.300+0.150 mm (διάμετρος σφαιρών d=12.7 mm).

Από τα διαγράμματα 7.61 – 7.63 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτριβήσεως τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Συνεπώς, οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη (αριστερά). Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο με χρήση σφαιρών. Αντίθετα, η αυτολειοτριβήση πρακτικά δεν οδηγεί σε μείωση του μεγέθους του υλικού, τουλάχιστον για τους συγκεκριμένους χρόνους που επιλέχθηκαν.

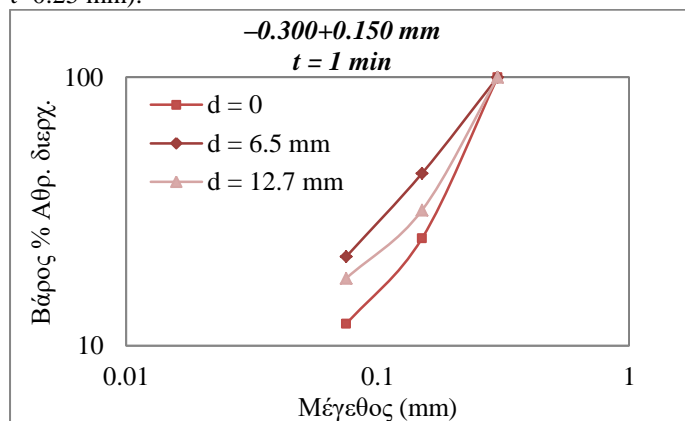
Επίσης, προέκυψαν τα διαγράμματα 7.64 – 7.67 τα οποία παριστάνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε σχέση με το μέγεθος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης και διάμετρο σφαιρών.



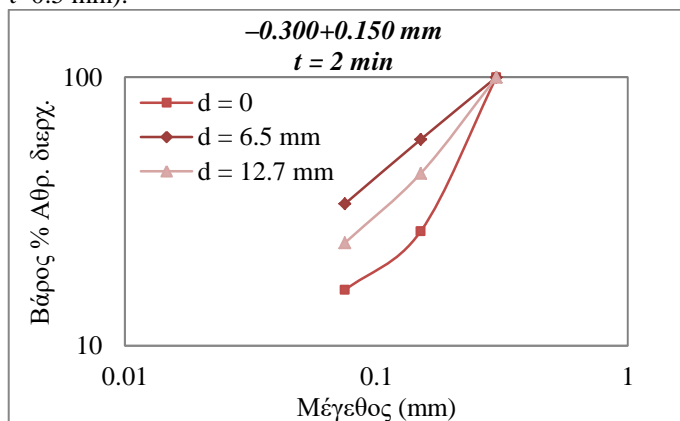
Διάγραμμα 7.64: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα κλάσματος $-0.300+0.150$ mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=0.25$ min).



Διάγραμμα 7.65: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα κλάσματος $-0.300+0.150$ mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=0.5$ min).



Διάγραμμα 7.66: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα κλάσματος $-0.300+0.150$ mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=1$ min).

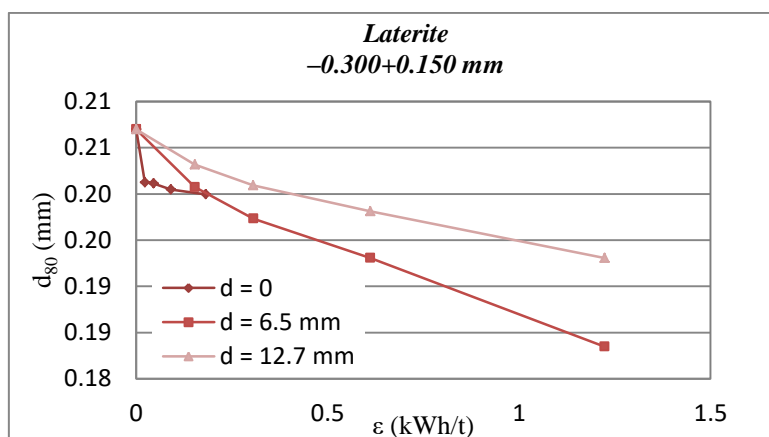


Διάγραμμα 7.67: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για το κοκκομετρικό κλάσμα κλάσματος $-0.300+0.150$ mm (χρόνος λειοτρίβησης, $t=2$ min).

Στα διαγράμματα 7.64 – 7.67 παρατηρείται ότι το υλικό του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm συμπεριφέρεται διαφορετικά στη χρησιμοποίηση διαφορετικών διαμέτρων σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm). σε κάθε χρόνο και για δοκιμές χωρίς και με συγκεκριμένες σφαίρες. Γενικά, για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης το προϊόν λειοτριβείται πιο αποδοτικά για σφαίρες διαμέτρου $d=6.5$ mm, κι αυτό φαίνεται πιο έντονα στο μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min. Αντίθετα, στην αυτολειοτρίβηση το προϊόν λειοτριβείται σχεδόν το ίδιο αποδοτικά σε όλους τους χρόνους.

7.3.2 Ειδική ενέργεια σε συνάρτηση με το d_{80}

Από τα παραπάνω διαγράμματα 7.64 – 7.67 υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια (ϵ) και το μέγεθος όπου διέρχεται το 80% του υλικού (d_{80}). Στον πίνακα Γ4 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ειδικής ενέργειας και στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα της ειδικής ενέργειας συναρτήσει d_{80} .



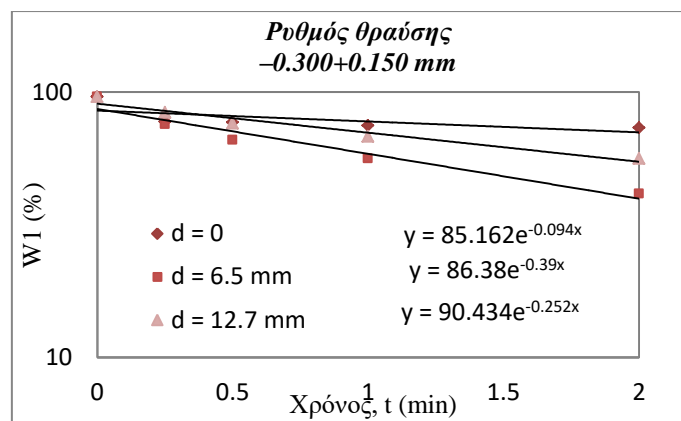
Διάγραμμα 7.68: Μέγεθος d_{80} του προϊόντος σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για το κοκκομετρικό κλάσμα $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm)

Στο διάγραμμα 7.68 παρατηρείται ότι α) προφανώς όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια κατανάλωσης τόσο μειώνεται και το μέγεθος d_{80} του προϊόντος, β) η διάμετρο σφαιρών 6.5 mm οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν, αλλά με μεγαλύτερη κατανάλωση ειδικής ενέργειας και γ) η αυτολειοτριβήση οδηγεί σε μικρή μείωση του μεγέθους προϊόντος για τους χρόνους (ειδικές ενέργειες) που επιλέχθηκαν σε σχέση με τη χρησιμοποίηση σφαιρών ($d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

7.3.3 Ρυθμός θραύσης τροφοδοσίας συναρτήσει του χρόνου

Ο ρυθμός θραύσης με τον οποίο θραύεται το κοκκομετρικό κλάσμα $-0.300+0.150$ mm μελετήθηκε όπως και τα προηγούμενα κοκκομετρικά κλάσματα ($-3.35 +1.70$ mm και $-0.300+0.150$ mm).

Αρχικά, από τη μελέτη του ρυθμού του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm προέκυψε ο πίνακας Γ5 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Γ και στη συνέχεια παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 7.69 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) προϊόντος που έχει παραμείνει στην αντίστοιχη τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης.



Διάγραμμα 7.69: Ρυθμός θραύσης σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (d=0, d=6.5 mm, d=12.7 mm).

Από το παραπάνω διάγραμμα 7.69 κι από την κλίση κάθε ευθείας υπολογίστηκαν οι ρυθμοί θραύσης για το κοκκομετρικό κλάσμα -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών που χρησιμοποιήθηκε και παρουσιάζονται στον πίνακα 7.39.

Πίνακας 7.39: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος -0.300+0.150 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

d (mm)	Si (min ⁻¹)
0	0.094
6.5	0.39
12.7	0.252

Από τον παραπάνω πίνακα 7.39 παρατηρείται ότι για το κοκκομετρικό κλάσμα -0.300+0.150 mm, ο ρυθμός θραύσης είναι μέγιστος όταν χρησιμοποιείται διάμετρος σφαιρών 6.5 mm κι αντιστοιχεί στην τιμή 0.39 min⁻¹. Αυτό σημαίνει ότι για μικρή διάμετρο σφαιρών έχουμε μεγαλύτερο ρυθμό θραύσης, σε αντίθεση με τα δυο προηγούμενα κοκκομετρικά κλάσματα (-3.35+1.70 mm και -1.18+0.600 mm) όπου ο μέγιστος ρυθμός θραύσης παρατηρήθηκε στη μεγαλύτερη διάμετρο σφαιρών (d=12.7 mm). Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι 0.39 min⁻¹ για d=6.5 mm.

7.3.4 Χημική ανάλυση προϊόντων

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των προϊόντων για το κοκκομετρικό κλάσμα -0.300+0.150 mm φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 7.40 – 7.43. 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, −0.150+0.075 mm και −0.075 mm).

Πίνακας 7.40: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος −0.300+0.150 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			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			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
		mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm
+0.150	77.38	75.74	83.77	36.12	35.10	37.16	0.97	0.95	0.97	40.50	41.39	39.42
-0.150+0.075	11.88	11.53	5.95	39.37	46.76	28.77	0.48	0.57	0.19	35.38	31.01	44.95
-0.075	10.75	12.73	10.27	32.53	32.55	31.93	1.51	1.45	1.42	38.71	37.52	38.98
	100.00	100.00	99.99	36.12	36.12	36.12	0.97	0.97	0.97	39.70	39.70	39.70

Πίνακας 7.41: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος −0.300+0.150 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			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			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
		mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm
+0.150	76.97	65.94	76.31	36.26	36.85	37.35	0.94	0.89	0.98	40.19	40.46	40.42
-0.150+0.075	11.88	17.28	10.05	38.93	36.58	31.06	0.69	0.74	0.42	37.49	38.62	36.51
-0.075	11.15	16.78	13.64	32.16	32.78	32.97	1.48	1.52	1.32	38.68	37.83	38.02
	100.00	100.00	100.00	36.12	36.12	36.12	0.97	0.97	0.97	39.70	39.70	39.70

Πίνακας 7.42: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος −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			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			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
		mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm
+0.150	74.91	56.19	68.07	36.87	36.77	37.19	0.96	0.86	0.96	39.43	42.28	40.03
-0.150+0.075	13.04	22.34	14.11	35.71	36.54	35.15	0.56	0.89	0.56	41.98	36.45	39.62
-0.075	12.04	21.47	17.82	31.90	33.98	32.80	1.48	1.34	1.33	38.91	36.33	38.50
	100.00	100.00	100.00	36.12	36.12	36.12	0.97	0.97	0.97	39.70	39.70	39.70

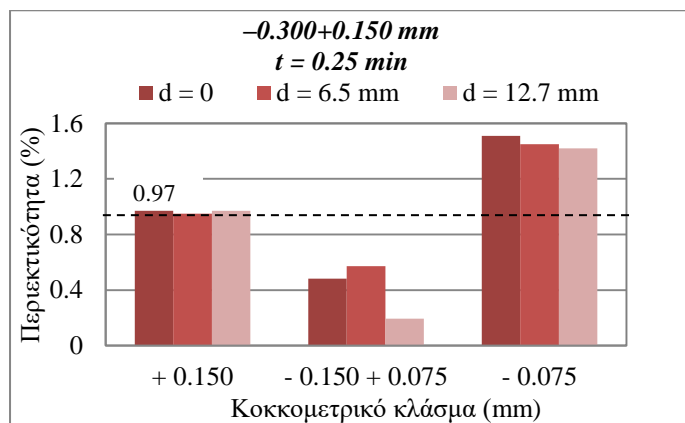
Πίνακας 7.43: Χημική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος −0.300+0.150 mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Παραμένον			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			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
		mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm
+0.150	73.33	41.38	56.19	37.19	36.59	37.86	0.96	0.78	0.96	39.10	44.33	39.71
-0.150+0.075	10.56	24.85	19.65	34.39	38.34	34.48	0.26	0.82	0.61	46.47	35.62	40.99
-0.075	16.11	33.77	24.16	32.38	33.91	33.41	1.48	1.31	1.29	38.01	37.03	38.63
	100.00	100.00	100.00	36.12	36.12	36.12	0.97	0.97	0.97	39.70	39.70	39.70

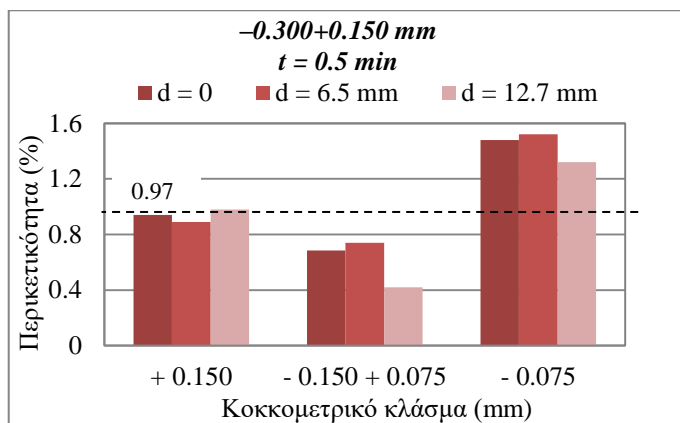
Στους πίνακες 7.40 – 7.43 παρατηρείται ότι α) για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό κλάσμα (+0.150 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (−0.150+0.075 mm) και του λεπτού

(-0.075 mm) κλάσματος, β) προφανώς, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο το βάρος του χονδρού κλάσματος μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού κλάσματος, γ) γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η περιεκτικότητα του NiO στο λεπτό κλάσμα (-0.075 mm), ενώ στο χονδρό κλάσμα ($+0.150$ mm) είναι σχεδόν ίση ή μικρότερη της περιεκτικότητας της αρχικής τροφής (0.97%), δ) η περιεκτικότητα του SiO₂ είναι μεγαλύτερη στο χονδρό κλάσμα ($+0.150$ mm), με εξαίρεση τις δοκιμές με $d=6.5$ mm και χρόνους λειοτρίβησης, $t=0.25$ min και $t=2$ min όπου παρατηρείται μια αύξηση στο ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.150+0.075$ mm), ε) όσον αφορά το Fe₂O₃ για μικρούς χρόνους λειοτρίβησης ($t=0.25$ min και $t=0.5$ min) και για όλες τις διαμέτρους σφαιρών η μεγαλύτερη περιεκτικότητα παρατηρείται στο χονδρό κλάσμα ($+0.150$ mm), με εξαίρεση τη δοκιμή με $d=12.7$ mm, όπου η μεγαλύτερη περιεκτικότητά του παρατηρείται στο ενδιάμεσο κλάσμα. Αντίθετα, στους μεγαλύτερους χρόνους λειοτρίβησης ($t=1$ min και $t=2$ min) και για δοκιμές χωρίς σφαίρες η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Fe₂O₃ παρατηρείται στο ενδιάμεσο κλάσμα, ενώ για δοκιμές με διάμετρο σφαιρών 6.5 mm και 12.7 mm, παρατηρείται στο χονδρό κλάσμα ($+0.150$ mm). Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του NiO είναι 1.52% για $t=0.5$ min και $d=6.5$ mm στο λεπτό κλάσμα (-0.075 mm), του SiO₂ είναι 46.76% και παρατηρείται στο ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.150+0.075$ mm) για $t=0.25$ min και $d=6.5$ mm και του Fe₂O₃ είναι 46.47% στο ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.150+0.075$ mm) για $t=2$ min και $d=0$.

Από τους παραπάνω πίνακες 7.40 – 7.43 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 7.70 – 7.73 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων ($+0.150$ mm, $-0.150+0.075$ και -0.075 mm).

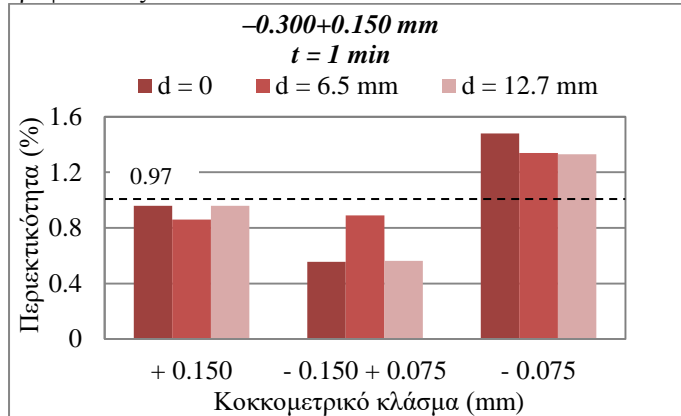


Διάγραμμα 7.70: Περιεκτικότητα (%) NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για $t=0.25$ min και διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών. Περιεκτικότητα αρχικής



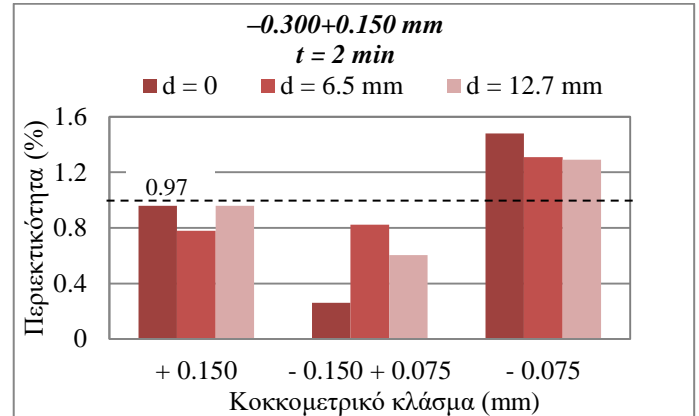
Διάγραμμα 7.71: Περιεκτικότητα (%) NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για $t=0.5$ min και διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας

τροφοδοσίας 0.97% NiO.



Διάγραμμα 7.72: Περιεκτικότητα (%) NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150 \text{ mm}$ για $t=1 \text{ min}$ και διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.97% NiO.

0.97% NiO.



Διάγραμμα 7.73: Περιεκτικότητα (%) NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150 \text{ mm}$ για $t=2 \text{ min}$ και διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.97% NiO.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.70 – 7.73 είναι εμφανής η αύξηση της αρχικής περιεκτικότητας σε NiO (0.97%) της συγκεκριμένης τροφοδοσίας στα λεπτά κλάσματα του προϊόντος (-0.075 mm). Αντίθετα, στο χονδρό κλάσμα η περιεκτικότητα σε NiO παραμένει σχεδόν ίση ή λίγο μικρότερη ή μεγαλύτερη της αρχικής τροφοδοσίας. Όσον αφορά το ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.150+0.075 \text{ mm}$) όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης αυξάνεται και η περιεκτικότητα σε NiO με τις μέγιστες τιμές της να παρουσιάζονται στις δοκιμές με διάμετρο σφαιρών 6.5 mm. Εκτός από την περιεκτικότητα (%) των οξειδίων μελετήθηκε και η κατανομή (%) τους, η οποία υπολογίστηκε από τους πίνακες 7.40 – 7.43. Τα αποτελέσματα της κατανομής (%) των οξειδίων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 7.44 – 7.47.

Πίνακας 7.44: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150 \text{ mm}$ για χρόνο $t=0.25 \text{ min}$ και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5 \text{ mm}$ και $d=12.7 \text{ mm}$).

$t=0.25 \text{ min}$	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO_2			NiO			Fe_2O_3		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	77.38	75.74	83.77	77.38	73.60	86.18	77.38	74.18	83.77	78.93	78.96	83.18
-0.150+0.075	11.88	11.53	5.95	12.95	14.93	4.74	5.90	6.79	1.20	10.59	9.00	6.74
-0.075	10.75	12.73	10.27	9.68	11.47	9.08	16.73	19.03	15.03	10.48	12.03	10.08
	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Πίνακας 7.45: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=0.5$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t = 0.5 \text{ min}$	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	76.97	65.94	76.31	77.27	67.27	78.91	74.59	60.50	77.10	77.92	67.20	77.69
-0.150+0.075	11.88	17.28	10.05	12.81	17.50	8.64	8.40	13.20	4.34	11.22	16.81	9.24
-0.075	11.15	16.78	13.64	9.92	15.23	12.45	17.01	26.29	18.56	10.86	15.99	13.06
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Πίνακας 7.46: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

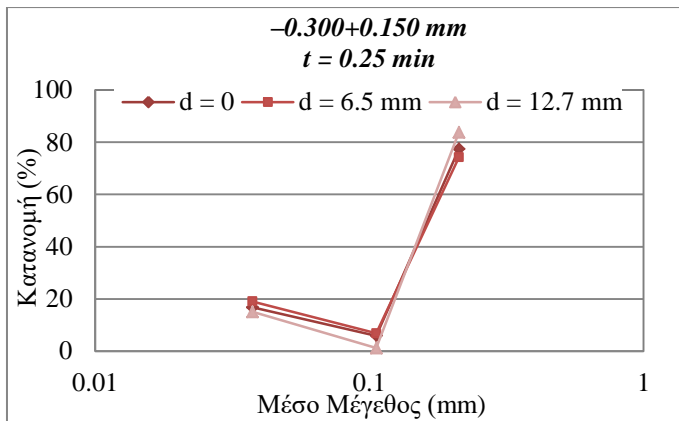
$t=1 \text{ min}$	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	74.91	56.19	68.07	76.47	57.20	70.09	74.14	49.82	67.37	74.40	59.84	68.64
-0.150+0.075	13.04	22.34	14.11	12.89	22.60	13.73	7.48	20.52	8.20	13.79	20.51	14.08
-0.075	12.04	21.47	17.82	10.64	20.20	16.18	18.38	29.66	24.43	11.80	19.65	17.28
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Πίνακας 7.47: Κατανομή οξειδίων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

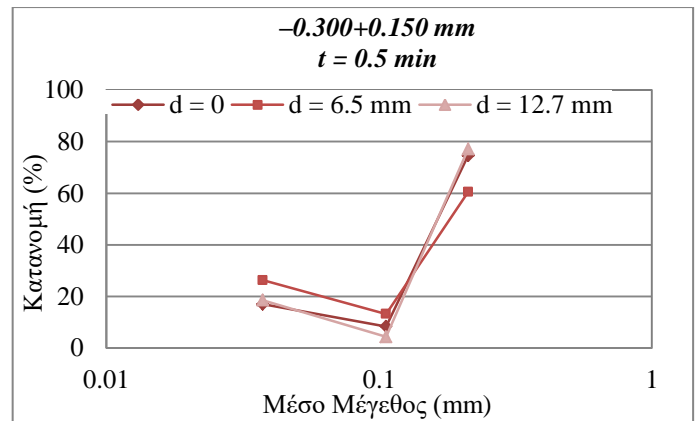
$t = 2 \text{ min}$	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	73.33	41.38	56.19	75.51	41.92	58.90	72.58	33.27	55.61	72.22	46.21	56.20
-0.150+0.075	10.56	24.85	19.65	10.05	26.38	18.76	2.85	21.12	12.26	12.36	22.30	20.29
-0.075	16.11	33.77	24.16	14.44	31.70	22.35	24.58	45.61	32.13	15.42	31.50	23.51
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Από τους πίνακες 7.44 – 7.47 παρατηρείται ότι α) για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης το βάρος του προϊόντος στο χονδρό κλάσμα (+0.150 mm) είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα βάρη του ενδιάμεσου (–0.150+0.075 mm) και του λεπτού (–0.075 mm) κλάσματος, β) προφανώς, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο το βάρος του χονδρού κλάσματος μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται το βάρος του ενδιάμεσου και του λεπτού κλάσματος, γ) γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται η κατανομή των οξειδίων όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος και η ίδια τάση παρατηρείται και με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης δ) η μεγαλύτερη κατανομή του NiO είναι 83.77%, του SiO₂ είναι 86.18% και του Fe₂O₃ είναι 83.18% και παρατηρούνται στο χονδρό κλάσμα (+0.150 mm) για $t=0.25$ min και $d=12.7$ mm.

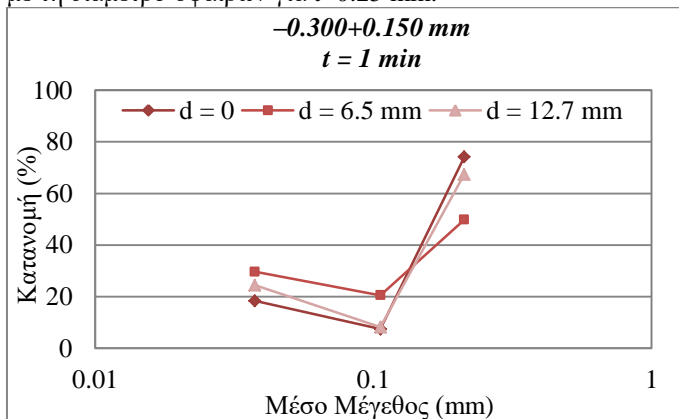
Επίσης, από τους πίνακες 7.44 – 7.47 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 7.74 – 7.77 τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%) του NiO για τα τρία μεγέθη προϊόντων (+0.150 mm, –0.150 +0.075 και –0.075 mm).



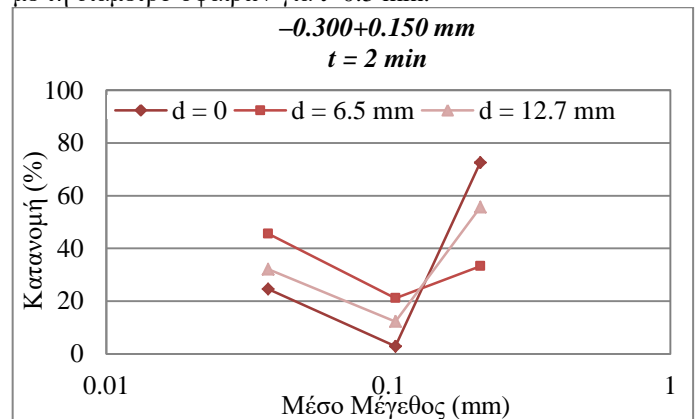
Διάγραμμα 7.74: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.25$ min.



Διάγραμμα 7.75: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.5$ min.



Διάγραμμα 7.76: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=1$ min.



Διάγραμμα 7.77: Κατανομή (%) NiO των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=2$ min.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.74 – 7.77 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, η κατανομή NiO στο λεπτό κλάσμα αυξάνεται από 19.03% σε 45.61%, ενώ στο χονδρό μειώνεται από 74.18% σε 33.27%, για χρήση σφαιρών διαμέτρου 6.5 mm. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο έντονα στο μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης ($t=2$ min) και για χρήση διαμέτρου σφαιρών 6.5 mm και για τα τρία μεγέθη προϊόντων ($+0.150$ mm, $-0.150 +0.075$ και -0.075 mm).

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

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες 7.48 – 7.51 της περιεκτικότητας (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων (-0.150 mm και -0.075 mm).

Πίνακας 7.48: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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	Αθροιστικώς			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0.00	6.5 mm	12.7 mm	0.00	6.5 mm	12.7 mm	0.00	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	36.12	36.12	36.12	0.97	0.97	0.97	39.70	39.70	39.70
-0.150	22.62	24.26	16.23	36.12	39.30	30.75	0.97	1.03	0.97	36.96	34.42	41.15
-0.075	10.75	12.73	10.28	32.53	32.55	31.90	1.51	1.45	1.42	38.71	37.52	38.94

Πίνακας 7.49: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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	Αθροιστικώς			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	36.12	36.12	36.12	0.97	0.97	0.97	39.70	39.70	39.70
-0.150	23.03	34.06	23.69	35.65	34.71	32.16	1.07	1.12	0.94	38.06	38.23	37.38
-0.075	11.15	16.78	13.64	32.16	32.78	32.97	1.48	1.52	1.32	38.68	37.83	38.02

Πίνακας 7.50: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

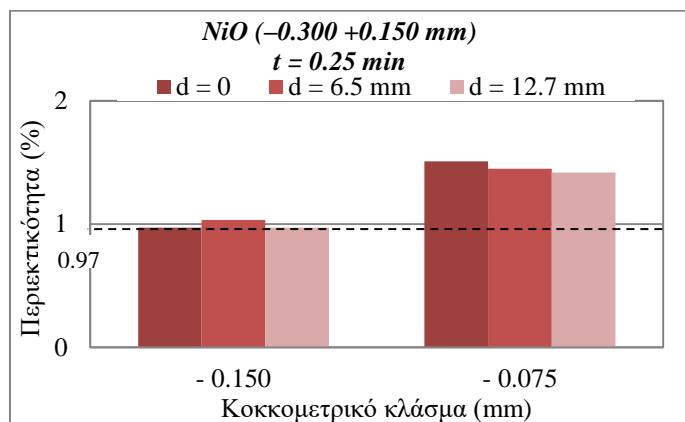
$t=1$ min	Αθροιστικώς			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	36.12	36.12	36.12	0.97	0.97	0.97	39.70	39.70	39.70
-0.150	25.09	43.81	31.93	33.88	35.29	33.84	1.00	1.11	0.99	40.51	36.39	39.00
-0.075	12.04	21.47	17.82	31.90	33.98	32.80	1.48	1.34	1.33	38.91	36.33	38.50

Πίνακας 7.51: Χημική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

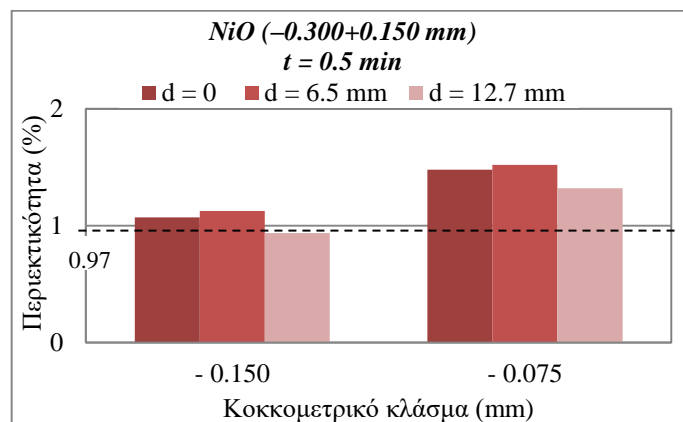
$t=2$ min	Αθροιστικώς			Χημική Ανάλυση (%)								
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	36.12	36.12	36.12	0.97	0.97	0.97	39.70	39.70	39.70
-0.150	26.67	58.62	43.81	33.18	35.79	33.89	1.00	1.10	0.98	41.36	36.43	39.69
-0.075	16.11	33.77	24.16	32.38	33.91	33.41	1.48	1.31	1.29	38.01	37.03	38.63

Από τους πίνακες 7.48 – 7.51 παρατηρείται ότι γενικά, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του NiO παρατηρείται στο λεπτό κλάσμα (-0.075 mm), ενώ των SiO₂ και Fe₂O₃ παρατηρείται στο χονδρό κλάσμα (-0.150 mm). Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του NiO είναι 1.52% για $t=0.5$ min και $d=6.5$ mm, του SiO₂ είναι 39.30% για $t=0.25$ min και $d=6.5$ mm και του Fe₂O₃ είναι 41.36% για $t=2$ min και $d=0$.

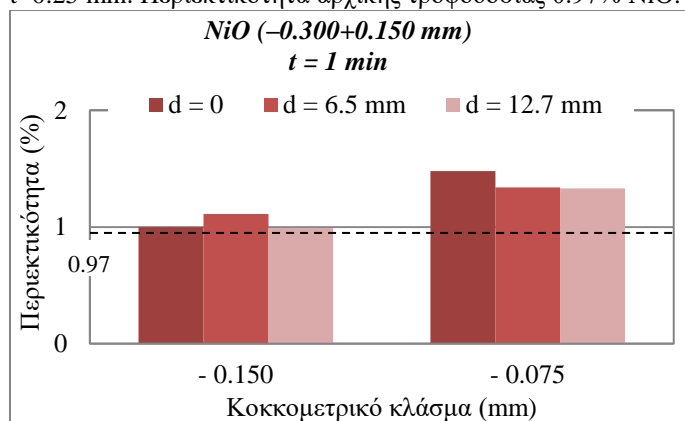
Με τη βοήθεια των παραπάνω πινάκων 7.60 – 7.63 προέκυψαν τα διαγράμματα 7.78 – 7.81 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) του NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων για αρχική τροφοδοσία $-0.300+0.150$ mm.



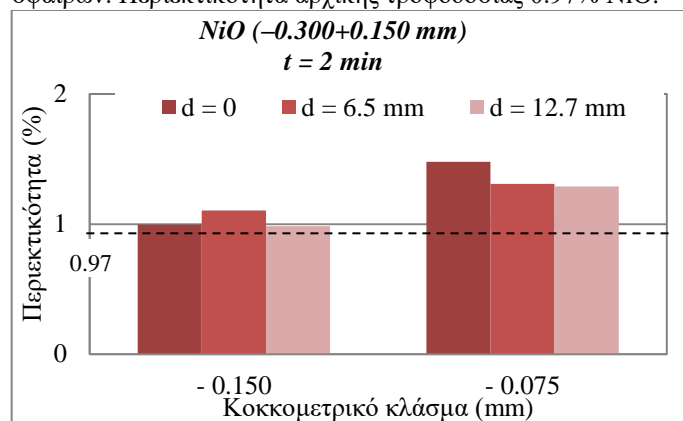
Διάγραμμα 7.78: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για $t=0.25$ min. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.97% NiO.



Διάγραμμα 7.79: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για $t=0.5$ min και διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.97% NiO.



Διάγραμμα 7.80: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για $t=1$ min και διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.97% NiO.



Διάγραμμα 7.81: Περιεκτικότητα (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για $t=2$ min και διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών. Περιεκτικότητα αρχικής τροφοδοσίας 0.97% NiO.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.78 – 7.81 παρατηρείται ότι το NiO είναι πιο πλούσιο στο λεπτό προϊόν -0.075 mm. Επίσης, όσο μικραίνει η διάμετρος των σφαιρών για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης το λεπτό κλάσμα εμπλουτίζεται λιγότερο σε NiO, με εξαίρεση στο χρόνο 0.5 min που παρατηρείται μια αύξηση για διάμετρο σφαιρών 6.5 mm. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα NiO παρατηρείται για $t=0.5$ min και $d=6.5$ mm και είναι 1.52%.

Ακόμα, από τους παραπάνω πίνακες 7.48 – 7.51 υπολογίστηκε η κατανομή (%) των οξειδίων των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm., η οποία φαίνεται στον πίνακες 7.52 – 7.55.

Πίνακας 7.52 Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.150	22.62	24.26	16.23	22.62	26.40	13.82	22.62	25.82	16.23	21.07	21.04	16.82
-0.075	10.75	12.73	10.28	9.68	11.47	9.08	16.73	19.03	15.03	10.48	12.03	10.08

Πίνακας 7.53: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0.	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.150	23.03	34.06	23.69	22.73	32.73	21.09	25.41	39.50	22.90	22.08	32.80	22.31
-0.075	11.15	16.78	13.64	9.92	15.23	12.45	17.01	26.29	18.56	10.86	15.99	13.06

Πίνακας 7.54: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.150	25.09	43.81	31.93	23.53	42.80	29.91	25.86	50.18	32.63	25.60	40.16	31.36
-0.075	12.04	21.47	17.82	10.64	20.20	16.18	18.38	29.66	24.43	11.80	19.65	17.28

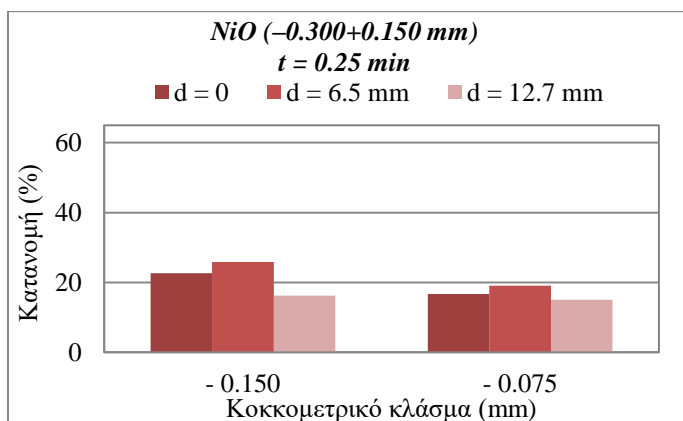
Πίνακας 7.55: Κατανομή (%) οξειδίων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			SiO ₂			NiO			Fe ₂ O ₃		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.150	26.67	58.62	43.81	24.49	58.08	41.10	27.42	66.73	44.39	27.78	53.79	43.80
-0.075	16.11	33.77	24.16	14.44	31.70	22.35	24.58	45.61	32.13	15.42	31.50	23.51

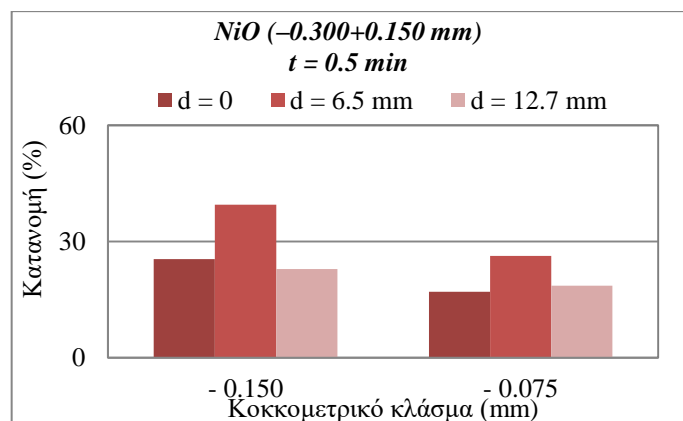
Από τους πίνακες 7.25 – 7.55 παρατηρείται ότι α) φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται η κατανομή (%) των οξειδίων όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος, γ) η μεγαλύτερη κατανομή (%) για όλα τα οξείδια παρατηρείται στο κλάσμα -0.150 mm για το μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης, $t=2$ min και σφαίρες

διαμέτρου 6.5 mm. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη κατανομή του NiO είναι 66.73%, του SiO₂ είναι 58.08% και του Fe₂O₃ είναι 53.79%.

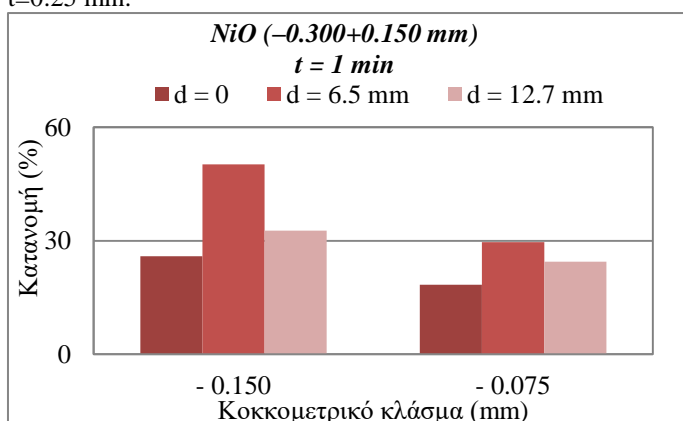
Από τους πίνακες 7.52 – 7.55 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα 7.82 – 7.85, τα οποία παριστάνουν την κατανομή (%)NiO του κοκκομετρικού κλάσματος – 0.300+0.150 mm για τα μεγέθη προϊόντων (–0.150 mm και –0.075 mm).



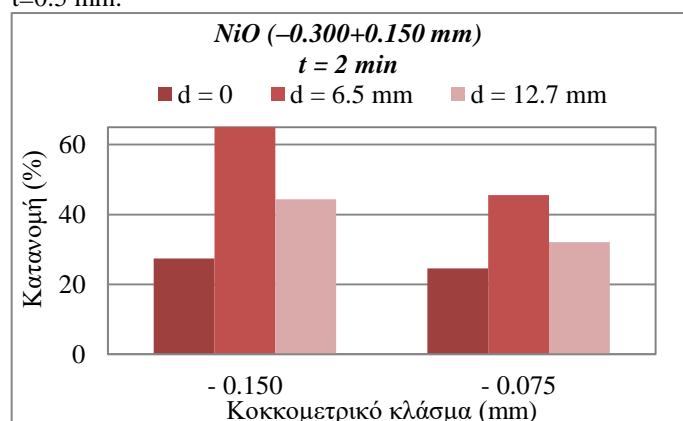
Διάγραμμα 7.82: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –0.300+0.150 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=0.25 min.



Διάγραμμα 7.83: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –0.300+0.150 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=0.5 min.



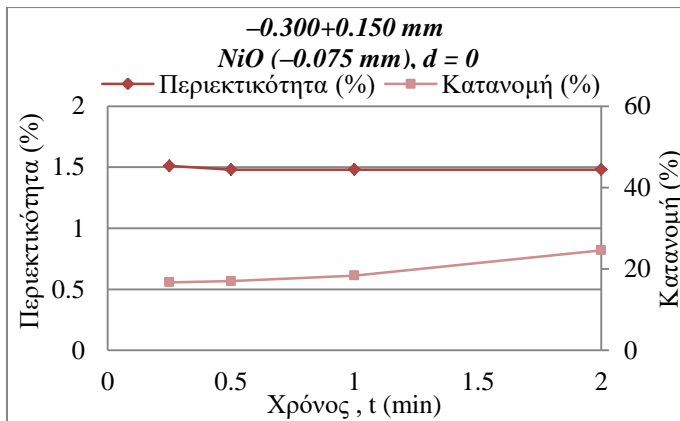
Διάγραμμα 7.84: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –0.300+0.150 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=1 min.



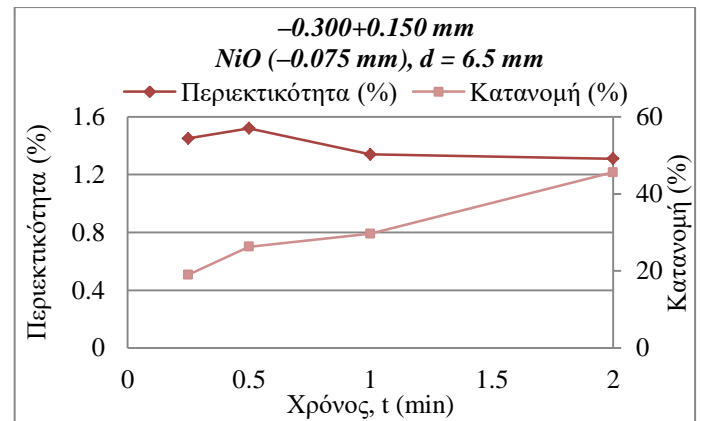
Διάγραμμα 7.85: Κατανομή (%) NiO των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος –0.300+0.150 mm σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαιρών για t=2 min.

Στα διαγράμματα 7.82 – 7.85 παρατηρείται ότι για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης και για d=6.5 mm η κατανομή (%) είναι μεγαλύτερη για το κλάσμα –0.150 mm σε σχέση με το λεπτό κλάσμα –0.075 mm. Γενικότερα, η μεγαλύτερη κατανομή NiO παρατηρείται στο κλάσμα –0.150 mm για d=6.5 mm και t=2 min και είναι 66.73%, όπως φαίνεται κι από τον πίνακα 7.55.

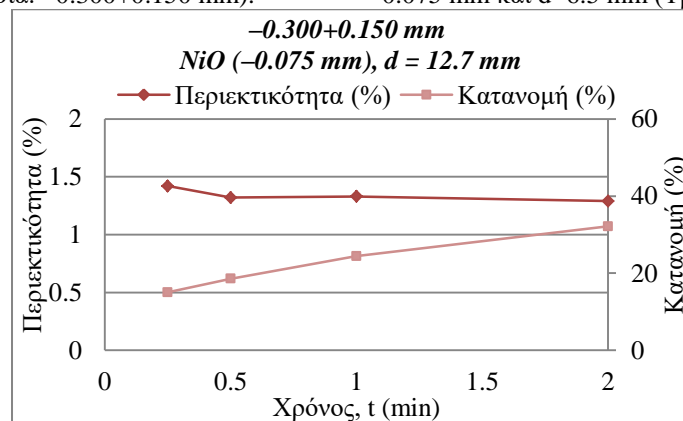
Τέλος, παρουσιάζονται τα διπλά διαγράμματα περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) του NiO του λεπτού κλάσματος (–0.075 mm).



Διάγραμμα 7.86: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και $d=0$ (Τροφοδοσία: $-0.300+0.150\text{ mm}$).



Διάγραμμα 7.87: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και $d=6.5\text{ mm}$ (Τροφοδοσία: $-0.300+0.150\text{ mm}$).



Διάγραμμα 7.88: Περικτικότητα (%) και κατανομή (%) NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κλάσματος -0.075 mm και $d=12.7\text{ mm}$ (Τροφοδοσία: $-0.300+0.150\text{ mm}$).

Στα διαγράμματα 7.86 – 7.88 παρατηρείται ότι α) γενικά, για το λεπτό κλάσμα -0.075 mm και για τις συγκεκριμένες διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5\text{ mm}$ και $d=12.7\text{ mm}$) όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης μειώνεται η περιεκτικότητα (%) του NiO, ενώ αντίθετα αυξάνεται η κατανομή του, β) η ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και με την αύξηση της διαμέτρου των σφαιρών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για χρόνο λειοτρίβησης 2 min και $d=0$, η περιεκτικότητα του NiO είναι 1.48% που αντιστοιχεί σε κατανομή 24.58% , ενώ για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης και $d=6.5\text{ mm}$, η περιεκτικότητα του ίδιου στοιχείου είναι 1.31% που αντιστοιχεί σε κατανομή 45.61% .

7.3.5 Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων

Από τις ημιποσοτικές αναλύσεις του XRD μελετήθηκε η επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών και του χρόνου λειοτρίβησης για συγκεκριμένες ορυκτολογικές φάσεις.

Από τα διπλά διαγράμματα 7.86 – 7.88 (υποκεφάλαιο 7.3.4) παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες τιμές περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) του NiO αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο χρόνο $t=2$ min. Για το λόγο αυτό, κι εφόσον τα ορυκτά που αναλύονται είναι φορείς νικελίου, στους παρακάτω πίνακες 7.56 και 7.57 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα (%) και η κατανομή (%) των ορυκτολογικών φάσεων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Πίνακας 7.56: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	73.33	41.38	56.19	20.30	32.30	27.30	13.20	13.20	13.30	3.20	3.30	3.30
-0.150+0.075	10.56	24.85	19.65	58.69	16.02	14.60	11.46	17.80	18.01	11.69	5.03	6.37
-0.075	16.11	33.77	24.16	15.00	20.00	21.90	16.20	10.70	10.30	2.60	4.10	3.70
	100.00	100.00	100.00	23.50	23.50	23.50	13.50	13.50	13.50	4.00	4.00	4.00

Πίνακας 7.57: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

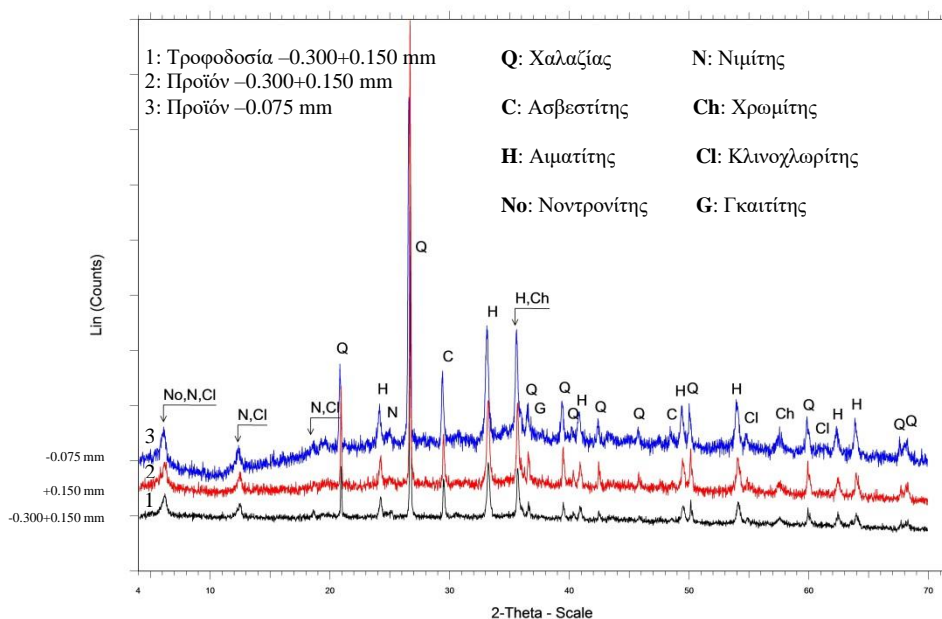
$t=2$ min	Παραμένον						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	73.33	41.38	56.19	63.35	56.88	65.28	71.70	40.46	55.36	58.67	34.14	46.36
-0.150+0.075	10.56	24.85	19.65	26.37	14.38	12.21	8.97	32.77	26.21	30.86	31.25	31.30
-0.075	16.11	33.77	24.16	10.28	28.74	22.52	19.33	26.77	18.40	10.47	34.61	22.35
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	100.01

Από τον πίνακα 7.56 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα (%) του χαλαζία για $t=2$ min είναι μεγαλύτερη στο χονδρό κλάσμα και μικρότερη στο ενδιάμεσο και στο λεπτό κλάσμα, με εξαίρεση τη δοκιμή για $d=0$ mm όπου η περιεκτικότητα του χαλαζία φτάνει το 58.69%. Αντίθετα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του νιμίτη παρατηρείται στο λεπτό κλάσμα για $d=0$ και στο ενδιάμεσο κλάσμα για $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του νιμίτη είναι 18.01% για $d=12.7$ κι αντιστοιχεί στο ενδιάμεσο κλάσμα. Για το χρωμίτη, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα

παρατηρείται στο ενδιάμεσο κλάσμα ($-0.150+0.075$ mm) για $d = 0$ και τιμή 11.69%. Όσον αφορά την κατανομή (%), από τον πίνακα 7.57, παρατηρείται ότι για τα συγκεκριμένα ορυκτά έχει μια τάση να μειώνεται όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος.

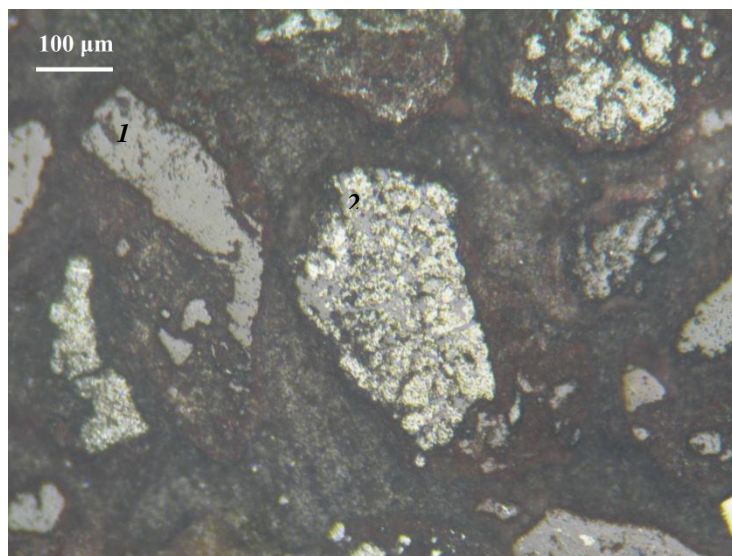
Οι αντίστοιχοι πίνακες για τις υπόλοιπες δοκιμές καθώς και οι πίνακες της περιεκτικότητας (%) και κατανομής (%) των ορυκτολογικών αναλύσεων των αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ (Πίνακες Γ6. – Γ19).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα ακτινοδιαγράμματα της τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm, του χονδρού προϊόντος ($-0.300+0.150$ mm) και του λεπτού προϊόντος (-0.075 mm) καθώς και η φωτογραφία της στυπνής τομής της αρχικής τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm.



Διάγραμμα 7.89: Ορυκτολογική ανάλυση του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.300+0.150$ mm, του προϊόντος $-0.300+0.150$ mm και του προϊόντος -0.075 mm, Τροφοδοσία: $-0.300+0.150$ mm, Συνθήκες λειοτρίβησης: $t=2$ min, $d=12.7$ mm.

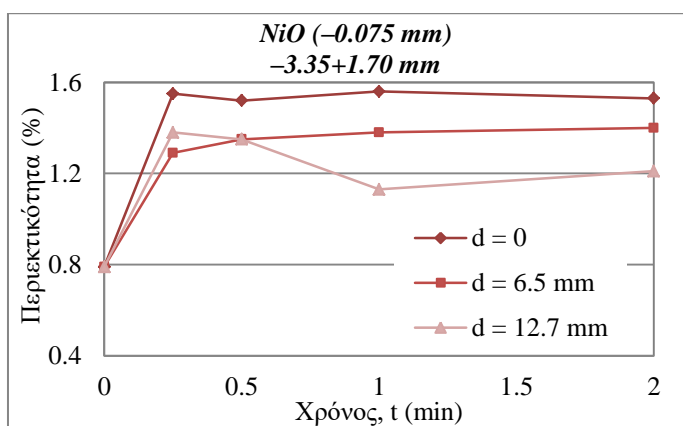
Από το διάγραμμα 7.89 παρατηρείται ότι οι κορυφές του χαλαζία είναι μεγαλύτερες στην τροφοδοσία $-0.300+0.150$ mm. Αντίθετα, στο λεπτό κλάσμα -0.075 mm παρατηρείται να υπάρχουν περισσότερες κορυφές νιμίτη και χρωμίτη.



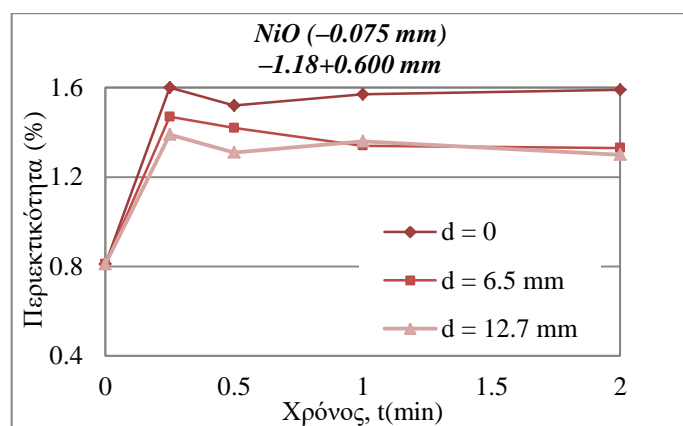
Εικόνα 7.1: Στιλπνή τομή του κλάσματος $-0.300+0.150$ mm (LE23). Ανακλώμενο φως, // Nicols. 1: Κόκκος χαλαζία, 2: Κόκκος αιματίτη με εγκλείσματα χαλαζία.

7.4 Επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών στην περιεκτικότητα του NiO

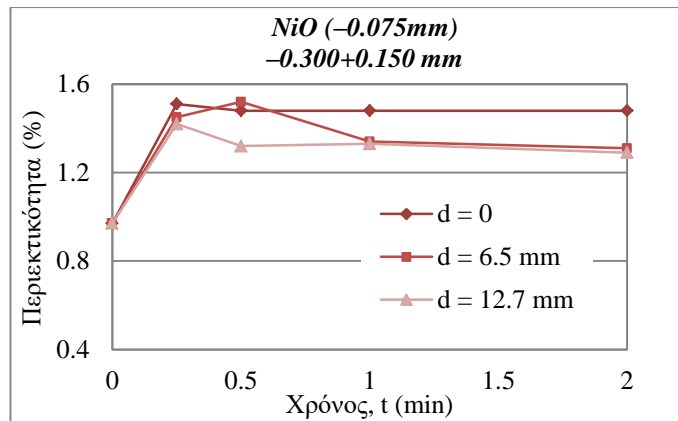
Από την επεξεργασία των χημικών αναλύσεων για τα τρία κοκκομετρικά κλάσματα παρατηρήθηκε ότι το NiO παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) στο λεπτό κλάσμα (-0.075 mm). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα 7.90 – 7.93 τα οποία παριστάνουν την περιεκτικότητα (%) NiO του κλάσματος -0.075 mm σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης για διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm ανά μέγεθος τροφοδοσίας.



Διάγραμμα 7.90: Περιεκτικότητα (%) NiO του κλάσματος -0.075 mm σε σχέση με το χρόνο για διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm (Τροφοδοσία $-3.35+1.70$ mm).



Διάγραμμα 7.91: Περιεκτικότητα (%) NiO του κλάσματος -0.075 mm σε σχέση με το χρόνο για διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm (Τροφοδοσία $-1.18+0.600$ mm).



Διάγραμμα 7.92: Περιεκτικότητα (%) NiO του κλάσματος -0.075 mm σε σχέση με το χρόνο για διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm (Τροφοδοσία $-0.300+0.150 \text{ mm}$).

Από τα παραπάνω διαγράμματα 7.90 – 7.92 παρατηρείται ότι για όλες τις τροφοδοσίες το NiO παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης 0.25 min και για δοκιμές χωρίς σφαίρες (αυτολειοτρίβηση). Πιο συγκεκριμένα, για αυτές τις συνθήκες η μεγαλύτερη περιεκτικότητα NiO παρατηρείται στο κλάσμα τροφοδοσίας $-1.18+0.600 \text{ mm}$ και η τιμή της φτάνει το 1.60% που αντιστοιχεί σε μικρή κατανομή 3.80%. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι για το προϊόν -0.075 mm η μεγαλύτερη περιεκτικότητα (%) του NiO παρατηρείται στο μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης 0.25 min σε αντίθεση με τη μεγαλύτερη κατανομή (%) του, η οποία παρουσιάζεται στο μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης 2 min. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη κατανομή του NiO παρουσιάζεται στο λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας ($-0.300+0.150 \text{ mm}$) για το μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης 2 min και διάμετρο σφαιρών 6.5 mm με τιμή 45.26% που αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα 1.31%.

7.5 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας

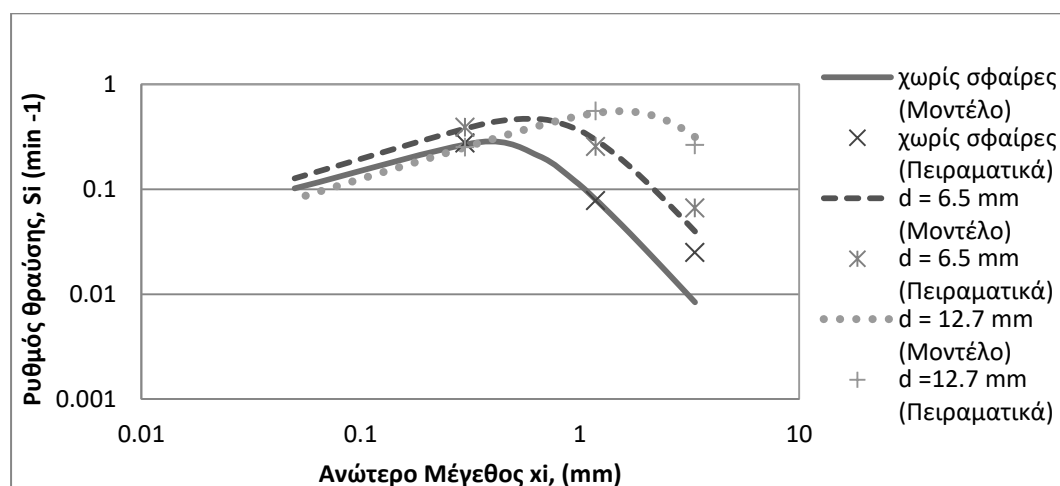
Αρχικά, ο ρυθμός θραύσης, ο οποίος θεωρήθηκε σταθερός κι ανεξάρτητος του χρόνου λειοτρίβησης, μελετήθηκε σε συνάρτηση με το μέγεθος τροφοδοσίας (σχέση 6.16). Για τη μελέτη του επιλύθηκε το μοντέλο κατά Austin et al. (1984) μέσω του προγράμματος excel και με τη βοήθεια του εργαλείου *solver*. Σκοπός της επίλυσης, ήταν να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν το σφάλμα μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και του μοντέλου. Οι παράμετροι αυτές, είναι οι εξής: α_T , α , μ και A .

Η αρχική επίλυση πραγματοποιήθηκε δίνοντας στις παραμέτρους τις πειραματικές τιμές και τιμές από τη βιβλιογραφία. Η πρώτη επίλυση έγινε

αλλάζοντας τις τιμές όλων των παραμέτρων και παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των α και Λ διέφεραν ελάχιστα μεταξύ τους.

Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι οι παράμετροι α και Λ εξαρτώνται από το υλικό, οπότε οι τιμές τους πρέπει να είναι ίδιες για όλες τις διαμέτρους σφαιρών. Αντίθετα, οι παράμετροι α_T και μ εξαρτώνται από τις συνθήκες λειοτρίβησης και διαφέρουν για κάθε διάμετρο σφαίρας.

Τέλος, έγινε μια τελευταία επίλυση με σταθερές τις τιμές των α και Λ κι αλλάζοντας τις τιμές των α_T και μ . Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι σαν μέγεθος τροφοδοσίας χρησιμοποιήσαμε το ανώτερο μέγεθος από κάθε τάξη μεγέθους. Τα αποτελέσματα από την επίλυση παρουσιάζονται στους πίνακες $\Delta 1 - \Delta 4$ του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Δ. Από τα αποτελέσματα της επίλυσης προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα 7.94 στο οποίο φαίνεται ο ρυθμός θραύσης συναρτήσει του ανώτερου μεγέθους της τροφοδοσίας και για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).



Διάγραμμα 7.94: Σύγκριση ρυθμού θραύσης πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου σε σχέση με το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών ($d = 0$, $d = 6.5$ mm, $d = 12.7$ mm).

Στο διάγραμμα 7.94 παρατηρείται ότι για κάθε διάμετρο σφαίρας υπάρχει ένα βέλτιστο μέγεθος της τάξης μεγέθους (x_m), όπου ο ρυθμός θραύσης παίρνει τη μέγιστη τιμή του (S_m) και μετά την τιμή αυτή μειώνεται σταδιακά. Στον παρακάτω πίνακα 7.58 παρουσιάζονται τα βέλτιστα μεγέθη της τάξης μεγέθους (x_m) και τα μέγιστα σημεία ρυθμού θραύσης (S_m) για κάθε διάμετρο σφαίρας ($d = 0$, $d = 6.5$ mm, $d = 12.7$ mm).

Πίνακας 7.58: Μέγιστα μεγέθη της τάξης μεγέθους (x_m) και μέγιστα σημεία ρυθμού θραύσης (S_m) για κάθε διάμετρο σφαίρας ($d = 0, d = 6.5 \text{ mm}, d = 12.7 \text{ mm}$).

$d \text{ (mm)}$	$x_m \text{ (mm)}$	$S_m \text{ (min}^{-1}\text{)}$
0.0	0.36	0.28
6.5	0.58	0.47
12.7	1.53	0.56

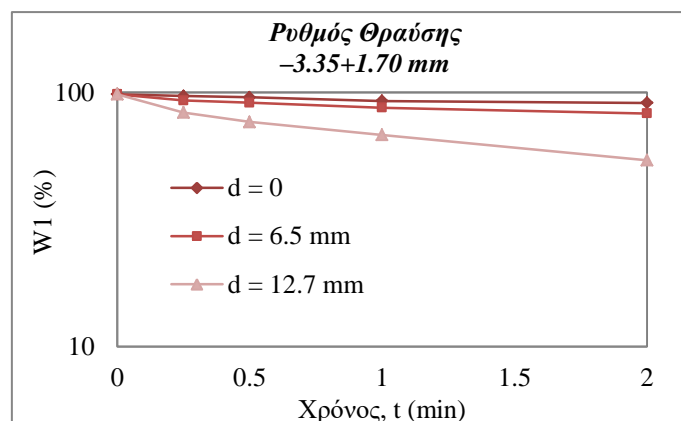
Από τον παραπάνω πίνακα 7.58 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται και το x_m και το S_m . Η μεγαλύτερη τιμή του x_m είναι 1.53 mm κι αντιστοιχεί στο S_m με τιμή 0.56 min⁻¹, για τη μεγαλύτερη διάμετρο σφαιρών 12.7 mm.

7.6 Ρυθμός θραύσης οξειδίων και ορυκτολογικών φάσεων συναρτήσει του χρόνου λειοτριβήσης

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων και των ορυκτολογικών φάσεων για τις διαφορετικές τροφοδοσίες που χρησιμοποιήθηκαν. Γενικά, ενώ στα προηγούμενα κεφάλαια ο ρυθμός θραύσης θεωρήθηκε σταθερός κι ανεξάρτητος του χρόνου στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η μεταβολή του σε σχέση με το χρόνο για να διερευνηθεί αν τελικά στην πραγματικότητα είναι σταθερός κι ανεξάρτητος του χρόνου. Ένας ακόμα λόγος όπου ο ρυθμός θραύσης σε αυτό το κεφάλαιο δε θεωρήθηκε ανεξάρτητος του χρόνου οφείλεται στο υλικό το οποίο μελετάμε. Όπως, έχει αναφερθεί και στο θεωρητικό μέρος, ο λατερίτης είναι ετερογενές υλικό με πολύπλοκη χημική και ορυκτολογική σύσταση, η οποία είναι διαφορετική για κάθε κλάσμα τροφοδοσίας. Επομένως, ο ρυθμός θραύσης μελετήθηκε για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (0–0.25 min, 0.25–0.5 min, 0.5–1 min και 1–2 min). Τέλος, ο ρυθμός θραύσης υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας των χρονικών διαστημάτων με τη βοήθεια της σχέσης 6.10.

7.6.1 Τροφοδοσία – 3.35 + 1.70 mm

Αρχικά, παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 7.95 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) του προϊόντος που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους της τροφοδοσίας σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0, d=6.5 \text{ mm}$ και $d=12.7 \text{ mm}$).



Διάγραμμα 7.95: Ρυθμός θραύσης σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσεως του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (d=0, d=6.5 mm, d=12.7 mm).

Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι στα ετερογενή συστήματα ο ρυθμός θραύσης στην πράξη δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο. Επομένως, σε αντίθεση με το διάγραμμα 7.9 του υποκεφαλαίου 7.1.4, όπου ο ρυθμός θραύσης θεωρήθηκε ανεξάρτητος του χρόνου, στο παραπάνω διάγραμμα 7.95 μελετήθηκε η μεταβολή του ρυθμού θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm σε σχέση με το χρόνο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7.59.

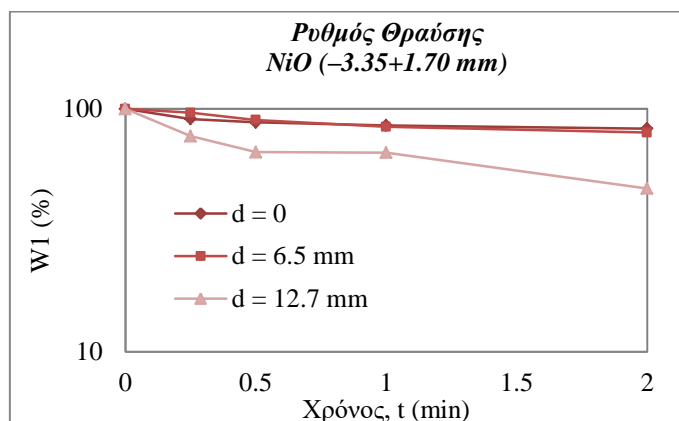
Πίνακας 7.59: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Χρονικό διάστημα (min)	Ρυθμός Θραύσης, S_i (min^{-1}), -3.35+1.70 mm		
	d=0	d=6.5 mm	d=12.7 mm
0-0.25	0.062	0.228	0.661
0.2-0.5	0.047	0.081	0.338
0.5-1	0.066	0.088	0.237
1-2	0.017	0.053	0.229

Στον πίνακα 7.59 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι 0.661 min^{-1} για d=12.7 mm και χρονικό διάστημα 0-0.25 min.

Εκτός από το ρυθμό θραύσης του κλάσματος μελετήθηκε και ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων, από τα οποία αναλύθηκε περαιτέρω ο ρυθμός θραύσης του NiO. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 7.96 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) του NiO που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε

συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).



Διάγραμμα 7.96: Ρυθμός θραύσης NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

Από το διάγραμμα 7.96 κι από την κλίση κάθε ευθείας των χρονικών διαστημάτων 0–0.25 min, 0.25–0.5 min, 0.5–1 min και 1–2 min υπολογίστηκε ο ρυθμός θραύσης του NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών (0, 6.5 mm, 12.7 mm). Στον παρακάτω πίνακα 7.60 παρουσιάζονται οι ρυθμοί θραύσης του NiO για κάθε διάμετρο σφαιρών σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Πίνακας 7.60: Ρυθμοί θραύσης NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Χρονικό διάστημα (min)	Μέσος Χρόνος (min)	Ρυθμός Θραύσης NiO, $S_i(\text{min})^{-1}$, $-3.35+1.70$ mm		
		$d=0$	$d=6.5$ mm	$d=12.7$ mm
0–0.25	0.125	0.388	0.161	1.034
0.25–0.5	0.375	0.128	0.271	0.609
0.5–1	0.75	0.055	0.133	0.008
1–2	1.5	0.031	0.055	0.340

Από τον πίνακα 7.60 παρατηρείται ότι για δοκιμές χωρίς σφαίρες όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτριβήσης μειώνεται ο ρυθμός θραύσης. Για διάμετρο σφαιρών 6.5 mm και 12.7 mm παρατηρείται μια αύξηση του ρυθμού θραύσης του NiO για 0.25–0.5 min και για 1–2 min, αντίστοιχα. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι 1.03 min^{-1} για $d=12.7$ mm και για το χρονικό διάστημα 0–0.25 min.

Με τον ίδιο τρόπο, εκτός από το ρυθμό θραύσης του NiO, μελετήθηκε κι ο ρυθμός θραύσης και για άλλα οξειδία όπως και για κάποιες ορυκτολογικές φάσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες 7.61 και 7.62 καθώς και τα διαγράμματα

7.97 – 7.99 και 7.100 – 7.102 τα οποία παριστάνουν το ρυθμό θραύσης των οξειδίων και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο, αντίστοιχα.

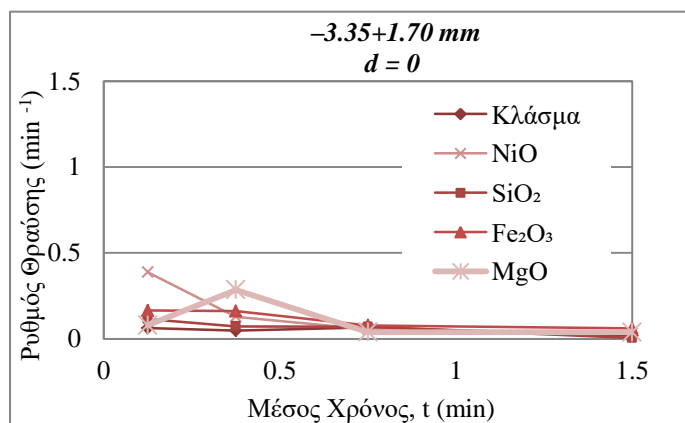
Πίνακας 7.61: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm και των οξειδίων για το μέσο χρόνο λειοτρίβησης και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Ρυθμός Θραύσης, Si (min^{-1}), $-3.35+1.70$ mm

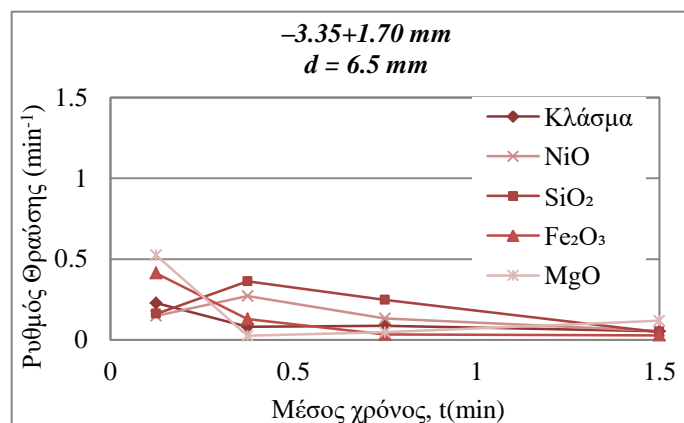
Μέσος Χρόνος (min)	Κλάσμα			NiO			SiO ₂			Fe ₂ O ₃			MgO		
	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
0.125	0.062	0.228	0.661	0.388	0.148	1.034	0.114	0.161	0.766	0.165	0.413	0.824	0.079	0.524	1.013
0.375	0.047	0.081	0.338	0.128	0.271	0.609	0.072	0.362	0.238	0.161	0.129	0.897	0.285	0.026	0.338
0.75	0.066	0.088	0.237	0.055	0.133	0.008	0.070	0.248	0.221	0.078	0.034	0.034	0.039	0.047	0.265
1.5	0.017	0.053	0.229	0.031	0.055	0.340	0.004	0.048	0.232	0.060	0.029	0.211	0.038	0.119	0.247

Από το παραπάνω πίνακα 7.61 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του κλάσματος είναι 0.661 min^{-1} για τη μικρότερη χρονική περίοδο 0.125 min και διάμετρο σφαιρών 12.7 mm. Όσον αφορά το ρυθμό θραύσης του NiO φαίνεται να έχει μια τάση να μειώνεται όσο μειώνεται ο χρόνος λειοτρίβησης και να αυξάνεται όσο μεγαλώνει η διάμετρος των σφαιρών, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή 1.034 min^{-1} στη μικρότερη χρονική περίοδο 0.125 min και για διάμετρο σφαιρών $d=12.7$ mm. Σε αυτές τις συνθήκες λειοτρίβησης τα NiO, SiO₂, MgO και Fe₂O₃ λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές ρυθμού θραύσης από εκείνη του κλάσματος. Οι ρυθμοί θραύσης ακολουθούν τη σειρά, από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη τιμή, NiO>MgO>Fe₂O₃>SiO₂>Κλάσμα.

Επίσης, παρουσιάζονται τα διαγράμματα 7.97 – 7.99 τα οποία παριστάνουν το ρυθμό θραύσης του κλάσματος και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο.



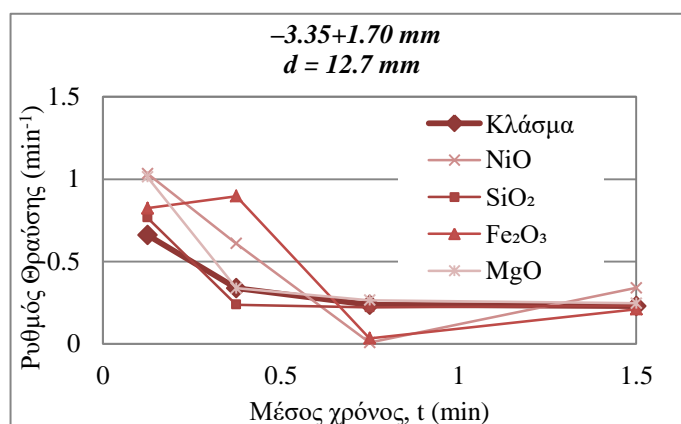
Διάγραμμα 7.97: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο για διάμετρο σφαιρών $d = 0$ mm.



Διάγραμμα 7.98: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο για διάμετρο σφαιρών $d = 6.5$ mm.

μέσο χρόνο λειοτρίβησης για d=0.

μέσο χρόνο λειοτρίβησης για d=6.5 mm.



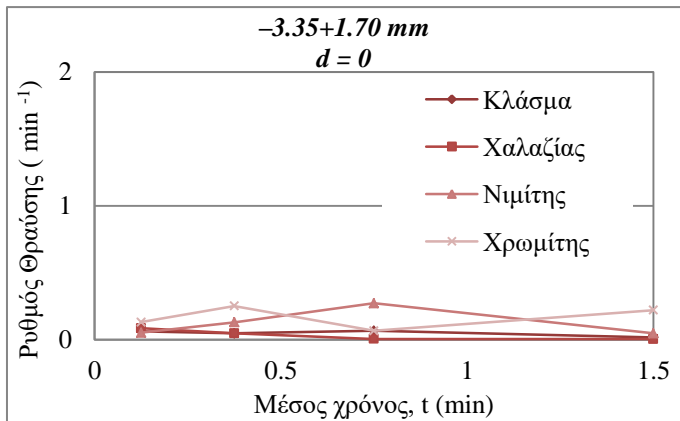
Διάγραμμα 7.99: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο για $d = 12.7$ mm.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.97 – 7.99 παρατηρείται ότι α) ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων διαφοροποιείται από εκείνον του κλάσματος, β) γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος αλλά και των περισσότερων οξειδίων όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, γ) η ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και με τη μείωση της διαμέτρου των σφαιρών και δ) η μεγαλύτερη διαφοροποίηση του ρυθμού θραύσης μεταξύ των οξειδίων και του κλάσματος εμφανίζεται στο μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης (μέσος χρόνος 0.125 min) και με χρήση της μεγαλύτερης διαμέτρου σφαιρών 12.7 mm.

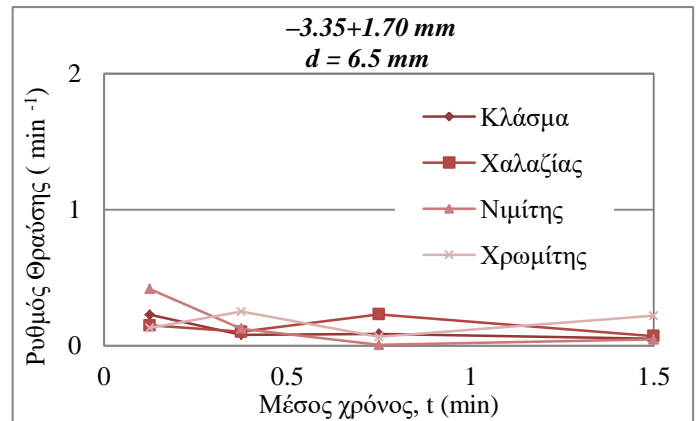
Τέλος, όπως προαναφέρθηκε εκτός από τα οξείδια, μελετήθηκε και ο ρυθμός θραύσης των ορυκτολογικών φάσεων. Τα αποτελέσματα του ρυθμού θραύσης για συγκεκριμένες ορυκτολογικές φάσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7.62 καθώς και στα παρακάτω διαγράμματα 7.100 – 7.102.

Πίνακας 7.62: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων για το μέσο χρόνο λειοτρίβησης και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

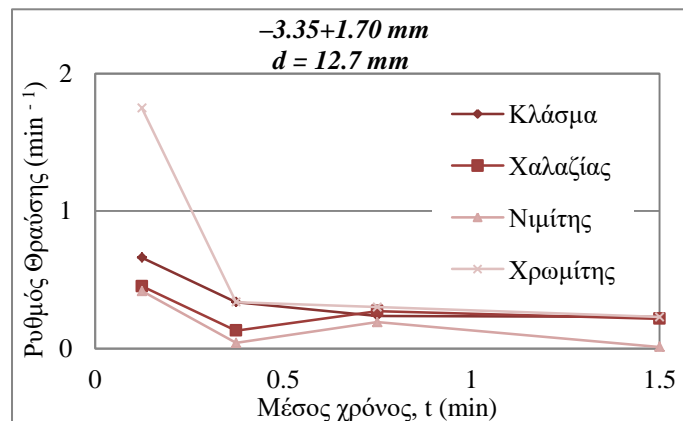
Ρυθμός Θραύσης, Si (min^{-1}), $-3.35+1.70$ mm												
Μέσος Χρόνος (min)	Κλάσμα			Χαλαζία			Νιμίτης			Χρωμίτης		
	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
0.125	0.062	0.228	0.661	0.086	0.150	0.453	0.052	0.418	0.459	0.131	1.189	1.749
0.375	0.047	0.081	0.338	0.047	0.103	0.13	0.126	0.04	0.376	0.252	0.339	0.338
0.75	0.066	0.088	0.237	0.005	0.231	0.272	0.007	0.192	0.477	0.066	0.088	0.301
1.5	0.017	0.053	0.229	0.004	0.071	0.216	0.047	0.011	0.045	0.221	0.053	0.229



Διάγραμμα 7.100: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=0$.



Διάγραμμα 7.101: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=6.5$ mm



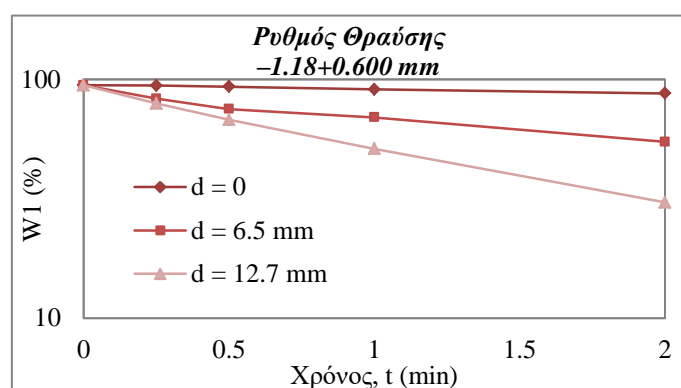
Διάγραμμα 7.102: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=12.7$ mm.

Από το παραπάνω πίνακα 7.62 και τα διαγράμματα 7.100 – 7.102 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του κλάσματος είναι 0.661 min^{-1} για τη μικρότερη χρονική περίοδο 0.125 min και διάμετρο σφαιρών 12.7 mm. Όσον αφορά τους ρυθμούς θραύσης των ορυκτών φαίνεται να έχουν μια τάση να αυξάνονται όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης, εκτός κάποιες δοκιμές του νιμίτη και του χρωμίτη όπου παρατηρείται μια μείωση για $d=6.5$ mm και στη συνέχεια αύξηση για $d=12.7$ mm. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται καλύτερα στο μικρότερη χρονική περίοδο λειοτρίβησης (μέσος χρόνος 0.125 min) και για διάμετρο σφαιρών 12.7 mm. Σε αυτές τις συνθήκες ο χρωμίτης λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή ρυθμού θραύσης από εκείνη του κλάσματος, ενώ ο νιμίτης και ο χαλαζίας λαμβάνουν μικρότερη τιμή σε

σύγκριση με τον χρωμίτη και το κλάσμα. Οι ρυθμοί θραύσης ακολουθούν τη σειρά, από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη τιμή, Χρωμίτης>Κλάσμα>Νιμίτης>Χαλαζίας.

7.6.2 Τροφοδοσία – 1.18 + 0.600 mm

Αρχικά, παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 7.103 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) προϊόντος που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm) και είναι ίδιο με το διάγραμμα 7.40 του υποκεφαλαίου 7.2.3.



Διάγραμμα 7.103: Ρυθμός θραύσης σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

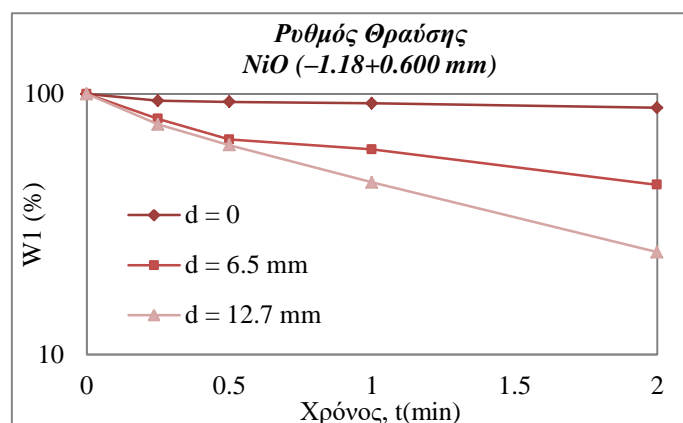
Ο ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm του διαγράμματος 7.103 μελετήθηκε όπως και του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm του υποκεφαλαίου 7.6.1, δηλαδή μελετήθηκε η μεταβολή του ρυθμού θραύσης σε σχέση με το χρόνο. Ο ρυθμός θραύσης υπολογίστηκε, από την κλίση κάθε ευθείας των χρονικών διαστημάτων (0–0.25 min, 0.25–0.5 min, 0.5–1 min και 1–2 min) για κάθε διάμετρο σφαίρας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7.63.

Πίνακας 7.63: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος -1.18+0.600 mm για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Χρονικό διάστημα (min)	Ρυθμός Θραύσης, $S_i (\text{min}^{-1})^I$, -1.18+0.600 mm		
	$d=0$	$d=6.5$ mm	$d=12.7$ mm
0–0.25	0.013	0.515	0.704
0.25–0.5	0.044	0.405	0.630
0.5–1	0.052	0.159	0.557
1–2	0.039	0.237	0.517

Στον παραπάνω πίνακα 7.63 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι 0.704 min^{-1} για $d=12.7 \text{ mm}$ και χρονικό διάστημα 0–0.25 min.

Εκτός, από το ρυθμό θραύσης του κλάσματος μελετήθηκε και ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων από τα οποία αναλύθηκε περαιτέρω ο ρυθμός θραύσης του NiO. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 7.104 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) του NiO που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5 \text{ mm}$ και $d=12.7 \text{ mm}$).



Διάγραμμα 7.104: Ρυθμός θραύσης NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600 \text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5 \text{ mm}$, $d=12.7 \text{ mm}$).

Από το διάγραμμα 7.104 κι από την κλίση κάθε ευθείας των χρονικών διαστημάτων 0–0.25 min, 0.25–0.5 min, 0.5–1 min και 1–2 min υπολογίστηκε ο ρυθμός θραύσης του NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600 \text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών (0, 6.5 mm, 12.7 mm). Στον παρακάτω πίνακα 7.82 παρουσιάζονται οι ρυθμοί θραύσης του NiO για κάθε διάμετρο σφαιρών σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Πίνακας 7.64: Ρυθμός θραύσης NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600 \text{ mm}$ για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Χρονικό διάστημα (min)	Ρυθμός Θραύσης NiO, $S_i(\text{min})^{-1}$, $-1.18+0.600 \text{ mm}$			
	Μέσος Χρόνος (min)	$d=0$	$d=6.5 \text{ mm}$	$d=12.7 \text{ mm}$
0–0.25	0.125	0.235	0.87	1.07
0.25–0.5	0.375	0.039	0.73	0.73
0.5–1	0.75	0.028	0.18	0.66
1–2	1.5	0.039	0.31	0.62

Από τον παραπάνω πίνακα 7.64 παρατηρείται ότι για δοκιμές χωρίς σφαίρες και διάμετρο σφαιρών 12.7 mm όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης μειώνεται ο ρυθμός θραύσης του NiO. Επίσης, για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται ο ρυθμός θραύσης του NiO. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του NiO είναι 1.07 min^{-1} για $d=12.7 \text{ mm}$ και χρονικό διάστημα 0–0.25 min.

Με τον ίδιο τρόπο, εκτός από το ρυθμό θραύσης του NiO, μελετήθηκε κι ο ρυθμός θραύσης και για άλλα οξειδία όπως και για κάποιες ορυκτολογικές φάσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες 7.65 και 7.66 καθώς και τα διαγράμματα 7.105 – 7.107 και 7.108 – 7.110 τα οποία παριστάνουν το ρυθμό θραύσης των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο καθώς και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο, αντίστοιχα.

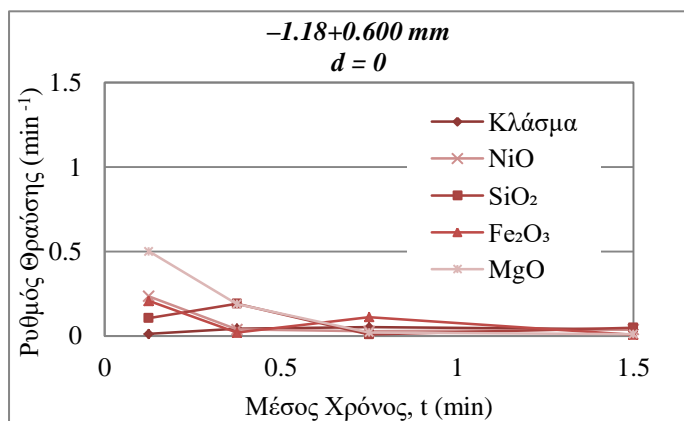
Πίνακας 7.65: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600 \text{ mm}$ και των οξειδίων για το μέσο χρόνο λειοτρίβησης και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Ρυθμός Θραύσης, $\text{Si} (\text{min}^{-1})$, $-1.18+0.600 \text{ mm}$

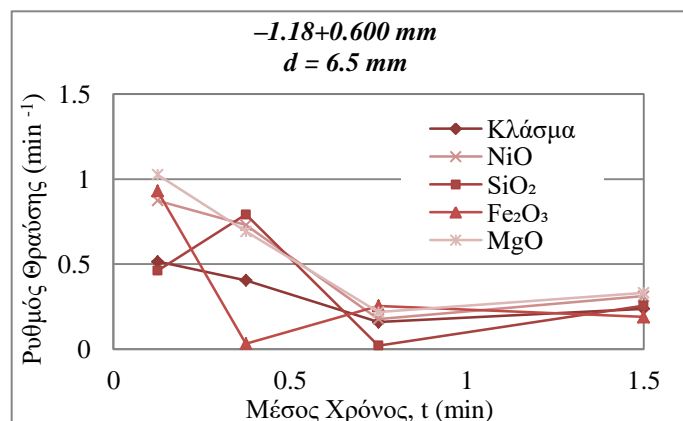
Μέσος Χρόνος (min)	Κλάσμα			NiO			SiO ₂			Fe ₂ O ₃			MgO		
	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
0.125	0.013	0.515	0.704	0.235	0.874	1.072	0.106	0.461	0.993	0.208	0.930	0.816	0.501	1.026	0.994
0.375	0.044	0.405	0.630	0.039	0.730	0.733	0.192	0.792	0.632	0.02	0.032	0.545	0.190	0.692	0.888
0.75	0.052	0.159	0.557	0.028	0.177	0.658	0.010	0.021	0.505	0.112	0.254	0.558	0.021	0.218	0.728
1.5	0.039	0.237	0.517	0.039	0.312	0.618	0.050	0.256	0.567	0.008	0.189	0.441	0.012	0.331	0.610

Από τον παραπάνω πίνακα 7.65 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του κλάσματος είναι 0.704 min^{-1} για τη μικρότερη χρονική περίοδο 0.125 min και διάμετρο σφαιρών 12.7 mm. Όσον αφορά το ρυθμό θραύσης του NiO φαίνεται να έχει μια τάση να αυξάνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών για τον ίδιο χρόνο λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή 1.072 min^{-1} στη μικρότερη χρονική περίοδο 0.125 min και για διάμετρο σφαιρών $d=12.7 \text{ mm}$. Σε αυτές τις συνθήκες λειοτρίβησης τα NiO, MgO, Fe₂O₃, SiO₂ λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές ρυθμού θραύσης από εκείνη του κλάσματος. Οι ρυθμοί θραύσης ακολουθούν τη σειρά, από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη τιμή, NiO>MgO> SiO₂>Fe₂O₃>Κλάσμα.

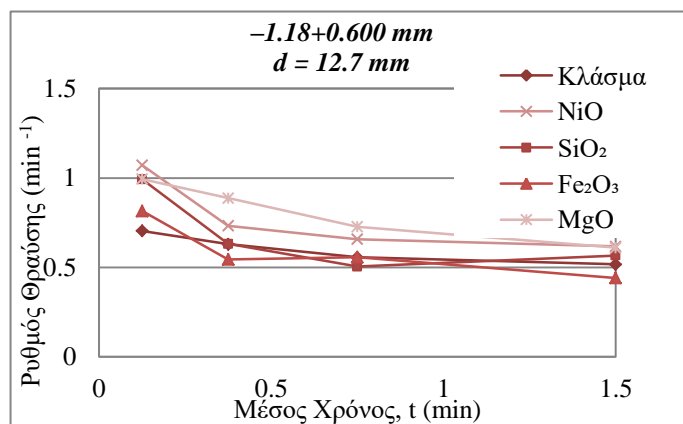
Επίσης, παρουσιάζονται τα διαγράμματα 7.105 – 7.107 τα οποία παριστάνουν το ρυθμό θραύσης του κλάσματος και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο.



Διάγραμμα 7.105: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=0$ mm.



Διάγραμμα 7.106: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=6.5$ mm.



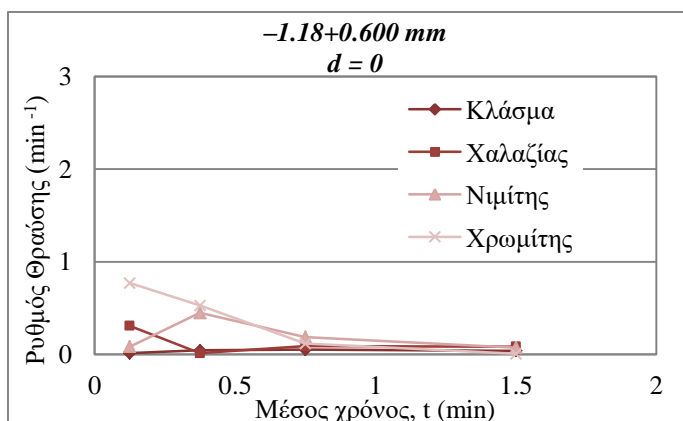
Διάγραμμα 7.107: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=12.7$ mm.

Στα παραπάνω διαγράμματα 7.106 – 7.107 παρατηρείται ότι α) ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων διαφοροποιείται από εκείνον του κλάσματος, β) γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος αλλά και των περισσότερων οξειδίων όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, γ) η ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και με τη μείωση της διαμέτρου των σφαιρών και δ) η μεγαλύτερη διαφοροποίηση του ρυθμού θραύσης μεταξύ των οξειδίων και του κλάσματος εμφανίζεται στο μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης (μέσος χρόνος 0.125 min) και με χρήση της μεγαλύτερης διαμέτρου σφαιρών 12.7 mm.

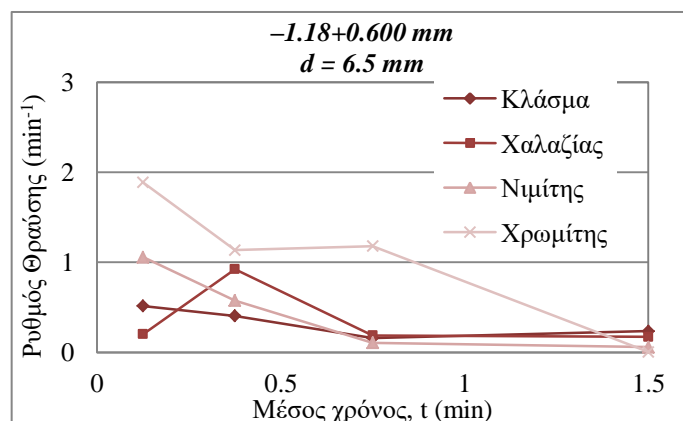
Τέλος, όπως προαναφέρθηκε εκτός από τα οξείδια, μελετήθηκε και ο ρυθμός θραύσης των ορυκτολογικών φάσεων. Τα αποτελέσματα του ρυθμού θραύσης για συγκεκριμένες ορυκτολογικές φάσεις του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7.66 καθώς και στα παρακάτω διαγράμματα 7.111 – 7.113.

Πίνακας 7.66: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος $-1.18+0.600$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων για το μέσο χρόνο λειοτρίβησης και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

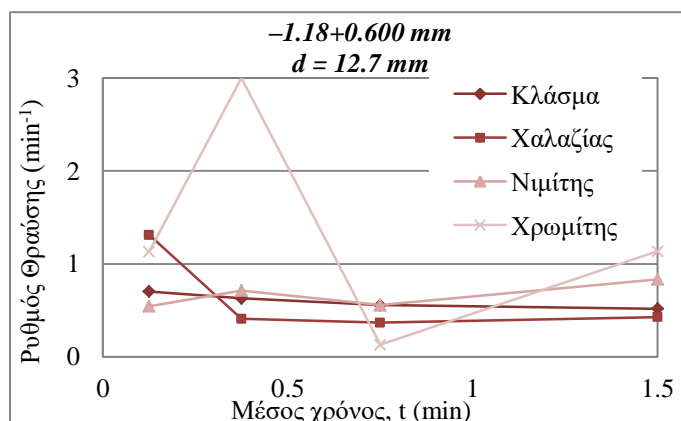
Ρυθμός Θραύσης, Si (min^{-1}), $-1.18+0.600$ mm												
Μέσος Χρόνος (min)	Κλάσμα			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
0.125	0.013	0.515	0.704	0.310	0.203	1.311	0.085	1.057	0.546	0.770	1.888	1.132
0.375	0.044	0.405	0.630	0.014	0.925	0.410	0.449	0.576	0.714	0.529	1.135	3.002
0.75	0.052	0.159	0.557	0.090	0.188	0.368	0.188	0.107	0.557	0.118	1.180	0.130
1.5	0.039	0.237	0.517	0.085	0.172	0.428	0.074	0.058	0.834	0.006	0.460	1.136



Διάγραμμα 7.111: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο για $d=0$.



Διάγραμμα 7.112: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο για $d=6.5$ mm



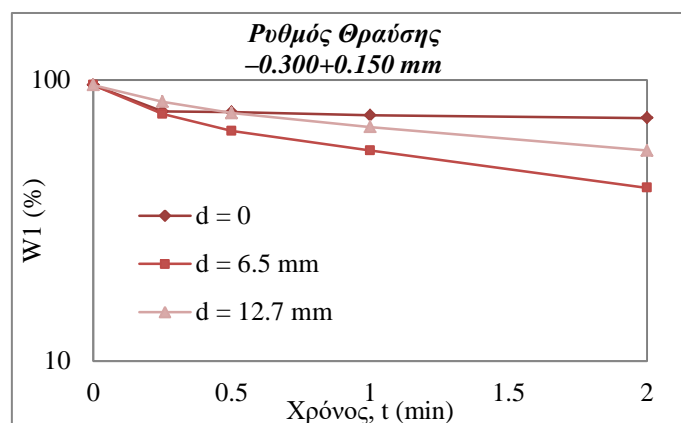
Διάγραμμα 7.113: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο για $d=12.7$ mm

Από τον παραπάνω πίνακα 7.66 και τα διαγράμματα 7.111 – 7.113 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται καλύτερα στη μικρότερη χρονική περίοδο 0.125 min και για διάμετρο σφαιρών 12.7 mm. Σε αυτές τις συνθήκες, ο χαλαζίας και ο χρωμίτης λαμβάνουν

μεγαλύτερες τιμές ρυθμού θραύσης από εκείνη του κλάσματος, ενώ ο νιμίτης λαμβάνει μικρότερη τιμή σε σύγκριση με τα άλλα ορυκτά και το κλάσμα. Οι ρυθμοί θραύσης ακολουθούν τη σειρά, από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη τιμή, Χαλαζίας>Χρωμίτης>Κλάσμα>Νιμίτης.

7.6.3 Τροφοδοσία – 0.300 + 0.150 mm

Αρχικά, παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 7.114 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) προϊόντος που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm) και είναι ίδιο με το διάγραμμα 7.69 του υποκεφαλαίου 7.3.3.



Διάγραμμα 7.114: Ρυθμός θραύσης σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).

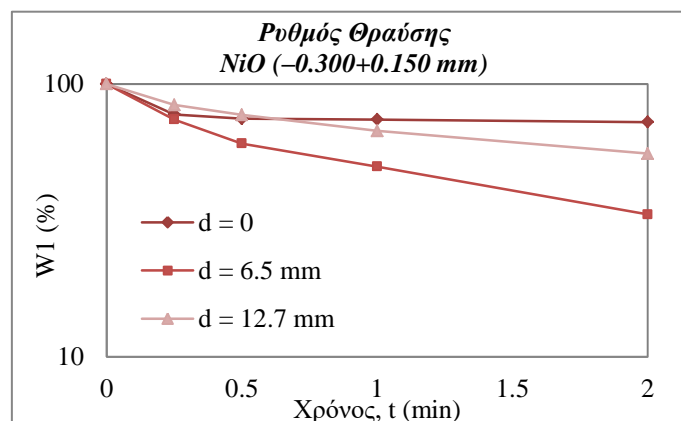
Ο ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ του διαγράμματος 7.107 μελετήθηκε όπως και των προηγούμενων κοκκομετρικών κλασμάτων. Από το παραπάνω διάγραμμα 7.107 κι από την κλίση κάθε ευθείας των χρονικών διαστημάτων (0–0.25 min, 0.25–0.5 min, 0.5–1 min και 1–2 min) υπολογίστηκε ο ρυθμός θραύσης για κάθε διάμετρο σφαίρας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7.67.

Πίνακας 7.67: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Χρονικό διάστημα (min)	Ρυθμός Θραύσης, $S_i (\text{min})^{-1}$, $-0.300+0.150$ mm		
	$d=0$	$d=6.5$ mm	$d=12.7$ mm
0–0.25	0.863	0.949	0.546
0.25–0.5	0.021	0.554	0.373
0.5–1	0.054	0.32	0.229
1–2	0.021	0.306	0.192

Στον πίνακα 7.67 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών από 0 σε 6.5 mm αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος, ενώ όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών από 6.5 mm σε 12.7 mm μειώνεται ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι 0.949 min^{-1} για $d=6.5 \text{ mm}$ και χρονικό διάστημα 0–0.25 min.

Εκτός από το ρυθμό θραύσης του κλάσματος μελετήθηκε και ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων από τα οποία αναλύθηκε περαιτέρω ο ρυθμός θραύσης του NiO. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 7.115 το οποίο παριστάνει το βάρος (%) του NiO που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5 \text{ mm}$ και $d=12.7 \text{ mm}$).



Διάγραμμα 7.115: Ρυθμός θραύσης NiO σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150 \text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών ($d=0$, $d=6.5 \text{ mm}$, $d=12.7 \text{ mm}$).

Από το διάγραμμα 7.115 κι από την κλίση κάθε ευθείας των χρονικών διαστημάτων 0–0.25 min, 0.25–0.5 min, 0.5–1 min και 1–2 min υπολογίστηκε ο ρυθμός θραύσης του NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150 \text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών (0, 6.5 mm, 12.7 mm). Στον παρακάτω πίνακα 7.68 παρουσιάζονται οι ρυθμοί θραύσης του NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150 \text{ mm}$ για κάθε διάμετρο σφαιρών σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Πίνακας 7.68: Ρυθμός θραύσης NiO του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.1500 \text{ mm}$ για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

Χρονικό διάστημα (min)	Ρυθμός Θραύσης NiO, $S_i (\text{min}^{-1})$, $-0.300+0.150 \text{ mm}$			
	Μέσος Χρόνος (min)	$d = 0$	$d = 6.5 \text{ mm}$	$d = 12.7 \text{ mm}$
0–0.25	0.125	1.026	1.195	0.708
0.25– 0.5	0.375	0.147	0.815	0.332
0.5–1	0.75	0.012	0.389	0.27
1–2	1.5	0.021	0.404	0.192

Από τον παραπάνω πίνακα 7.68 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών από 0 σε 6.5 mm αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του NiO, ενώ όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών από 6.5 mm σε 12.7 mm μειώνεται ο ρυθμός θραύσης του NiO. Επίσης, για τις δοκιμές χωρίς σφαίρες και για d=6.5 mm ο ρυθμός θραύσης μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, με εξαίρεση τα χρονικά διαστήματα από 0.5–1 min σε 1–2 min όπου ο ρυθμός θραύσης του NiO αυξάνεται. Από την άλλη, ο ρυθμός θραύσης για d=12.7 mm μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης NiO είναι 1.195 min^{-1} για d=6.5 mm και χρονικό διάστημα 0–0.25 min.

Με τον ίδιο τρόπο, εκτός από το ρυθμό θραύσης του NiO, μελετήθηκε κι ο ρυθμός θραύσης και για άλλα οξειδία όπως και για κάποιες ορυκτολογικές φάσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες 7.69 και 7.70 καθώς και τα διαγράμματα 7.116 – 7.118 και 7.119 – 7.121 τα οποία παριστάνουν το ρυθμό θραύσης των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο καθώς και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο, αντίστοιχα.

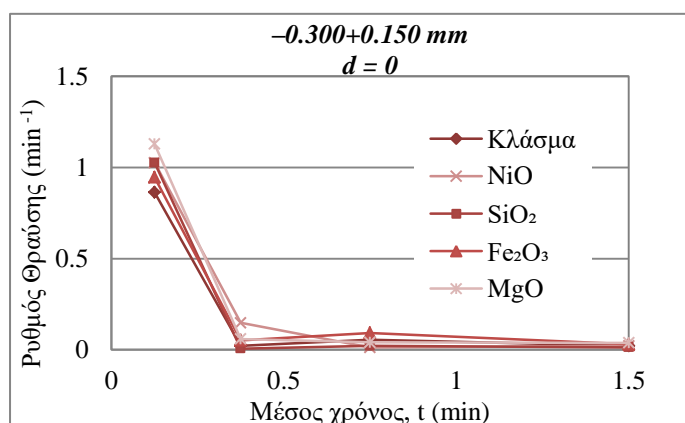
Πίνακας 7.69: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150 \text{ mm}$ και των οξειδίων για το μέσο χρόνο λειοτρίβησης και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

<i>Ρυθμός Θραύσης, $\text{Si} (\text{min}^{-1})$, $-0.300+0.150 \text{ mm}$</i>															
<i>Μέσος Χρόνος (min)</i>	<i>Κλάσμα</i>			<i>NiO</i>			<i>SiO₂</i>			<i>Fe₂O₃</i>			<i>MgO</i>		
	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>
0.125	0.863	0.949	0.546	1.026	1.195	0.708	1.026	1.226	0.595	0.946	0.945	0.737	1.129	1.450	0.774
0.375	0.021	0.554	0.373	0.147	0.815	0.332	0.006	0.360	0.353	0.052	0.645	0.273	0.059	0.494	1.461
0.75	0.054	0.320	0.229	0.012	0.389	0.270	0.021	0.324	0.237	0.092	0.232	0.248	0.040	0.491	0.012
1.5	0.021	0.306	0.192	0.021	0.404	0.192	0.013	0.311	0.174	0.030	0.259	0.200	0.038	0.455	0.042

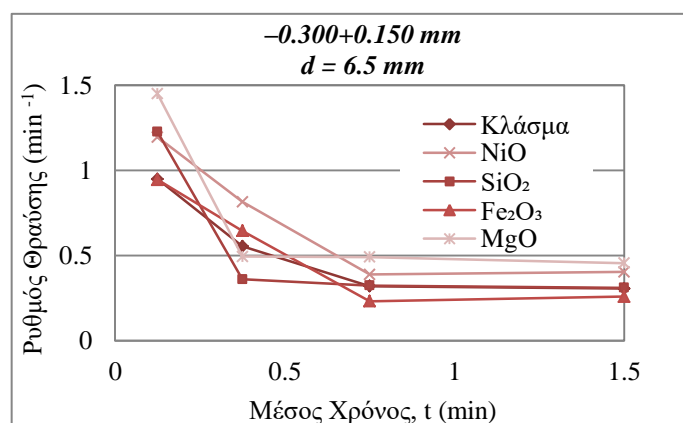
Από τον παραπάνω πίνακα 7.69 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών από 0 σε 6.5 mm αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος και των οξειδίων, ενώ όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών από 6.5 mm σε 12.7 mm μειώνεται ο ρυθμός θραύσης. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του κλάσματος είναι 0.949 min^{-1} για τη μικρότερη χρονική περίοδο 0.125 min και διάμετρο σφαιρών 6.5 mm. Όσον αφορά το ρυθμό θραύσης του NiO φαίνεται να έχει μια τάση να μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης για κάθε διάμετρο σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm) λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή 1.195 min^{-1} στη μικρότερη χρονική 0.125 min και για διάμετρο σφαιρών 6.5 mm. Σε αυτές τις συνθήκες λειοτρίβησης τα NiO, MgO, και SiO₂ λαμβάνουν

μεγαλύτερες τιμές ρυθμού θραύσης από εκείνη του κλάσματος, ενώ το Fe_2O_3 λαμβάνει τη μικρότερη τιμή σε σύγκριση με τα υπόλοιπα οξείδια που εξετάστηκαν κι επίσης κάπως μικρότερη τιμή από εκείνη του κλάσματος. Οι ρυθμοί θραύσης ακολουθούν τη σειρά, από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη τιμή, $\text{SiO}_2 > \text{MgO} > \text{NiO} > \text{Κλάσμα} > \text{Fe}_2\text{O}_3$.

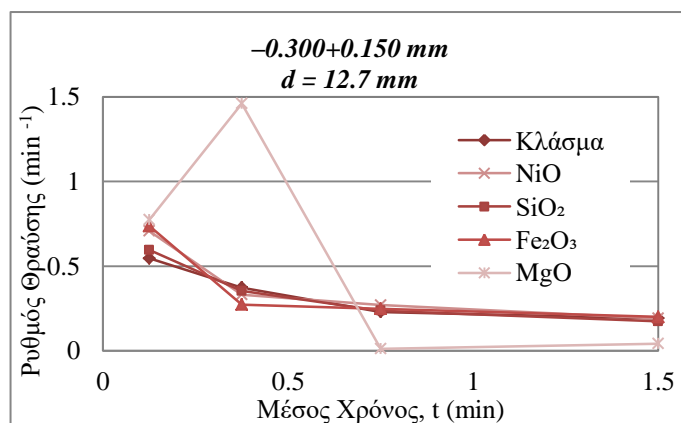
Επίσης, παρουσιάζονται τα διαγράμματα 7.105 – 7.107 τα οποία παριστάνουν το ρυθμό θραύσης του κλάσματος και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 7.116: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300 + 0.150$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο για λειοτρίβησης για $d=0$.



Διάγραμμα 7.117: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300 + 0.150$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=6.5$ mm.



Διάγραμμα 7.118: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300 + 0.150$ mm και των οξειδίων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=12.7$ mm.

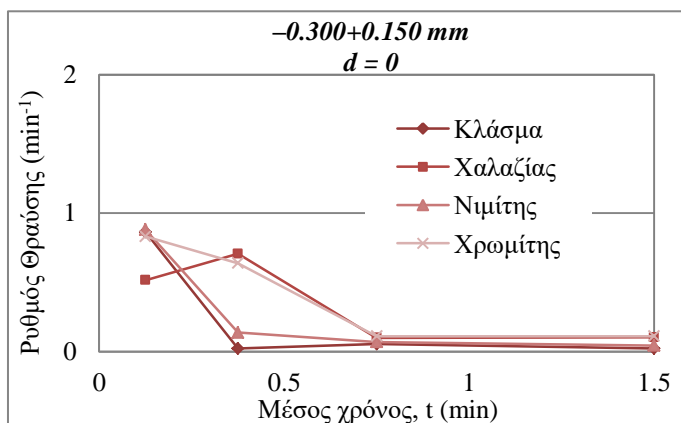
Στα παραπάνω διαγράμματα 7.116 – 7.118 παρατηρείται ότι α) ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων διαφοροποιείται από εκείνον του κλάσματος στη μικρότερη χρονική περίοδο λειοτρίβησης (μέσος χρόνος 0.125 min) και με χρήση της διαμέτρου σφαιρών 6.5 mm, β) γενικά, φαίνεται να υπάρχει μια τάση να μειώνεται ο ρυθμός

θραύσης του κλάσματος αλλά και των οξειδίων όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, με εξαίρεση τη δοκιμή με διάμετρο σφαιρών 12.7 mm, όπου για το Mg παρατηρείται μια αύξηση του ρυθμού θραύσης όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης από 0.25 min σε 0.5 min, και γ) η ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και με τη μείωση της διαμέτρου των σφαιρών.

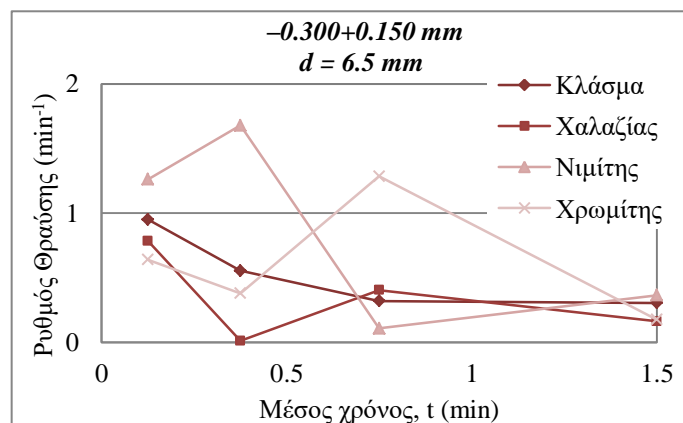
Τέλος, όπως προαναφέρθηκε εκτός από τα οξείδια, μελετήθηκε και ο ρυθμός θραύσης των ορυκτολογικών φάσεων. Τα αποτελέσματα του ρυθμού θραύσης για συγκεκριμένες ορυκτολογικές φάσεις του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7.70 καθώς και στα παρακάτω διαγράμματα 7.119 – 7.121.

Πίνακας 7.70: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων για το μέσο χρόνο λειοτρίβησης και για διάμετρο σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.

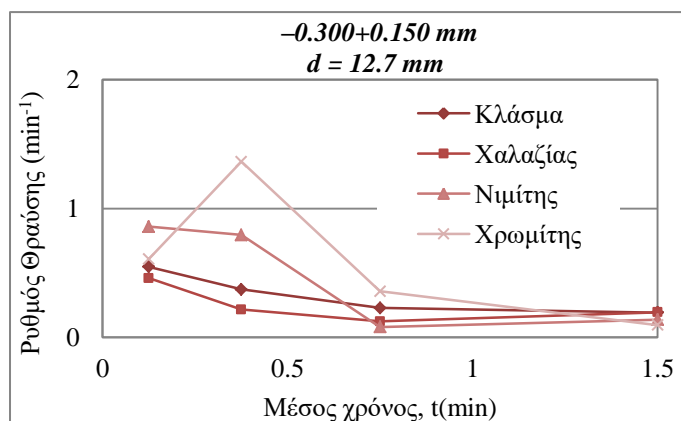
<i>Ρυθμός Θραύσης, Si (min^{-1}), $-0.300+0.150$ mm</i>												
<i>Μέσος Χρόνος (min)</i>	<i>Κλάσμα</i>			<i>Χαλαζίας</i>			<i>Νιμίτης</i>			<i>Χρωμίτης</i>		
	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>	<i>0</i>	<i>6.5 mm</i>	<i>12.7 mm</i>
0.125	0.863	0.951	0.548	0.515	0.785	0.460	0.881	1.262	0.859	0.831	0.640	0.609
0.375	0.021	0.554	0.373	0.706	0.012	0.216	0.137	1.679	0.795	0.638	0.380	1.364
0.75	0.054	0.320	0.229	0.099	0.404	0.124	0.069	0.109	0.080	0.111	1.286	0.358
1.5	0.021	0.306	0.192	0.102	0.163	0.195	0.044	0.365	0.138	0.111	0.177	0.096



Διάγραμμα 7.119: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=0$.



Διάγραμμα 7.120: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτρίβησης για $d=6.5$ mm



Διάγραμμα 7.121: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm και των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με το μέσο χρόνο λειοτριβήσης για $d=12.7$ mm.

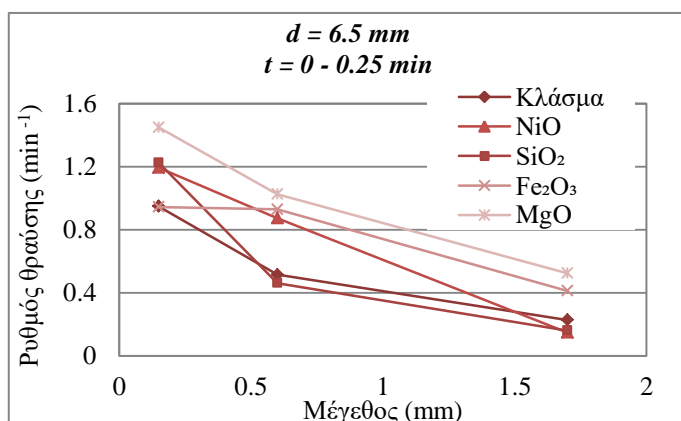
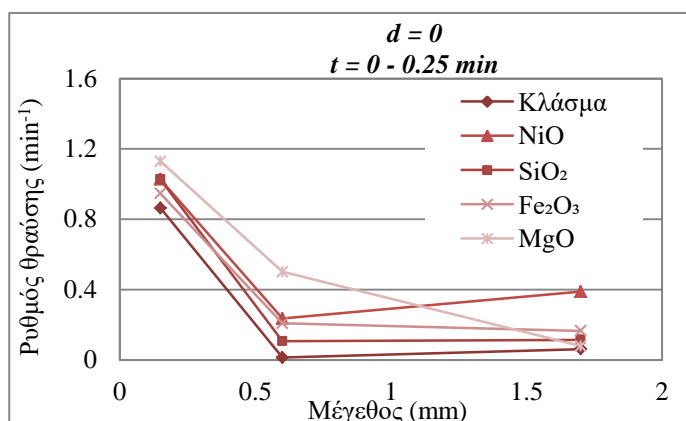
Από τον παραπάνω πίνακα 7.70 και τα διαγράμματα 7.119 – 7.120 παρατηρείται ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται καλύτερα στους μέσους χρόνους 0.125 min, 0.375 και 0.750 min και για διαμέτρους σφαιρών 6.5 mm και 12.7 mm. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του κλάσματος είναι 0.951 min^{-1} για τη μικρότερη χρονική περίοδο 0.125 min και σφαίρες διαμέτρου 6.5 mm. Σε αυτές τις συνθήκες ο νιμίτης λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή ρυθμού θραύσης από εκείνη του κλάσματος, ενώ ο χαλαζίας και ο χρωμίτης λαμβάνουν μικρότερες τιμές σε σύγκριση με τα άλλα ορυκτά και το κλάσμα. Οι ρυθμοί θραύσης ακολουθούν τη σειρά από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη τιμή, Νιμίτης>Κλάσμα>Χαλαζίας>Χρωμίτης.

7.7 Επίδραση του μεγέθους τροφοδοσίας και της διαμέτρου σφαιρών στο ρυθμό θραύσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα του ρυθμού θραύσης και των τριών κοκκομετρικών κλασμάτων προέκυψε ότι το NiO εμφανίζει μεγαλύτερο ρυθμό θραύσης όταν το υλικό λειοτριβείται στο μικρότερο χρόνο 0.25 min. Για το λόγο αυτό, μελετήθηκε σε αυτό το χρόνο (0.25 min) ο ρυθμός θραύσης σε σχέση με το μέγεθος τροφοδοσίας για τις τρεις διαμέτρους σφαιρών (0, 6.5 mm και 12.7 mm). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο πίνακας 7.71 και τα αντίστοιχα διαγράμματα 7.122 – 7.124, τα οποία παριστάνουν το ρυθμό θραύσης σε σχέση με το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας και διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm για χρόνο λειοτριβήσης 0.25 min.

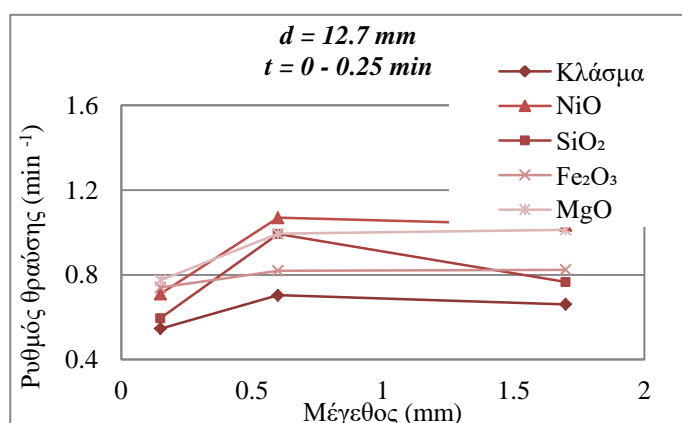
Πίνακας 7.71: Ρυθμός θραύσης των κλασμάτων και των οξειδίων σε σχέση με το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας και τις διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm για χρόνο λειοτρίβησης 0.25 min.

Μέγεθος Τροφοδοσίας (mm)	Κλάσμα			NiO			SiO ₂			Fe ₂ O ₃			MgO		
	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-3.35+1.70	0.062	0.228	0.661	0.388	0.148	1.034	0.114	0.161	0.7660	0.165	0.413	0.824	0.079	0.524	1.013
-1.18+0.600	0.013	0.515	0.704	0.235	0.874	1.072	0.106	0.461	0.993	0.208	0.930	0.816	0.501	1.026	0.994
-0.300+0.150	0.863	0.949	0.546	1.026	1.195	0.708	1.026	1.226	0.595	0.946	0.945	0.737	1.129	1.450	0.774



Διάγραμμα 7.122: Ρυθμός θραύσης των κοκκομετρικών κλασμάτων και των οξειδίων σε σχέση με το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας για d=0 και χρονικό διάστημα t=0-0.25 min.

Διάγραμμα 7.123: Ρυθμός θραύσης των κοκκομετρικών κλασμάτων και των οξειδίων σε σχέση με το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας για d=6.5 mm και χρονικό διάστημα t=0-0.25 min.

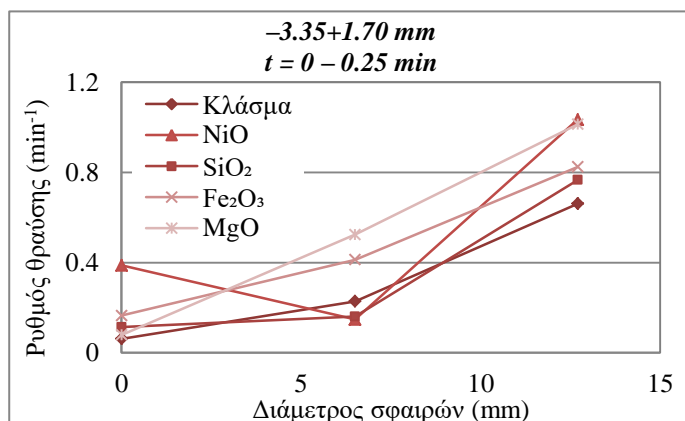


Διάγραμμα 7.124: Ρυθμός θραύσης των κοκκομετρικών κλασμάτων και των οξειδίων σε σχέση με το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας για d=12.7 mm και χρονικό διάστημα t=0-0.25 min.

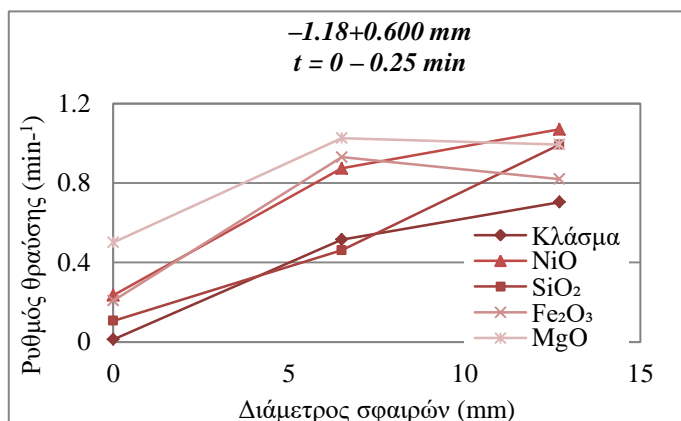
Από τον πίνακα 7.71 και τα αντίστοιχα διαγράμματα 7.122 – 7.123 παρατηρείται ότι α) γενικά, ο ρυθμός θραύσης των κλασμάτων και των οξειδίων μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους τροφοδοσίας, για d=0 και d=6.7 mm. Αντίθετα, ο ρυθμός θραύσης έχει μια τάση να αυξάνεται όσο μεγαλώνει το μέγεθος τροφοδοσίας, με χρήση της μεγάλης διαμέτρου σφαιρών 12.7 mm, β) ο μέγιστος

ρυθμός θραύσης του NiO (1.195 min^{-1}) παρατηρείται στο λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας ($-0.300+0.150 \text{ mm}$), με χρήση σφαιρών $d=6.5 \text{ mm}$.

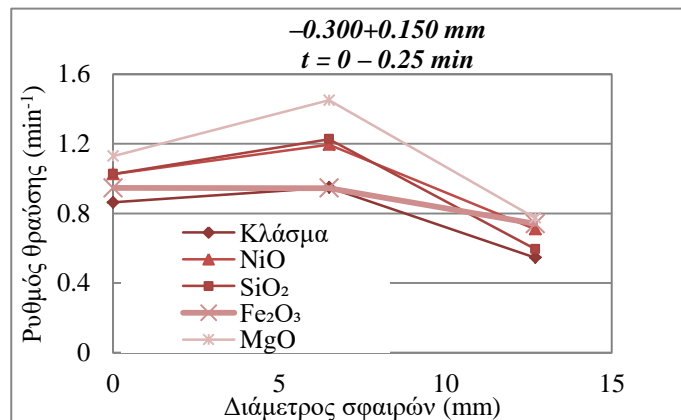
Επίσης, εκτός από τα διαγράμματα του ρυθμού θραύσης σε σχέση με το μέγεθος τροφοδοσίας, προέκυψαν και τα παρακάτω διαγράμματα 7.125 – 7.127 τα οποία παριστάνουν το ρυθμό θραύσης του κλάσματος και των οξειδίων σε σχέση με τις διαμέτρους σφαιρών 0, 6.5 mm και 12.7 mm.



Διάγραμμα 7.125: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70 \text{ mm}$ σε σχέση με τις διαμέτρους σφαιρών για το χρονικό διάστημα $t=0-0.25 \text{ min}$.



Διάγραμμα 7.126: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600 \text{ mm}$ σε σχέση με τις διαμέτρους σφαιρών για το χρονικό διάστημα $t=0-0.25 \text{ min}$.



Διάγραμμα 7.127: Ρυθμός θραύσης του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150 \text{ mm}$ σε σχέση με τις διαμέτρους σφαιρών για το χρονικό διάστημα $t=0-0.25 \text{ min}$.

Τέλος, από τα διαγράμματα 7.125 – 7.127 παρατηρείται ότι α) γενικά στα χονδρότερα κοκκομετρικά κλάσματα ο ρυθμός θραύσης των κλασμάτων και των οξειδίων έχει μια τάση να αυξάνεται όσο μεγαλώνει η διάμετρος των σφαιρών. Αντίθετα, ο ρυθμός θραύσης του κλάσματος και των οξειδίων για το λεπτότερο κλάσμα ($-0.300+0.150 \text{ mm}$) αυξάνεται για $d = 6.5 \text{ mm}$ και μειώνεται με τη χρήση της μεγαλύτερης διαμέτρου σφαιρών 12.7 mm. Επομένως, ο μέγιστος ρυθμός θραύσης

του κλάσματος αλλά και των οξειδίων παρατηρείται στο λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας ($-0.300+0.150$ mm) και με χρήση διαμέτρου σφαιρών $d=6.5$ mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εκλεκτική λειοτρίβηση λατερίτη της περιοχής Εύβοιας σε σφαιρόμυλο, με σκοπό να μελετηθεί ο ρυθμός θραύσης διάφορων ορυκτολογικών συστατικών και ο εμπλουτισμός του σε νικέλιο. Αρχικά, προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Αντίθετα, η αυτολειοτρίβηση πρακτικά δεν οδηγεί σε μείωση του μεγέθους του προϊόντος, τουλάχιστον για τους συγκεκριμένους χρόνους που επιλέχθηκαν. Επίσης, από τη μελέτη του ρυθμού θραύσης σε σχέση με το χρόνο, προέκυψε ότι στα χονδρότερα κλάσματα τροφοδοσίας ($-3.35+1.70$ mm και $-1.18+0.600$ mm), ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών. Αντίθετα, για το λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας ($-0.300+0.150$ mm), ο ρυθμός θραύσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή με τη χρήση διαμέτρου σφαιρών 6.5 mm.

Από τις χημικές αναλύσεις των προϊόντων προέκυψε ότι και στα τρία κοκκομετρικά κλάσματα υπάρχει μια τάση να αυξάνεται η περιεκτικότητα (%) του NiO για μικρότερους χρόνους λειοτρίβησης και όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα NiO (1.60%) στο προϊόν -0.075 mm παρατηρήθηκε μετά από αυτολειοτρίβηση του κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=0.25$ min. Από τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων και για συγκεκριμένες ορυκτολογικές φάσεις προέκυψε ότι, για κάθε μέγεθος τροφοδοσίας, τα χονδρά κλάσματα είναι πλούσια σε χαλαζία, τα ενδιάμεσα σε χρωμίτη και τα λεπτά κλάσματα σε νιμίτη.

Επίσης, από τη μελέτη του ρυθμού θραύσης των κλασμάτων τροφοδοσίας ($-3.35+1.70$ mm, $-1.18+0.600$ mm και $-0.300+0.150$ mm) προέκυψε ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος τροφοδοσίας αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης, μέχρι όμως ένα συγκεκριμένο μέγεθος πέρα από το οποίο μειώνεται σημαντικά. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ο μέγιστος ρυθμός θραύσης (S_m) καθώς και το βέλτιστο μέγεθος (x_m) αυξάνονται όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών. Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης (S_m) είναι 0.56 min^{-1} κι αντιστοιχεί στο βέλτιστο μέγεθος (x_m) με τιμή 1.53 mm, για τη μεγαλύτερη διάμετρο σφαιρών 12.7 mm

Από τη μελέτη του ρυθμού θραύσης των οξειδίων και των ορυκτολογικών φάσεων βρέθηκε ότι:

Α) για το κοκκομετρικό κλάσμα $-3.35+1.70$ mm, ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του NiO είναι μεγαλύτερος από εκείνον του κλάσματος (1.034 min^{-1} έναντι 0.661

min^{-1}) για $d = 12.7 \text{ mm}$ και περίοδο λειοτρίβησης $0 - 0.25 \text{ min}$. Ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων, σε φθίνουσα σειρά είναι, $\text{NiO} > \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2 > \text{Κλάσμα}$, ενώ ο ρυθμός θραύσης των ορυκτολογικών φάσεων ακολουθεί τη σειρά, $\text{Χρωμίτης} > \text{Κλάσμα} > \text{Νιμίτης} > \text{Χαλαζίας}$.

Β) για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600 \text{ mm}$, ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του NiO είναι μεγαλύτερος από εκείνον του κλάσματος (1.072 min^{-1} έναντι 0.704 min^{-1}) για $d = 12.7 \text{ mm}$ και για περίοδο λειοτρίβησης από $0 - 0.25 \text{ min}$. Ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων, σε φθίνουσα σειρά είναι, $\text{NiO} > \text{MgO} > \text{SiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Κλάσμα}$, ενώ ο ρυθμός θραύσης των ορυκτολογικών φάσεων ακολουθεί τη σειρά $\text{Χαλαζίας} > \text{Χρωμίτης} > \text{Κλάσμα} > \text{Νιμίτης}$.

Γ) για το λεπτότερο κοκκομετρικό κλάσμα $-0.300+0.150 \text{ mm}$, ο μέγιστος ρυθμός θραύσης του NiO είναι μεγαλύτερος από εκείνον του κλάσματος (1.195 min^{-1} έναντι 0.951 min^{-1}) για $d = 6.5 \text{ mm}$ και περίοδο λειοτρίβησης από $0 - 0.25 \text{ min}$. Ο ρυθμός θραύσης των οξειδίων, σε φθίνουσα σειρά είναι $\text{MgO} > \text{SiO}_2 > \text{NiO} > \text{Κλάσμα} > \text{Fe}_2\text{O}_3$, ενώ ο ρυθμός θραύσης των ορυκτολογικών φάσεων ακολουθεί τη σειρά, $\text{Νιμίτης} > \text{Κλάσμα} > \text{Χαλαζίας} > \text{Χρωμίτης}$.

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι ο μεγαλύτερος ρυθμός θραύσης του NiO αντιστοιχεί στο λεπτότερο κοκκομετρικό κλάσμα $-0.300+0.150 \text{ mm}$.

Τέλος, προέκυψε ότι ο καλύτερος εμπλουτισμός του NiO , για όλα τα κλάσματα τροφοδοσίας, με βάση, την κατανομή (%) και περιεκτικότητα (%) του επέρχεται στο μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης που επιλέχθηκε (2 min). Αντίθετα, με βάση το ρυθμό θραύσης προέκυψε ότι το NiO θραύεται με μεγαλύτερο ρυθμό στη μικρότερη περίοδο λειοτρίβησης ($0-0.25 \text{ min}$).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. Αρβανιτάκη Χ. 2015. *Ανάκτηση Ni από φτωχό λατεριτικό μετάλλευμα με τη μέθοδο εκχύλισης*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. Κατσίκατσου Χ. Γ. 1992. *Γεωλογία της Ελλάδας*
3. Κομνίτσας, Κ. 1988. *Εκχύλιση λατεριτών με θειικό οξύ υπό πίεση*, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π.
4. Κομνίτσας, Κ. 2005. *Μεταλλουργικές διεργασίες*, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. σελ. 11.
5. Πετράκης, Ε. 2017. *Μοντελοποίηση της σχέσης ενέργειας – διαστασιακών ιδιοτήτων των προϊόντων κατάτμησης σε σφαιρόμυλο*, Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. σελ. 8.
6. Σταθογιάννη, Φ. 2007. *Ορυκτολογική εξέταση και δοκιμές εμπλουτισμού του σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος της περιοχής Κομνηνών Βερμίου*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. σελ. 16.
7. Σταμπολιάδης, Η. 2001. *Εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων*, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
8. Σταμπολιάδης, Ηλ. 2008. *Μηχανική των τεμαχιδίων*, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. σελ.66, 68, 88 – 90.
9. Τσούκαλου, Α. 2016. *Κινητικό Μοντέλο Λειοτρίβησης Μαρμάρου σε Σφαιρόμυλο*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
10. Χρηστίδης, Γ. 2002. *Κοιτασματολογία Ι (Γενικές αρχές-μεταλλικά ορυκτά)*, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
11. Χρηστίδης, Γ. 2002. *Κοιτασματολογία ΙΙ (Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα)*, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

1. Agatzini – Leonardou, S., Zafiratos, I.G., Spathis, D. 2004. *Beneficiation of a Greek serpentinitic nickeliferous ore. Part I. Mineral processing.* Hydrometallurgy 74, 259–265.
2. Austin, L. G. and Bhatia, V. K. 1972. *Experimental methods for grinding studies in laboratory mills.* Powder Technology 5, 261–266.
3. Austin, L.G. and Luckie, P.T. 1972. *Methods for determination of breakage distribution parameters.* Powder Technology 5, 215–222.
4. Austin, L.G., and Bagga, P. 1981. *An analysis of fine dry grinding in ball mills.* Powder Technology 28, 83–90.
5. Austin, L. G., Klimpel, R. and Luckie, P. T. 1984. *Process Engineering of Size Reduction Ball Milling.* New-York: SME, AIME.
6. Bilgili, E., and Scarlett, B. 2005. *Population balance modeling of non-linear effects in milling processes.* Powder Technology 153, 59–71.
7. Büyükkakinci, E., Topkaya, Y.A. 2009. *Extraction of nickel from laterite ores at atmospheric pressure with agitation leaching.* Hydrometallurgy 97, 33–38.
8. Deniz, V. 2013. *Effect of mill speed on kinetic breakage four different particulate pumices.* Particulate Science and Technology 31, 101–108.
9. Gupta, V. K., and Kapur, P.C. 1974. *Empirical correlations for the effects of particulate mass and ball size on the selection parameters in the discretized batch grinding equation.* Powder Technology 10 (4-5), 217–223.
10. Herbst, J.A., and Fuerstenau, D.W. 1973. *Mathematical simulation of dry ball milling using specific power information.* Transactions AIME 254, 343–348.
11. Herbst, J.A., and Fuerstenau, D.W. 1980. *Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models.* International Journal of Mineral Processing 7,1–31.
12. Ipek, H. and Göktepe, F. 2011. *Determination of grindability characteristics of zeolite.* Physicochemical Problems of Mineral Processing 47,183–192
13. Katubilwa, F.M. 2008. *Effect of ball size distribution on milling parameters,* Master of Science Dissertation, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
14. Kelly, E. G., Spottiswood, D. J. 1990. *The breakage function; What is it really.* Minerals Engineering 5, 405–414.

15. Klimpel, R. R. and Austin, L. G. 1977. *The Back – Calculation of Specific Rates of Breakage and Non – Normalized Breakage Distribution Parameters from Batch Grinding Data*. Mineral Processing 4, 7–32.
16. Lynch, A.J. 1977. *Mineral Crushing and Grinding Circuits. Their Simulation, Optimization, Design and Control*. New York: Elsevier Scientific Publishing Co.
17. Napier – Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., Kojovic, T. 1996. *Mineral Comminution Circuits. Their Operation and Optimization*, JKMRRC, Queensland, Australia.
18. Petrakis, E., Komnitsas, K. 2017. *Improved modeling of the grinding process through the combined use of matrix and population balance models*. Minerals 7, 67–83.
19. Quast, K., Connor, N. J., Skinner, W., Robinson, J.D., Addai-Mensah J. 2015. *Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores Part 1: Literature review*. Minerals Engineering 79, 261–268.
20. Rao, K.A, Sreenivas, T., Natarajan, R., Rao, N.K. 1995. *Preconcentration of nickel values from lateritic chromite ore overburden*, Sukinda, Orissa, India. Mineral Processing and Extractive Metallurgy 15, 37–45.
21. Stamboltzis, G. 1990. *Calculation of the Net Power of Laboratory Ball Mills*. Mining and Metallurgical Annals 76, 47–55 (in Greek).
22. Tong, L., Klein, B., Zanin, M., Quast, K., Skinner, B., Addai-Mensah, J., & Robinson, D. 2013. *Stirred milling kinetics of siliceous goethitic nickel laterite for selective comminution*. Minerals Engineering 49, 109–115.
23. Tong, L., Klein, B., Zanin, M., Quast, K., Skinner, W., Addai-Mensah, J. and Robinson, D. 2015. *Stirred milling of nickel laterites for selective comminution*. SAG Conference, Vancouver, British Columbia, Canada.
24. Wills, B.A., and T., Napier-Munn. 2006. *Will's mineral processing technology. An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th edition. London: Elsevier Science and Technology Books.
25. Zhu, Y., Han, Y., Tian, Y., Hong, W. 2010. *Medium Characteristics on Selective Grinding of Low grade Bauxite*. Advanced Materials Research 158, 159–166.

ΔΙΑΔΥΚΤΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. www.geo.auth.gr (πρόσβαση, 22/11/2017)
2. www.insg.org (πρόσβαση, 14/12/2017)
3. www.larco.gr (πρόσβαση, 22/11/2017)
4. www.lenntech.com (πρόσβαση, 12/12/2017)
5. www.nickelinstitute.org (πρόσβαση, 6/10/2017)
6. gr.worldscrap.com (πρόσβαση, 13/2/2018)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

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

$d = 0$

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min
3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	96.78	95.65	92.54	90.97	3.22	4.35	7.46	9.03
1.180	1.87	2.94	3.69	3.12	1.35	1.41	3.77	5.90
0.850	0.26	0.31	0.41	0.80	1.09	1.11	3.35	5.10
0.600	0.15	0.19	0.30	0.30	0.94	0.92	3.05	4.80
0.425	0.15	0.15	0.23	0.30	0.79	0.76	2.83	4.50
0.300	0.15	0.00	0.00	0.19	0.64	0.76	2.83	4.30
0.212	0.00	0.00	0.00	0.15	0.64	0.76	2.83	4.15
0.150	0.00	0.00	0.00	0.15	0.64	0.76	2.83	4.00
0.075	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.76	2.83	4.00
-0.075	0.64	0.76	2.83	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

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

$d=6.5$ mm

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min
3.35	0.00	0.0	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	0.00	0.0	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	92.87	91.0	87.11	82.60	7.13	9.00	12.89	17.40
1.18	3.53	3.9	5.02	6.43	3.60	5.13	7.87	10.97
0.85	0.75	1.0	1.27	1.54	2.85	4.16	6.60	9.43
0.60	0.56	0.7	0.86	1.01	2.29	3.49	5.73	8.42
0.43	0.26	0.4	0.56	0.64	2.03	3.11	5.17	7.78
0.30	0.23	0.2	0.41	0.41	1.80	2.89	4.76	7.37
0.21	0.15	0.2	0.34	0.23	1.65	2.70	4.42	7.14
0.15	0.15	0.2	0.26	0.30	1.50	2.51	4.16	6.84
0.075	0.19	0.3	0.26	0.38	1.31	2.25	3.90	6.46
-0.075	1.31	2.2	3.90	6.46	0.00	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

Πίνακας Α3: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm, με χρήση σφαιρών d=12.7 mm.

d=12.7 mm

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t= 0.25 min	t=0.5 min	t=1 min	t=2 min	t=0.25 min	t=0.5 min	t=1 min	t=2 min
3.35	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1.70	83.3	76.6	68.0	54.1	16.7	23.4	32.0	45.9
1.18	7.7	9.4	10.1	10.8	9.0	14.0	21.9	35.0
0.85	2.3	3.3	4.1	4.7	6.7	10.7	17.9	30.4
0.60	1.6	2.5	3.2	3.9	5.0	8.2	14.7	26.5
0.43	1.0	1.5	2.2	2.8	4.0	6.7	12.5	23.7
0.30	0.7	1.1	1.8	2.6	3.4	5.6	10.7	21.2
0.21	0.5	0.8	1.4	2.3	2.8	4.8	9.3	18.8
0.15	0.4	0.8	1.4	2.6	2.4	4.0	7.9	16.3
0.075	0.4	0.7	1.9	3.8	1.9	3.2	6.0	12.5
-0.075	1.9	3.2	6.0	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

Πίνακας Α4: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το d₈₀ για το κοκκομετρικό κλάσμα -3.35+1.70 mm.

d=0

d=6.5 mm

d=12.7 mm

Χρόνος	Ειδική ενέργεια	d ₈₀	Ειδική ενέργεια	d ₈₀	Ειδική ενέργεια	d ₈₀
Min	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)
0.0	0.0	2.30	0.0	2.30	0.0	2.30
0.3	0.02	2.31	0.2	2.30	0.2	2.27
0.5	0.05	2.31	0.3	2.29	0.3	2.24
1.0	0.09	2.29	0.6	2.28	0.6	2.21
2.0	0.18	2.29	1.2	2.26	2.1	2.15

Πίνακας Α5: Παραμένον (% κ.β.) στην τροφοδοσία -3.35+1.70 mm σε σχέση με το χρόνο λειοτριβήσης μετά από αυτολειοτριβήση και χρήση σφαιρών (d=6.5 mm, d =12.7 mm).

-3.35+1.70 mm

Χρόνος (min)	Βάρος (χωρίς σφαίρες)	Βάρος (6.5mm)	Βάρος (12.7mm)
0.0	93.9	93.9	93.9
0.3	96.8	92.9	83.3
0.5	95.6	91.0	76.6
1.0	92.5	87.1	68.0
2.0	91.0	82.6	54.1

Πίνακας Α6: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -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 (%)

Μέγεθος (mm)	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-1.70	96.78	92.87	83.33	35.40	36.30	37.50	10.2	9.70	10.70	4.00	3.00	3.10
-1.70+0.075	2.59	5.82	14.72	25.04	18.17	22.97	2.87	13.27	5.24	4.49	12.30	8.84
-0.075	0.64	1.31	1.95	14.8	17.70	19.00	8.60	16.70	16.00	2.00	7.20	5.90
	100	100	100	35.00	35.00	35.00	10.00	10.00	10.00	4.00	4.00	4.00

Πίνακας Α7: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-1.70	95.96	91.00	76.57	35.40	36.10	39.50	10.00	9.80	10.60	3.80	3.90	0.00
-1.70+0.075	3.59	6.75	20.2	28.81	26.60	20.57	7.81	11.20	7.09	9.43	16.92	18.99
-0.075	0.76	2.25	3.22	13.80	15.70	18.50	20.40	14.50	14.00	3.50	5.70	5.10
	100	100	100	35.00	35.00	35.00	10.00	10.00	10.00	4.00	4.0	4.0

Πίνακας Α8: Ορυκτολογική ανάλυση του προϊόντων κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-1.70	92.54	87.11	68.03	36.50	33.60	38.80	10.30	9.30	9.40	3.80	3.00	3.00
-1.70+0.075	4.64	9.00	25.97	17.59	55.71	28.90	1.64	13.79	10.35	8.23	12.30	5.37
-0.075	2.83	3.90	6.00	14.50	18.50	18.30	13.90	16.90	15.30	3.60	7.20	9.40
	100	100	100	35.00	35.00	35.00	10.00	10.00	10.00	4.00	4.00	4.00

Πίνακας Α9: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-1.70	96.78	92.87	83.33	93.45	96.31	89.28	98.71	90.08	89.16	96.77	74.29	64.58
-1.70+0.075	2.59	5.82	14.72	6.28	3.02	9.66	0.74	7.73	7.72	2.91	24.10	32.54
-0.075	0.64	1.31	1.95	0.27	0.66	1.06	0.55	2.19	3.12	0.32	1.61	2.87
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας Α10: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-1.70	95.65	91.00	76.57	94.55	93.86	86.42	95.64	89.18	81.17	90.86	68.25	0.00
-1.70+0.075	3.59	6.75	20.20	5.14	5.13	11.87	2.80	7.55	14.32	8.47	28.54	95.89
-0.075	0.76	2.25	3.22	0.30	1.01	1.70	1.54	3.26	4.51	0.66	3.20	4.11
	100	100	100	99.99	100	100	99.99	100	100	99.99	100	100

Πίνακας A11: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

<i>t=1 min</i>	<i>Παραμένον</i>						<i>Κατανομή</i>					
	<i>Βάρος, W (%)</i>			<i>Χαλαζίας</i>			<i>Νιμίτης</i>			<i>Χρωμίτης</i>		
<i>Μέγεθος (mm)</i>	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
-1.70	92.54	87.11	68.03	96.50	83.62	75.42	95.31	81.01	63.43	87.90	65.33	51.02
-1.70+0.075	4.64	9.00	25.97	2.33	14.32	21.44	0.76	12.40	34.87	9.55	27.65	34.87
-0.075	2.83	3.90	6.00	1.17	2.03	3.14	3.93	6.59	14.11	2.55	7.02	14.11
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας A12: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -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).

<i>t=0.25 min</i>	<i>Αθροιστικώς</i>						<i>Ανάλυση (%)</i>					
	<i>Βάρος, W (%)</i>			<i>Χαλαζίας</i>			<i>Νιμίτης</i>			<i>Χρωμίτης</i>		
<i>Μέγεθος (mm)</i>	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	35.00	35.00	35.00	10.00	10.00	10.00	4.00	4.00	4.00
-1.70	3.22	7.13	16.67	71.18	18.08	22.50	4.02	13.90	6.5	4.01	14.41	8.50
-0.075	0.63	1.31	1.95	15.03	17.70	18.96	8.74	16.70	15.96	2.03	4.90	5.89

Πίνακας A13: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -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).

<i>t=0.5 min</i>	<i>Αθροιστικώς</i>						<i>Ανάλυση (%)</i>					
	<i>Βάρος, W (%)</i>			<i>Χαλαζίας</i>			<i>Νιμίτης</i>			<i>Χρωμίτης</i>		
<i>Μέγεθος (mm)</i>	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100.00	100.00	35.00	35.00	35.00	10.00	10.00	10.00	4.00	4.00	4.00
-1.70	4.35	9.00	23.43	43.76	23.87	20.28	9.99	12.02	8.04	8.39	5.01	17.07
-0.075	0.76	2.25	3.23	13.72	15.70	18.49	20.29	14.50	13.99	3.48	5.70	5.10

Πίνακας A14: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm για χρόνο t=1 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

<i>t=1 min</i>	<i>Αθροιστικώς</i>						<i>Ανάλυση (%)</i>					
	<i>Βάρος, W (%)</i>			<i>Χαλαζίας</i>			<i>Νιμίτης</i>			<i>Χρωμίτης</i>		
<i>Μέγεθος (mm)</i>	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	35.00	35.00	35.00	10.00	10.00	10.00	4.00	4.00	4.00
-1.70	7.46	12.89	31.97	16.44	44.46	26.91	6.29	14.73	11.28	6.49	10.76	6.13
-0.075	2.82	3.90	6.00	14.55	18.50	18.31	13.95	16.90	15.31	3.61	7.20	9.41

Πίνακας A15: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος -3.35+1.70 mm για χρόνο t=2 min και διαμέτρους σφαιρών (d=0, d=6.5 mm και d=12.7 mm).

<i>t=2 min</i>	<i>Αθροιστικώς</i>						<i>Ανάλυση (%)</i>					
	<i>Βάρος, W (%)</i>			<i>Χαλαζίας</i>			<i>Νιμίτης</i>			<i>Χρωμίτης</i>		
<i>Μέγεθος (mm)</i>	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	35.00	35.00	35.00	10.00	10.00	10.00	4.00	4.00	4.00

-1.70	9.03	17.40	45.89	14.85	44.49	29.93	10.00	11.42	8.47	13.07	8.75	8.72
-0.075	4.00	6.46	12.46	15.60	20.40	22.69	14.20	16.50	11.70	2.70	6.00	4.20

Πίνακας A16: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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		Αθροιστικώς			Κατανομή (%)							
		Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης	
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-1.70	3.22	7.13	16.67	6.55	3.69	10.72	1.29	9.92	10.84	3.23	25.71	35.42
-0.075	0.63	1.31	1.95	0.27	0.66	1.06	0.55	2.19	3.12	0.32	1.61	2.87

Πίνακας A17: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ 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		Αθροιστικώς			Κατανομή (%)							
		Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης	
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-1.70	4.35	9.00	23.43	5.44	6.14	13.58	4.35	10.82	18.83	9.13	31.75	100.00
-0.075	0.76	2.25	3.23	0.30	1.01	1.70	1.54	3.26	4.51	0.66	3.20	4.11

Πίνακας A18: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min		Αθροιστικώς			Κατανομή (%)							
		Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης	
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-1.70	7.46	12.89	31.97	3.50	16.38	24.58	4.69	18.99	36.06	12.10	34.67	48.98
-0.075	2.82	3.90	6.00	1.17	2.06	3.14	3.93	6.59	9.19	2.55	7.02	14.11

Πίνακας A19: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-3.35+1.70$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min		Αθροιστικώς			Κατανομή (%)							
		Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης	
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-1.70	9.03	17.40	45.89	3.83	22.12	39.24	9.03	19.88	38.85	29.50	38.05	100.00
-0.075	4.00	6.46	12.46	1.78	3.77	8.08	5.68	10.67	14.58	2.70	9.70	13.08

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

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

d=0

Μέγεθος Mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	<i>t=0.25 min</i>	<i>t=0.5 min</i>	<i>t=1 min</i>	<i>t=2 min</i>	<i>t=0.25 min</i>	<i>t=0.5 min</i>	<i>t=1 min</i>	<i>t=2 min</i>
1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.600	94.29	93.26	90.86	87.42	5.71	6.74	9.14	12.58
0.425	3.05	3.61	5.31	5.76	2.67	3.12	3.83	6.82
0.300	0.30	0.34	0.59	1.06	2.37	2.79	3.24	5.76
0.212	0.23	0.23	0.35	0.34	2.14	2.56	2.89	5.42
0.150	0.04	0.19	0.23	0.34	2.11	2.37	2.66	5.08
0.075	0.19	0.15	0.23	0.34	1.92	2.22	2.42	4.73
-0.075	1.92	2.22	2.42	4.73	0.00	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

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

d=6.5 mm

Μέγεθος Mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	<i>t=0.25 min</i>	<i>t=0.5 min</i>	<i>t=1 min</i>	<i>t=2 min</i>	<i>t=0.25 min</i>	<i>t=0.5 min</i>	<i>t=1 min</i>	<i>t=2 min</i>
1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.600	83.18	75.16	69.42	54.80	16.82	24.84	30.58	45.20
0.425	6.90	8.95	8.74	11.03	9.93	15.89	21.84	34.18
0.300	2.58	3.93	4.35	4.38	7.35	11.95	17.49	29.80
0.212	1.29	2.10	2.40	3.17	6.06	9.85	15.08	26.62
0.150	0.95	1.72	2.10	2.76	5.12	8.13	12.98	23.87
0.075	0.95	1.72	2.78	4.08	4.17	6.41	10.21	19.79
-0.075	4.17	6.41	10.21	19.79	0.00	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

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

d=12.7 mm

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	<i>t=0.25 min</i>	<i>t=0.5 min</i>	<i>t=1 min</i>	<i>t=2 min</i>	<i>t=0.25 min</i>	<i>t=0.5 min</i>	<i>t=1 min</i>	<i>t=2 min</i>
1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.600	79.32	67.77	51.29	30.58	20.68	32.23	48.71	69.42
0.425	8.82	12.52	16.41	17.77	11.86	19.72	32.30	51.65
0.300	3.49	6.07	9.10	12.82	8.37	13.64	23.19	38.83
0.212	1.69	3.11	5.21	8.36	6.68	10.53	17.98	30.47
0.150	1.24	2.32	3.90	6.63	5.44	8.21	14.09	23.84
0.075	1.13	2.02	3.90	7.27	4.32	6.18	10.19	16.57
-0.075	4.32	6.18	10.19	16.57	0.00	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.0	100.00	100.00	100.00				

0

Πίνακας B4: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το d_{80} για το κοκκομετρικό κλάσμα $-1.18+0.600$ mm.
χωρίς σφαίρες $d = 6.5$ mm $d = 12.7$ mm

Χρόνος	Ειδική ενέργεια	d_{80}	Ειδική ενέργεια	d_{80}	Ειδική ενέργεια	d_{80}
min	kWh/tn	(mm)	kWh/tn	(mm)	kWh/tn	(mm)
0.00	0.00	0.83	0.00	0.83	0.00	0.83
0.25	0.02	0.83	0.15	0.81	0.15	0.81
0.50	0.05	0.83	0.31	0.80	0.31	0.79
1.00	0.09	0.82	0.61	0.80	0.61	0.76
2.00	0.18	0.82	1.22	0.77	1.22	0.69

Πίνακας B5: Παραμένον (% κ.β.) στην τροφοδοσία $-1.18+0.600$ mm σε σχέση με το χρόνο λειοτριβήσης μετά από αυτολειοτριβήση και χρήση σφαιρών ($d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).
 $-1.18 + 0.600$ mm

Χρόνος (min)	Βάρος (χωρίς σφαίρες)	Βάρος (6.5mm)	Βάρος (12.7mm)
0.0	94.6	94.6	94.6
0.3	94.3	83.2	79.3
0.5	93.3	75.2	67.8
1.0	90.9	69.4	51.3
2.0	87.4	54.8	30.6

Πίνακας B6: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 (%)			Χαλαζιάς			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	94.29	83.18	79.32	26.80	31.20	24.80	13.50	12.00	14.30	3.50	3.00	3.80
-0.600+0.075	3.8	12.66	16.37	45.92	4.94	42.32	2.11	18.52	6.17	17.01	10.50	4.84
-0.075	1.92	4.17	4.32	15.00	17.40	16.30	10.00	16.20	15.00	2.80	4.20	4.50
	100	100.00	100.01	27.30	27.30	27.30	13.00	13.00	13.00	4.00	4.00	4.00

Πίνακας B7: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 (%)			Χαλαζιάς			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	93.26	75.16	67.77	27.00	27.40	26.20	12.20	11.50	14.00	3.10	2.50	2.10
-0.600+0.075	4.52	18.43	26.04	40.22	29.99	32.44	26.61	19.33	10.59	23.60	10.67	8.75
-0.075	2.22	6.41	6.18	13.60	18.40	17.70	18.90	12.40	12.20	1.90	2.40	4.80
	100.00	100.00	99.99	27.30	27.30	27.30	13.00	13.00	13.00	4.00	4.00	4.00

Πίνακας B8: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 (%)			Χαλαζιάς			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	90.86	69.42	51.29	26.50	27.00	28.80	11.40	11.80	14.00	3.00	1.50	2.60
-0.600+0.075	6.72	20.38	38.52	42.98	32.73	27.21	31.90	17.69	10.74	17.99	12.27	5.94
-0.075	2.42	10.21	10.19	13.80	18.50	20.10	20.60	11.80	16.50	2.70	4.50	3.70
	100	100.0	100	27.30	27.30	27.30	13.00	13.00	13.00	4.00	4.00	4.00

Πίνακας B9: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	94.29	83.18	79.32	92.55	95.05	72.05	97.91	76.77	87.24	82.50	62.38	75.35
-0.425+0.075	3.80	12.66	16.37	6.39	2.29	25.37	0.62	18.03	7.77	16.16	33.24	19.79
-0.075	1.92	4.17	4.32	1.05	2.66	2.58	1.48	5.19	4.98	1.34	4.38	4.86
	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Πίνακας B10: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	93.26	75.16	67.77	92.23	75.43	65.03	87.51	66.48	72.98	72.27	46.975	35.58
-0.600+0.075	4.52	18.43	26.04	6.66	20.24	30.94	9.25	27.40	21.21	26.67	49.18	56.99
-0.075	2.22	6.41	6.18	1.11	4.32	4.01	3.23	6.11	5.80	1.05	3.84	7.42
	100.00	100.00	99.99	99.99	99.99	99.98	99.99	99.99	99.98	99.99	99.99	99.98

Πίνακας B11: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.600	90.86	69.42	51.29	88.19	68.65	54.10	79.67	63.01	55.23	68.14	26.03	33.34
-0.600+0.075	6.72	20.38	38.52	10.58	24.43	38.39	16.49	27.73	31.83	30.22	62.49	57.23
-0.075	2.42	10.21	10.19	1.22	6.92	7.50	3.83	9.26	12.93	1.63	11.48	9.42
	100.00	100.00	100.00	99.99	100.00	99.99	99.99	100.00	99.99	99.99	100.00	99.99

Πίνακας B12: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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 Αθροιστικώς Ανάλυση (%)

	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	27.30	27.30	27.30	13.00	13.00	13.00	4.00	4.00	4.00
-0.600	5.71	16.82	20.68	35.60	8.03	36.90	4.77	17.95	8.02	12.26	8.94	4.77
-0.075	1.91	4.16	4.31	15.08	17.42	16.34	10.05	16.21	15.03	2.81	4.20	4.51

Πίνακας B13: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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	Αθροιστικώς						Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	27.30	27.30	27.30	13.00	13.00	13.00	4.00	4.00	4.00
-0.600	6.74	24.84	32.23	31.45	26.99	29.60	24.07	17.54	10.89	16.45	8.54	7.99
-0.075	2.22	6.41	6.19	13.60	18.39	17.67	18.90	12.39	12.18	1.90	20.40	4.79

Πίνακας B14: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Αθροιστικώς						Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	27.30	27.30	27.30	13.00	13.00	13.00	4.00	4.00	4.00
-0.600	9.14	30.58	48.71	35.25	27.99	25.72	28.91	15.73	11.95	13.94	9.68	5.47
-0.075	2.42	10.20	10.19	13.80	18.51	20.10	20.60	11.81	16.50	2.70	4.50	3.70

Πίνακας B15: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Αθροιστικώς						Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	27.30	27.30	27.30	13.00	13.00	13.00	4.00	4.00	4.00
-0.600	12.58	45.20	69.42	41.18	25.48	25.45	26.89	11.67	14.23	10.25	7.39	5.15
-0.075	4.74	19.78	16.57	13.67	19.10	18.70	17.66	18.30	11.10	3.79	5.30	5.80

Πίνακας B16: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.600	5.71	16.82	20.68	7.45	4.95	27.95	2.09	23.23	12.76	17.51	37.62	24.66
-0.075	1.91	4.16	4.31	1.05	2.66	2.58	1.48	5.19	4.98	1.34	4.38	4.86

Πίνακας B17: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ 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	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.600	6.74	24.84	32.23	7.76	24.56	34.95	12.48	33.51	27.01	27.72	53.02	64.41

-0.075	2.22	6.41	6.19	1.11	4.32	4.01	3.23	6.11	5.80	1.05	3.84	7.42
--------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Πίνακας B18: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.600	9.14	30.58	48.71	11.80	31.35	45.89	20.32	63.99	44.76	31.86	73.97	66.66
-0.075	2.42	10.20	10.19	1.22	6.92	7.50	3.83	9.26	12.93	1.63	11.48	9.43

Πίνακας B19: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-1.18+0.600$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-0.600	12.58	45.20	69.42	18.97	42.20	64.72	26.02	40.57	76.01	32.24	83.57	89.30
-0.075	4.74	19.78	16.57	2.37	13.84	11.35	6.44	27.86	14.15	4.49	26.22	24.03

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

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

$d=0$

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min
0.300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.150	77.38	76.97	74.91	73.33	22.62	23.03	25.09	26.67
0.075	11.88	11.88	13.04	10.56	10.75	11.15	12.04	16.11
-0.075	10.75	11.15	12.04	16.11	0.00	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

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

$d=6.5$ mm

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min
0.300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.150	75.74	65.94	56.19	41.38	24.26	34.06	43.81	58.62
0.075	11.53	17.28	22.34	24.85	12.73	16.78	21.47	33.77
-0.075	12.73	16.78	21.47	33.77	0.00	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

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

$d=12.7$ mm

Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min	$t=0.25$ min	$t=0.5$ min	$t=1$ min	$t=2$ min
0.300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.150	83.77	76.31	68.07	56.19	16.23	23.69	31.93	43.81
0.075	5.95	10.05	14.11	19.65	10.27	13.64	17.82	24.16
-0.075	10.27	13.64	17.82	24.16	0.00	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

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

$d=0$

$d=6.5$ mm

$d=12.7$ mm

Χρόνος	Ειδική ενέργεια	d_{80}	Ειδική ενέργεια	d_{80}	Ειδική ενέργεια	d_{80}
min	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)
0.0	0.0	0.21	0.00	0.21	0.00	0.21
0.3	0.02	0.20	0.15	0.20	0.15	0.20
0.5	0.05	0.20	0.31	0.20	0.31	0.20
1.0	0.09	0.20	0.61	0.19	0.61	0.20
2.0	0.18	0.20	1.22	0.18	1.22	0.19

Πίνακας Γ5: Παραμένον (% κ.β.) στην τροφοδοσία $-0.300+0.150$ mm σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης μετά από αυτολειοτρίβηση και χρήση σφαιρών ($d=6.5$ mm, $d=12.7$ mm).
 $-0.300+0.150$ mm

Χρόνος (min)	Βάρος (χωρίς σφαίρες)	Βάρος (6.5mm)	Βάρος (12.7mm)
0.0	96.1	96.1	96.1
0.3	77.4	75.7	83.8
0.5	77.0	65.9	76.3
1.0	74.9	56.2	68.1
2.0	73.3	41.4	56.2

Πίνακας Γ6: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	77.38	75.74	83.77	26.70	25.50	25.00	14.00	13.00	13.00	4.20	4.50	4.10
-0.150+0.075	11.88	11.53	5.95	10.25	18.53	7.73	6.53	15.24	17.61	4.33	1.82	2.42
-0.075	10.75	12.73	10.27	15.10	16.10	20.40	17.60	14.90	15.20	2.20	3.00	4.10
	100.00	100.00	99.99	23.50	23.50	23.50	13.50	13.50	13.50	4.00	4.00	4.00

Πίνακας Γ7: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	76.97	65.94	76.31	22.50	29.20	26.00	13.60	12.60	11.70	3.60	4.70	3.20
-0.150+0.075	11.88	17.28	10.05	35.51	8.45	6.01	11.26	11.69	25.67	5.09	1.13	9.80
-0.075	11.15	16.78	13.64	17.60	16.60	22.40	15.20	18.90	14.60	5.60	4.20	4.20
	100.00	100.00	100.00	23.50	23.50	23.50	13.50	13.50	13.50	4.00	4.00	4.00

Πίνακας Γ8: Ορυκτολογική ανάλυση προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	74.91	56.19	68.07	22.00	28.00	27.40	13.50	14.00	12.60	3.50	2.90	3.00
-0.150+0.075	13.04	22.34	14.11	38.40	13.24	9.36	14.33	8.88	16.58	5.03	5.81	8.32
-0.075	12.04	21.47	17.82	16.70	22.40	19.80	12.60	17.00	14.50	6.00	5.00	4.40
	100.00	100.00	100.00	23.50	23.50	23.50	13.50	13.50	13.50	4.00	4.00	4.00

Πίνακας Γ9: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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 (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	77.38	75.74	83.77	87.91	82.19	89.13	80.24	72.93	80.68	81.24	85.2	85.87
-0.150+0.075	11.88	11.53	5.95	5.18	9.09	1.96	5.75	13.02	7.76	12.85	5.25	3.60
-0.075	10.75	12.73	10.27	6.91	8.72	8.92	14.01	14.05	11.56	5.91	9.55	10.53
	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Πίνακας Γ10: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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 (%)			Χαλαζιάς			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	76.97	65.94	76.31	73.70	81.93	84.44	77.54	61.54	66.14	69.27	77.48	61.05
-0.150+0.075	11.88	17.28	10.05	17.96	6.21	2.57	9.91	14.96	19.12	15.12	4.90	24.63
-0.075	11.15	16.78	13.64	8.35	11.85	13.00	12.55	23.49	14.75	15.60	17.62	14.32
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	100.01

Πίνακας Γ11: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων των προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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 (%)			Χαλαζιάς			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
+0.150	74.91	56.19	68.07	70.13	66.95	79.37	74.19	58.27	63.54	65.55	40.74	51.06
-0.150+0.075	13.04	22.34	14.11	21.31	12.59	5.62	13.84	14.69	17.33	16.38	32.42	29.35
-0.075	12.04	21.47	17.82	8.56	20.47	15.02	11.24	27.04	19.14	18.07	26.84	19.60
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	100.01

Πίνακας Γ12: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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

Αθροιστικώς

Ανάλυση (%)

	Βάρος, W (%)			Χαλαζιάς			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	23.50	23.50	23.50	13.50	13.50	13.50	4.00	4.00	4.00
-0.150	22.62	24.26	16.23	12.56	17.26	15.74	11.79	15.06	16.07	3.32	2.44	3.48
-0.075	10.75	12.73	10.28	15.10	16.10	20.38	17.60	14.90	15.19	2.20	3.00	4.10

Πίνακας Γ13: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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

Αθροιστικώς

Ανάλυση (%)

	Βάρος, W (%)			Χαλαζιάς			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	23.50	23.50	23.50	13.50	13.50	13.50	4.00	4.00	4.00
-0.150	23.03	34.06	23.69	26.84	12.46	15.45	13.17	15.24	19.30	5.34	2.64	6.58
-0.075	11.15	16.78	13.64	17.60	16.60	22.40	15.20	18.90	14.60	5.60	4.20	4.20

Πίνακας Γ14: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min	Αθροιστικώς						Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	23.50	23.50	23.50	13.50	13.50	13.50	4.00	4.00	4.00
-0.150	25.09	43.81	31.93	27.98	17.73	15.19	13.50	12.86	15.42	5.49	5.41	6.13
-0.075	12.04	21.47	17.82	16.70	22.40	19.80	12.60	17.00	14.50	6.00	5.00	4.40

Πίνακας Γ15: Ορυκτολογική ανάλυση αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=2$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min	Αθροιστικώς						Ανάλυση (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	23.50	23.50	23.50	13.50	13.50	13.50	4.00	4.00	4.00
-0.150	26.67	58.62	43.81	32.30	17.29	18.63	14.33	13.71	13.76	6.20	4.49	4.90
-0.075	16.11	6.75	24.16	15.00	20.00	21.90	16.20	10.70	10.30	2.60	4.10	3.70

Πίνακας Γ16: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-0.150	22.62	24.26	16.23	12.09	17.81	10.87	19.76	27.07	19.32	18.76	14.79	14.13
-0.075	10.75	12.73	10.28	6.91	8.72	8.92	14.01	14.05	11.56	5.91	9.55	10.53

Πίνακας Γ17: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ 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	Αθροιστικώς						Κατανομή (%)					
	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
Μέγεθος (mm)	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-0.150	23.03	34.06	23.69	26.30	18.07	15.57	22.46	38.46	33.86	30.73	22.52	38.95
-0.075	11.15	16.78	13.64	8.35	11.85	13.00	12.55	23.49	14.75	15.60	17.62	14.32

Πίνακας Γ18: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=1$ min

Αθροιστικώς

Κατανομή (%)

Μέγεθος (mm)	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-0.150	25.09	43.81	31.93	29.87	33.05	20.63	39.51	41.73	36.47	34.45	59.26	48.95
-0.075	12.04	21.47	17.82	8.56	20.47	15.01	11.24	27.04	19.14	18.07	26.84	19.60

Πίνακας Γ19: Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων αθροιστικώς διερχόμενων προϊόντων του κοκκομετρικού κλάσματος $-0.300+0.150$ mm για χρόνο $t=1$ min και διαμέτρους σφαιρών ($d=0$, $d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

$t=2$ min

Αθροιστικώς

Κατανομή (%)

Μέγεθος (mm)	Βάρος, W (%)			Χαλαζίας			Νιμίτης			Χρωμίτης		
	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm	0	6.5 mm	12.7 mm
Τροφή	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-0.150	26.67	58.62	43.81	36.65	43.12	34.72	28.30	59.54	44.64	26.67	65.86	53.64
-0.075	16.11	6.75	24.16	10.28	28.74	22.52	19.33	26.77	18.43	10.47	34.61	22.35

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Πίνακας Δ1: Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου για δοκιμές αυτολειοτριβήσης ($d=0$).

$d=0$			
<i>Ανώτερο Μέγεθος (mm)</i>	<i>Πειραματικό S_i</i>	<i>Μοντέλο S_i</i>	<i>Διαφορά τετραγώνων</i>
3.35	0.025	0.008	0.00
1.18	0.08	0.08	0.00
0.300	0.28	0.27	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.00

Πίνακας Δ2: Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου για $d = 6.5$ mm.

$d=6.5$ mm			
<i>Ανώτερο Μέγεθος (mm)</i>	<i>Πειραματικό S_i</i>	<i>Μοντέλο S_i</i>	<i>Διαφορά τετραγώνων</i>
3.35	0.066	0.040	0.00
1.18	0.255	0.296	0.00
0.300	0.390	0.381	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.00

Πίνακας Δ3: Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου για $d = 12.7$ mm.

$d=12.7$ mm			
<i>Ανώτερο Μέγεθος (mm)</i>	<i>Πειραματικό S_i</i>	<i>Μοντέλο S_i</i>	<i>Διαφορά τετραγώνων</i>
3.35	0.264	0.31	0.00
1.18	0.557	0.53	0.00
0.300	0.252	0.25	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.00

Πίνακας Δ4: Παράμετροι για δοκιμές αυτολειοτριβήσης ($d=0$) και για κάθε διάμετρο σφαίρας ($d=6.5$ mm και $d=12.7$ mm).

d (mm)	α_T (min^{-1})	α	M	A	x_m (mm)	S_m (min^{-1})
0	0.69	0.64	0.56	2.9	0.36	0.28
6.5	0.85	0.64	0.9	2.9	0.58	0.47
12.7	0.54	0.64	2.37	2.9	1.53	0.56