



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ

Ποιοτική αναβάθμιση μεταλλεύματος βωξίτη
μέσω διαφόρων μεθόδων εμπλουτισμού

Διπλωματική Εργασία
Μιχαήλ Ιωάννης

Εξεταστική επιτροπή

Κορνίτσας Κωνσταντίνος (Καθηγητής, επιβλέπων)

Αλεβίζος Γεώργιος (Αν. Καθηγητής)

Δρ. Πετράκης Ευάγγελος (ΕΔΙΠ)

Χανιά, Οκτ. 2019

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη	5
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	7
1.1 Βωξίτης.....	7
1.2 Ορυκτολογία	7
1.3 Γένεση Βωξιτικών κοιτασμάτων	9
1.4 Χρήσεις Βωξίτη	9
1.5 Παγκόσμια παραγωγή	10
1.6 Βωξίτης στον Ελλαδικό χώρο	11
1.7 Η βιομηχανία βωξίτη στην Ελλάδα	13
1.9 Τιμή αλουμινίου.....	14
Κεφάλαιο 2: Επεξεργασία Μεταλλεύματος Βωξίτη.....	14
2.1 Εμπλουτισμός Μεταλλεύματος	15
2.2 Κατάτμηση	15
2.3 Παράμετροι που επηρεάζουν τη λειοτρίβηση.....	18
2.4 Επίπλευση.....	21
2.5 Μαγνητικός Διαχωρισμός	22
2.6 Μεταλλουργία Βωξίτη.....	25
Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διαδικασία.....	28
3.1 Χαρακτηρισμός αρχικού υλικού.....	28
3.2 Ορυκτολογική και χημική ανάλυση δείγματος	30
3.2.1 Ορυκτολογική Ανάλυση.....	33
3.3 Υπολογισμός παραμέτρων λειοτρίβησης.....	34
3.3 Εκλεκτική Λειοτρίβηση	36
3.4 Μαγνητικός διαχωρισμός.....	38
3.5 Επίπλευση	41
Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία αποτελεσμάτων	44
4.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και της πλήρωσης του σφαιρόμυλου	44
4.2 Ειδική ενέργεια κατανάλωσης συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος.....	47
4.3 Χημική ανάλυση κοκκομετρικών κλασμάτων	49
4.3.1 Χημική ανάλυση κλασμάτων για πλήρωση σφαιρόμυλου $f_c = 0,05$	49
4.3.2 Χημική ανάλυση κλασμάτων για πλήρωση σφαιρόμυλου $f_c = 0,1$	52

4.3.3 Χημική ανάλυση κλασμάτων για πλήρωση σφαιρόμυλου $f_c = 0,15$	56
4.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Λειοτρίβησης	60
4.4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$	60
4.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για πλήρωση $f_c = 0,1$	64
4.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για πλήρωση $f_c = 0,15$	68
4.5 Δοκιμές Επίπλευσης	72
4.6 Μαγνητικός Διαχωρισμός	73
4.6.1 Μαγνητικός διαχωρισμός χρόνο λειοτρίβησης $t=2,72$ min, και $f_c = 0,05$	74
4.6.2 Μαγνητικός διαχωρισμός σε χρόνο λειοτρίβησης $t=6,59$ min και $f_c = 0,1$	77
4.6.3 Μαγνητικός διαχωρισμός σε χρόνο λειοτρίβησης $t=11$ min και $f_c = 0,15$	81
4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού διαχωρισμού	84
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις	88
Βιβλιογραφία	91
Διεθνείς Αναφορές	91
Ελληνικές Αναφορές	91
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	94

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Κομνίτσα. Το κύριο μέρος της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων, της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Μέρος της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας, καθώς και στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε εκλεκτική λειοτρίβηση βωξίτη σε σφαιρόμυλο, η οποία εκμεταλλεύεται τη διαφορά της σκληρότητας μεταξύ των ορυκτών του βωξίτη και μπορεί να αποτελέσει μια αποδοτική μέθοδο εμπλουτισμού του μεταλλεύματος. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε επίπλευση και μαγνητικός διαχωρισμός σε επιλεγμένα προϊόντα της λειοτρίβησης για περαιτέρω αναβάθμιση του μεταλλεύματος.

Η εξόρυξη βωξίτη στην Ελλάδα αποτελεί έναν από τους βασικότερους τομείς της Ελληνικής βιομηχανίας και οικονομίας, στην παραγωγή αλουμινίου καθώς και στην εξαγωγή ορυκτής πρώτης ύλης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς όλους όσους με βοήθησαν και καθοδήγησαν να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα για την ανάθεση του θέματος. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Ευάγγελο Πετράκη, για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση του, την προθυμία και την υπομονή που μου έδειξε και την άριστη συνεργασία μας, ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή.

Επίσης, ευχαριστώ τον Αν. καθηγητή κ. Γεώργιο Αλεβίζο, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή, τη διδακτορική φοιτήτρια Βασιλική Καρμάλη για την υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, τον Αντιπρύτανη Πολυτεχνείου Κρήτης και καθηγητή της Σχολής Μηχ.Ο.Π. κ. Νικόλαο Καλλίθρακα-Κόντο, το Δρ. Αντώνη Στρατάκη και τη Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Παυλίνα Ροτόντο για την άριστη συνεργασία.

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ήταν η ποιοτική αναβάθμιση μεταλλεύματος βωξίτη από την περιοχή του Παρνασσού μέσω διαφόρων μεθόδων εμπλουτισμού. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εκλεκτικής λειοτρίβησης με στόχο τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών για την πιθανή αναβάθμιση του μεταλλεύματος. Στη συνέχεια, μέσω κλασικών μεθόδων (επίπλευση και μαγνητικός διαχωρισμός) μελετήθηκε ο εμπλουτισμός του μεταλλεύματος σε επιλεγμένα κοκκομετρικά κλάσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές λειοτρίβησης.

Από τη χημική και ορυκτολογική ανάλυση του αρχικού υλικού προέκυψε ότι τα κυριότερα οξείδια ήταν το Al_2O_3 (58%), Fe_2O_3 (22%) και TiO_2 (4%), ενώ οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις ήταν το διάσπορο ($\alpha\text{-AlOOH}$), ο βαιμίτης ($\gamma\text{-AlOOH}$), ο αιματίτης (Fe_2O_3), ο ανατάσης (TiO_2) και ο καολινίτης ($\text{Al}_4[(\text{OH})_8/\text{Si}_4\text{O}_{10}]$)

Οι δοκιμές λειοτρίβησης πραγματοποιήθηκαν σε σφαιρόμυλο, με χρήση σφαιρών διαφορετικών διαμέτρων (12,7, 25,4 και 40 mm), σε τέσσερις διαφορετικούς χρόνους (2, 4, 8, και 12 min) και για τρεις διαφορετικούς συντελεστές πλήρωσης f_c (0,05, 0,1, 0,15) του μύλου με υλικό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Al_2O_3 (65,15%), που αντιστοιχεί σε αύξηση 6,28%, επιτεύχθηκε στο χονδρό κλάσμα (-3,35+1,18 mm), για χρόνο λειοτρίβησης 8 min και για πλήρωση του υλικού $f_c = 0,05$. Μεγαλύτερος ρυθμός θραύσης του μεταλλεύματος επιτυγχάνεται στη μικρότερη πλήρωση που επιλέχθηκε ($f_c = 0,05$). Γενικά, υπάρχει μια τάση αύξησης της περιεκτικότητας % του Al_2O_3 με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης πάνω από ένα συγκεκριμένο μέγεθος προϊόντος, γεγονός που δείχνει ότι σε μεγαλύτερα ενεργειακά επίπεδα το υλικό πάνω από αυτό μέγεθος εμπλουτίζεται ως προς το Al_2O_3 . Ανάκτηση του Al_2O_3 μεγαλύτερη από 70% επιτυγχάνεται και στις τρεις διαφορετικές πληρώσεις του μύλου, με μεγαλύτερη στο συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,15$. Σε αυτές τις συνθήκες η ανάκτηση έφτασε έως και 90%, με περιεκτικότητα Al_2O_3 περίπου 62% (αύξηση 2-3%).

Στη μελέτη επίπλευσης δεν παρουσιάστηκαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα καθώς δεν επιτεύχθηκε εμπλουτισμός του μεταλλεύματος. Πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές για τους αντίστοιχους συντελεστές f_c , με μέγεθος τροφοδοσίας -0,300 mm και πυκνότητα

πολφού 30% στερεά. Από τα αποτελέσματα, δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη μεταβολή στην περιεκτικότητα των οξειδίων. Τέλος, στο μαγνητικό διαχωρισμό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε τρεις διαφορετικούς μαγνήτες, για τρία κοκκομετρικά κλάσματα (-3,35+1,18, -1,18+0,300, -0,300 mm). Από τις χημικές αναλύσεις προκύπτει ότι στο ενοποιημένο κλάσμα +0,300 mm, η μεγαλύτερη τιμή της περιεκτικότητας (66,9%, αύξηση 7,8%) του Al_2O_3 παρατηρείται στο μη μαγνητικό 2 (MM2) όταν ο συντελεστής πλήρωσης ήταν $f_c = 0,05$ και σε χρόνο λειοτρίβησης 2,7 min, ενώ στο κλάσμα -0,300 mm η μεγαλύτερη τιμή της περιεκτικότητας (61,6%, αύξηση 7,5%) του Al_2O_3 , παρατηρείται στο μη μαγνητικό 1 (MM1) στον ίδιο συντελεστή πλήρωσης και στον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Βωξίτης

Ο Βωξίτης είναι η ορυκτή πρώτη ύλη, το όνομα της οποίας προέρχεται από την γαλλική λέξη *Baux*. Ονομάστηκε έτσι γιατί τα πρώτα κοιτάσματα Βωξίτη ανακαλύφθηκαν, από το Γάλλο γεωλόγο *Pierre Berthier* στην πόλη Μπω της νότιας Γαλλίας. Προκύπτει από πετρώματα πλούσια σε αργιλιοπυριτικές ενώσεις. Αποτελεί το κυριότερο μέταλλευμα αργιλίου. Τα βωξιτικά κοιτάσματα χαρακτηρίζονται από κοκκινωπό, κίτρινο και σπανίως γκριζωπό χρώμα. Τα διαφορετικά χρώματα που συναντώνται οφείλονται στις διαφορετικές περιεκτικότητες των ορυκτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο βωξίτης που έχει περισσότερο αιματίτη να παρουσιάζεται κοκκινωπός, ενώ τα κοιτάσματα που περιέχουν γκαιίτη να παρουσιάζονται κιτρινωπά. Τα σκούρα χρώματα οφείλονται στα οξείδια του σιδήρου (www.orykta.gr). Η μέση περιεκτικότητα ενός τυπικού κοιτάσματος βωξίτη ανέρχεται σε 35-65% Al_2O_3 , 2-20% Fe_2O_3 , 2-10% SiO_2 , 1-3% TiO_2 και τέλος 10% H_2O (Χριστίδης, 1999). Το ειδικό βάρος του, ανάλογα με την περιεκτικότητα του στα οξείδια του σιδήρου κυμαίνεται από 2,7 έως 3,5, ενώ παρουσιάζει στιφρή, ωλιθική ή πισσολιθική υφή.

1.2 Ορυκτολογία

Τα κυριότερα στοιχεία που αποτελούν το βωξίτη είναι τα υδροξείδια του αργιλίου όπως γκιψίτης, διάσπορο και βαιμίτης, τα υδροξείδια-οξείδια του σιδήρου όπως γκαιίτης και αιματίτης, πυριτικά ορυκτά όπως καολίνη, αλουνίτης και αλβίτης και τέλος, οξείδια του τιτανίου όπως ανατάσης και ρουτίλιο.

Τα κύρια ορυκτά του αργιλίου είναι :

- Γκιψίτης (ή Γιββσίτης): Ο χημικός τύπος του Γκιψίτη είναι $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$. Κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα. Κατά την κλίμακα Mohs, ο Γκιψίτης παρουσιάζει σκληρότητα από 2,5 - 3,5, ενώ η πυκνότητα του κυμαίνεται περίπου στα 2,4 g/cm^3 . Έχει λευκό χρώμα, ανοικτό πορτοκαλί, ανοικτό πράσινο και γκρί. Εμφανίζεται σε χαμηλής θερμοκρασίας υδροθερμικά ορυκτά, καθώς και σε λατερίτες και βωξίτες (Θεοδωρίκας, 2013).

- Βαιμίτης (ή μπαιμίτης): Ο χημικός τύπος του βαιμίτη είναι $\gamma\text{-AlOOH}$. Κρυσταλλώνεται στο ρομβικό σύστημα. Παρουσιάζει πολύ καλό σχισμό. Κατά την κλίμακα Mohs, η σκληρότητα του κυμαίνεται από 3,5-4, ενώ η πυκνότητα του είναι ίση με $3,05 \text{ g/cm}^3$. Το χρώμα του είναι λευκό (Θεοδωρίκας, 2013).
- Διάσπορο: Ο χημικός τύπος του είναι $\alpha\text{-AlOOH}$. Κρυσταλλώνεται στο ρομβικό σύστημα. Παρουσιάζει τέλειο σχισμό, ενώ η σκληρότητα του κυμαίνεται από 6,5-7 στην κλίμακα Mohs. Το χρώμα του είναι λευκό ή άχρωμο. Η χημική σύσταση του είναι 85% Al_2O_3 , 15% H_2O . Απαντά σε υδροθερμικές αλλοιώσεις αργιλικών ορυκτών (Θεοδωρίκας, 2013).

Τα κύρια ορυκτά του σιδήρου είναι :

- Γκαιίτης: Ο χημικός τύπος του γκαιίτη είναι $\alpha\text{-FeOOH}$. Κρυσταλλώνεται στο ρομβικό σύστημα. Παρουσιάζει τέλειο σχισμό. Η σκληρότητα του κυμαίνεται από 5 έως 5,5 στην κλίμακα Mohs, ενώ η πυκνότητα του είναι $4,37 \text{ g/cm}^3$. Παρουσιάζει αδαμαντώδη έως μεταξώδη λάμψη, ενώ το χρώμα του είναι κιτρινωπό καστανό έως καστανόμαυρο. Η χημική του σύσταση αποτελείται από 62% Fe, 27% O, και 10,1% H_2O . Αποτελεί αρκετά διαδεδομένο ορυκτό και σχηματίζεται σε οξειδωτικές συνθήκες, σαν προϊόν αποσάθρωσης σιδηρούχων ορυκτών (Θεοδωρίκας, 2013).
- Αιματίτης: Ο χημικός τύπος του αιματίτη είναι Fe_2O_3 . Κρυσταλλώνεται στο τριγωνικό σύστημα. Η σκληρότητα του κυμαίνεται από 5,5 έως 6,5 στην κλίμακα Mohs, και η πυκνότητα του είναι ίση με $5,25 \text{ g/cm}^3$. Παρουσιάζει μεταλλική έως ημιμεταλλική λάμψη, και χρώμα καστανοκόκκινο έως μαύρο. Η χημική σύσταση του αιματίτη είναι 70% Fe και 30% O (Θεοδωρίκας, 2013).

Για τη μεταλλευτική βιομηχανία, ο αλβίτης και ο καολινίτης δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον όσον αφορά την ανάκτηση του αργιλίου. Αντιθέτως, ο γκιψίτης ο βαιμίτης και το διάσπορο θεωρούνται ορυκτές πρώτες ύλες για την ανάκτηση αργιλίου.

1.3 Γένεση Βωξιτικών κοιτασμάτων

Η γένεση των βωξιτικών κοιτασμάτων, βασίζεται σε δύο θεωρίες. Στη θεωρία της αυτόχθονης γένεσης και στη θεωρία της αλλόχθονης γένεσης. Η θεωρία της αυτόχθονης γένεσης, στηρίζεται στην αποσάθρωση των ασβεστολίθων. Από την αποσάθρωση, απομακρύνθηκαν και διαλυτοποιήθηκαν τα ανθρακικά ορυκτά, ενώ τα αργιλιοπυριτικά ορυκτά που παρέμειναν αδιάλυτα στο χώρο υπέστησαν λατεριτίωση που είχε ως αποτέλεσμα το σχηματισμό των κοιτασμάτων βωξίτη (Μουντράκης, 2010).

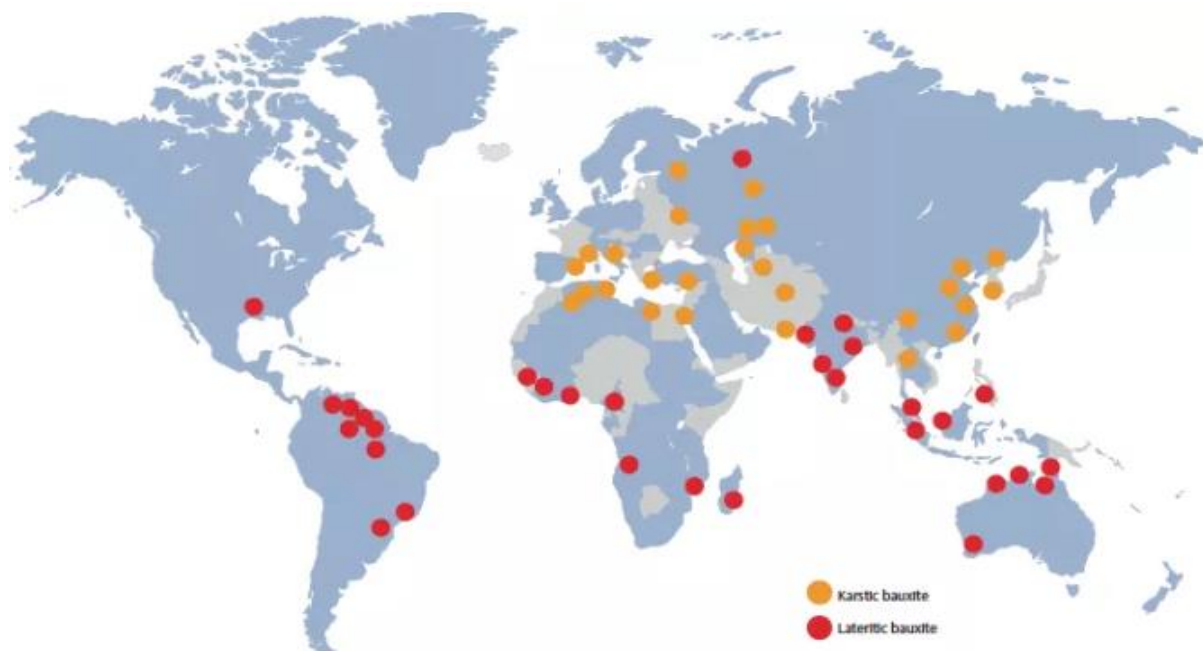
Η δεύτερη θεωρία, της αλλόχθονης γένεσης, στηρίζεται στη λατεριτική αποσάθρωση. Το κοίτασμα βωξίτη, σχηματίστηκε σε μια θέση, μεταφέρθηκε και αποτέθηκε σε μια άλλη με μορφή αλλουβιακή. Από το σχηματισμό αυτού του τύπου προκύπτει ότι το βωξιτικό κοίτασμα είναι λατεριτικό ίζημα και αλλόχθονο (Μουντράκης, 2010).

1.4 Χρήσεις Βωξίτη

Ο βωξίτης θεωρείται αρκετά σημαντικό βιομηχανικό ορυκτό. Χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών. Αποτελεί την κύρια πηγή για παραγωγή αλουμινίου. Το 85% της παγκόσμιας παραγωγής απορροφάται από τη βιομηχανία αλουμινίου. Επίσης, χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τσιμέντου. Κατά την παραγωγή ειδικών τσιμέντων, ένας σκληρός βωξίτης, συνήθως διασπορικός, τήκεται σε ειδικές κάμινους μαζί με κωκ και ασβεστόλιθο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή του σε αργιλική τηκτική κονία, που αποτελεί τσιμέντο ταχείας πήξεως. Ακόμη, παρατηρείται ευρεία χρήση του βωξιτικού μεταλλεύματος στην παραγωγή λειαντικών προϊόντων. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται διασπορικός βωξίτης ή βαιμιτικού τύπου, με ελάχιστη περιεκτικότητα σε Al_2O_3 (55%), και μέγιστη περιεκτικότητα Fe_2O_3 (6%), SiO_2 (5%) και TiO_2 (5%). Επιπλέον, χρησιμοποιείται και στη βιομηχανία παραγωγής πυρίμαχων υλικών, με μέταλλευμα υψηλής περιεκτικότητας σε Al_2O_3 (59-61%) και χαμηλής περιεκτικότητας σε Fe_2O_3 (2%), SiO_2 (1,5-5%) και TiO_2 (2,5%) αντίστοιχα (Χριστίδης, 1999). Τέλος, βρίσκει χρήση μεταξύ άλλων στη μεταλλουργία σιδήρου, στην παραγωγή γαιών διηθήσεως, στους καταλύτες πυρόλυσης πετρελαίου, καθώς και στην οδοποιία.

1.5 Παγκόσμια παραγωγή

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του USGS (United States Geological Survey, 2015), τα κοιτάσματα βωξίτη σε παγκόσμιο επίπεδο ανέρχονται από 55-75 δισεκατομμύρια τόνους, από τους οποίους το 32% βρίσκεται στην Αφρική, το 23% στην Ωκεανία, το 21% στη Νότια Αμερική και Καραϊβική, το 18% στην Ασία, και το υπόλοιπο 6% στον υπόλοιπο κόσμο.



Εικόνα 1: Παγκόσμιος χάρτης κοιτασμάτων Λατεριτικού και Καρστικού Βωξίτη (<http://curiousprofessional.com>)

Συγκεκριμένα, παρατηρώντας την Εικόνα 1 διακρίνονται εμφανίσεις λατεριτικού βωξίτη στην Αυστραλία, Νότιο-Ανατολική Ασία, Ινδία, Αφρική και Νότια Αμερική, ενώ εμφανίσεις καρστικού βωξίτη παρατηρούνται στην Ευρώπη, Μέση Ανατολή, Κίνα και Τζαμάικα.

Η Ελλάδα βρίσκεται στις πρώτες δέκα χώρες σε αποθέματα βωξίτη, τα οποία ανέρχονται στους 130.000.000 τόνους. Η κατάταξη των χωρών με βάση τα αποθέματα τους παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Στη λίστα συμπεριλαμβάνονται με σειρά αποθεμάτων η Ινδία-Γουινέα με 7,4 δισεκατομμύρια τόνους, ακολουθεί η Αυστραλία με 6 δισεκατομμύρια τόνους, Βραζιλία με 2,6 δισεκατομμύρια τόνους, Τζαμάικα με 2

δισεκατομμύρια τόνους και ακολουθούν οι Ελλάδα, Γκάνα, Δημοκρατία του Σουρινάμ και Καζακστάν με λιγότερο από 1 δισεκατομμύριο τόνους.

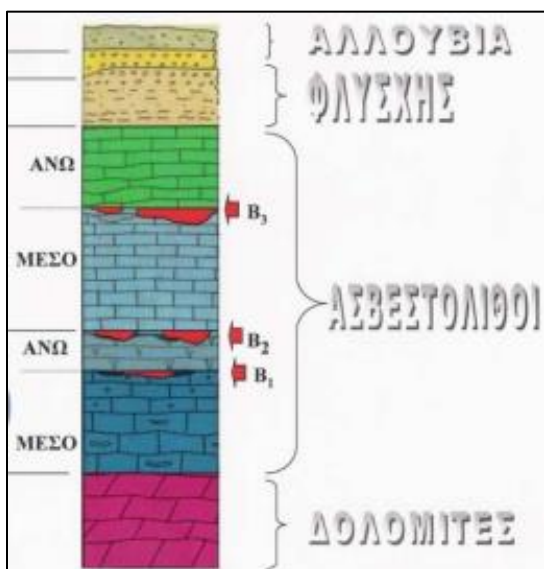


Εικόνα 2: Παγκόσμιος Χάρτης των πρώτων δέκα χωρών σε αποθέματα Βωξίτη (USGS, 2015)

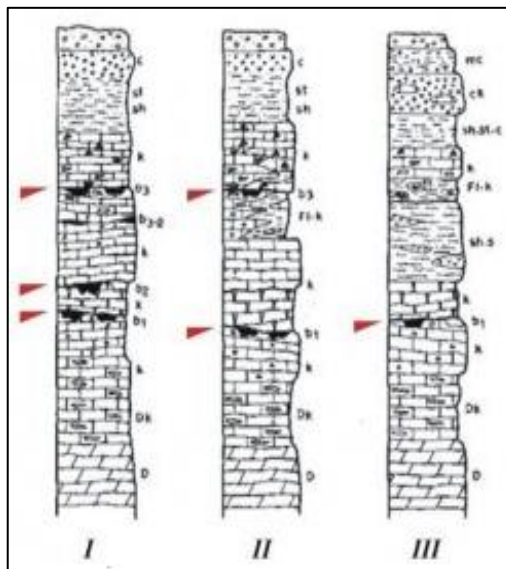
1.6 Βωξίτης στον Ελλαδικό χώρο

Ο βωξίτης στον Ελλαδικό χώρο συναντάται στη ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας, η ονομασία της οποίας προέρχεται από τα βουνά Παρνασσό και Γκιώνα τα οποία συγκροτούν τη ζώνη. Η γεωλογική ιδιαιτερότητα του Παρνασσού συνίσταται στα πλούσια κοιτάσματα βωξίτη, τα οποία χωρίζονται σε τρεις διαδοχικούς στρωματογραφικούς ορίζοντες μέσα στους ασβεστόλιθους (Μουντράκης, 2010).

Ο 1^{ος} βωξιτικός ορίζοντας βρίσκεται πάνω στους ωολιθικούς ασβεστόλιθους, και καλύπτεται από σκούρους ασβεστόλιθους. Ακολουθως, βρίσκεται ο 2^{ος} βωξιτικός ορίζοντας που καλύπτεται από λευκούς-τεφρούς ασβεστόλιθους. Τέλος, συναντάται ο 3^{ος} βωξιτικός, ανώτερος ορίζοντας, όπου καλύπτεται από μαύρους ρουδιστοφόρους ασβεστόλιθους (Εικόνα 3), στον οποίο απαντώνται τα περισσότερα αποθέματα (Χριστίδης, 1999).



Εικόνα 3: Βωξιτικοί ορίζοντες σειράς Παρνασσού-Γκίωνα (Κούκης, 2009)



Εικόνα 4: Βωξιτικοί ορίζοντες σειράς Παρνασσού-Γκίωνα I, και ανατολικής Ελλάδος II, III (www.orykta.gr)

Βωξιτικοί ορίζοντες συναντώνται και στη ζώνη Ανατολικής Ελλάδος (Υποπελαγονική) και Πελαγονική (Εικόνα 4) που περιλαμβάνουν τα κοιτάσματα του Καλλιδρόμου, της Λοκρίδας, του Δομοκού, της Νοτιοανατολικής Θεσσαλίας, της Μάνδρας Ελευσίνας, της βορείου και κεντρικής Ευβοίας και της Σκόπελου.

Τέλος, βωξιτικά κοιτάσματα απαντώνται στο όρος Κατσίκια της Χαλκιδικής, στο Νότιο τμήμα της Χίου, στην Ναύπακτο – Πύλο και ανατολική Πελοπόννησο, και συγκεκριμένα στα όρη Αρτεμίσιο – Παρθένιο, και τέλος στο Βροντερό της περιοχής Πρεσπών (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Χάρτης κοιτασμάτων Βωξίτη στην Ελλάδα (www.orykta.gr)

1.7 Η βιομηχανία βωξίτη στην Ελλάδα

Η βιομηχανία βωξίτη στον Ελλαδικό χώρο αποτελεί καθοριστικό πυλώνα για την Ελληνική οικονομία. Δραστηριοποιούνται αρκετές εταιρείες, κομβικής σημασίας για την παγκόσμια παραγωγή του μεταλλεύματος καθώς και τις εξαγωγές της χώρας, με κέρδη από €1,5 έως και €2 δίσ ετησίως.

Από στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ, προκύπτει ότι οι εξαγωγές για το 2018 καταγράφουν κέρδη €1,9 δισ, παρουσιάζοντας σταθερή ανάκαμψη του κλάδου σε σχέση με το 2017 (www.liberal.gr). Το 2017 η παραγωγή ανήλθε σε 1.927.093 τόνους, εκ των οποίων οι 1.341.000 τόνοι τροφοδότησαν την εταιρεία «ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ της ΕΛΛΑΔΟΣ» (ΑΤΕ), και οι υπόλοιποι 586.093 τόνοι διοχετεύτηκαν στη διεθνή αγορά.

Οι κυριότεροι παραγωγοί βωξίτη στην Ελλάδα είναι η εταιρεία «ΕΛΜΙΝ ΒΑΥΧΙΤΕΣ», η οποία προέκυψε από τη συγχώνευση των εταιρειών «ΕΛΜΙΝ» και «ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΙ ΒΩΞΙΤΕΣ ΑΕ». Τώρα, η «S&B ορυκτά» καθώς και η «ΕΛΜΙΝ ΒΑΥΧΙΤΕΣ», ανήκουν στην Imerys Group. Επίσης, σημαντική εταιρεία στην παραγωγή του βωξίτη είναι η «ΔΕΛΦΟΙ-ΔΙΣΤΟΜΟΝ ΑΕ», θυγατρική της ΑΤΕ. Αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους παραγωγούς βωξίτη στην Ελλάδα, με ετήσια παραγωγή 650.000 τόνους μέσω υπόγειων εκμεταλλεύσεων. Η ΑΤΕ, αποτελεί τη συνέχεια του

σημαντικότερου εκπροσώπου του κλάδου, του όμιλου Mytilineos, μέσω του τομέα της μεταλλουργίας. Ασχολείται με την παραγωγή ένυδρης και άνυδρης αλουμίνας, καθώς και μετάλλου αλουμινίου. Από το 2016, η ΑτΕ επένδυσε στην εγκατάσταση φίλτρων υψηλής πίεσης, ώστε τα κατάλοιπα του βωξίτη να αποτίθενται με ξηρή απόθεση, η οποία είναι και η ασφαλέστερη απόθεση τους, αλλά παράλληλα επιτρέπει και τη χρήση τους ως πρώτη ύλη (www.mytilineos.gr).

1.9 Τιμή αλουμινίου

Τα προϊόντα αλουμινίου αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης κοινωνίας. Μεταξύ άλλων, βρίσκουν χρήση και εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε μηχανολογικό εξοπλισμό, πόρτες, παράθυρα, συμπληρωματικά συστήματα κουφωμάτων, υαλοπετάσματα, συστήματα σκίασης, κάγκελα και περιφράξεις, προσόψεις κτηρίων, δομικά υλικά, διαχωριστικά, αίθρια και σε οικιακές συσκευές.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται αναλυτικά η τιμή πώλησης αλουμινίου σε δολάρια ανά τόνο, για την τελευταία πενταετία. Η τιμή πώλησης παρουσίασε πτώση τη διετία 2015-2016, ενώ στη συνέχεια αυξητική τάση, που ανέρχεται μέχρι και 14,2% σε σχέση με την αρχική τιμή πώλησης της πενταετίας. Το 1^ο εξάμηνο του 2019 παρουσίασε πτώση λόγω του εμπορικού πολέμου ΗΠΑ-Κίνας με αποτέλεσμα η μέση τιμή αλουμινίου να καθοριστεί στα 1,826 \$/tn (www.mytilineos.gr)

Πίνακας 1: Τιμή πώλησης αλουμινίου ανά τόνο σε USD (www.focus-economics.com)

Χρονολογία	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Τιμή πώλησης (\$/tn)	1845,86	1867,48	1663,69	1604,6	1968,4	2107,64

Κεφάλαιο 2: Επεξεργασία Μεταλλεύματος Βωξίτη

2.1 Εμπλουτισμός Μεταλλεύματος

Εμπλουτισμός μεταλλεύματος ονομάζεται το σύνολο των διεργασιών που πρέπει να υποστεί ένα μέταλλευμα ώστε να διαχωριστεί το χρήσιμο ορυκτό από τα συνυπάρχοντα στείρα ορυκτά (Σταμπολιάδης, 2006). Οι μέθοδοι που επιλέγονται για εμπλουτισμό, εκμεταλλεύονται τις φυσικοχημικές ιδιότητες του μεταλλεύματος, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος εμπλουτισμός και διαχωρισμός στείρου και χρήσιμου ορυκτού, τα οποία καλούνται απόρριμμα και συμπύκνωμα αντίστοιχα.

Ο εμπλουτισμός του μεταλλεύματος αποτελεί καθοριστική διαδικασία για την παραγωγή, καθώς επιτυγχάνεται η αύξηση της περιεκτικότητας των χρήσιμων ορυκτών του μεταλλεύματος, (π.χ. Al_2O_3), και συγχρόνως η μείωση της περιεκτικότητας των στείρων ορυκτών του (π.χ. Fe_2O_3 ή SiO_2). Η αύξηση της περιεκτικότητας, οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή προϊόντος.

Η διαδικασία του εμπλουτισμού χωρίζεται σε τρεις κύριες φάσεις (Κατράκης, 1979):

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

2.2 Κατάτμηση

Κατάτμηση καλείται η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους των τεμαχίων των πετρωμάτων και βιομηχανικών ορυκτών. Ο όρος κατάτμηση περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ελάττωσης του μεγέθους των υλικών (θραύση και λειοτρίβηση) ανεξάρτητα από το αρχικό και τελικό μέγεθος των τεμαχίων (Wills and Napier-Munn, 2006). Τα στάδια ελάττωσης του μεγέθους διαχωρίζονται σε φάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2. Πραγματοποιείται με την εφαρμογή μηχανικών δυνάμεων στα στερεά τεμάχια με αποτέλεσμα τη διάσπαση της συνοχής τους και την παραγωγή νέων τεμαχίων με μικρότερο μέγεθος (Πετράκης 2017).

Πίνακας 2: Στάδια Κατάτμησης (Πετράκης, 2004)

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

Οι μηχανές κατάτμησης χρησιμοποιούνται για τη μείωση του μεγέθους των τεμαχιδίων, και διακρίνονται σε μηχανές θραύσης και μηχανές λειοτρίβησης. Κατά τη θραύση του σώματος του τεμαχίου, δρουν θλιπτικές και κρουστικές δυνάμεις για τη μείωση του μεγέθους, ενώ κατά τη διαδικασία της λειοτρίβησης, δρουν κυρίως οι δυνάμεις της τριβής (Tasdemir, 2009).

Θραύση ονομάζεται η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους τεμαχίων μεταλλεύματος σε μικρότερα τεμάχια. Το πρωτογενές μετάλλευμα τροφοδοτεί τη μηχανή θραύσης, η οποία δίνει ως προϊόν, μικρότερα τεμάχια του πρωτογενούς μεταλλεύματος. Χωρίζεται σε απλή και πολλαπλή, όπου απλή καλείται η θραύση που προκαλείται από ένα σύστημα εξωτερικών δυνάμεων, το οποίο δρα μια φορά στο σώμα του τεμαχίου, ενώ πολλαπλή καλείται η επανάληψη της απλής θραύσης σε διαδοχικούς κύκλους δράσης.

Η θραύση μπορεί να προκληθεί από τα παρακάτω είδη δυνάμεων (Σταμπολιάδης, 2006).

1. Θλίψη: Οι θλιπτικές δυνάμεις προκαλούνται από τη συμπίεση ενός τεμαχιδίου μεταξύ δύο επιφανειών.
2. Κρούση: Οι κρουστικές δυνάμεις προκύπτουν από την πρόσκρουση ενός τεμαχιδίου σε κινούμενη επιφάνεια ή αντιστρόφως.
3. Τριβή: Οι δυνάμεις της τριβής προκύπτουν από την αντίθετη κίνηση, δύο παράλληλων κινούμενων επιφανειών.
4. Διάτμηση: Η διάτμηση αφορά μια εφελκυστική δύναμη, που δρα στην επιφάνεια του τεμαχίου.

Σε μια διάταξη κατάτμησης, βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι της αποτελεί ο μύλος. Βασική προϋπόθεση για την επιλογή μύλου λειοτρίβησης, αποτελεί το είδος του υλικού, καθώς το κάθε υλικό, ανάλογα με της μηχανικές του ιδιότητες και τη σκληρότητα του, διαφέρει στον τρόπο άλεσης. Οι δυνάμεις που ενεργούν στα τεμάχια μέσα στο μύλο είναι κυρίως οι δυνάμεις κρούσης και τριβής, ενώ συναντώνται και δυνάμεις σύνθλιψης. Οι μύλοι λειοτρίβησης χαρακτηρίζονται και ως μύλοι κυλιόμενου φορτίου (ραβδόμυλοι, σφαιρόμυλοι και κροκαλόμυλοι), όπου η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων επιτυγχάνεται από τη σχετική τους κίνηση σε σχέση με τα μέσα λειοτρίβησης (ράβδοι, σφαίρες ή κροκάλες).

Ο σφαιρόμυλος, είναι χαλύβδινος θάλαμος κυλινδρικού σχήματος, ο οποίος μπορεί να περιστραφεί γύρω από ένα οριζόντιο άξονα (εικόνα 7) ενώ περιέχει χαλύβδινες σφαίρες. Οι σφαίρες διαφέρουν σε διάμετρο ανάλογα με το είδος του υλικού και τις συνθήκες λειοτρίβησης (εικόνα 8).



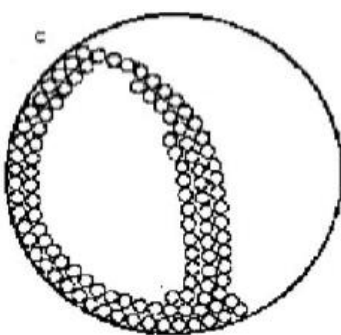
Εικόνα 7: Σφαιρόμυλος σε λειτουργία



Εικόνα 8: Εσωτερικό σφαιρόμυλου

Η αρχή λειτουργίας του σφαιρόμυλου, βασίζεται στην περιστροφική κίνηση του. Οι σφαίρες εκτελούν κυκλική τροχιά, λόγω της τριβής με τα τοιχώματα του μύλου αλλά και των φυγόκεντρων δυνάμεων. Η κυκλική τροχιά των σφαιρών εκτελείται μέχρι το οριακό σημείο λίγο πριν την κορυφή του μύλου, όπου λόγω του βάρους τους και της ταχύτητας περιστροφής χάνουν την επαφή που έχουν με τα τοιχώματα του μύλου και πέφτουν βίαια προς τον πυθμένα εκτελώντας ξανά την ίδια κυκλική κίνηση, που διατηρείται λόγω της φυγόκεντρου που έχει το σύστημα. Η κατάτμηση του υλικού επιτυγχάνεται τη στιγμή της βίαιης πτώσης των σφαιρών (Εικόνα 9). Οι σφαίρες εκτελούν ελεύθερη πτώση και κατά

την πρόσκρουση τους με το κάτω μέρος του μύλου, θλίβουν το υλικό που βρίσκεται στην περιοχή. Επίσης, δημιουργείται επιπλέον κατάτμηση του υλικού λόγω των δυνάμεων της τριβής που αναπτύσσονται από την κίνηση των σφαιρών μεταξύ τους.



Εικόνα 9: Αρχή λειτουργίας σφαιρόμυλου

2.3 Παράμετροι που επηρεάζουν τη λειοτρίβηση

Η λειοτρίβηση επηρεάζεται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ώστε να παράγεται το επιθυμητό μέγεθος προϊόντος με το μικρότερο λειτουργικό κόστος. Οι παράμετροι αυτοί είναι (Σταμπολιάδης, 2006):

- Κρίσιμη συχνότητα περιστροφής N_c : Κατά την περιστροφή του μύλου, η σφαίρα παρασυρόμενη από την περιστροφική του κίνηση, ανυψώνεται μέχρι ένα μέγιστο σημείο στην κορυφή του κελύφους του μύλου, όπου από εκεί εκτελεί ελεύθερη πτώση και θλίβει το υλικό. Η κίνηση αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του μύλου. Η δύναμη που κρατάει την σφαίρα σε επαφή με τα τοιχώματα του μύλου ονομάζεται φυγόκεντρος. Η συχνότητα περιστροφής στην κορυφή του κελύφους του μύλου είναι η N_c και ονομάζεται κρίσιμη συχνότητα περιστροφής. Θεωρείται κρίσιμη, καθώς στο σημείο εκείνο που το κέλυφος περιστρέφεται με συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση με αυτή, η σφαίρα δεν εκτελεί ελεύθερη πτώση, και παραμένει προσκολλημένη στο σώμα του μύλου. Η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής (N_c) υπολογίζεται από τη σχέση (Σταμπολιάδης, 2006)

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

Όπου D (m) η εσωτερική διάμετρος του μύλου. Η συχνότητα περιστροφής του μύλου συνήθως κυμαίνεται από 60% έως 80% της N_c .

- Συντελεστής πλήρωσης υλικού f_c : Ο συντελεστής πλήρωσης υλικού f_c δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνει το υλικό, σε σχέση με το διαθέσιμο όγκο του μύλου και δίνεται από την παρακάτω σχέση (Πετράκης, 2017).

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

- Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών J : Ο συντελεστής πλήρωσης σφαιρών J δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνουν οι σφαίρες σε σχέση με το διαθέσιμο όγκο του μύλου. Η σχέση που τον εκφράζει είναι η εξής (Πετράκης, 2017).

$$J = \left(\frac{\text{μάζα σφαιρών} / \text{πυκνότητα σφαιρών}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \times \frac{1}{1-\varphi} (\%) \quad (4)$$

Όπου φ το πορώδες των σφαιρών και του υλικού μέσα στο μύλο. Το φ εξαρτάται από το μέγεθος των σφαιρών και την πλήρωση του μύλου σε υλικό.

Η τιμή που συνηθίζεται για το φ είναι 0,4 σε εργαστηριακό επίπεδο (Austin et Al., 1984).

- Συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό U : Ο συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών, δείχνει τον βαθμό πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό και είναι συνάρτηση του συντελεστή πλήρωσης υλικού (f_c) και του συντελεστή πλήρωσης σφαιρών (J). Το U δίνεται από τη σχέση (Πετράκης, 2017).

$$U = \frac{f_c}{(0,4 \times J)} \quad (5)$$

- Ισχύς P : Η ισχύς P (W) που απορροφάται από ένα μύλο εξαρτάται από τη διάμετρο του μύλου, τη συχνότητα περιστροφής καθώς και τη μάζα της τροφοδοσίας. Η σχέση που εκφράζει την ισχύ είναι η εξής (Σταμπολτζής, 1990).

$$P = 0,109 \times M \times N^{1.124} \times D^{1.078} \quad (6)$$

Όπου M η μάζα της τροφοδοσίας του μύλου (kg), N η συχνότητα περιστροφής (rpm) και D , διάμετρος του μύλου (m)

- Ειδική ενέργεια ε : Για την κατάτμηση των τεμαχιδίων απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Αυτό που ενδιαφέρει είναι η ενέργεια ανά μονάδα βάρους ή όγκου υλικού (ειδική ενέργεια) που απαιτείται ώστε από ένα αρχικό υλικό να επιτευχθεί το απαιτούμενο μέγεθος τεμαχιδίων. Για την ελάττωση του μεγέθους, καταναλώνεται περίπου το 3-4% της ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα. Σε μια βιομηχανική μονάδα επεξεργασίας ορυκτών, η κατανάλωση μπορεί να φτάσει μέχρι και το 70% που απαιτείται για τη λειτουργία της μονάδας. Από την ενέργεια που παράγεται από τις μηχανές θραύσης και λειοτρίβησης, μόνο ένα μικρό ποσοστό διατίθεται για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων, ενώ η περισσότερη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι είναι απαραίτητο να γίνονται προσπάθειες πρόβλεψης ή μείωσης της απαιτούμενης ειδικής ενέργειας, ώστε να γίνει σωστός προγραμματισμός της λειοτρίβησης και ορθολογικός σχεδιασμός της όλης εγκατάστασης επεξεργασίας του μεταλλεύματος με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα βάρους υλικού (Πετράκης, 2017). Η ενέργεια E (kJ) που απαιτείται για την κατάτμηση του μεταλλεύματος ή πετρώματος δίνεται από την εξής σχέση:

$$E = P \times t \quad (7)$$

Όπου P η ισχύς (kW) και t ο χρόνος λειοτρίβησης (sec).

Εάν διαιρεθεί η σχέση (7) με τη μάζα m (Kg) του υλικού, προκύπτει η ειδική ενέργεια E σε kJ/Kg

$$E = \frac{P \times t}{m} \left(\frac{kJ}{Kg} \right) \quad (8)$$

Όπου m η μάζα του υλικού (kg).

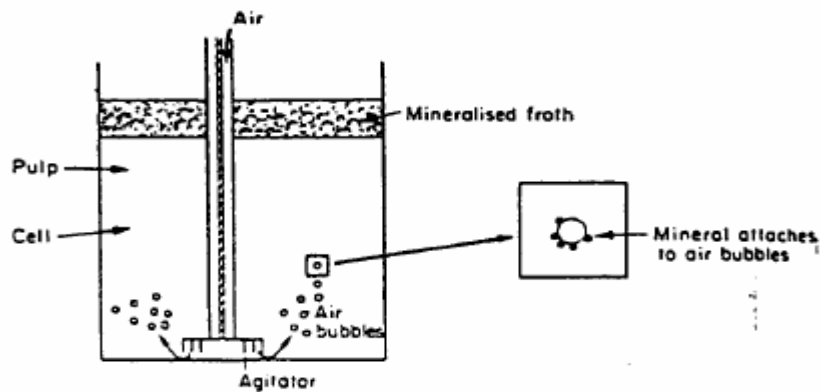
Η διαίρεση της σχέσης (8), με 3.6 δίνει την ειδική ενέργεια σε kWh/t.

2.4 Επίπλευση

Η επίπλευση αποτελεί μια διεργασία εμπλουτισμού η οποία στηρίζεται στη διαφορά των επιφανειακών ιδιοτήτων μεταξύ των ορυκτολογικών φάσεων του μεταλλεύματος.

Κατά τη διαδικασία της επίπλευσης το λειοτριβημένο μέταλλευμα εισέρχεται σε κελί υπό μορφή πολφού. Ακολούθως, με την προσθήκη αντιδραστηρίων στο μίγμα, δημιουργούνται συνθήκες διαχωρισμού των χρήσιμων ορυκτών από των στείρων.

Η αρχή λειτουργίας της επίπλευσης, βασίζεται κυρίως στις ιδιότητες των επιφανειών των τεμαχιδίων, ταξινομώντας τα ως υδρόφιλα ή υδρόφοβα. Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 11, ο πολφός του μεταλλεύματος μαζί με τα αντιδραστήρια, προστίθενται στο κελί επίπλευσης, στο οποίο βρίσκεται ένας αναδευτήρας. Ο αναδευτήρας κρατά τα στερεά σε αιώρηση. Μέσω του αναδευτήρα, διοχετεύεται αέρας στον πολφό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων, πάνω στις οποίες οι υδρόφοβοι κόκκοι προσκολλώνται και ανέρχονται στην επιφάνεια υπό μορφή αφρού, ενώ οι υδρόφιλοι κόκκοι καθιζάνουν ή παραμένουν σε αιώρηση μέσα στο κελί επίπλευσης (Σταμπολιάδης, 2006). Το χρήσιμο μέταλλευμα συγκεντρώνεται στον αφρό, ενώ το στείρο μέταλλευμα παραμένει εν αιώρηση ή καθιζάνει στο κελί επίπλευσης. Σε περίπτωση που το χρήσιμο μέταλλευμα βρίσκεται στο κελί επίπλευσης, και το στείρο στον αφρό, η διαδικασία καλείται ανάστροφη.



Εικόνα 11: Κελί επίπλευσης (Σταμπολιάδης, 2006)

2.5 Μαγνητικός Διαχωρισμός

Η αρχή λειτουργίας του μαγνητικού διαχωρισμού βασίζεται στις μαγνητικές ιδιότητες των ορυκτών. Θεωρείται φυσικός διαχωρισμός, καθώς πολλά ορυκτά κατατάσσονται στην κατηγορία των μαγνητικών. Κατά την πειραματική διαδικασία, ο μαγνήτης της συσκευής ενεργοποιείται και δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που έχει ως αποτέλεσμα τα μαγνητικά ορυκτά να παραμένουν προσκολλημένα στην επιφάνεια του μαγνήτη, ενώ τα μη μαγνητικά ορυκτά να διέρχονται ανεπηρέαστα.

Τα υλικά ταξινομούνται ως:

- Σιδηρομαγνητικά: Η δύναμη έλξης από το μαγνητικό πεδίο είναι πολύ μεγάλη. Διαχωρίζονται σε μαγνήτες χαμηλής έντασης.
- Παραμαγνητικά: Η δύναμη έλξης συγκεντρώνεται στα σημεία του μαγνητικού πεδίου, στα οποία η ένταση του αυξάνεται. Διαχωρίζονται σε μαγνήτες υψηλής έντασης.
- Διαμαγνητικά: Η δύναμη έλξης είναι αρκετά μικρή για το μέταλλευμα, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο.

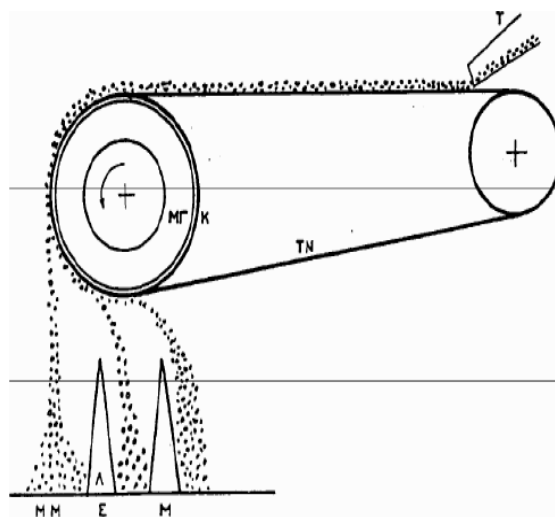
Οι μαγνητικοί διαχωριστές χωρίζονται ως υψηλής ή χαμηλής έντασης, ανάλογα με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν. Επιπλέον, χωρίζονται σε ξηρούς ή υγρούς, όπου η τροφοδοσία είναι ξηρή ή σχεδόν ξηρή στον ξηρό διαχωριστή, ενώ υπό μορφή πολφού στον υγρό (Σταμπολιάδης, 2006).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρεις μαγνητικοί διαχωριστές, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω.

- Ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής Perm Role (Εικόνα 11): Πρόκειται για ένα μαγνητικό τύμπανο πάνω στο οποίο έχει προσαρτηθεί μεταφορική ταινία. Στο διαχωριστή ρυθμίζεται η ένταση της δόνησης καθώς και η ταχύτητα περιστροφής της ταινίας. Το μέταλλο τοποθετείται στο δονούμενο τροφοδότη, ο οποίος τροφοδοτεί τη μεταφορική ταινία. Έτσι, λόγω της περιστροφής, οι μη μαγνητικοί κόκκοι ακολουθούν πορεία ελεύθερης πτώσης και αποχωρίζονται από την ταινία κατά την περιστροφή της. Οι μαγνητικοί κόκκοι έλκονται από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο μαγνήτης, κολλάνε στην μεταφορική ταινία, και την αποχωρίζονται στο σημείο εκείνο που η ένταση του μαγνητικού πεδίου εξασθενεί (Εικόνα 12).



Εικόνα 11: Ταινιοφόρος μαγνήτης διαχωριστής Perm role στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης



Εικόνα 12: Μεταφορική ταινία μαγνητικού διαχωριστή Perm role (Σταμπολιάδης 2006)

- Μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης (High Induced Role, Εικόνα 13): Το μαγνητικό πεδίο της συσκευής βρίσκεται στο περιστρεφόμενο τύμπανο. Στο κάτω μέρος της συσκευής συναντάται μια λεπίδα διαχωρισμού, η οποία έχει τη δυνατότητα να μετακινείται υπό γωνία σε σχέση με το μαγνήτη. Το μέταλλο τροφοδοτείται στο τύμπανο και οι κόκκοι προσκολλώνται σε αυτό. Ανάλογα με

την ταχύτητα περιστροφής του, την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη θέση της λεπίδας διαχωρισμού, το μετάλλευμά διαχωρίζεται σε μαγνητικό, και μη μαγνητικό. Οι μη μαγνητικοί κόκκοι, αποχωρίζονται το τύμπανο λόγω της φυγοκέντρου δύναμης, και ακολουθούν πορεία ελεύθερης πτώσης, ενώ οι μαγνητικοί κόκκοι, αποχωρίζονται στο σημείο όπου εξασθενεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 13: Μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης (High induced Role) στο εργαστήριο εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης



Εικόνα 14: Υγρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής κλίσης πεδίου, του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης.

- Υγρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής κλίσης πεδίου (Εικόνα 14): Στον υγρό μαγνητικό διαχωριστή ρυθμίζεται η ένταση του ρεύματος, ώστε να δημιουργηθεί το μαγνητικό πεδίο. Ακολούθως, τοποθετείται κατάλληλη μήτρα μεταξύ των μαγνητών, η οποία περιέχει σιδερένιες σφαίρες. Με την δημιουργία μαγνητικού πεδίου, η σιδερένιες σφαίρες ενεργοποιούνται με αποτέλεσμα οι μαγνητικοί κόκκοι να παραμένουν προσκολλημένοι σε αυτές. Το μετάλλευμα τοποθετείται στην είσοδο της μήτρας και ακολούθως ξεπλένεται με νερό. Οι μη μαγνητικοί κόκκοι αποκολλώνται από τις σιδερένιες σφαίρες και συλλέγονται στο κάτω μέρος της μήτρας, ενώ οι μαγνητικοί κόκκοι παραμένουν

προσκολλημένοι στις σφαίρες. Η συλλογή τους πραγματοποιείται όταν τεθεί εκτός λειτουργίας ο μαγνήτης.

2.6 Μεταλλουργία Βωξίτη

Η μεταλλουργία Βωξίτη αφορά την παραγωγή αλουμινίου. Για την παραγωγή αλουμινίου το μετάλλευμα υπόκειται σε επεξεργασία με τη μέθοδο Bayer. Η μέθοδος Bayer περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια επεξεργασίας του μεταλλεύματος, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 15 (Γεωργάτης, 2003).

Αρχικά, το μετάλλευμα υπόκειται σε θραύση και λειοτρίβηση ώστε να γίνει αρκετά λεπτόκοκκο ($<0,15\text{ mm}$). Η λειοτρίβηση γίνεται εν υγρώ σε σφαιρόμυλο. Στη συνέχεια, κατά το 2^ο στάδιο της μεθόδου, το μετάλλευμα υπόκειται σε εκχύλιση υπό πίεση με διάλυμα καυστικού νατρίου (καυστική σόδα). Ο βωξίτης αναμιγνύεται με διάλυμα καυστικού νατρίου και θερμαίνεται σε αυτόκλειστα δοχεία στους $180\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Το πρώτο χημικό στάδιο της επεξεργασίας αφορά τη διαλυτοποίηση όλου του Al_2O_3 . Οι ενώσεις του αλουμινίου στο βωξίτη παρουσιάζονται ως γκιψίτης ($\text{Al}(\text{OH})_3$), βαιμίτης $\gamma\text{-(AlOOH)}$ και διάσπορο ($\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$). Οι βασικές χημικές αντιδράσεις που προκύπτουν κατά τη μέθοδο Bayer είναι οι εξής

- Γκιψίτης: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} = 2\text{NaAlO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$
- Βαιμίτης/Διάσπορο: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} = 2\text{NaAlO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$

Το Fe και το Ti παραμένουν αδιάλυτα κατά τη διάρκεια της εκχύλισης. Το Si διαλύεται μονομερώς με τις ακόλουθες αντιδράσεις

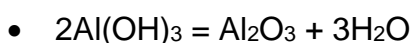
- $\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 6\text{NaOH} = 2\text{NaAlO}_2 + 2\text{Na}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$

Μετά την εκχύλιση, τα στερεά περιέχουν χονδρομερή σωματίδια $>100\mu\text{m}$ και λεπτομερή σωματίδια $<10\mu\text{m}$. Τα χονδρομερή σωματίδια διαχωρίζονται σε υδροκυκλώνες και πλένονται με νερό ώστε να συλλεχθεί αργιλικό διάλυμα που πιθανόν να υπάρχει σε αυτά, και στη συνέχεια αποτίθενται στον χώρο απόθεσης στερεών παραπροϊόντων. Τα λεπτομερή σωματίδια, καθιζάνουν δίνοντας ερυθρά ιλύ. Η ερυθρά ιλύς πρέπει να υποστεί πλύση με στόχο να ανακτηθεί το αργιλικό διάλυμα που υπάρχει

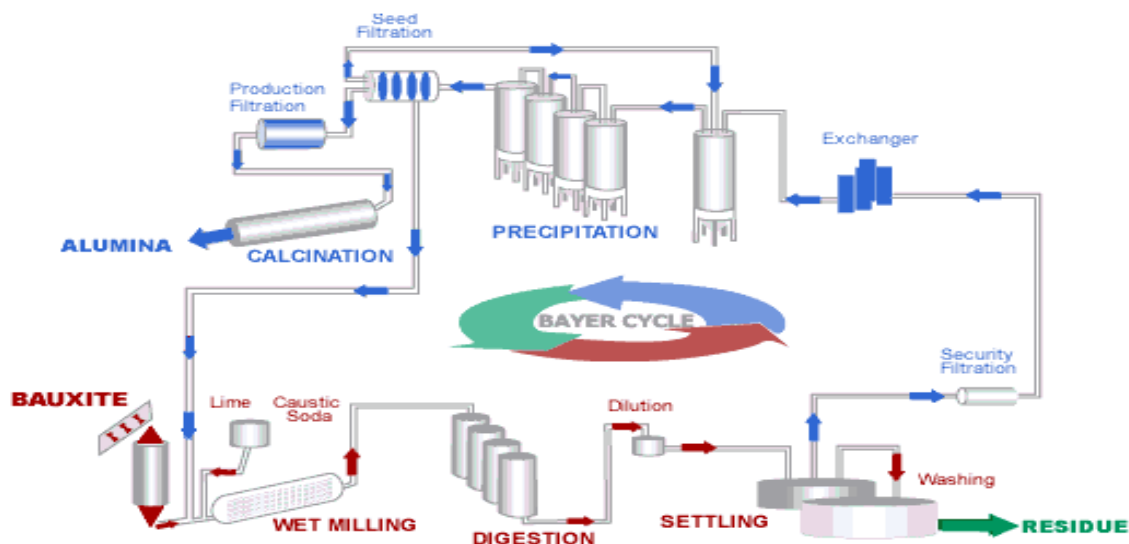
σε αυτήν. Στόχος της διαδικασίας αποτελεί η μεγιστοποίηση της ανάκτησης του αργιλικού διαλύματος, με το ελάχιστο ενεργειακό κόστος.

Ακολούθως, το 3^ο στάδιο της μεθόδου Bayer αφορά την διήθηση ένυδρης αλουμίνας από το υπέρκορο αργιλικό διάλυμα. Σε αυτό το στάδιο, το αργιλικό διάλυμα οδηγείται στις δεξαμενές, με σκοπό να ανακτηθεί Al που βρίσκεται σε αυτό εν διαλύσει. Το αργιλικό διάλυμα διασπάται και παρέχεται γκιψίτης, με τη μέγιστη δυνατή απόδοση ανά μονάδα όγκου. Με το πέρας της διήθησης, προκύπτει διαχωρισμός του ιζήματος $Al(OH)_3$. Ανάλογα με την ποιότητα του μεταλλεύματος, προκύπτει πως από 2 τόνους βωξίτη, παράγεται 1.5 τόνος τριένυδρης αλουμίνας.

Τέλος, στο 4^ο και τελευταίο στάδιο της μεθόδου, περιλαμβάνεται η θερμική διάσπαση της τριένυδρης αλουμίνας. Μέσω της θερμικής διάσπασης η οποία διεξάγεται σε θερμοκρασία 1100 °C, προκύπτει η αλουμίνη. Η αντίδραση της διάσπασης παρουσιάζεται παρακάτω.



Από 1.5 τόνο τριένυδρης αλουμίνας, παράγεται 1 τόνος αλουμίνας.



Εικόνα 15: Κύκλος επεξεργασίας μεταλλεύματος με την μέθοδο Bayer (www.alteo-alumina.com)

Σύμφωνα με τον Ou et al. (2008) η εκμετάλλευση του βωξίτη με τη μέθοδο Bayer, βασίζεται στο λόγο $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (Al/Si). Η παραγωγή μπορεί να αποδώσει οικονομικά αλουμίνα, με την προϋπόθεση ότι ο λόγος $\text{Al/Si} > 10$. Οι ερευνητές ασχολήθηκαν με τις συνθήκες λειοτρίβησης του μεταλλεύματος, συγκρίνοντας την επίδραση του μέσου λειοτρίβησης του υλικού με την επίδραση του χρόνου, σε σχέση με την αύξηση του λόγου Al/Si . Η μελέτη, βασίστηκε σε μετάλλευμα που προήλθε από την Κίνα, το οποίο είχε μεγάλη περιεκτικότητα σε αργίλιο (Al_2O_3) και πυρίτιο (SiO_2), με αποτέλεσμα ο λόγος τους να είναι κατώτερος από την αποδεκτή τιμή για την εφαρμογή της μεθόδου. Συγκεκριμένα, η μελέτη πραγματοποιήθηκε μέσω εκλεκτικής λειοτρίβησης σε δείγμα περιεκτικότητας $\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 55\text{-}62\%$, και $\text{SiO}_2 \approx 14\text{-}38\%$, και λόγο οξειδίων $\text{Al/Si} \approx 5,5$. Για την επίτευξη της δοκιμής χρησιμοποιήθηκε μύλος με τροφοδοσία 1 kg βωξίτη και 0,7 L νερού. Αρχικά το δείγμα θραύστηκε σε σιαγωνινό σπαστήρα και στην συνέχεια λειοτριβήθηκε σε διαφορετικούς χρόνους (5, 7, 9, 11, 13 min) και διαφορετικά μέσα λειοτρίβησης (σφαίρες ή ράβδοι). Διαπιστώθηκε ότι το Al_2O_3 εμπλουτίζεται στα χονδρότερα κλάσματα (+0,075 mm), ενώ το SiO_2 στα λεπτότερα κλάσματα (-0,075 mm). Επίσης, παρατηρήθηκε πως η λειοτρίβηση με σφαίρες και στήλες δίνει τη μεγαλύτερη τιμή λόγου οξειδίων Al/Si . Συγκεκριμένα, για χρόνο λειοτρίβησης 13 min η τιμή του λόγου είναι ίση με $\text{Al/Si} = 8,1$.

Ο Zhu et al. (2011) πραγματοποίησε μελέτη για την επίδραση των σφαιρών, ως μέσα λειοτρίβησης, μεταλλεύματος βωξίτη με λόγο $\text{Al/Si} = 4,4$. Για τη μελέτη πραγματοποιήθηκε εκλεκτική λειοτρίβηση σε μύλο όγκου 1.18L. Αρχικά το υλικό θραύτηκε σε σιαγωνινό σπαστήρα και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διαφορετικές συνθήκες λειοτρίβησης ($t = 16, 20, 23$ min και διάμετρο σφαιρών $d = 15, 20, 30$ mm). Τα αποτελέσματα έδειξαν και σε αυτή την έρευνα πως το Al_2O_3 εμπλουτίζεται στα χονδρότερα κλάσματα, ενώ το SiO_2 στα λεπτότερα κλάσματα. Επίσης, διαπιστώθηκε πως η απόδοση στην εκλεκτικότητα του βωξίτη είναι μεγαλύτερη με σφαίρες διαμέτρου $d = 15$ mm. Συγκεκριμένα, ο λόγος Al/Si στο κλάσμα -0,5+0,28 mm, με $d = 15$ mm είναι ίσος με $\text{Al/Si} = 7,5$.

Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διαδικασία

3.1 Χαρακτηρισμός αρχικού μεταλλεύματος

Στο αρχικό στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, το αρχικό μέταλλευμα βωξίτη (Εικόνα 16) υποβλήθηκε σε κατάτμηση στο σιαγωνοτό σπαστήρα τύπου Fritsch pulverisette 1 (Εικόνα 17). Πραγματοποιήθηκαν διαδοχικά περάσματα στο σπαστήρα, όπου απώτερος σκοπός είναι όλο το υλικό να διέρχεται από κόσκινο 3,35 mm.



Εικόνα 16: Μορφή αρχικού υλικού μεταλλεύματος βωξίτη



Εικόνα 17: Σιαγωνοτός σπαστήρας Fritsch pulverisette 1 στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης

Αφού το υλικό θραύστηκε σε $\sim 3,35$ mm, τεταρτοδιαιρέθηκε ώστε να προκύψουν αντιπροσωπευτικά δείγματα για την επεξεργασία που ακολουθήθηκε. Η τεταρτοδιαίρεση επιτεύχθηκε με το διαχωριστήρα Jones ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Τεταρτοδιαίρεση αρχικού υλικού

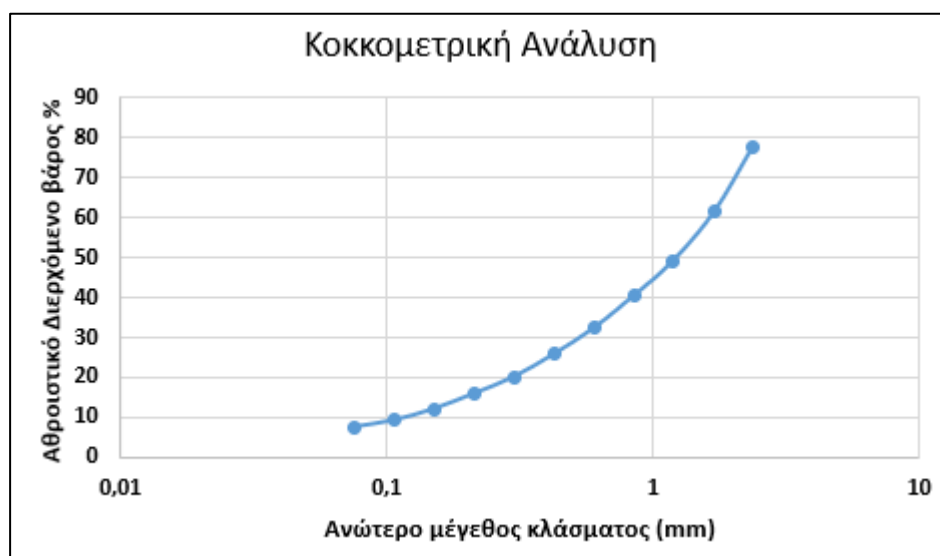
Ακολούθως, χρησιμοποιήθηκε αντιπροσωπευτική ποσότητα υλικού και κοσκινίστηκε εν υγρώ στο κόσκινο 0,075 mm. Το κλάσμα +0,075 mm που προέκυψε τοποθετήθηκε στο φούρνο για ξήρανση και ακολούθως ταξινομήθηκε εν ξηρώ σε σειρά κοσκίνων με λόγο $\sqrt{2}$, ενώ το κλάσμα -0,075 mm συλλέχθηκε μέσω διηθήσεως και με τη σειρά του τοποθετήθηκε στο φούρνο για ξήρανση. Έτσι, προέκυψε η πρώτη ταξινόμηση του αρχικού υλικού σε 12 κοκκομετρικά κλάσματα τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.

Στο Διάγραμμα 2.1 παρουσιάζεται το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος σε σχέση με το μέγεθος του κλάσματος. Το μέγεθος D_{80} , το οποίο αντιστοιχεί στο κόσκινο από το οποίο διέρχεται το 80% των προϊόντων του σφαιρόμυλου, αντιστοιχεί σε 2,46 mm, ενώ το μέγεθος D_{50} , το οποίο αντιστοιχεί στο κόσκινο στο οποίο διέρχεται το 50% των προϊόντων του σφαιρόμυλου, σε 1,22 mm.

Από τα κλάσματα, χρησιμοποιήθηκε αντιπροσωπευτική ποσότητα υλικού για ανάλυση XRF και XRD.

Πίνακας 3: Κοκκομετρική ανάλυση αρχικού υλικού

ΔΕΙΓΜΑ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΑ ΚΛΑΣΜΑΤΑ (mm)	ΒΑΡΟΣ (g)	ΒΑΡΟΣ (%)	ΑΘΡ. ΔΙΕΡΧ. ΒΑΡΟΣ (%)
B1	-3,35 + 2,36	232,4	22,49	77,51
B2	-2,36 + 1,70	165,7	16,03	61,48
B3	-1,70 + 1,18	129,7	12,55	48,93
B4	-1,18 + 0,850	86,6	8,38	40,55
B5	-0,850 + 0,600	84,6	8,19	32,37
B6	-0,600 + 0,425	67,2	6,50	25,86
B7	- 0,425 + 0,300	59,5	5,76	20,11
B8	-0,300 + 0,212	43,3	4,19	15,92
B9	- 0,212 + 0,150	39,50	3,82	12,09
B10	-0,150+0,106	29,40	2,84	9,25
B11	0,106+0,075	17,4	1,68	7,57
B12	-0,075	78,2	7,57	
	Σύνολο	1033,5	100	



Διάγραμμα 2.1: Κοκκομετρική ανάλυση αρχικού υλικού

3.2 Ορυκτολογική και χημική ανάλυση δείγματος

Η ορυκτολογική (XRD) ανάλυση των κοκκομετρικών κλασμάτων του δείγματος, έγινε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, ενώ η χημική ανάλυση των κλασμάτων (XRF) έγινε στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας Οργανικής Πετρογραφίας, του Πολυτεχνείου Κρήτης. Μέρος των χημικών αναλύσεων έγιναν στο Εργαστήριο Αναλυτικής και Περιβαλλοντικής Χημείας (ΕΑΠΧ).

Στον Πίνακα 4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του πρωτογενούς μεταλλεύματος σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, οι λόγοι $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (Al/Si) και $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Al/Fe) καθώς και η απώλεια πύρωσης (LOI).

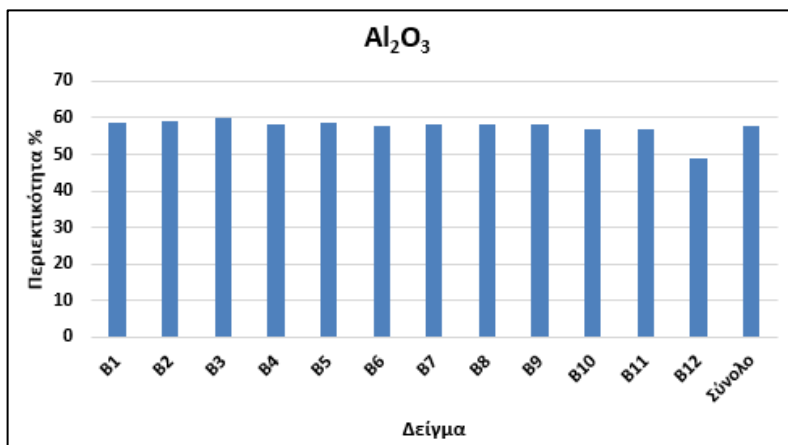
Πίνακας 4: Χημική ανάλυση αρχικού υλικού

Δείγμα	Κλάσματα (mm)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	SiO_2 (%)	Al/Si	Al/Fe	LOI (%)
B1	-3,35+2,36	58,52	21,42	3,94	1,63	35,90	2,73	13,27
B2	-2,36+1,7	59,09	21,23	3,85	1,75	33,77	2,78	12,91
B3	-1,7+1,18	60,12	20,94	3,75	1,36	44,21	2,87	13,08
B4	-1,18+0,850	58,44	22,04	3,90	1,54	37,95	2,65	13,04
B5	-0,850+0,600	58,68	21,99	3,84	1,48	39,65	2,67	12,97
B6	-0,600+0,425	57,89	22,73	3,97	1,38	41,95	2,55	12,99
B7	0,425+0,300	58,43	22,23	3,94	1,42	41,15	2,63	12,93
B8	0,300+0,212	58,29	22,58	3,95	1,40	41,64	2,58	12,83
B9	0,212+0,150	58,30	22,62	3,97	1,50	38,87	2,58	12,75
B10	0,150+0,106	56,77	23,52	4,01	1,82	31,19	2,41	12,82
B11	0,106+0,075	57,10	23,48	3,95	1,70	33,59	2,43	12,64
B12	-0,075	48,89	29,84	4,54	2,82	17,34	1,64	12,49
Σύνολο		57,95	22,39	3,94	1,65	35,14	2,59	

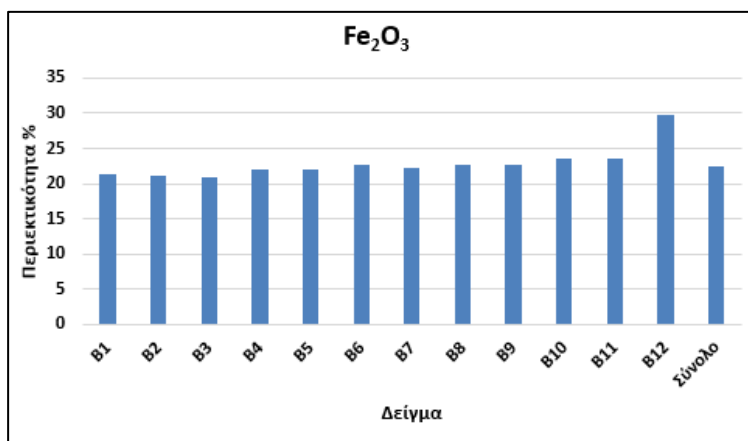
Παρατηρώντας τον πίνακα προκύπτει ότι η περιεκτικότητα του μεταλλεύματος βωξίτη σε Al_2O_3 είναι 57,95%, σε Fe_2O_3 είναι 22,39%, σε SiO_2 είναι 1,65% ενώ σε TiO_2 ίση με 3,94%. Ο λόγος Al/Si είναι σε πάρα πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, με τιμή 35,14, αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή 10, η οποία είναι αποδεκτή για την μέθοδο Bayer, ενώ ο λόγος Al/Fe ισούται με 2,59. Η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας αργίλιου παρατηρείται στο δείγμα B3 (-1,70+1,18 mm) και είναι ίση με 60,12%, ενώ στα άλλα οξειδία του μεγέθους, η περιεκτικότητα ανέρχεται για το Fe_2O_3 στο 20,94%, για το SiO_2 στο 1,36% και τέλος για το TiO_2 στο 3,75%. Η μικρότερη τιμή του Al_2O_3 παρουσιάζεται στο δείγμα B12 (-0,075 mm) και είναι ίση με 48,89 %, ενώ στα άλλα οξειδία σε αυτό το κλάσμα η περιεκτικότητα ανέρχεται για το Fe_2O_3 στο 29,84%, για το SiO_2 στο 2,82% και τέλος για το TiO_2 στο 4,54%.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα Διαγράμματα (2.2-2.7) όπου φαίνεται η περιεκτικότητα των κλασμάτων σε επιλεγμένα οξειδία ξεχωριστά, καθώς και οι λόγοι Al/Si και Al/Fe.

Από το Διάγραμμα 2.2, προκύπτει ότι η περιεκτικότητα του Al_2O_3 στα χονδρόκοκκα κλάσματα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα λεπτόκοκκα. Παρατηρείται μια τάση μείωσης από τα χονδρόκοκκα στα λεπτόκοκκα κλάσματα που κυμαίνεται από 60,12% έως και 48,89%, με ενδιάμεσες τιμές περιεκτικότητας γύρω στο 56-59%.

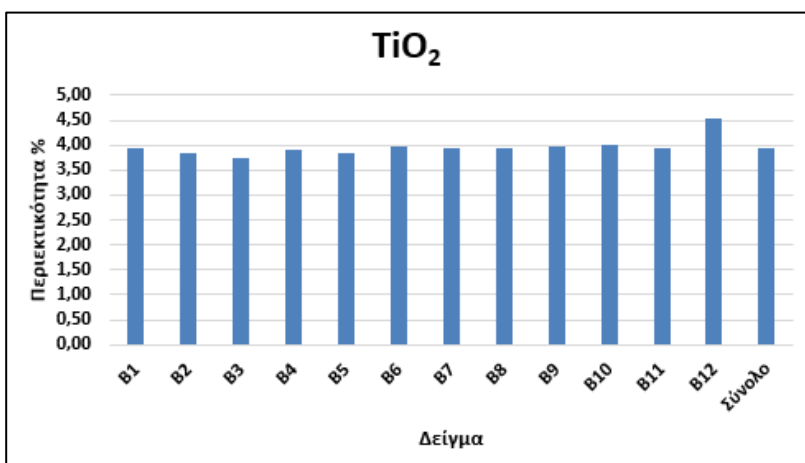


Διάγραμμα 2.2: Περιεκτικότητα % Al_2O_3 σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα.

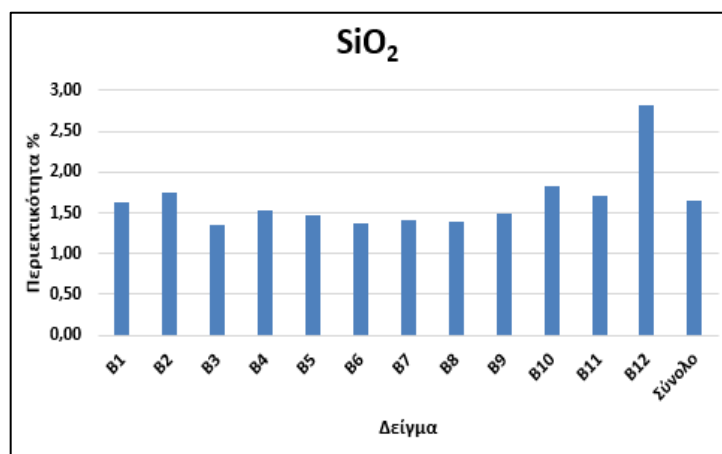


Διάγραμμα 2.3: Περιεκτικότητα % Fe_2O_3 σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα.

Αντιθέτως, από το Διάγραμμα 2.3 προκύπτει ότι η περιεκτικότητα του Fe_2O_3 παρουσιάζει αυξητική τάση, από τα χονδρόκοκκα στα λεπτόκοκκα, με τιμές περίπου 20-30%.



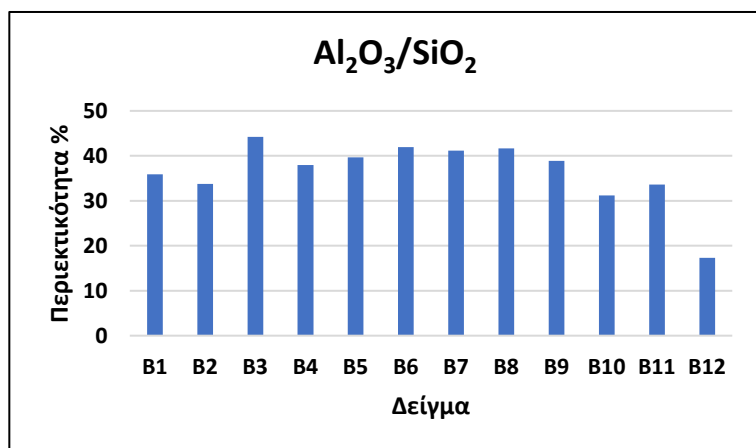
Διάγραμμα 2.4: Περιεκτικότητα % SiO_2 σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα



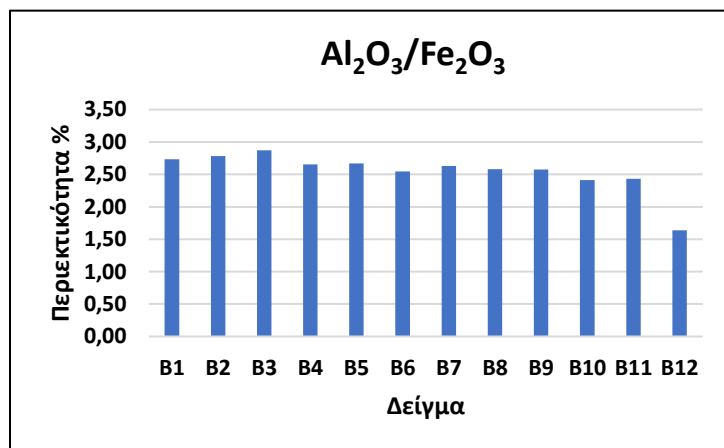
Διάγραμμα 2.5: Περιεκτικότητα % TiO_2 σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα.

Στο Διάγραμμα 2.4 παρατηρείται μείωση της περιεκτικότητας σε SiO_2 στα ενδιάμεσα κλάσματα, η οποία τελικά αυξάνεται καθώς το υλικό γίνεται όλο και πιο λεπτομερές. Όσον αφορά το Διάγραμμα 2.5 η περιεκτικότητα % του TiO_2 , δεν παρουσιάζει σαφή τάση μεταξύ των κλασμάτων, εκτός από το λεπτομερές προϊόν B12 (-0,075 mm) όπου παρουσιάζει μικρή αύξηση.

Όσον αφορά τον λόγο Al/Si , στο Διαγράμματα 2.6 παρατηρείται αύξηση του λόγου Al/Si στα ενδιάμεσα κλάσματα, που οφείλεται στην μείωση της περιεκτικότητας, των ενδιάμεσων κλασμάτων σε SiO_2 .



Διάγραμμα 2.6: Λόγος οξειδίων $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$



Διάγραμμα 2.7: Λόγος οξειδίων $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$

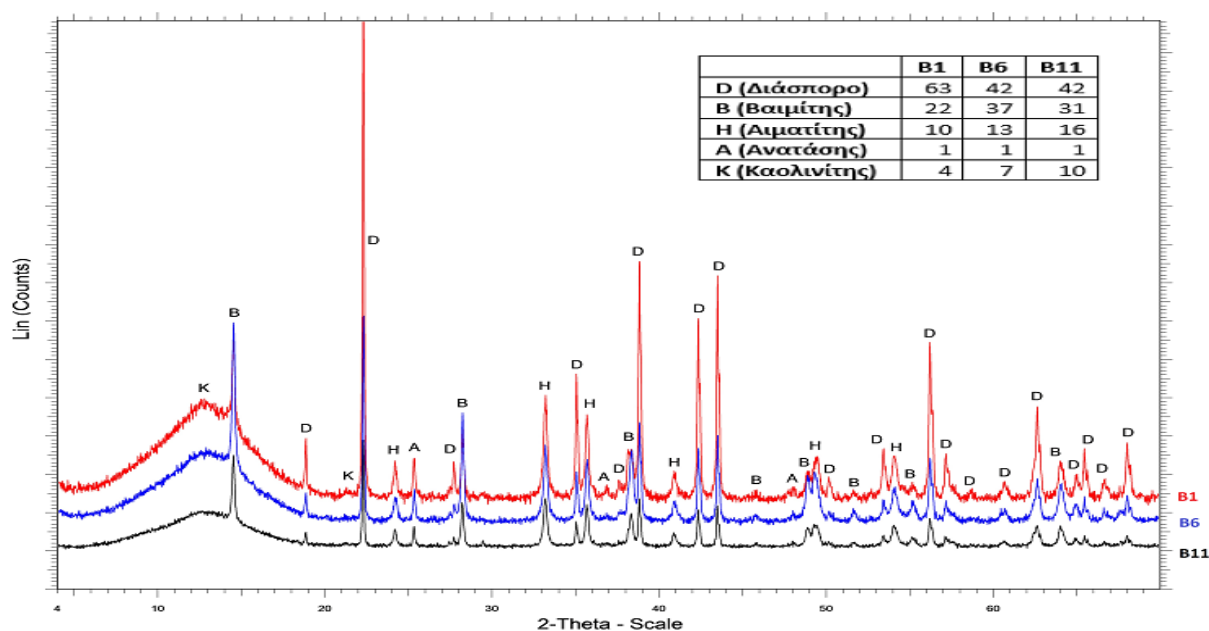
Τέλος, στο Διάγραμμα 2.7 παρατηρείται μείωση του λόγου Al/Fe από τα χονδρόκοκκα προς τα λεπτόκοκκα κλάσματα. Αυτό οφείλεται στη μείωση της περιεκτικότητας του Al_2O_3 από τα χονδρόκοκκα στα λεπτόκοκκα κλάσματα, ενώ συγχρόνως η περιεκτικότητα του Fe_2O_3 αυξάνεται από τα χονδρόκοκκα στα λεπτόκοκκα κλάσματα.

3.2.1 Ορυκτολογική Ανάλυση

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης παρουσιάζονται αναλυτικά στην Εικόνα 20. Τα προς ανάλυση δείγματα είναι τα B1, B6 και B11 που αντιστοιχούν στα κλάσματα -3,35+2,36 mm, -0,600+0,425 mm και -0,106+0,075 mm. Οι ορυκτολογικές

φάσεις που προέκυψαν είναι Διάσπορο (D), Βαιμίτης (B), Αιματίτης (H), Ανατάσης (A) και Καολινίτης (K). Οι φάσεις που φέρουν αργιλίο είναι ο βαιμίτης και το διάσπορο.

Από τις ημιποσοτικές αναλύσεις με χρήση του TOPAS (Bruker-AXS, Germany), προκύπτει ότι το διάσπορο βρίσκεται περισσότερο στο χονδρό κλάσμα $-3,35+2,36$ mm (67%) που αντιστοιχεί στο δείγμα B1, ενώ αρκετά λιγότερο στο ενδιάμεσο και λεπτό κλάσμα (42%). Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει περισσότερος βαιμίτης στο ενδιάμεσο κλάσμα $-0,600+0,425$ mm (37%), καθώς και στο ψιλό $-0,106+0,075$ mm (31%) που αντιστοιχούν στα B6 και B11 δείγματα, σε σχέση με το αρχικό κλάσμα $-3,35+2,36$ mm (22%). Όσον αφορά τον καολινίτη προκύπτει πως αυξάνεται όσο πάει προς το λεπτομερές υλικό. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα που παρατηρείται αντιστοιχεί στο κλάσμα $-0,106+0,075$ mm (δείγμα B11) και είναι ίση με 10%. Τέλος, ο ανατάσης παραμένει σταθερός και στα τρία κλάσματα, με τιμή 1%.



Εικόνα 20: Ορυκτολογική ανάλυση αρχικών κλασμάτων (B1, B6 και B11)

3.3 Υπολογισμός παραμέτρων λειοτρίβησης

Πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές λειοτρίβησης σε σφαιρόμυλο. Σε κάθε δοκιμή, χρησιμοποιήθηκε σταθερή μάζα σφαιρών, από τρεις διαφορετικές διαμέτρους d (12.7, 25.4 και 40 mm). Η παράμετρος που μεταβαλλόταν σε κάθε δοκιμή ήταν ο συντελεστής

πλήρωσης υλικού f_c . Πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές με τιμή συντελεστή πλήρωσης υλικού f_c (0.05, 0.1, 0.15) αντίστοιχα.

Αρχικά, υπολογίστηκε η ταχύτητα περιστροφής του μύλου, η οποία παρέμεινε σταθερή και στις τρεις δοκιμές. Η ταχύτητα περιστροφής N υπολογίστηκε από τη σχέση (Σταμπολιάδης, 2006).

$$N = 70\% * N_c = 66 \text{ rpm} \quad (9)$$

Όπου N_c = κρίσιμη συχνότητα περιστροφής, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} = \frac{42.3}{\sqrt{0.203}} = 93.8 \text{ rpm} \quad (10)$$

Όπου D η διάμετρος του μύλου (m)

Η ποσότητα του υλικού για την τροφοδοσία κάθε δοκιμής υπολογίστηκε από τη σχέση

$$m = 0.6 \times \text{όγκος μύλου} \times \text{φαινόμενη πυκνότητα} \times f_c \quad (11)$$

Όπου φαινόμενη πυκνότητα $\rho_b = 1,8 \text{ g/cm}^3$ και όγκος μύλου = $5427,73 \text{ cm}^3$.

Η αναλογία της τροφοδοσίας σε κάθε δοκιμή ήταν 60% στερεά και 40% νερό.

Στη συνέχεια, καθορίστηκε ότι ο συντελεστής συμπλήρωσης κενών J είναι σταθερός με τιμή 0.4. Με δεδομένο αυτό υπολογίστηκε η μάζα των σφαιρών που τοποθετήθηκε στο μύλο. Η μάζα των σφαιρών (m_b) υπολογίστηκε από τη σχέση

$$m_b = J \times \text{όγκος μύλου} \times 0,6 \times \text{πυκνότητα σφαιρών} \quad (12)$$

Όπου πυκνότητα σφαιρών = 7.86 g/cm^3 .

Από την πιο πάνω εξίσωση, προκύπτει πως η συνολική μάζα των σφαιρών είναι ίση με $m_b = 10209,1 \text{ g}$. Επομένως, διαιρώντας τη συνολική μάζα των σφαιρών με τον αριθμό 3 (τρεις διαφορετικές διαμέτροι σφαιρών) υπολογίστηκε το βάρος των σφαιρών που πρέπει να μπει στο μύλο από κάθε διάμετρο.

$$\text{Το βάρος από κάθε διάμετρο είναι } m_b = \frac{10209,1}{3} = 3403,3 \text{ g}$$

Έτσι ο αριθμός σφαιρών που χρησιμοποιήθηκε για κάθε διάμετρο παρουσιάζεται παρακάτω.

1. $Nd1 = \frac{3403.03}{8.36} = 407$ σφαίρες διαμέτρου 12,7 mm, με πραγματικό βάρος 3407 g.
2. $Nd2 = \frac{3403.03}{66.46} = 51$ σφαίρες με διαμέτρου 25,4 mm, με πραγματικό βάρος 3463,6 g.
3. $Nd3 = \frac{3403}{262.02} = 13$ σφαίρες με διαμέτρου 40 mm, με πραγματικό βάρος 3403,9 g.

Τέλος, υπολογίστηκε ο συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό U . Ο συντελεστής υπολογίστηκε από τη σχέση

$$U = \frac{f_c}{J * 0,4} \quad (13)$$

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές συνθήκες κάθε δοκιμής.

Πίνακας 5: Πειραματικές συνθήκες και χαρακτηριστικά μύλου

Περιγραφή	Δοκιμή 1 ^η	Δοκιμή 2 ^η	Δοκιμή 3 ^η
Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών, J	0,4	0,4	0,4
Συντελεστής πλήρωσης υλικού στο μύλο, f_c	0,05	0,1	0,15
Συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό, U	0,31	0,63	0,94
Μάζα σφαιρών m_b (g)	10274,5	10274,5	10274,5
Μάζα υλικού, m (g)	493,3	986,5	1479,8
Νερό (mL)	328,87	657,67	986,53
Σύνολο	822,17	1644,17	2466,33

3.3 Εκλεκτική Λειοτρίβηση

Κατά τη διαδικασία της λειοτρίβησης πραγματοποιήθηκαν συνολικά δώδεκα δοκιμές εν υγρώ, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Κάθε τροφοδοσία, f_c (0,05, 0,1, 0,15) λειοτριβήθηκε σε τέσσερις διαφορετικούς χρόνους t (2, 4, 8, 12 min).

Σύμφωνα με τη διαδικασία, μετά από κάθε δοκιμή, το προϊόν (πολφός) συλλέχθηκε σε δοχεία. Το προϊόν αφέθηκε για ικανοποιητικό χρόνο στα δοχεία, έτσι ώστε να καθιζάνουν τα στερεά, και να διευκολυνθεί η απομάκρυνση του νερού. Στη συνέχεια, ο εναπομείναν πολφός του δοχείου κοσκινίστηκε εν υγρώ σε κόσκινο 0,075 mm όπου προέκυψαν δύο προϊόντα. Το χονδρό μέγεθος +0,075 mm και το λεπτομερές μέγεθος –

0,075 mm. Μετά την κοσκίνιση το +0,075 mm, τοποθετήθηκε στο φούρνο για ξήρανση του υλικού, ενώ τα στερεά του −0,075 mm συλλέχθηκαν μέσω διηθήσεως υπό κενό και ακολούθως τοποθετήθηκαν στο φούρνο για ξήρανση.

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας τροφοδοσίας σφαιρόμυλου ανά δοκιμή

Δοκιμή	Χρόνος (min)	Τροφοδοσία μύλου			
		2	4	8	12
1 ^η : $f_c = 0,05$	Νερό (mL)	328,87	328,87	328,87	328,87
	Στερεά (g)	493,3	493,3	493,3	493,3
2 ^η : $f_c = 0,1$	Νερό (mL)	657,67	657,67	657,67	657,67
	Στερεά (g)	986,5	986,5	986,5	986,5
3 ^η : $f_c = 0,15$	Νερό (mL)	986,53	986,53	986,53	986,53
	Στερεά (g)	1479,8	1479,8	1479,8	1479,8
	Μάζα σφαιρών (g)	10274,5	10274,5	10274,5	10274,5

Ακολούθως, μετά την ξήρανση των δύο κλασμάτων το χονδρό υλικό (+0,075 mm) ταξινομήθηκε σε σειρά κοσκίνων που ξεκινούν από 2,36 mm και έχουν λόγο $\sqrt{2}$. Ο χρόνος ταξινόμησης ορίστηκε στα 8 λεπτά με δόνηση στο 0,80 mm (Εικόνα 21). Αφού ταξινομήθηκε το υλικό, δημιουργήθηκαν τέσσερα ενοποιημένα κλάσματα, για την περαιτέρω επεξεργασία του μεταλλεύματος. Τα τέσσερα ενοποιημένα κλάσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.



Εικόνα 21: Μηχανή κοσκίνισης μεταλλεύματος

Πίνακας 7: Ενοποιημένα κλάσματα

Ενοποιημένο κλάσμα	Αρχικό κλάσμα (mm)
-3,35+1,18 mm	-3,35 +2,36
	-2,36 +1,70
	-1,70 +1,18
-1,18+0,300 mm	-1,18 +0,850
	-0,850 +0,600
	-0,600 +0,425
	-0,425 +0,300
-0,300+0,075 mm	-0,300 +0,212
	-0,212 +0,150
	-0,150 +0,106
	-0,106 +0,075
-0,075 mm	-0,075

3.4 Μαγνητικός διαχωρισμός

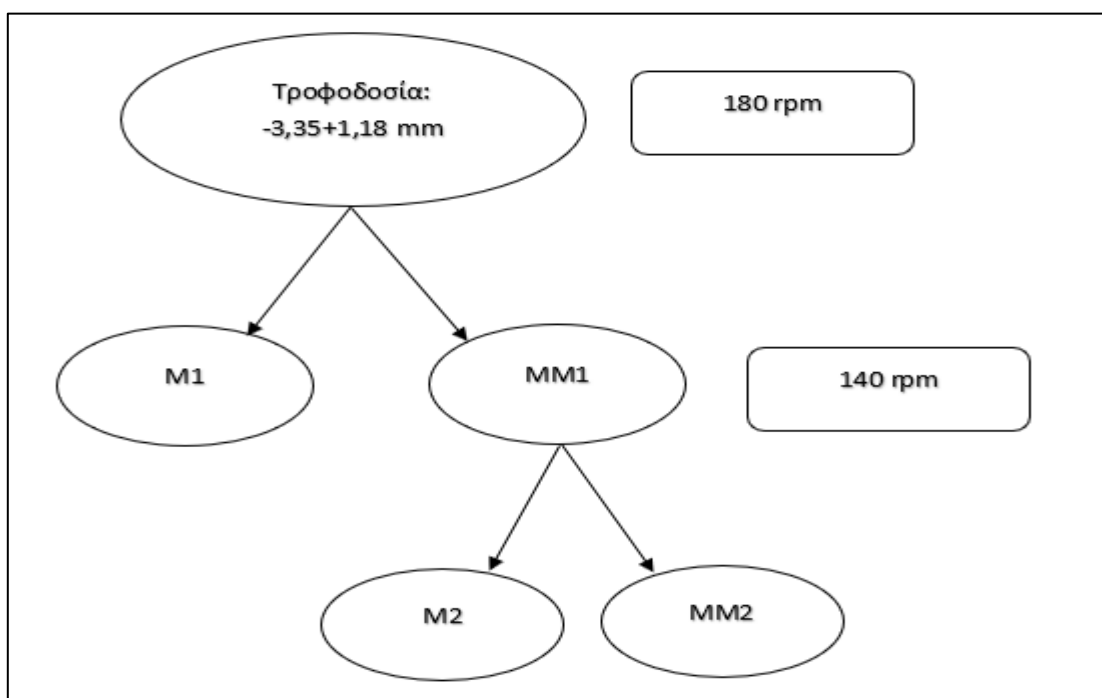
Για την επίτευξη του μαγνητικού διαχωρισμού, πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές επίπλευσης για τρεις τροφοδοσίες f_c (0,05, 0,1, 0,15), σε τρεις συγκεκριμένους χρόνους λειοτρίβησης (2,72, 6,59, 11 min). Τα κλάσματα που χρησιμοποιήθηκαν (-3,35+1,18, -1,18+0,300, -0,300 mm) διαχωρίστηκαν σε τρεις διαφορετικούς μαγνήτες.

Το κλάσμα -3,35+1,18 mm διαχωρίστηκε στον ταινιοφόρο μαγνητικό διαχωριστή Perm role (Εικόνα 12) ενώ το κλάσμα -1,18+0,300 mm διαχωρίστηκε στον ξηρό επαγωγικό μαγνήτη υψηλής έντασης (High induced role magnetic separator) (Εικόνα 13). Στο κλάσμα -0,300 mm πραγματοποιήθηκαν τόσο δοκιμές επίπλευσης όσο και μαγνητικού διαχωρισμού με χρήση του υγρού μαγνητικού διαχωριστή υψηλής κλίσης πεδίου (wet high gradient magnetic separator, HGMS, Εικόνα 15).

Στον ταινιοφόρο μαγνήτη Perm role το κλάσμα διαχωρίστηκε σε δύο διαδοχικές δοκιμές. Αρχικά, η ταχύτητα περιστροφής της μεταφορικής ταινίας καθορίστηκε στα 180 rpm. Από την περιστροφή, οι μη μαγνητικοί κόκκοι της τροφοδοσίας αποχωρίστηκαν από την ταινία και κατέληξαν στο δοχείο που αντιστοιχούσε στο Μη Μαγνητικό1 (MM1), ενώ οι μαγνητικοί κόκκοι παρέμειναν προσκολλημένοι στην ταινία για περισσότερο χρόνο μέχρι το σημείο που εξασθενεί το μαγνητικό πεδίο. Αφού αποχωρίστηκαν από την ταινία,

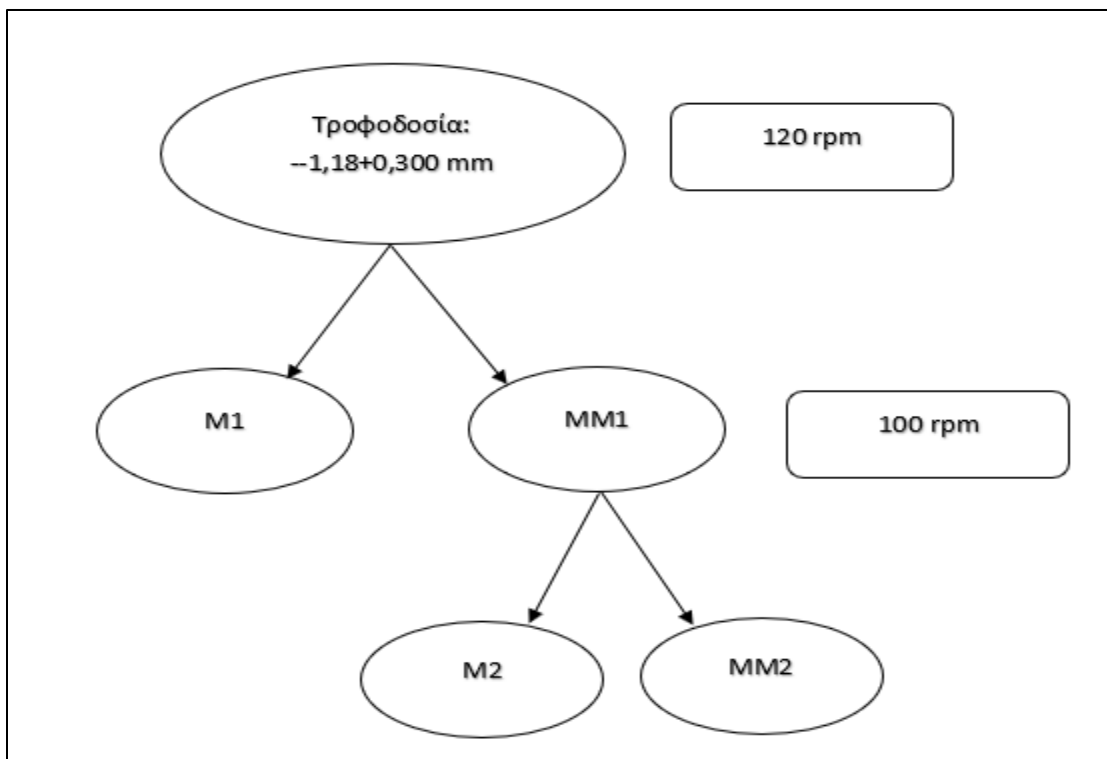
κατέληξαν σε δοχείο που αντιστοιχούσε στο Μαγνητικό 1 (M1). Η διαδικασία επαναλήφθηκε με τροφοδοσία το MM1, και νέα ταχύτητα περιστροφής 140 rpm, όπου οι μη μαγνητικοί κόκκοι αντιστοιχούν στο δοχείο Μη μαγνητικό 2 (MM2), ενώ οι μαγνητικοί κόκκοι στο δοχείο Μαγνητικό 2 (M2). Η διαδικασία επαναλήφθηκε και για τους τρεις διαφορετικούς συντελεστές πλήρωσης f_c .

Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής που περιγράφει την πειραματική διαδικασία. Για την επεξεργασία των προϊόντων, χρησιμοποιήθηκαν τα M1, M2 και MM2.



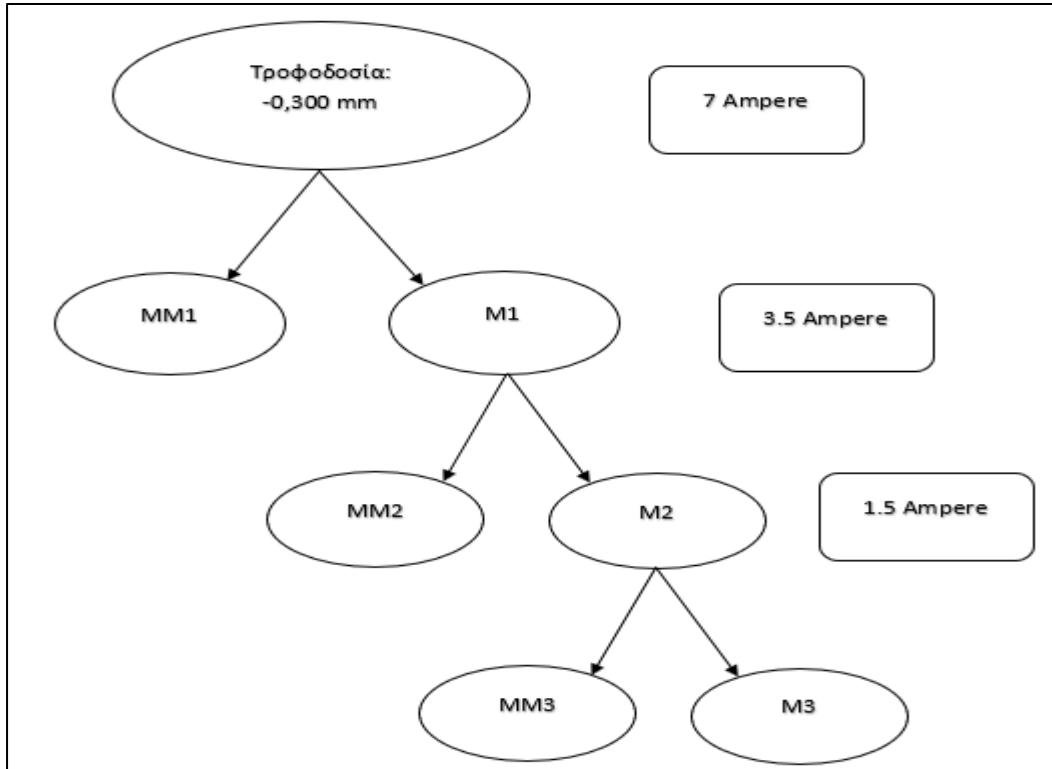
Εικόνα 22: Διάγραμμα ροής μαγνητικού διαχωρισμού μέσω του μαγνήτη Perm role

Όπως προαναφέρθηκε, το κλάσμα $-1,18+0,300$ mm διαχωρίστηκε στο μαγνήτη υψηλής έντασης (Εικόνα 13). Ο διαχωρισμός επιτεύχθηκε σε δύο διαδοχικές δοκιμές, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 23. Αρχικά, η ένταση του μαγνήτη (I) καθορίστηκε στα 3.2 A σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών. Η αρχική ταχύτητα περιστροφής καθορίστηκε ως 120 rpm. Μετά τον πρώτο διαχωρισμό, συλλέχθηκε το μαγνητικό 1 (M1), ενώ το μη μαγνητικό μέρος της τροφοδοσίας (MM1), χρησιμοποιήθηκε ως τροφοδοσία της 2^{ης} δοκιμής, με νέα ταχύτητα περιστροφής 100 rpm. Από τη δεύτερη δοκιμή συλλέχθηκε το μαγνητικό μέρος της τροφοδοσίας (M2) και το μη μαγνητικό 2 (MM2). Τα M1, M2 και MM2 χρησιμοποιήθηκαν για αναλύσεις.



Εικόνα 23: Διάγραμμα ροής μαγνητικού διαχωρισμού μέσω του μαγνήτη υψηλής έντασης

Τέλος, το κλάσμα -0,300 mm διαχωρίστηκε εν υγρώ. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε απεικονίζεται στην Εικόνα 24. Αρχικά, για το 1^ο στάδιο του διαχωρισμού, η ένταση του μαγνητικού πεδίου (I) ορίστηκε στα 7 A. Μετά την επίτευξη του 1^{ου} σταδίου, το μη μαγνητικό προϊόν (MM1) συλλέχθηκε, ενώ το μαγνητικό προϊόν (M1) τοποθετήθηκε ως τροφοδοσία για το 2^ο στάδιο, με νέα ένταση μαγνητικού πεδίου 3.5 A. Στη συνέχεια, συλλέχθηκε το μη μαγνητικό προϊόν 2 (MM2) ενώ το μαγνητικό προϊόν 2 (M2) χρησιμοποιήθηκε ως τροφοδοσία για το 3^ο και τελευταίο στάδιο, με νέα ένταση μαγνητικού πεδίου 1,5 A. Τα προϊόντα M1, M2, M3 και MM3 χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση.



Εικόνα 24: Διάγραμμα ροής υγρού μαγνητικού διαχωρισμού, για το κλάσμα -0.300 mm

3.5 Επίπλευση

Στην πειραματική διαδικασία της επίπλευσης χρησιμοποιήθηκε ως τροφοδοσία το κλάσμα -0,300 mm. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά τρεις δοκιμές, με σταθερή πυκνότητα πολφού 30% στερεά. Στους Πίνακες 8-10 παρουσιάζονται οι πειραματικές συνθήκες κάθε δοκιμής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αντιδραστήρια και η ποσότητα τους στην τροφοδοσία, ο χρόνος προοδοποίησης των συλλεκτών, και τέλος, ο χρόνος συλλογής του συμπυκνώματος. Τα αποτελέσματα και οι χημικές αναλύσεις των τριών δοκιμών παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Για τις τρεις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω αντιδραστήρια:

- Ανθρακικό νάτριο (Sodium Carbonate, Na_2CO_3): Χρησιμοποιείται ως ρυθμιστικό του pH.

- Εξαμεταφωσφορικό νάτριο (Sodium Hexametaphosphate, SHP, $(\text{NaPO}_3)_6$): Χρησιμοποιείται ως διασπορέας των κόκκων του πολφού καθώς και καταβυθιστικό των πυριτικών ορυκτών. Επίσης, βελτιώνει τις συνθήκες δράσης των συλλεκτών.
- Πυριτικό νάτριο (Sodium Silicate, Na_2SiO_3): Χρησιμοποιείται ως διασπορέας των κόκκων του πολφού και καταβυθιστικό των πυριτικών ορυκτών. Επιπλέον, βελτιώνει τις συνθήκες δράσης των συλλεκτών.
- Ελαϊκό οξύ (Oleic Acid, $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$): Παρασκευάζεται από ζωικά και φυτικά λίπη. Χρησιμοποιείται ως συλλέκτης. Έχει τη δυνατότητα παραγωγής μεγάλης ποσότητας αφρού κατά τη διαδικασία της επίπλευσης.
- Άμυλο (Starch, $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$): Αποτελεί ένα βιο-αποικοδομήσιμο, μη τοξικό και φυσικό πολυμερές. Χρησιμοποιείται ως καταβυθιστικό του σιδήρου.

Οι πειραματικές συνθήκες της 1^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 8. Το πείραμα διήρκεσε συνολικά, περίπου 30 min. Ως τροφοδοσία, τοποθετήθηκαν στο κελί επίπλευσης 357,8 g μεταλλεύματος, και 1000 ml νερού. Ακολούθησαν δύο στάδια κατά την πειραματική διαδικασία. Αρχικά, αφού προστέθηκε το μέταλλευμα στο κελί επίπλευσης, ακολούθησε το 1^ο στάδιο της δοκιμής. Αφού προστέθηκαν τα αντιδραστήρια, με την πάροδο του χρόνου προοδοποίησης, ακολούθησε η συλλογή του συμπυκνώματος 1. Στην συνέχεια, ακολούθησε το 2^ο στάδιο, όπου προστέθηκαν τα αντιδραστήρια στο παραμένον 1, όπου με την πάροδο του χρόνου προοδοποίησης, ακολούθησε η συλλογή του συμπυκνώματος 2. Το βάρος των προϊόντων του συμπυκνώματος 1, 2 και του απορρίμματος αντιστοιχεί σε 11,71%, 26,83% και 61,46%.

Πίνακας 8: Πειραματικές συνθήκες 1^{ης} δοκιμής επίπλευσης

1η δοκιμή			
pH=10,5-11	Αντιδραστήρια (g/t)		Χρόνος προοδοποίησης/επίπλευσης (min)
1 ^ο	Na_2CO_3	3000-6000	-
	SHP	1300	3
	Starch	500	3
	Oleic Acid	1000	3
Συλλογή Συμπυκνώματος			4
2 ^ο	Oleic Acid	200	4
	Starch	250	4
Συλλογή Συμπυκνώματος			4

Η δεύτερη δοκιμή διήρκησε συνολικά, περίπου 15 min. Η τροφοδοσία της δοκιμής στο κελί επίπλευσης ήταν 343,4 g μεταλλεύματος με 1000 ml νερού. Η 2^η δοκιμή επιτεύχθηκε σε ένα στάδιο. Μετά την προσθήκη του μεταλλεύματος στο κελί επίπλευσης, προστέθηκαν τα αντιδραστήρια, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 9. Με την πάροδο του χρόνου προοδοποίησης, ακολούθησε η συλλογή του συμπυκνώματος 1. Η ποσότητα του συμπυκνώματος είναι 56,90% και του απορρίμματος 43,10%.

Πίνακας 9: Πειραματικές συνθήκες 2^{ης} δοκιμής επίπλευσης

2η δοκιμή			
pH=8	Αντιδραστήρια (g/t)		Χρόνος προοδοποίησης/επίπλευσης(min)
1°	Na₂CO₃	3000	-
	SHP	100	3
	Oleic Acid	800	
	Oleic Acid	200	5
Συλλογή Συμπυκνώματος			5

Τέλος, η τρίτη δοκιμή διήρκησε συνολικά, περίπου 24 min. Η τροφοδοσία που προστέθηκε στο κελί επίπλευσης είναι 340,7 g μεταλλεύματος με 1000 ml νερού. Στο 1^ο στάδιο της διαδικασίας, προστέθηκαν τα αντιδραστήρια όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 10. Με την πάροδο του χρόνου προοδοποίησης, ακολούθησε η συλλογή του συμπυκνώματος 1, ενώ στο παραμένον 1 προστέθηκαν τα αντιδραστήρια του 2^{ου} σταδίου της διαδικασίας. Με την πάροδο του χρόνου προοδοποίησης, ακολούθησε η συλλογή του συμπυκνώματος 2. Η ποσότητα του συμπυκνώματος 1 είναι 22,97%, του συμπυκνώματος 2 είναι 44,32% και τέλος του απορρίμματος είναι 32,79%.

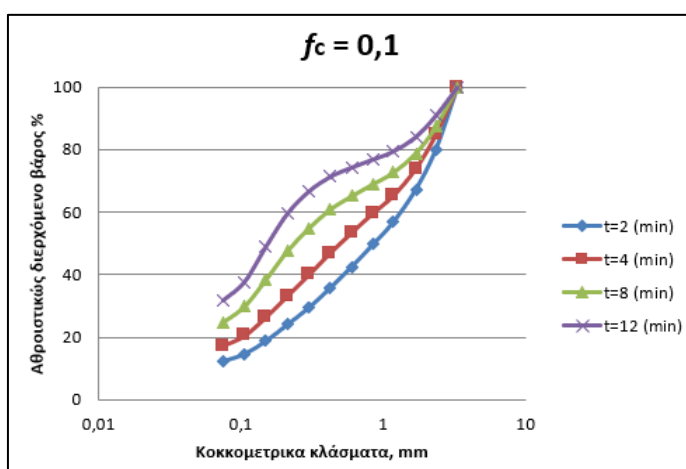
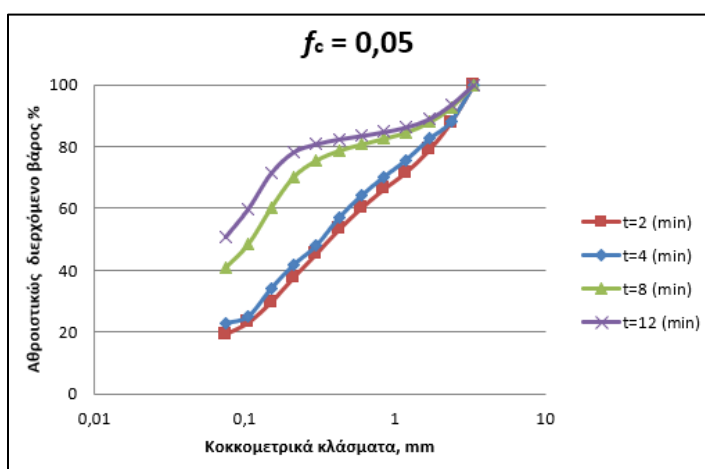
Πίνακας 10: Πειραματικές συνθήκες 3^{ης} δοκιμής επίπλευσης

3η δοκιμή			
pH=7	Αντιδραστήρια (g/t)		Χρόνος προοδοποίησης/επίπλευσης (min)
1°	Na₂CO₃	3000	-
	SHP	100	3
	Sodium Metasilicate	1000	3
	Oleic Acid	800	3
Συλλογή Συμπυκνώματος			2
2°	Oleic Acid	200	4
Συλλογή Συμπυκνώματος			4

Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία αποτελεσμάτων

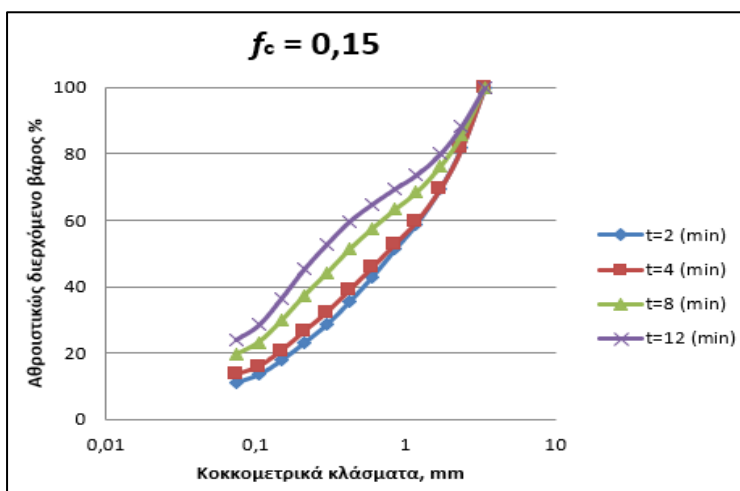
4.1 Επίδραση του χρόνου λειοτρίβησης και βαθμού πλήρωσης του σφαιρόμυλου

Μετά την ταξινόμηση των προϊόντων σε σειρά κοσκίνων προέκυψαν οι Πίνακες (Π1-Π3) του παραρτήματος Α, με το βάρος του υλικού σε κάθε κόσκινο και το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος. Από τους πίνακες προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα για το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος από κάθε κόσκινο.



Διάγραμμα 4.1: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος συναρτήσει του μεγέθους του προϊόντος, για συντελεστή πλήρωσης μύλου $f_c = 0,05$

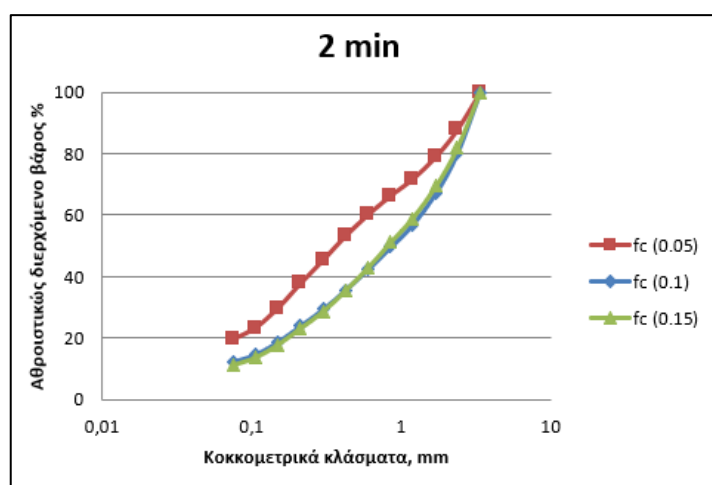
Διάγραμμα 4.1: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος συναρτήσει του μεγέθους του προϊόντος, για συντελεστή πλήρωσης μύλου $f_c = 0,1$



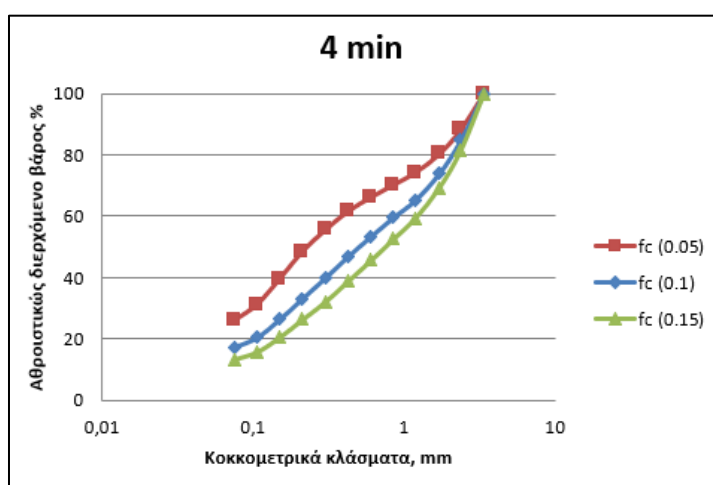
Διάγραμμα 4.3: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος συναρτήσει του μεγέθους του προϊόντος, για συντελεστή πλήρωσης μύλου $f_c = 0,15$

Από τα διαγράμματα 4.1-4.3, προκύπτει ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης του υλικού, όλο και περισσότερο μειώνεται το μέγεθος του, γεγονός που δείχνει ότι στο αντίστοιχο μέγεθος κόσκινου σε κάθε χρόνο, διέρχεται περισσότερο υλικό. Το μέγεθος όμως του προϊόντος εξαρτάται από το συντελεστή πλήρωσης του υλικού f_c . Η καλύτερη λειοτρίβηση του υλικού παρατηρείται στην πρώτη περίπτωση, όπου ο συντελεστής πλήρωσης είναι ο μικρότερος που εξετάστηκε ($f_c = 0,05$). Όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους μετατοπίζονται προς τα αριστερά. Συγκεκριμένα, στους χρόνους 8 min και 12 min, η καμπύλη τείνει αριστερότερα στα ενδιάμεσα κλάσματα και δεν ακολουθεί την τάση μείωσης που έχουν οι χρόνοι 2 min και 4 min αντίστοιχα. Επομένως, χρειάζεται ικανός χρόνος για να φανούν οι διαφορές μεταξύ τους.

Πιο κάτω στα διαγράμματα 4.4-4.5 παρουσιάζεται το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος, για χρόνο λειοτρίβησης 2 και 4 min, για κάθε συντελεστή πλήρωσης f_c .



Διάγραμμα 4.4: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος συναρτήσει του μεγέθους του προϊόντος, για χρόνο $t = 2 \text{ min}$



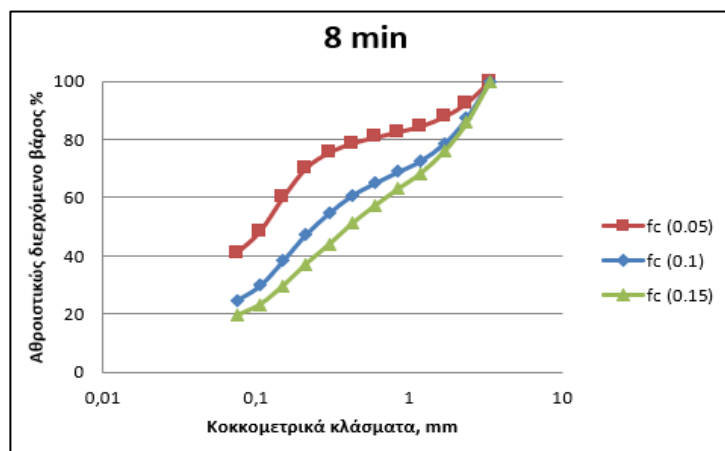
Διάγραμμα 4.5: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος συναρτήσει του μεγέθους του προϊόντος, για χρόνο $t = 4 \text{ min}$

Στο Διαγράμμα 4.4 η αποτελεσματικότερη λειοτρίβηση του υλικού είναι στις περιπτώσεις με το μικρότερο συντελεστή πλήρωσης f_c . Η καμπύλη που αντιστοιχεί στο $f_c = 0,05$ τείνει να πάει προς τα αριστερά, που σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη μείωση του

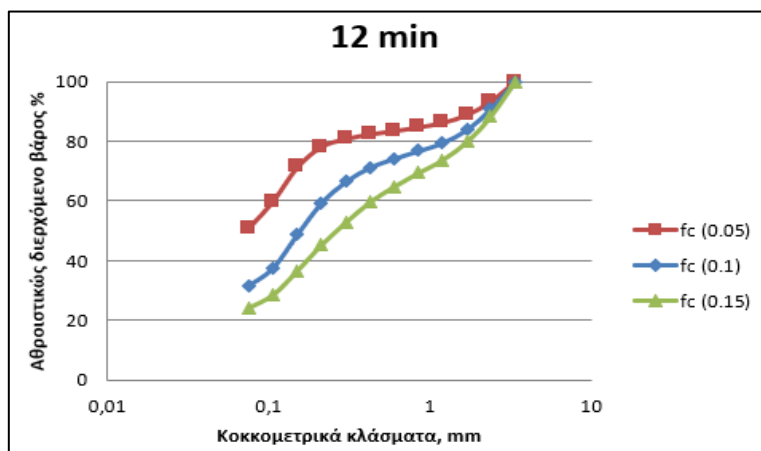
μεγέθους του υλικού, και κατανέμεται περισσότερο στα λεπτόκοκκα κλάσματα. Ακόμη, στον χρόνο 2 min, για τα $f_c = 0,1$ ή 0,15 η μείωση του μεγέθους είναι ίδια, που σημαίνει πως ο χρόνος λειοτρίβησης για τις δύο αυτές περιπτώσεις ήταν μικρός και δεν φάνηκε η επίδραση του βαθμού πλήρωσης του μύλου.

Αυτό παρατηρείται στο αμέσως επόμενο Διάγραμμα 4.5, που αντιστοιχεί σε χρόνο λειοτρίβησης 4 min. Οι τρεις καμπύλες διαφέρουν μεταξύ τους, επιβεβαιώνοντας το αρχικό μας συμπέρασμα ότι ο χρόνος 2 min, ήταν μικρός για $f_c = 0.1$ και 0.15 αντίστοιχα.

Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και στα διαγράμματα 4.6-4.7. Ο χρόνος ήταν αρκετός για να φανεί η επίδραση της πλήρωσης του μύλου.

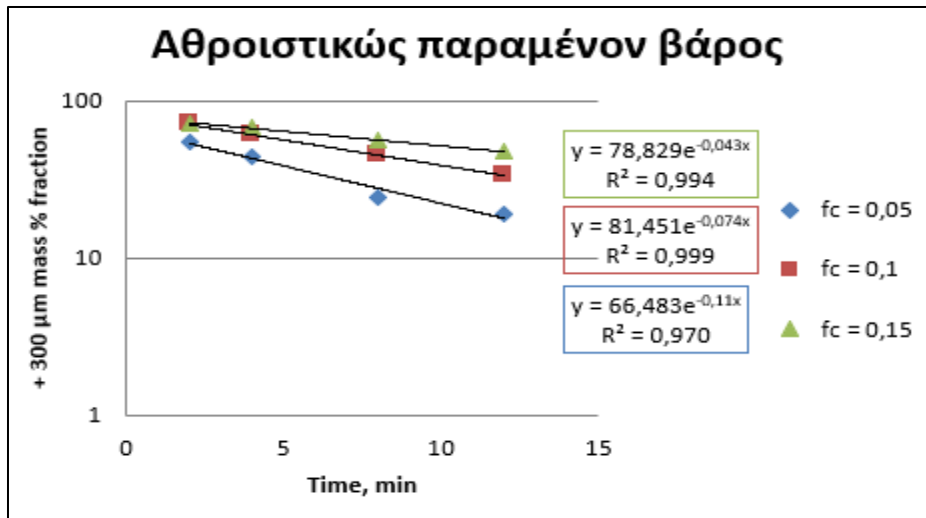


Διάγραμμα 4.6: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος συναρτήσει του μεγέθους του προϊόντος, για χρόνο $t = 8 \text{ min}$



Διάγραμμα 4.7: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος συναρτήσει του μεγέθους του προϊόντος, για χρόνο $t = 12 \text{ min}$

Στο ημιλογαριθμικό Διάγραμμα 4.8 παρουσιάζεται το αθροιστικώς παραμένον βάρος για το μέγεθος +300 μm , με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης για κάθε συντελεστή πλήρωσης f_c του μύλου.



Διάγραμμα 4.8: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για το μέγεθος +300 μm , σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης του υλικού

Από το διάγραμμα προκύπτουν οι ευθείες για κάθε συντελεστή f_c , που περιγράφονται από τις εκθετικές συναρτήσεις. Η κλίση των ευθειών, δίνει τον ρυθμό θραύσης του μεταλλεύματος. Ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται, όσο η κλίση μειώνεται. Ουσιαστικά, ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται όσο η ευθεία προσεγγίζει τον άξονα-Y του διαγράμματος. Επομένως, ο μικρότερος συντελεστής πλήρωσης $f_c = 0,05$ δίνει το μεγαλύτερο ρυθμό θραύσης του μεταλλεύματος.

4.2 Ειδική ενέργεια κατανάλωσης συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος.

Σε κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε για τη λειοτρίβηση του υλικού, καθώς και το μέγεθος D_{50} των προϊόντων.

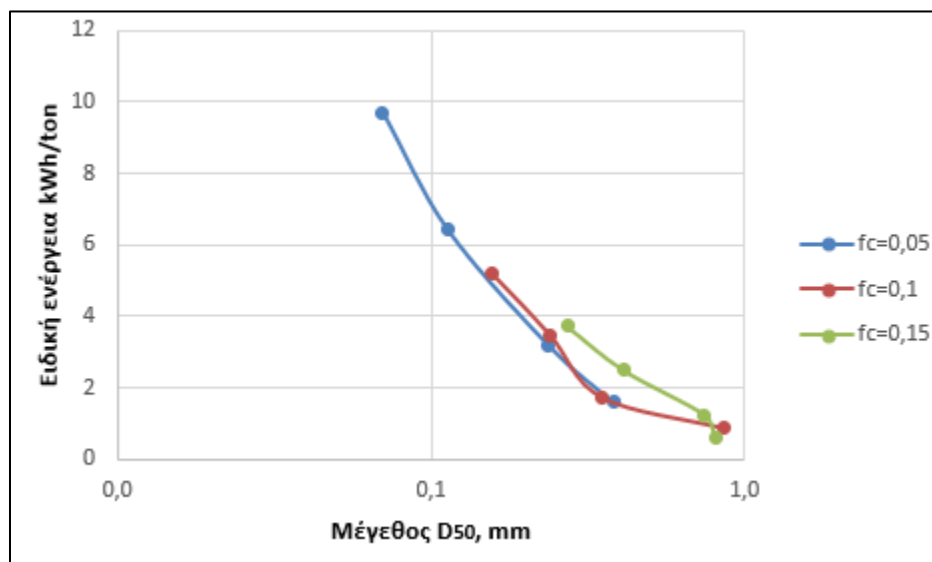
Η ειδική ενέργεια κατανάλωσης (ϵ), που υπολογίζεται από τη σχέση (8), εξαρτάται από το χρόνο λειοτρίβησης του υλικού, καθώς και την ισχύ P του σφαιρόμυλου.

Τα αποτελέσματα για τις τρεις τροφοδοσίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Ειδική ενέργεια κατανάλωσης συναρτήσει του μεγέθους D_{50} για τρεις συντελεστές πλήρωσης f_c

	$f_c = 0,05$		$f_c = 0,1$		$f_c = 0,15$	
Χρόνος	Ειδική ενέργεια	D_{50}	Ειδική ενέργεια	D_{50}	Ειδική ενέργεια	D_{50}
min	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)
0,0	0,0	2,30	0,0	2,30	0,0	2,30
2,00	1,61	0,38	0,9	0,86	0,6	0,81
4,0	3,21	0,24	1,7	0,35	1,2	0,75
8,0	6,42	0,11	3,5	0,24	2,5	0,41
12,0	9,70	0,07	5,2	0,16	3,7	0,27

Παρακάτω, παρουσιάζεται το Διάγραμμα 4.9 της ειδικής ενέργειας που καταναλώθηκε, συναρτήσει του μεγέθους D_{50} , για διαφορετικούς συντελεστές πλήρωσης f_c του σφαιρόμυλου.



Διάγραμμα 4.9: Μέγεθος D_{50} της τροφοδοσίας συναρτήσει της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας, για τρεις διαφορετικές τροφοδοσίες (f_c)

Από το Διάγραμμα 4.9, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια (ϵ), μειώνεται το μέγεθος D_{50} του υλικού της τροφοδοσίας. Ο συντελεστής πλήρωσης του μύλου $f_c = 0,05$, ο οποίος είναι ο συντελεστής που αντιστοιχεί στη μικρότερη τροφοδοσία οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν και σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Συγκεκριμένα, με βάση τα αποτελέσματα στον Πίνακα 11, η μεγαλύτερη τιμή στην κατανάλωση ενέργειας είναι 9,70 kWh/ton με μέγεθος $D_{50} = 0,07$ mm.

4.3 Χημική ανάλυση κοκκομετρικών κλασμάτων

Από τα ενοποιημένα κλάσματα προέκυψαν σαράντα οκτώ (48) προϊόντα τα οποία υποβλήθηκαν σε χημική ανάλυση με την χρήση φασματοσκοπίας XRF. Συνολικά μελετήθηκαν τρεις συντελεστές f_c (0,05, 0,1, 0,15), σε τέσσερις διαφορετικούς χρόνους (2, 4, 8, 12 min). Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκων, οι οποίοι περιέχουν την περιεκτικότητα (%) κάθε κλάσματος, σε συγκεκριμένα οξειδία, τους λόγους Al_2O_3/SiO_2 (Al/Si) και Al_2O_3/Fe_2O_3 (Al/Fe) και τέλος, την κατανομή βάρους (%) κάθε οξειδίου στο αντίστοιχο κλάσμα.

4.3.1 Χημική ανάλυση κλασμάτων για πλήρωση σφαιρόμυλου $f_c = 0,05$

Οι πρώτες αναλύσεις που προέκυψαν αφορούν την 1^η τροφοδοσία, για $f_c = 0,05$ όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.

Στους πίνακες 12 - 15, παρουσιάζεται η ανάλυση επιλεγμένων οξειδίων, για συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$, στους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Πίνακας 12: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,05$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 2$ min

$f_c = 0,05$	$t = 2$ min	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al/Si	Al/Fe	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
1,18	28,80	63,98	17,11	2,11	3,35	30,33	3,74	30,18	24,70	27,11	25,27
0,3	26,74	63,09	18,02	2,19	3,68	28,86	3,50	27,63	24,16	26,08	25,77
0,075	26,28	60,87	20,61	1,75	4,02	34,82	2,95	26,21	27,16	20,50	27,67
-0,075	18,19	53,64	26,30	3,24	4,47	16,55	2,04	15,98	23,98	26,31	21,29
	100,00	61,04	19,95	2,24	3,82	27,24	3,06	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 13: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,05$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 4$ min

$f_c = 0,05$	$t = 4$ min	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al/Si	Al/Fe	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
1,18	26,11	64,71	17,00	1,74	3,58	37,22	3,81	27,57	21,96	24,03	23,95
0,300	18,98	63,39	18,21	1,59	3,71	39,96	3,48	19,63	17,09	15,93	18,04
0,075	30,05	61,73	19,83	1,61	3,93	38,45	3,11	30,27	29,46	25,53	30,25
-0,075	24,86	55,54	25,62	2,62	4,36	21,17	2,17	22,53	31,49	34,51	27,76
	100,00	61,28	20,22	1,89	3,90	32,43	3,03	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 14: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,05$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 8 \text{ min}$

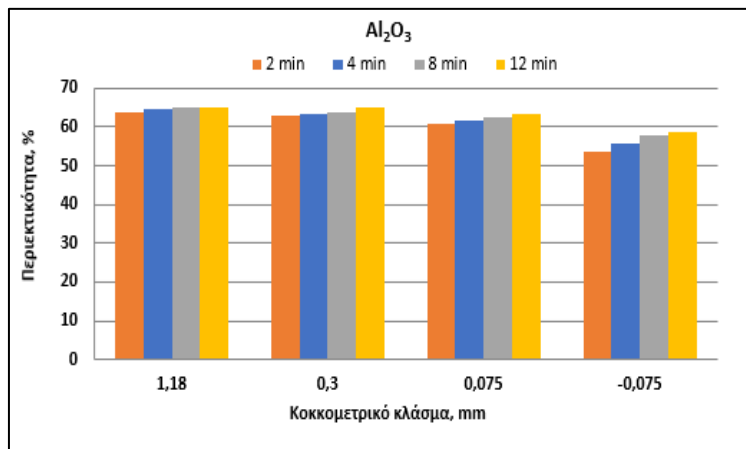
$f_c = 0,05$	$t = 8 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	15,86	65,15	16,42	1,77	3,44	36,87	3,97	16,85	13,01	14,89	14,06
0,300	9,25	63,95	17,39	1,69	3,70	37,82	3,68	9,65	8,03	8,31	8,82
0,075	35,56	62,69	18,98	1,61	3,86	39,05	3,30	36,37	33,72	30,34	35,37
-0,075	39,33	57,86	23,02	2,22	4,12	26,02	2,51	37,13	45,24	46,47	41,76
	100,00	61,30	20,02	1,88	3,88	32,57	3,06	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 15: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,05$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 12 \text{ min}$

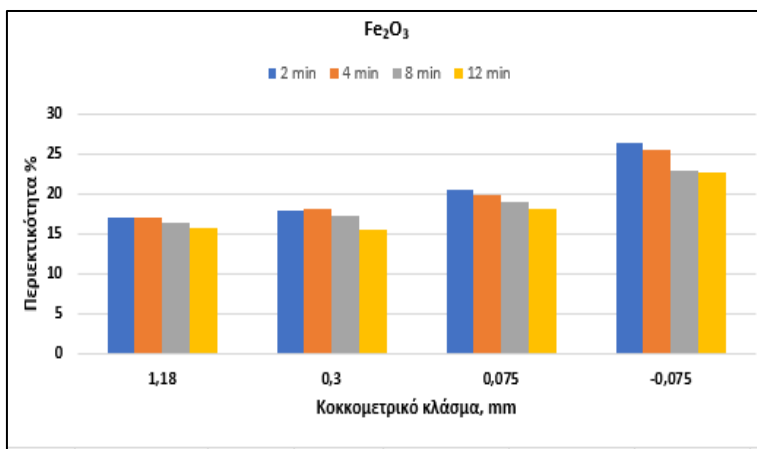
$f_c = 0,05$	$t = 12 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	14,74	64,91	15,77	2,36	3,59	27,54	4,12	15,68	11,56	17,24	13,50
0,300	5,76	65,01	15,60	2,26	3,43	28,74	4,17	6,14	4,47	6,47	5,04
0,075	24,76	63,31	18,16	1,57	3,78	40,39	3,49	25,69	22,36	19,25	23,88
-0,075	54,74	58,49	22,63	2,10	4,12	27,85	2,58	52,49	61,61	57,04	57,57
	100,00	61,01	20,11	2,02	3,92	30,27	3,03	100,00	100,00	100,00	100,00

Η μεγαλύτερη τιμή της περιεκτικότητας του Al₂O₃ είναι 65,15% (αύξηση 6,28%) με κατανομή 16,85%, στο χρόνο λειοτρίβησης 8 min για το μέγεθος +1,18 mm. Οι υπόλοιπες τιμές περιεκτικότητας στο συγκεκριμένο κλάσμα είναι 16,42% για το Fe₂O₃, 1,77% για το SiO₂ και 3,44% για το TiO₂. Όσον αφορά τα υπόλοιπα οξείδια, η μικρότερη τιμή του Fe₂O₃ βρίσκεται στο χρόνο 12 min και για το κλάσμα -1,18+0.300 mm. Στις συγκεκριμένες συνθήκες το Fe₂O₃ έχει περιεκτικότητα 15,60% (μείωση 22,42%). Η μεγαλύτερη τιμή του TiO₂ είναι 4,47% (αύξηση 17,08%) και προκύπτει μετά από χρόνο 2 min, για το μέγεθος-0,075 mm. Τέλος, για το λόγο Al/Si, η μεγαλύτερη τιμή (40,39) προκύπτει στον χρόνο λειοτρίβησης 12 min, για το κλάσμα -0,300+0,075 mm, ενώ η μεγαλύτερη τιμή του λόγου Al/Fe (4,17), παρατηρείται στο χρόνο λειοτρίβησης 12 min, για το κλάσμα -1,18+0,300 mm.

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων επιλεγμένων οξειδίων για το συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$ παρουσιάζονται στα διαγράμματα 4.10-4.13.



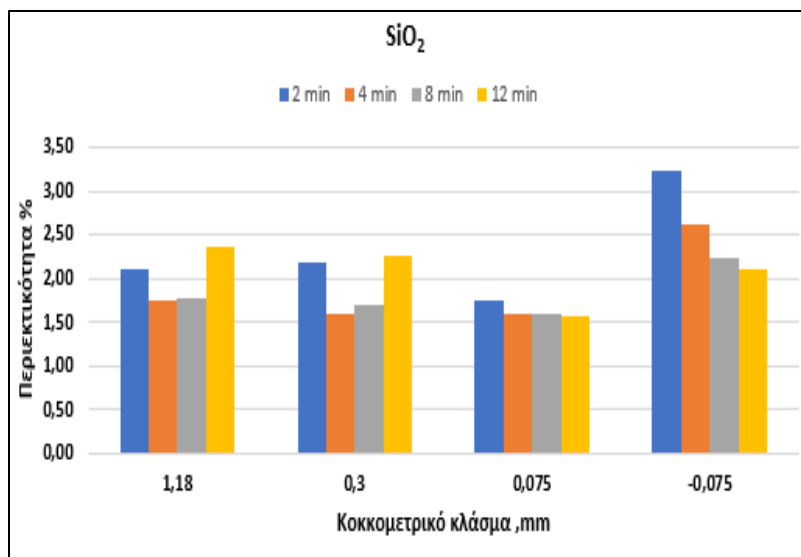
Διάγραμμα 4.10: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % Al_2O_3 , σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης



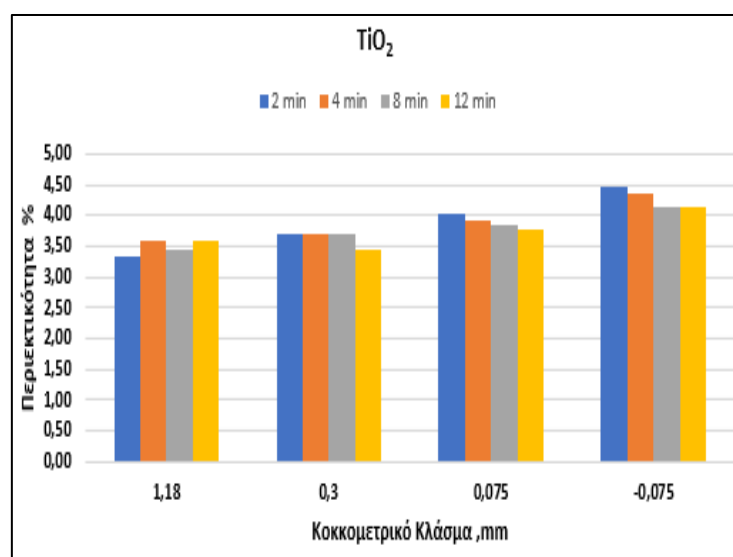
Διάγραμμα 4 11: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % Fe_2O_3 , σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης

Στο Διάγραμμα 4.10, παρατηρείται υψηλή περιεκτικότητα % στα χονδρομερή κλάσματα σε Al_2O_3 , η οποία μειώνεται όσο το υλικό γίνεται πιο λεπτομερές. Η περιεκτικότητα % του κλάσματος σε Al_2O_3 αυξάνεται, όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Al συναντάται στο χονδρό μέγεθος +1,18 mm.

Όσον αφορά το Διάγραμμα 4.11, στην περιεκτικότητα % για το Fe_2O_3 συμβαίνει ακριβώς αντίστροφη διαδικασία σε σχέση με το αργίλιο. Η περιεκτικότητα του μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, ενώ συγκεντρώνεται κυρίως στο λεπτό μέγεθος -0,075 mm. Στα μεγαλύτερα μεγέθη παρατηρείται μικρότερη περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 σε σχέση με τα πιο λεπτομερή.



Διάγραμμα 4.12: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % SiO₂, σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης



Διάγραμμα 4.13: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % TiO₂, σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης

Στο Διάγραμμα 4.12, το SiO₂ συγκεντρώνεται κυρίως στο λεπτό κλάσμα -0,075 mm, με μια τάση μείωσης της περιεκτικότητας του όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, ενώ παραμένει σε χαμηλή τιμή στα χονδρόκοκκα καθώς και στα ενδιάμεσα κλάσματα. Στα μεγαλύτερα κλάσματα δεν υπάρχει συγκεκριμένη διαφοροποίηση σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης που επιλέχθηκε. Από αυτό, συνεπάγεται πως ο λόγος Al/Si παραμένει σε υψηλά επίπεδα έως και 40, γεγονός εξαιρετικά θετικό για την ποιότητα του υλικού. Τέλος, από το Διάγραμμα 4.13 προκύπτει ότι όσο μειώνεται το μέγεθος του κλάσματος αυξάνεται η περιεκτικότητα σε TiO₂. Η περιεκτικότητα % μειώνεται όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης στα λεπτά μεγέθη -0,300+0,075 mm και -0,075 mm. Στο χονδρό μέγεθος +1,18 mm, παρατηρείται τάση αύξησης της περιεκτικότητας ενώ στο ενδιάμεσο μέγεθος -1,18+0,300 mm δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή στους τρεις χρόνους (2, 4, 8 min), εκτός από μείωση της περιεκτικότητας στο μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης (12 min).

4.3.2 Χημική ανάλυση κλασμάτων για πλήρωση σφαιρόμυλου $f_c = 0,1$

Παρακάτω παρατίθενται οι συγκεντρώσεις των οξειδίων της 2^{ης} τροφοδοσίας, για $f_c = 0,1$ όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 16: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,1$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 2 \text{ min}$

$f_c = 0,1$	$t = 2 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	43,17	65,01	17,83	2,15	3,94	30,27	3,65	45,19	38,89	45,07	42,77
0,3	27,39	62,15	19,17	1,70	3,79	36,55	3,24	27,41	26,55	22,64	26,10
0,075	17,07	60,76	20,76	1,75	4,04	34,76	2,93	16,70	17,91	14,50	17,34
-0,075	12,38	53,71	26,61	2,96	4,43	18,17	2,02	10,70	16,65	17,79	13,79
	100,00	62,11	19,78	2,06	3,98	30,19	3,14	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 17: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,1$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 4 \text{ min}$

$f_c = 0,1$	$t = 4 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	34,76	64,74	16,90	1,65	3,59	39,16	3,83	36,50	29,61	31,04	32,17
0,3	25,29	63,25	18,45	1,53	3,71	41,36	3,43	25,95	23,52	20,89	24,19
0,075	22,61	61,06	20,38	1,62	3,98	37,59	3,00	22,40	23,24	19,85	23,21
-0,075	17,34	53,85	27,03	3,01	4,57	17,87	1,99	15,15	23,63	28,23	20,43
	100,00	61,64	19,83	1,85	3,88	33,30	3,11	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 18: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,1$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 8 \text{ min}$

$f_c = 0,1$	$t = 8 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	27,32	64,65	16,96	1,69	3,54	38,23	3,81	28,89	22,95	24,58	24,75
0,3	17,86	62,87	18,53	1,57	3,86	40,11	3,39	18,37	16,40	14,90	17,64
0,075	29,96	62,04	19,49	1,56	3,88	39,82	3,18	30,41	28,92	24,83	29,75
-0,075	24,86	54,90	25,78	2,70	4,38	20,34	2,13	22,33	31,74	35,69	27,86
	100,00	61,13	20,19	1,88	3,91	32,52	3,03	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 19: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,1$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 12 \text{ min}$

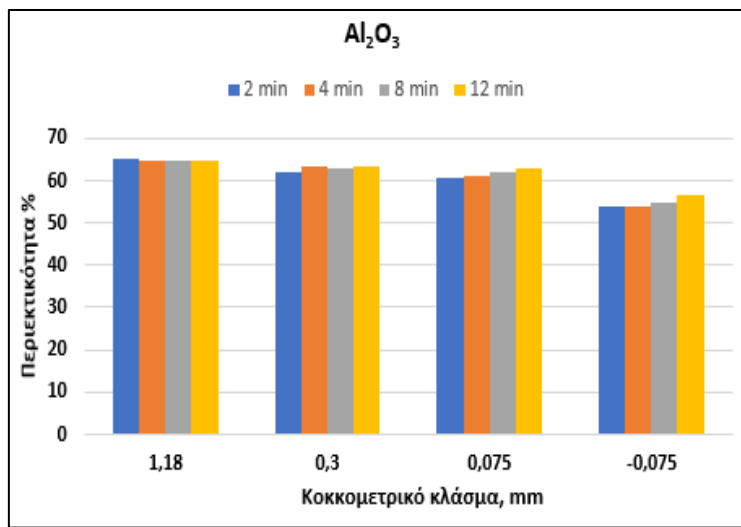
$f_c = 0,1$	$t = 12 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	20,55	64,89	16,62	1,79	3,56	36,33	3,90	21,75	17,16	19,32	18,55
0,3	12,85	63,21	18,00	1,69	3,84	37,38	3,51	13,25	11,62	11,44	12,51
0,075	34,79	62,77	18,50	1,57	3,94	40,05	3,39	35,62	32,33	28,70	34,75
-0,075	31,80	56,64	24,34	2,42	4,24	23,37	2,33	29,38	38,89	40,55	34,18
	100,00	61,31	19,90	1,90	3,94	32,26	3,08	100,00	100,00	100,00	100,00

Από τους πιο πάνω πίνακες 16 - 19, παρατηρείται, όπως και πριν, ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης στη δοκιμή, τόσο λιγότερο υλικό αντιστοιχεί στα χονδρομερή κλάσματα (+1,18, -1,18+0,300 mm) ενώ αυξάνεται στα λεπτομερή κλάσματα (-0,300+0,075, -0,075 mm).

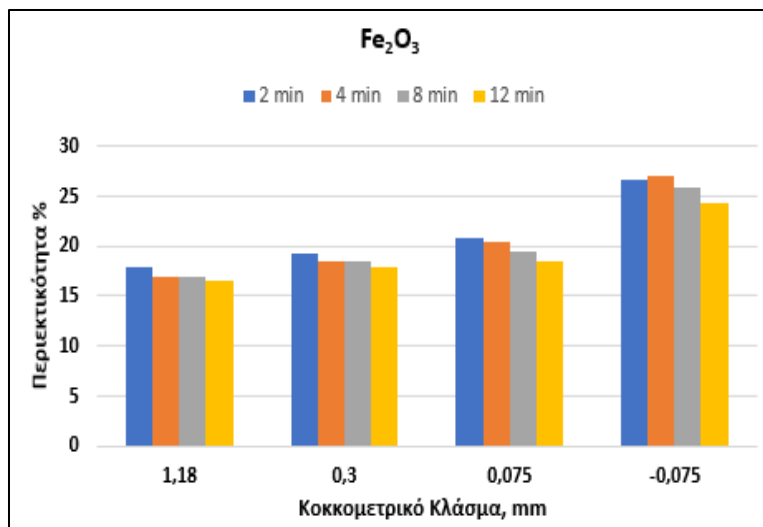
Η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας του Al_2O_3 είναι 65,01% (αύξηση 4,7%) με κατανομή 45,19%, στο χρόνο 2 min, και μέγεθος +1,18 mm, ενώ η περιεκτικότητα των υπόλοιπων οξειδίων στο μέγεθος είναι 17,83% για το Fe_2O_3 , 2,15% για το SiO_2 και 3,94% για το TiO_2 . Για το Fe_2O_3 η μικρότερη τιμή περιεκτικότητας είναι 16,62% (μείωση 16,48) με κατανομή 17,16%, στο χρόνο 12 min και μέγεθος +1,18 mm. Τέλος, η μεγαλύτερη τιμή για το TiO_2 βρίσκεται στο χρόνο 4 min, μέγεθος -0,075 mm και είναι 4,57% (αύξηση 17,83%).

Όσον αφορά τους λόγους, η περιεκτικότητα του Al/Si παραμένει σε ψηλά επίπεδα που ανέρχονται μέχρι και την τιμή 41. Ακόμη και στα λεπτομερή κλάσματα, όπου η τιμή του SiO_2 αυξάνεται απότομα, η τιμή της περιεκτικότητας του λόγου παραμένει αρκετά μεγαλύτερη από την αποδεκτή. Η μεγαλύτερη τιμή για τον λόγο Al/Si (41,36) προκύπτει μετά από χρόνο λειοτρίβησης 4 min, στο κλάσμα -1,18+0,300 mm. Για το λόγο Al/Fe η τιμή της περιεκτικότητας δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή και κυμαίνεται μεταξύ του 2 στα λεπτόκοκκα κλάσματα, ενώ ανέρχεται οριακά στο 4 στα χονδροκόκκα. Η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας για το λόγο είναι ίση με 3,90 στον χρόνο 12 min και μέγεθος +1,18 mm.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων επιλεγμένων οξειδίων για το συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,1$ στα διαγράμματα 4.14-4.17.



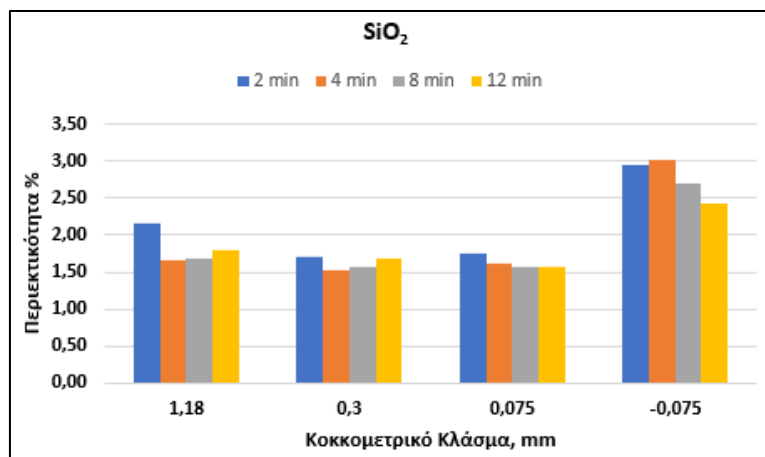
Διάγραμμα 4.14: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % Al_2O_3 , σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης



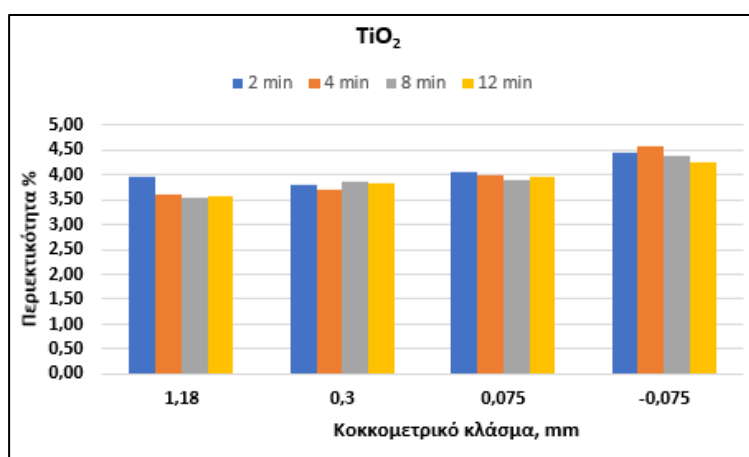
Διάγραμμα 4.15: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % Fe_2O_3 , σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης

Από το Διάγραμμα 4.14 προκύπτει ότι στο χονδρό μέγεθος +1,18 mm δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη μεταβολή της περιεκτικότητας και στους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης. Στα υπόλοιπα μεγέθη -1,18+0,300 mm, -0,300+0,075 mm και -0,075 mm παρατηρείται τάση αύξησης της περιεκτικότητας όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης. Τέλος, όσο μειώνεται το μέγεθος του υλικού, μειώνεται και η περιεκτικότητα του. Στο διάγραμμα 4.15, προκύπτει η ίδια τάση όπως και στο αντίστοιχο διάγραμμα 4.10, που αφορά το Fe_2O_3 για συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$. Όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης μειώνεται η περιεκτικότητα, ενώ τα πιο λεπτά μεγέθη είναι πιο πλούσια σε Fe_2O_3 .

Αντίστοιχα με το Διάγραμμα 4.11, στο διάγραμμα 4.16 το λεπτό μέγεθος -0,075 mm είναι πιο πλούσιο από τα υπόλοιπα μεγέθη, ενώ όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης του, μειώνεται η περιεκτικότητα του SiO_2 στο μέγεθος. Τέλος, όσον αφορά το διάγραμμα 4.17, η περιεκτικότητα % του κλάσματος σε TiO_2 αυξάνεται, όσο το μέγεθος του μειώνεται. Επομένως προκύπτει πως η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του συναντάται στο μέγεθος -0,075 mm. Γενικά δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη διακύμανση των τιμών της περιεκτικότητας στα κλάσματα, καθώς η περιεκτικότητα και στα τέσσερα κλάσματα, στους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης κυμαίνεται από 3 - 4,5%.



Διάγραμμα 4.16.: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % SiO₂, σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης



Διάγραμμα 4.17: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % TiO₂, σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης

4.3.3 Χημική ανάλυση κλασμάτων για πλήρωση σφαιρόμυλου $f_c = 0,15$

Τα τελευταία αποτελέσματα για το πρώτο κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, το οποίο αφορά την εκλεκτική λειοτρίβηση για τον εμπλουτισμό μεταλλεύματος βωξίτη, προκύπτουν από την 3^η τροφοδοσία, για $f_c = 0,15$ όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5. Παρουσιάζονται αναλυτικά η περιεκτικότητα, το βάρος και η κατανομή των οξειδίων στους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης.

Πίνακας 20: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,15$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 2 \text{ min}$

$f_c = 0,15$	$t = 2 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	41,13	63,00	18,42	1,71	3,76	36,84	3,42	42,43	37,48	37,78	39,32
0,3	30,22	62,32	19,19	1,69	3,84	36,86	3,25	30,85	28,69	27,45	29,51
0,075	17,47	60,73	20,76	1,62	3,99	37,38	2,92	17,37	17,94	15,24	17,72
-0,075	11,18	51,09	28,75	3,25	4,73	15,72	1,78	9,36	15,90	19,53	13,45
	100,00	61,07	20,22	1,86	3,93	32,80	3,02	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 21: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,15$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 4 \text{ min}$

$f_c = 0,15$	$t = 4 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι (%)		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	40,51	63,35	18,07	1,76	3,73	36,05	3,51	42,05	36,08	37,45	38,39
0,3	27,29	61,92	19,61	1,61	3,89	38,57	3,16	27,69	26,38	23,04	26,98
0,075	18,72	61,02	20,55	1,62	3,96	37,56	2,97	18,72	18,97	16,00	18,84
-0,075	13,48	52,23	27,96	3,32	4,61	15,74	1,87	11,53	18,58	23,51	15,79
	100,00	61,03	20,29	1,90	3,94	32,10	3,01	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 22: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,15$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 8 \text{ min}$

$f_c = 0,15$	$t = 8 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	32,03	64,24	17,13	1,70	3,64	37,77	3,75	33,34	27,78	29,61	30,12
0,3	24,67	63,16	18,54	1,54	3,77	41,04	3,41	25,25	23,16	20,63	24,02
0,075	24,84	62,26	19,50	1,59	3,89	39,25	3,19	25,06	24,53	21,42	24,96
-0,075	18,47	54,66	26,22	2,82	4,38	19,36	2,08	16,36	24,53	28,34	20,90
	100,00	61,71	19,75	1,84	3,87	33,55	3,13	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 23: Χημική ανάλυση ενοποιημένων κλασμάτων με πλήρωση $f_c = 0,15$ σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 12 \text{ min}$

$f_c = 0,15$	$t = 12 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Μεγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
1,18	26,73	63,77	17,45	1,80	3,73	35,51	3,65	27,90	23,09	25,86	25,29
0,3	21,10	62,71	18,65	1,55	3,83	40,50	3,36	21,66	19,48	17,60	20,50
0,075	29,10	62,20	19,34	1,54	3,88	40,42	3,22	29,63	27,87	24,12	28,64
-0,075	23,11	54,99	25,84	2,60	4,36	21,12	2,13	20,81	29,57	32,42	25,56
	100,03	61,08	20,20	1,86	3,94	32,91	3,02	100,00	100,00	100,00	100,00

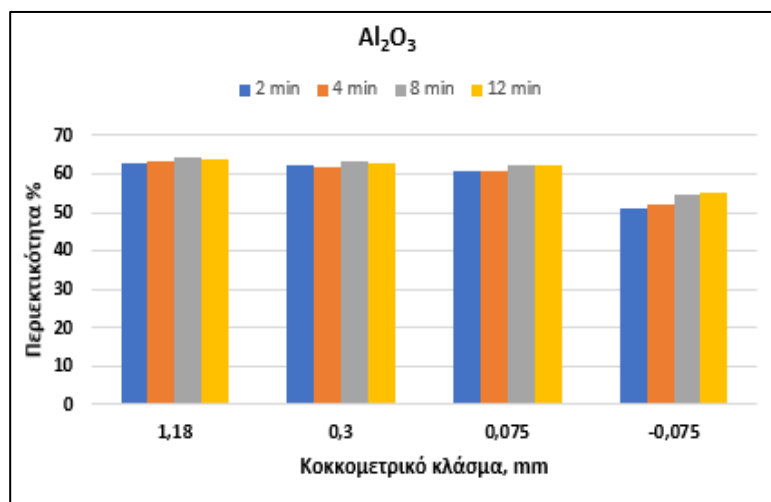
Στους πίνακες 20 – 23 προκύπτει ότι οι περιεκτικότητες % και η διακύμανση των τιμών ακολουθούν την ίδια τάση σε σχέση με τις προηγούμενες τροφοδοσίες.

Η μεγαλύτερη τιμή στην περιεκτικότητα του Al₂O₃ είναι στο χρόνο λειοτρίβησης 8 min, μέγεθος +1,18 mm και είναι ίση με 64,24 % (αύξηση 4,1%) με κατανομή 33,34%, ενώ η περιεκτικότητα % επιλεγμένων οξειδίων στο κλάσμα αυτό είναι 17,13% για το Fe₂O₃, 1,70% για το SiO₂ και τέλος 3,64% για το TiO₂. Όσον αφορά τα υπόλοιπα οξείδια, η μικρότερη τιμή του Fe₂O₃ βρίσκεται στο χρόνο 8 min, μέγεθος +1,18 mm και είναι 17,13% (μείωση 13,26%) με κατανομή 27,78%. Τέλος, η μεγαλύτερη τιμή στην περιεκτικότητα του TiO₂ είναι 4,73% (αύξηση 20,26%) στο χρόνο 2 min και μέγεθος - 0,075 mm. Όσον αφορά τους λόγους, ο λόγος Al/Si παραμένει σε ψηλά επίπεδα σε όλα

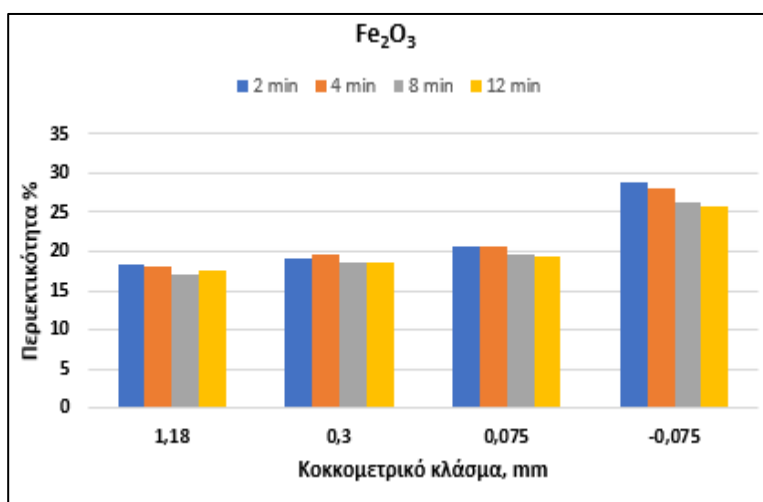
τα κλάσματα, ενώ ο λόγος Al/Fe δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή. Συγκεκριμένα, ο λόγος Al/Si παρουσιάζει μέγιστη τιμή στο χρόνο 8 min, στο κλάσμα +1.18 mm, η οποία είναι ίση με 41,04 ενώ παρουσιάζει μικρότερη τιμή στο χρόνο 2 min και κλάσμα -0,075 mm, και είναι ίση με 15,72. Η μείωση της τιμής του λόγου στα λεπτομερή κλάσματα είναι αναμενόμενη, καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα του Al_2O_3 ενώ παράλληλα αυξάνεται η περιεκτικότητα του SiO_2 . Ο λόγος Al/Fe παρουσιάζει μέγιστη τιμή στον χρόνο 8 min, και στο κλάσμα +1,18 mm, και είναι ίση με 3,75.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων επιλεγμένων οξειδίων για το συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,15$ στα διαγράμματα 4.18-4.21.

Στο Διάγραμμα 4.18 παρατηρείται η ίδια τάση όπως και στα αντίστοιχα



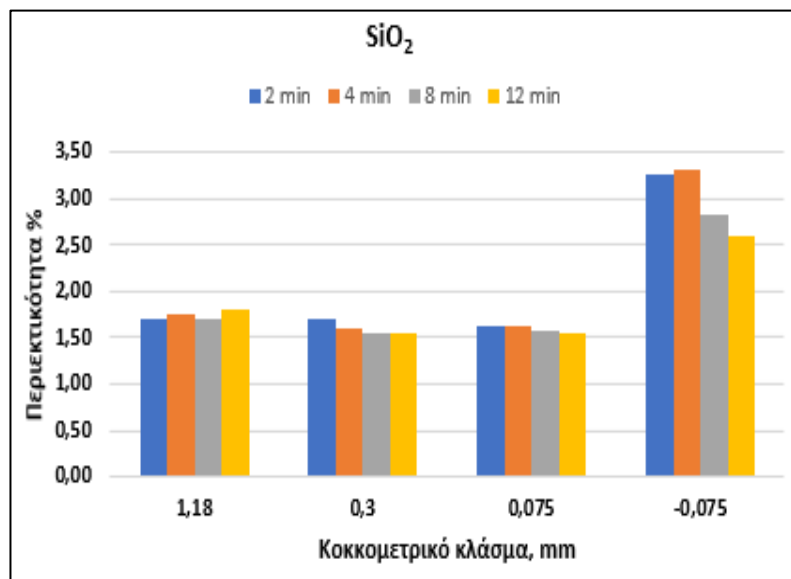
Διάγραμμα 4.18: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % Al_2O_3 , σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης για



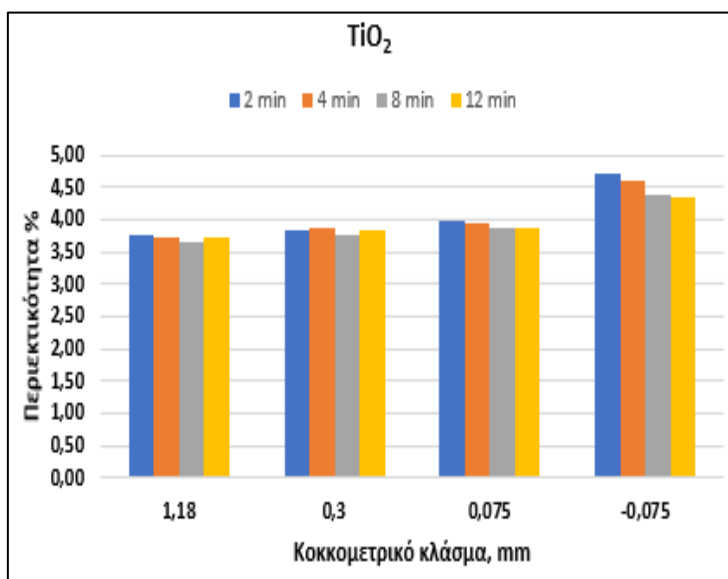
Διάγραμμα 4.19: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % Fe_2O_3 , σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης

διαγράμματα 4.10 και 4.14, στους συντελεστές $f_c = 0,05$ και $0,1$. Η περιεκτικότητα μειώνεται όσο μειώνεται το μέγεθος, ενώ αυξάνεται όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης του υλικού. Συγκεκριμένα, οι υψηλές περιεκτικότητες % σε Al_2O_3 είναι στο χονδρό μέγεθος (+1.18 mm), ενώ οι χαμηλές περιεκτικότητες στο λεπτό μέγεθος (-0,075 mm). Όσον αφορά το Διάγραμμα 4.19 παρουσιάζεται η ίδια τάση με τα αντίστοιχα διαγράμματα του Fe_2O_3 στους συντελεστές $f_c = 0,05$ και $0,1$. Συγκεκριμένα, οι χαμηλές περιεκτικότητες του

υλικού είναι στο χονδρό μέγεθος (+1.18 mm) ενώ οι υψηλές περιεκτικότητες στο πιο λεπτομερές μέγεθος (-0.075 mm). Επιπλέον, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος λειοτρίβησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του Fe_2O_3 στο υλικό.



Διάγραμμα 4.20: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % SiO_2 , σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης



Διάγραμμα 4.21: Συγκεντρωτικό γράφημα περιεκτικότητας % TiO_2 , σε κάθε ενοποιημένο κλάσμα, με τον αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης

Στο Διάγραμμα 4.20, υπάρχει τάση αύξησης της περιεκτικότητας % του μεγέθους +1,18 mm σε Fe_2O_3 , όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης, ενώ στα υπόλοιπα μεγέθη -1,18+0,300 mm, -0,300+0,075 mm, -0,075 mm συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης μειώνεται η περιεκτικότητα του SiO_2 στο μέγεθος. Στο μέγεθος -0,075 mm η περιεκτικότητα % του SiO_2 αυξάνεται κατακόρυφα, ενώ στα υπόλοιπα μεγέθη παραμένει στα ίδια επίπεδα. Τέλος, στο Διάγραμμα 4.21, παρατηρείται η ίδια τάση όπως και στα αντίστοιχα διαγράμματα του TiO_2 στους συντελεστές $f_c = 0,05$ και $0,1$. Όσο μειώνεται το μέγεθος αυξάνεται η περιεκτικότητα του σε TiO_2 , με τη μεγαλύτερη αύξηση στο λεπτό μέγεθος (-0,075 mm). Στα μεγέθη +1,18 mm και -1,18+0,300 mm δεν παρουσιάζεται κάποια τάση όσον αφορά το χρόνο λειοτρίβησης, ενώ

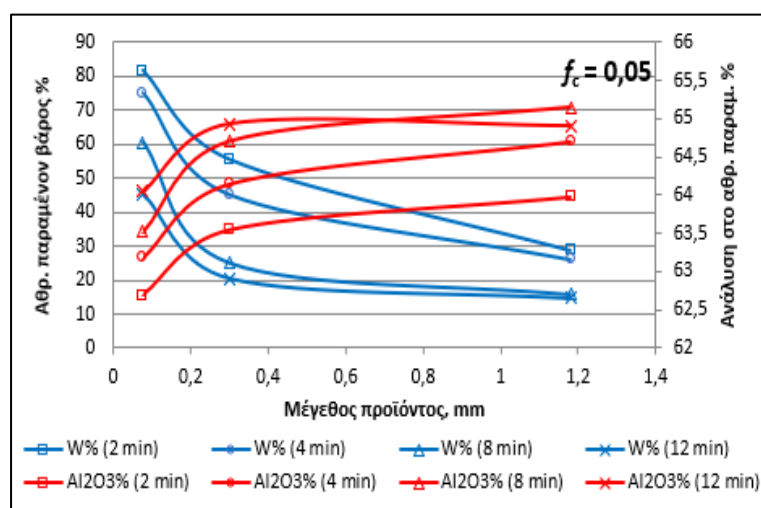
στα μεγέθη $-0,300+0,075$ mm και $-0,075$ mm, όσο μεγαλώνει ο χρόνος μειώνεται η περιεκτικότητα του SiO_2 στο μέγεθος.

4.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Λειοτρίβησης

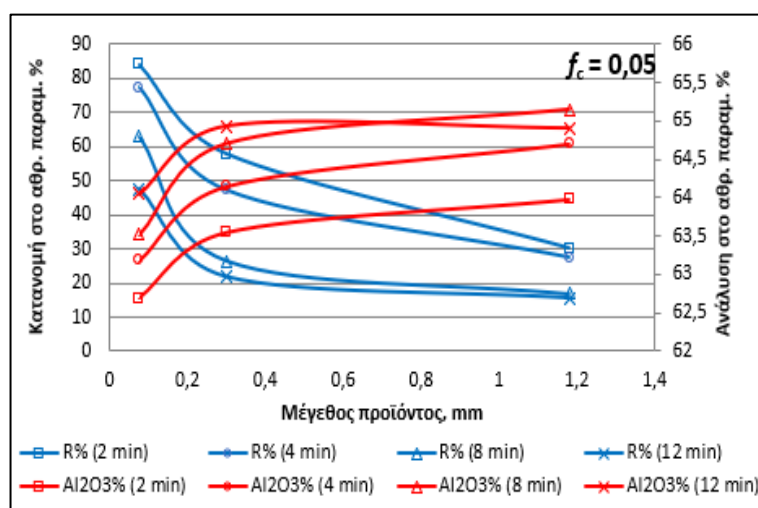
4.4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$

Τα αποτελέσματα της δοκιμής για το παραμένον βάρος στον κάθε χρόνο λειοτρίβησης, στην πλήρωση του μύλου $f_c = 0,05$, παρουσιάζονται στους πίνακες Π4-Π7 του παραρτήματος Β.

Τα διαγράμματα (4.22 – 4.23) παρουσιάζουν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένοντος βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε Al_2O_3 σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος. Σε αυτά τα διαγράμματα, παρουσιάζεται επίσης η αθροιστική κατανομή βάρους του Al_2O_3 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.22: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένοντος βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του Al_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης,



Διάγραμμα 4.23: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένον βάρος, σε σχέση με την ανάλυση του Al_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Στο Διαγράμμα 4.22, όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος τόσο αυξάνεται το αθροιστικώς παραμένον βάρος, ενώ συγχρόνως μειώνεται η περιεκτικότητα % σε Al_2O_3 κάτω από αυτό το μέγεθος. Γενικά, για το ίδιο μέγεθος προϊόντος, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο μικρότερο είναι το βάρος που έχει παραμείνει σε αυτό. Αντίθετα, με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης παρατηρείται και αύξηση της περιεκτικότητας % σε

Al_2O_3 πάνω από αυτό το μέγεθος, γεγονός που δείχνει ότι σε μεγαλύτερα ενεργειακά επίπεδα το υλικό πάνω από κάθε μέγεθος εμπλουτίζεται ως προς το Al_2O_3 . Η περιεκτικότητα % σε Al_2O_3 του κλάσματος +1,18 mm είναι 63,98% και μειώνεται σε 62,69% στο κλάσμα +0,075 mm, για χρόνο λειοτρίβησης 2 min ενώ στα αντίστοιχα κλάσματα, για χρόνο λειοτρίβησης 12 min είναι 64,91% και μειώνεται σε 64,05% (βλέπε Π4, Π7, παράρτημα Β).

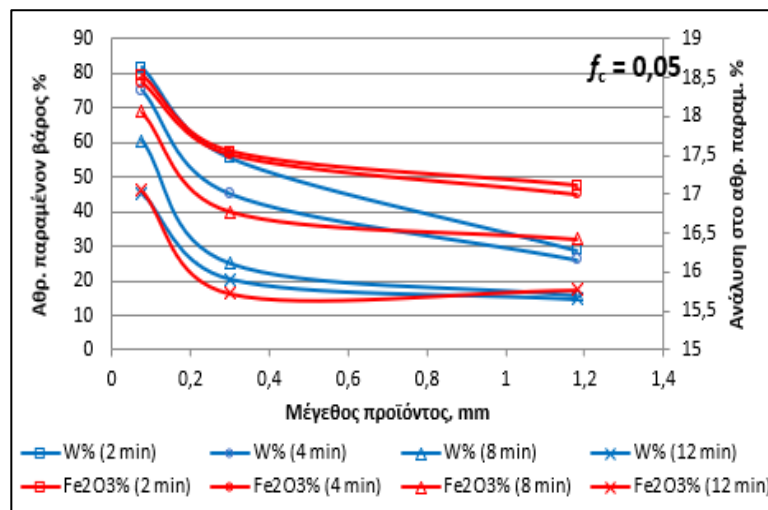
Όσον αφορά το Διάγραμμα 4.23, παρατηρείται ότι η κατανομή % στο αθροιστικώς παραμένον (ανάκτηση, R%) του Al_2O_3 αυξάνεται όσο το μέγεθος του προϊόντος μειώνεται, ενώ συγχρόνως μειώνεται η ανάλυσή του. Για το ίδιο μέγεθος προϊόντος, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο μειώνεται η αθροιστική κατανομή βάρους πάνω από αυτό. Σύμφωνα με τους πίνακες Π4-Π7 (παράρτημα Β), ανάκτηση Al_2O_3 μεγαλύτερη από 70% επιτυγχάνεται στο μέγεθος +0,075 mm, μετά από χρόνο λειοτρίβησης 2 min. Πιο συγκεκριμένα, η ανάκτηση του Al_2O_3 ανέρχεται στο 84,02%, με σχετικά καλή ανάλυση, η οποία ισούται με 62,69% (αύξηση 2,70%). Η ανάλυση του Fe_2O_3 στο κλάσμα αυτό είναι 18,53% (μείωση 7,08%), ενώ του TiO_2 ανέρχεται στο 3,67% (μείωση 3,80%). Ο στόχος ανάκτησης (>70%) του Al_2O_3 ικανοποιείται και στο χρόνο λειοτρίβησης 4 min, στο ίδιο μέγεθος +0,075 mm, με μικρότερη ανάκτηση η οποία ανέρχεται στο 77,47% με ανάλυση 63,19% (αύξηση 3,10%) ενώ στα άλλα δύο οξειδία του μεγέθους παρατηρείται ανάλυση 18,44% (μείωση 8,83%) για το Fe_2O_3 και ανάλυση 3,75% (μείωση 3,87%) στο TiO_2 .

Για χρόνους 8 και 12 min ο στόχος δεν ικανοποιείται σε κανένα από τα τέσσερα μεγέθη.

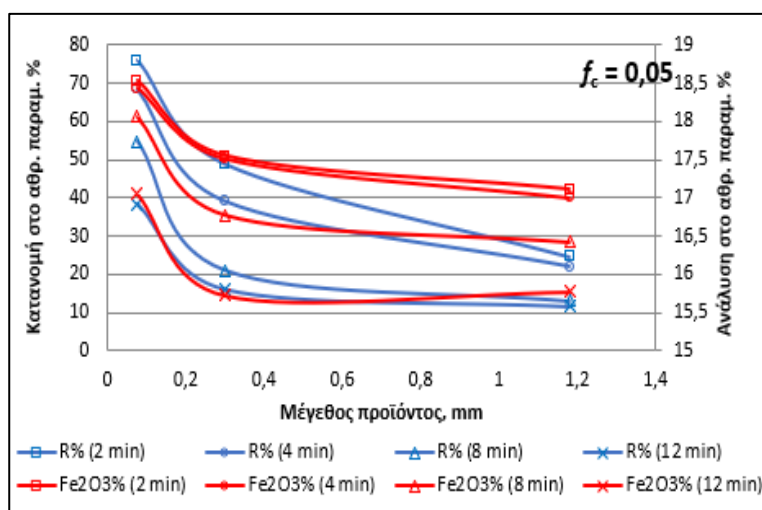
Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα Al_2O_3 είναι 65,15% (αύξηση 6,29%) στο χονδρό κλάσμα +1,18 mm, για χρόνο λειοτρίβησης 8 min, με ανάκτηση 16,85%. Όσον αφορά το Fe_2O_3 στο μέγεθος, η ανάλυση του ανέρχεται στο 16,42% (μείωση 17,94%) ενώ για το TiO_2 η ανάλυση ανέρχεται στο 3,44% (μείωση 4,51%).

Τα διαγράμματα (4.24 – 4.25), παρουσιάζουν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένοντος βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε Fe_2O_3 σε

σχέση με το μέγεθος του προϊόντος καθώς και την αθροιστική κατανομή βάρους % του Fe_2O_3 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.24: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένου βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του Fe_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

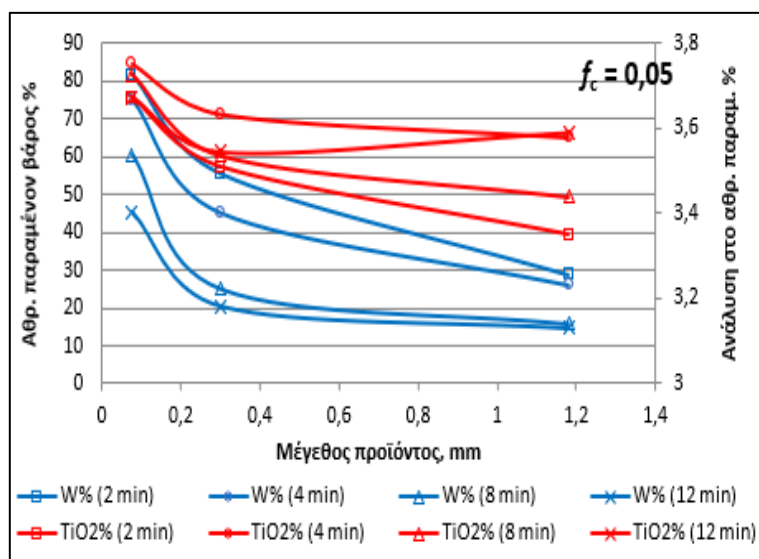


Διάγραμμα 4.25: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένον βάρος, σε σχέση με την ανάλυση του Fe_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

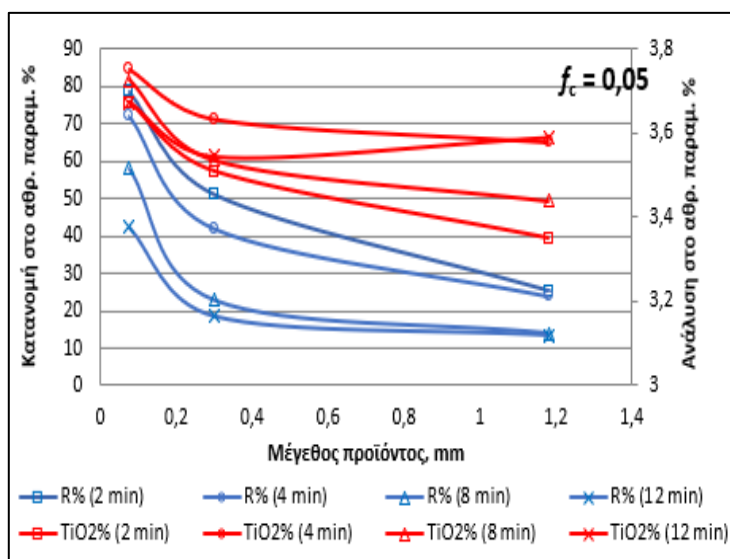
Πιο συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 4.24, παρατηρείται ότι όσο μειώνεται το μέγεθος προϊόντος αυξάνεται το αθροιστικώς παραμένον βάρος, ενώ συγχρόνως αυξάνεται και η περιεκτικότητα % σε Fe_2O_3 . Γενικά, για το ίδιο μέγεθος προϊόντος, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, μειώνεται το αντίστοιχο αθροιστικό βάρος και συγχρόνως μειώνεται και η περιεκτικότητα % σε Fe_2O_3 . Η περιεκτικότητα % του μεγέθους +1,18 mm για χρόνο λειοτρίβησης 2 min είναι 17,11% και αυξάνεται σε 18,53% στο +0,075 mm ενώ στα αντίστοιχα μεγέθη, για χρόνο λειοτρίβησης 12 min είναι 15,77% και αυξάνεται σε 17,06%. (Π4, Π7, παράρτημα Β).

Ίδια τάση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.25 που αφορά την ανάκτηση R% του Fe_2O_3 . Τόσο η κατανομή στο αθροιστικώς παραμένον, όσο και η ανάλυση του αυξάνονται όσο μειώνεται το μέγεθος του υλικού. Επιπλέον, για το ίδιο μέγεθος, τόσο η περιεκτικότητα, όσο και η κατανομή % του βάρους μειώνονται όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης.

Τέλος, στα διαγράμματα (4.26 – 4.27), παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένου βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε TiO_2 σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος. Στα διαγράμματα αυτά, παρουσιάζεται επίσης, και η αθροιστική κατανομή βάρους του TiO_2 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.26: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένου βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του TiO_2 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης



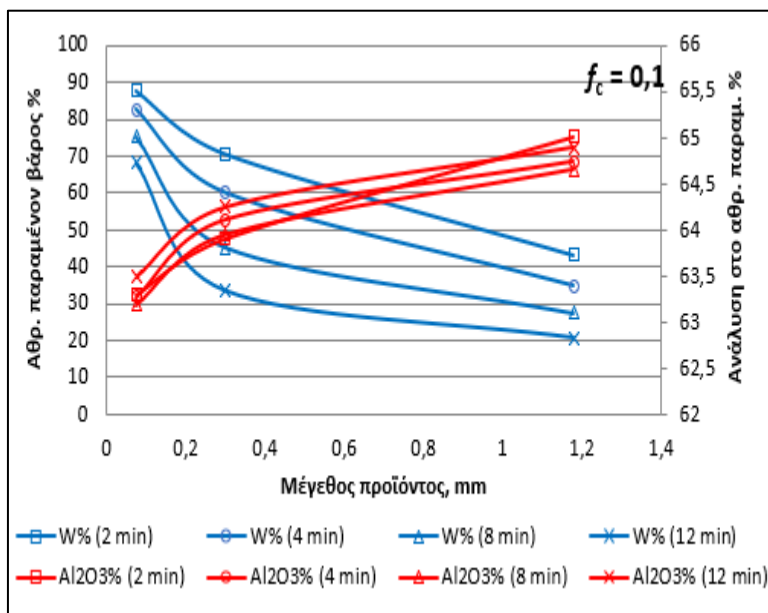
Διάγραμμα 4.27: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένον βάρος, σε σχέση με την ανάλυση του TiO_2 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Στο Διάγραμμα 4.26 η ανάλυση % του TiO_2 ακολουθεί την καμπύλη του αθροιστικώς παραμένου βάρους. Παρατηρώντας τους χρόνους λειοτρίβησης σε κάθε μέγεθος, προκύπτει ότι όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης, μειώνεται το αθροιστικώς βάρος που υπάρχει σε αυτά. Όσον αφορά την περιεκτικότητα, δεν παρουσιάζει σαφή τάση σε σχέση με τη μεταβολή του χρόνου λειοτρίβησης, ενώ η διακύμανση της στα μεγέθη είναι μικρότερη από 0,5%. Στο Διάγραμμα 4.27, παρατηρείται η ίδια τάση με το Διάγραμμα 4.26. Η κατανομή % βάρους αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος των προϊόντων, ενώ μειώνεται όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης του μεταλλεύματος.

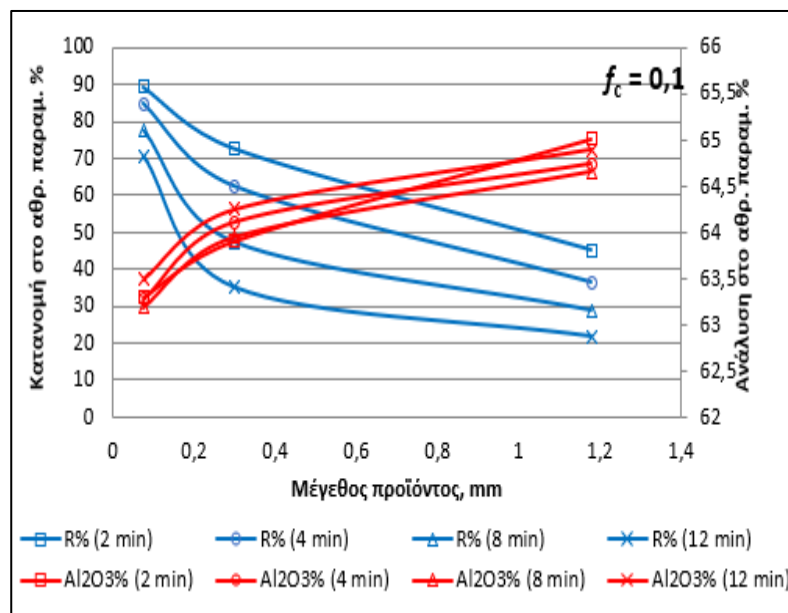
4.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για πλήρωση $f_c = 0,1$

Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες Π8-Π11 στο παράρτημα Β. Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως ο στόχος για ανάκτηση 70% Al_2O_3 ικανοποιείται σε πέντε συνολικά μεγέθη.

Στα διαγράμματα (4.28 – 4.29) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένου βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε Al_2O_3 σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος καθώς και η αθροιστική κατανομή βάρους του Al_2O_3 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.28: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένου βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του Al_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης



Διάγραμμα 4.29: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένου βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του Al_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Στο Διαγράμμα 4.28, όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος τόσο αυξάνεται το αθροιστικώς παραμένου βάρους, ενώ συγχρόνως μειώνεται η περιεκτικότητα % σε Al_2O_3 κάτω από αυτό το μέγεθος. Γενικά, παρατηρείται η ίδια τάση όπως και στο αντίστοιχο Διάγραμμα 4.22 για συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$. Η περιεκτικότητα % σε Al_2O_3 του μεγέθους +1,18 mm είναι 65,01% και μειώνεται σε 63,29% στο κλάσμα +0,075 mm, για χρόνο λειοτρίβησης 2 min, ενώ στα αντίστοιχα μεγέθη για χρόνο λειοτρίβησης 12 min, η

περιεκτικότητα % σε Al_2O_3 είναι 64,84% και μειώνεται σε 63,49% (βλέπε Π8, Π11, παράρτημα Β).

Όσον αφορά το Διάγραμμα 4.29, η κατανομή % του Al_2O_3 στο αθροιστικώς παραμένον (ανάκτηση R %) αυξάνεται όσο το μέγεθος του προϊόντος μειώνεται, ενώ συγχρόνως μειώνεται η ανάλυση του. Στο ίδιο μέγεθος προϊόντος, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, μειώνεται η κατανομή βαρους ενώ αυξάνεται η ανάλυση του. Σύμφωνα με τον Π 8 (παράρτημα Β) ο στόχος για ανάκτηση Al_2O_3 μεγαλύτερη από 70% ικανοποιείται στα μεγέθη +0,300 mm και +0,075 mm για χρόνο λειοτρίβησης 2 min. Η ανάκτηση ανέρχεται στο 72,6% και 89,3%, με ανάλυση 63,9% (αύξηση 2,90%) και 63,29% (αύξηση 1,91%) αντίστοιχα. Όσον αφορά τα υπόλοιπα οξείδια, στο μέγεθος +0,300 mm η περιεκτικότητα για το Fe_2O_3 ανέρχεται στο 18,35% (μείωση 7,25%), ενώ για το TiO_2 είναι ίση με 3,88% (μείωση 2,39%). Στο μέγεθος +0,075 mm η τιμή της περιεκτικότητας για το Fe_2O_3 ανέρχεται στο 18,80% (μείωση 4,87%), ενώ για το TiO_2 ανέρχεται στο 3,91% (μείωση 1,61%).

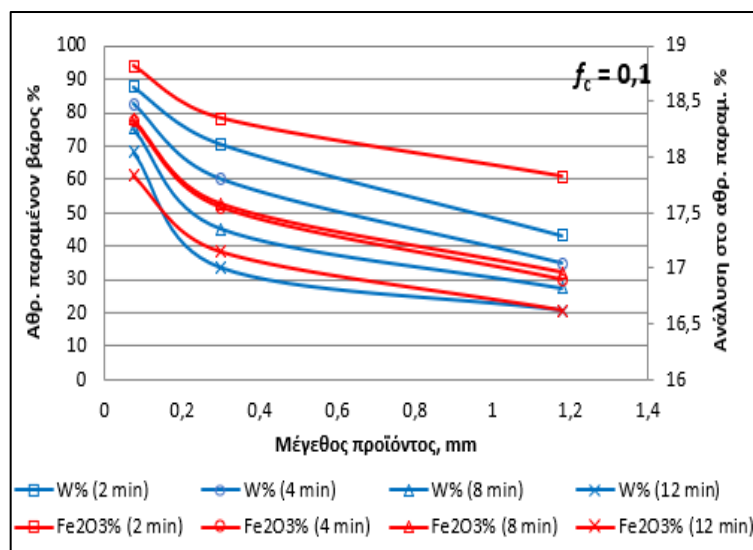
Για χρόνους λειοτρίβησης 4,8,12 min ο στόχος ανάκτησης του Al_2O_3 ικανοποιείται στο ίδιο μέγεθος +0,075 mm. (Π9, Π10, Π11, παράρτημα Β)

Στο χρόνο 4 min, η ανάκτηση κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα, και ανέρχεται στο 84,85% (αύξηση 2,65%) με ανάλυση σχετικά καλή ανάλυση 63,28%. Για το Fe_2O_3 η ανάλυση είναι 18,33% (μείωση 7,61%) ενώ για το TiO_2 η ανάλυση είναι 3,73% (μείωση 3,74%). Όσον αφορά το χρόνο 8 min, η ανάκτηση του Al_2O_3 ανέρχεται στο 77,67% με ανάλυση 63,19% (αύξηση 3,37%), ενώ για τα υπόλοιπα οξείδια στο μέγεθος, η ανάλυση ανέρχεται στο 18,34% (μείωση 9,16%) για το Fe_2O_3 , και 3,75% (μείωση 4%) για το TiO_2 . Τέλος, στο χρόνο 12 min η ανάκτηση του Al_2O_3 έχει την μικρότερη τιμή που συναντήθηκε και ικανοποιεί τον στόχο. Βρίσκεται ακριβώς στο όριο με τιμή 70,62%. Η ανάλυση είναι 63,49% (αύξηση 3,55%). Για τα άλλα οξείδια του μεγέθους, η περιεκτικότητα για το Fe_2O_3 ανέρχεται στο 17,84% (μείωση 10,39%) ενώ για το TiO_2 3,81% (μείωση 3,49%).

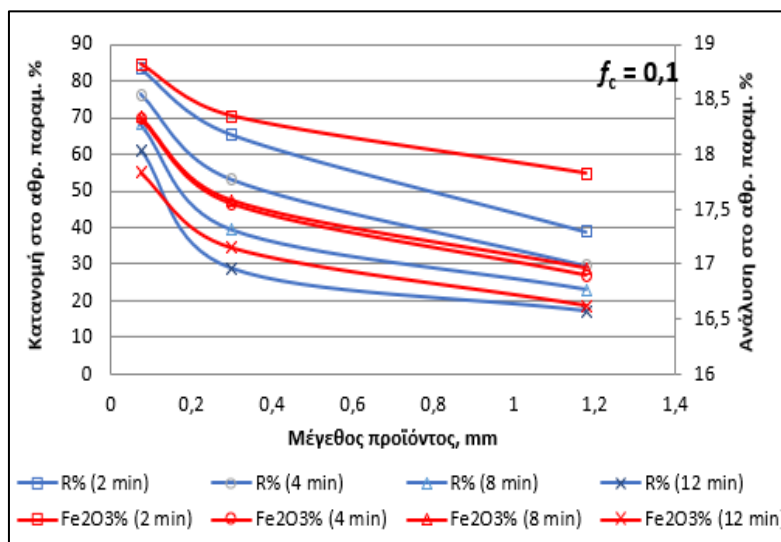
Η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας % του Al_2O_3 συναντάται στο μέγεθος +1,18 και χρόνο λειοτρίβησης 2 min, με τιμή 65,01% (αύξηση 4,68%) και κατανομή 45,19%. Στα

υπόλοιπα οξείδια του μεγέθους παρατηρείται 17,83% (μείωση 9,89%) περιεκτικότητα για το Fe_2O_3 , και τέλος, περιεκτικότητα για το TiO_2 3,94% (μείωση 0,92%).

Στα διαγράμματα (4.30 – 4.31) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένου βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε Fe_2O_3 σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος. Σε αυτά τα διαγράμματα, παρουσιάζεται επίσης η αθροιστική κατανομή βάρους του Fe_2O_3 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.30: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένου βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του Fe_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης



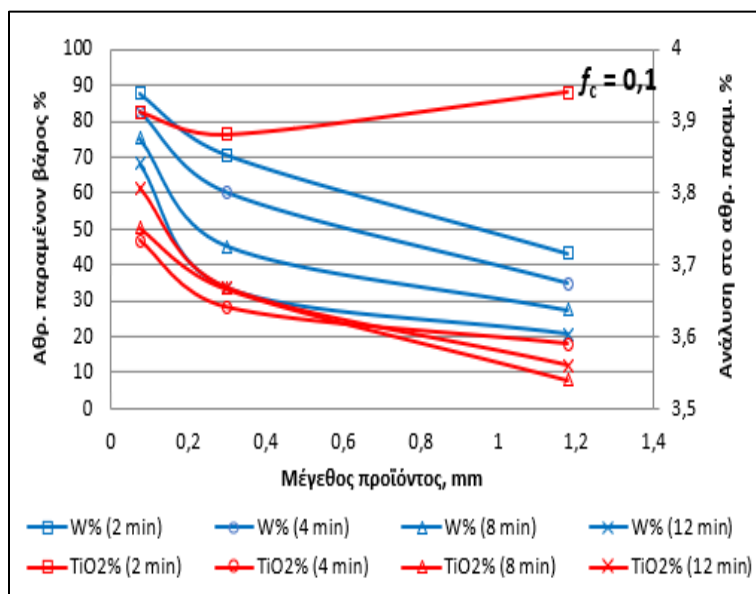
Διάγραμμα 4.31: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένον βάρος, σε σχέση με την ανάλυση του Fe_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Όσον αφορά το Fe_2O_3 , από το Διάγραμμα 4.30 προκύπτει ότι η περιεκτικότητα % αυξάνεται καθώς το μέγεθος μειώνεται. Την ίδια τάση ακολουθεί και το αθροιστικώς παραμένον βάρος καθώς αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος. Γενικά παρατηρείται η ίδια τάση όπως και στο αντίστοιχο διάγραμμα 4.24 για τον συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$. Η περιεκτικότητα % του κλάσματος +1,18 mm για χρόνο λειοτρίβησης 2 min είναι 17,83% και αυξάνεται σε 18,82% στο +0,075 mm ενώ στα αντίστοιχα μεγέθη, για χρόνο λειοτρίβησης 12 min είναι 16,62% και αυξάνεται σε 17,84%. (Π8, Π11, παράρτημα Β)

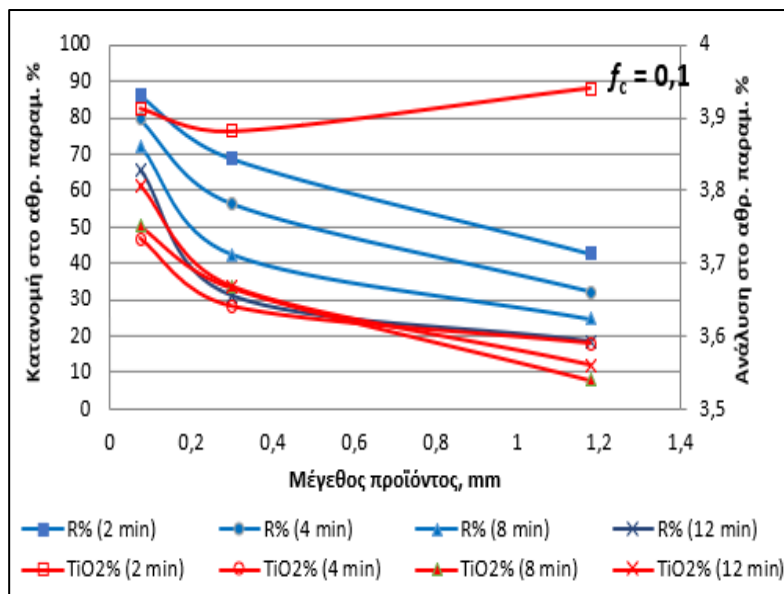
Στο Διάγραμμα 4.31 παρατηρείται η ίδια τάση όπως και στο διάγραμμα 4.30. Η κατανομή ακολουθεί την καμπύλη της ανάλυσης. Η κατανομή στο αθροιστικώς παραμένον (ανάκτηση R %) καθώς και η ανάλυση του Fe_2O_3 αυξάνονται όσο το μέγεθος

μειώνεται. Για το ίδιο μέγεθος, τόσο η ανάκτηση, όσο και η κατανομή βάρους μειώνονται όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης.

Τέλος, στα διαγράμματα (4.32 – 4.33) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένου βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε TiO_2 σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος. Στα διαγράμματα, παρουσιάζεται και η αθροιστική κατανομή βάρους του TiO_2 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.32: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένου βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του TiO_2 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης



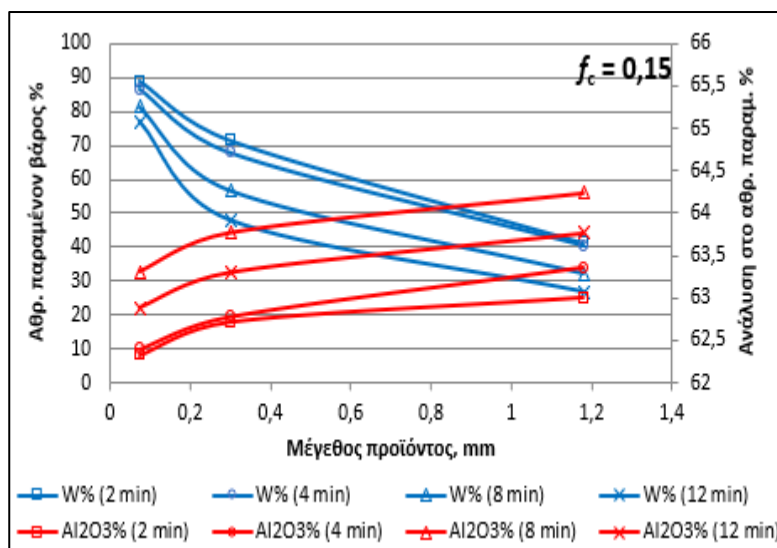
Διάγραμμα 4.31 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένον βάρος, σε σχέση με την ανάλυση του TiO_2 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Στο Διάγραμμα 4.32 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, μειώνεται το αθροιστικώς παραμένον βάρος στο αντίστοιχο κλάσμα. Η περιεκτικότητα αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος προϊόντος, εκτός από το χρόνο λειοτρίβησης 2 min που παρουσιάζει μέγιστη τιμή στο χονδρό κλάσμα. Γενικά, όσον αφορά τους χρόνους λειοτρίβησης σε σχέση με την περιεκτικότητα % του TiO_2 , δεν παρατηρείται σαφή τάση, ενώ η διακύμανση των τιμών είναι μικρότερη από 0,5%. Ίδια τάση παρατηρείται και στο Διάγραμμα 4.33. Όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης, η ανάκτηση % του Fe_2O_3 στο αντίστοιχο μέγεθος μειώνεται.

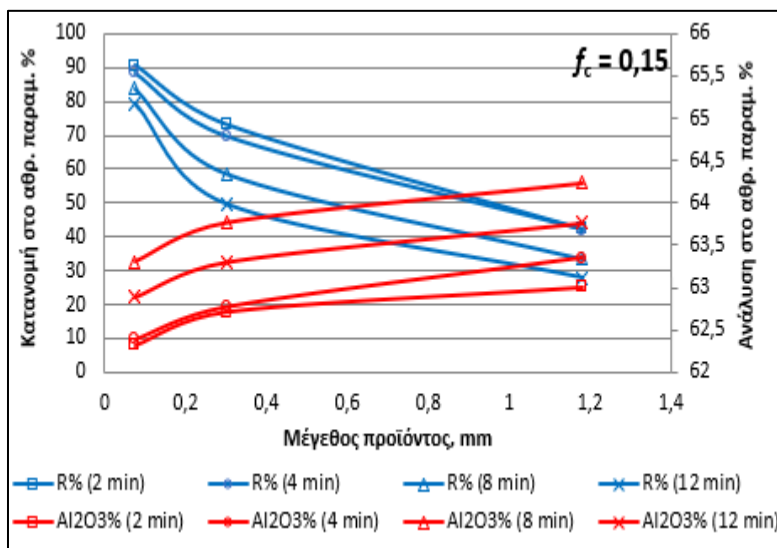
4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για πλήρωση $f_c = 0,15$

Στους πίνακες Π12-Π15 του παραρτήματος Β, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για το αθροιστικώς παραμένον βάρος σε κάθε χρόνο λειοτρίβησης, στο συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,15$. Από τα αποτελέσματα του πίνακα προκύπτει πως ο στόχος για ανάκτηση Al_2O_3 μεγαλύτερη από 70% ικανοποιείται σε πέντε συνολικά μεγέθη.

Τα διαγράμματα (4.34 – 4.39) παρουσιάζουν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένοντος βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε Al_2O_3 σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος καθώς και η αθροιστική κατανομή βάρους του Al_2O_3 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.34: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένοντος βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του Al_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους



Διάγραμμα 4.35 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένον βάρος, σε σχέση με την ανάλυση του Al_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Στο Διάγραμμα 4.34, όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης του μεταλλεύματος, μειώνεται το αθροιστικώς παραμένον βάρος στο αντίστοιχο κλάσμα. Όσον αφορά την περιεκτικότητα % σε Al_2O_3 , παρατηρείται τάση αύξησης της όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης σε κάθε μέγεθος, με εξαίρεση τους χρόνους 8 και 12 min, όπου ο χρόνος λειοτρίβησης 8 min παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές περιεκτικότητας και στα τρία μεγέθη, σε σχέση με το χρόνο 12 min. Στο Διάγραμμα 4.35, παρουσιάζεται ίδια τάση όπως και στο διάγραμμα 4.34. Η ανάλυση του Al_2O_3 μειώνεται; όσο μειώνεται το μέγεθος προϊόντος, ενώ συγχρόνως στο ίδιο μέγεθος η ανάλυση % μειώνεται όσο μειώνεται ο

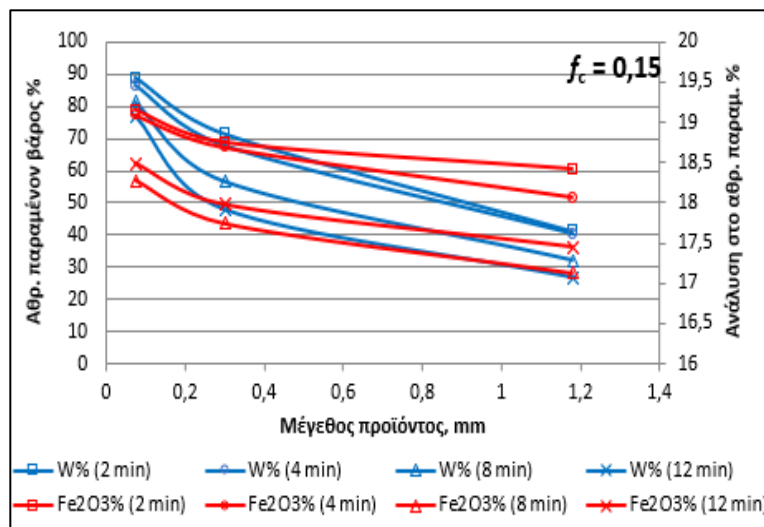
χρόνος λειοτρίβησης, με εξαίρεση τους χρόνους 8 και 12 min, όπως προαναφέρθηκε στο διάγραμμα 4.34. Η κατανομή % του Al_2O_3 στο αθροιστικώς παραμένον (ανάκτηση R %) αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος του υλικού, ενώ στο ίδιο μέγεθος, μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης. Σύμφωνα με τους πίνακες Π8-Π12 (παράρτημα Β), ο στόχος ανάκτησης (>70%) του Al_2O_3 επιτυγχάνεται στα μεγέθη +0,300 mm και +0,075 mm για χρόνο λειοτρίβησης 2 min (Π 12, παράρτημα Β). Η ανάκτηση ανέρχεται στο 73,28% και 90,64%, με ανάλυση 62,72% (αύξηση 2,70%) και 62,32% (αύξηση +2,06%) αντίστοιχα. Η ανάκτηση 90,64% αποτελεί τη μέγιστη τιμή ανάκτησης που συναντήθηκε στα αποτελέσματα, με σχετικά καλή ανάλυση 62,32%. Όσον αφορά τα υπόλοιπα οξείδια, στο μέγεθος +0,300 mm η περιεκτικότητα για το Fe_2O_3 ανέρχεται στο 18,75% (μείωση 7,27%) και για το TiO_2 3,79% (μείωση 3,53%). Στο μέγεθος +0,075 mm η τιμή της περιεκτικότητας για το Fe_2O_3 ανέρχεται στο 19,14% (μείωση 4,87%), ενώ για το TiO_2 η περιεκτικότητα ανέρχεται στο 3,83% (μείωση 2,55%).

Στους χρόνους λειοτρίβησης 4,8,12 min ο στόχος ανάκτησης του Al_2O_3 ικανοποιείται στο ίδιο μέγεθος +0,075 mm (Π 13, Π 14, Π 15, παράρτημα Β).

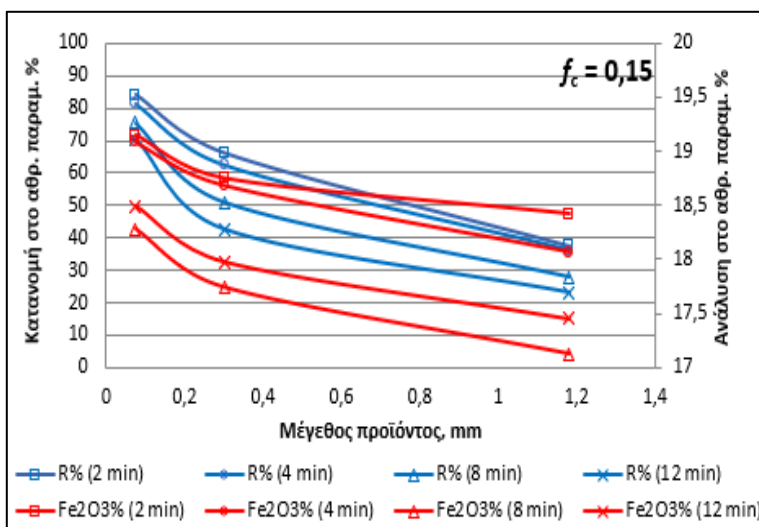
Στο χρόνο 4 min, η ανάκτηση κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα, και ανέρχεται στο 84,47% με ανάλυση σχετικά καλή ανάλυση 62,4%(αύξηση 2,25%). Για το Fe_2O_3 η περιεκτικότητα ανέρχεται στο 19,09% (μείωση 5,89%) ενώ για το TiO_2 η περιεκτικότητα είναι 3,83% (μείωση 2,67%). Όσον αφορά το χρόνο 8 min, η ανάκτηση του Al_2O_3 ανέρχεται στο 83,64% με ανάλυση 63,31% (αύξηση 2,59%), ενώ για τα υπόλοιπα οξείδια στο μέγεθος, η περιεκτικότητα για το Fe_2O_3 είναι 18,28% (μείωση 7,43%) και για το TiO_2 είναι 3,76% (μείωση 2,98%). Τέλος, στον χρόνο 12 min η ανάκτηση του Al_2O_3 ανέρχεται στο 79,19% με περιεκτικότητα 62,8% (αύξηση 2,95%) . Για τα εναπομείναντα οξείδια του μεγέθους, η ανάλυση για Fe_2O_3 ανέρχεται στο 18,49% (μείωση 8,44%) ενώ για το TiO_2 στο 3,81% (μείωση 3,23%).

Η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας του Al_2O_3 είναι στο μέγεθος +1,18 μετά από χρόνο λειοτρίβησης 8 min, με τιμή 64,24% (αύξηση 4,03%) και κατανομή 33,34%. Στα υπόλοιπα οξείδια του μεγέθους παρατηρείται 17,13% (μείωση 13,25%) περιεκτικότητα για το Fe_2O_3 και τέλος, 3,64% (μείωση 5,96%) για το TiO_2 .

Στα διαγράμματα (4.36 – 4.37) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένουστος βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε Fe_2O_3 σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος. Σε αυτά τα διαγράμματα, παρουσιάζεται επίσης η αθροιστική κατανομή βάρους του Fe_2O_3 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.36: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένουστος βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του Fe_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

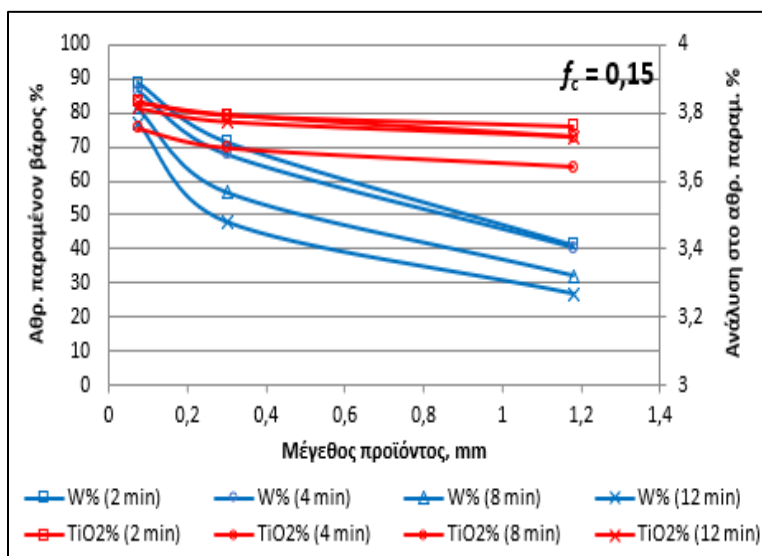


Διάγραμμα 4.37: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένον βάρος, σε σχέση με την ανάλυση του Fe_2O_3 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

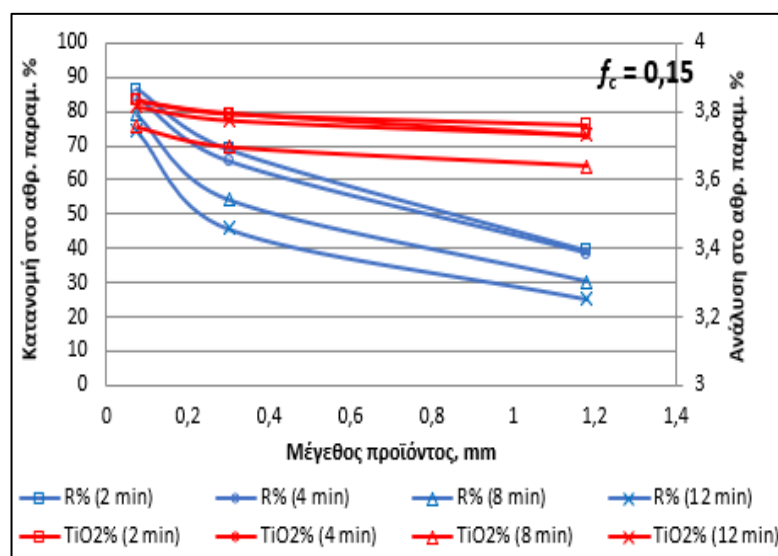
Στο Διάγραμμα 4.36, όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος, αυξάνεται η περιεκτικότητα του στα μεγέθη. Επίσης, όσο μεγαλώνει ο χρόνος λειοτρίβησης, μειώνεται το αθροιστικώς παραμένον βάρος στα αντίστοιχα μεγέθη. Γενικά, όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, μειώνεται η περιεκτικότητα % του Fe_2O_3 στο μέγεθος, με εξαίρεση τους χρόνους 8 και 12 min, όπου η ελάχιστη τιμή βρίσκεται στον χρόνο 8 min αντί για το χρόνο 12 min. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους πίνακες Π 12, Π 14 (παράρτημα Β), η περιεκτικότητα % του κλάσματος +1,18 mm για χρόνο λειοτρίβησης 2 min είναι 18,42% και αυξάνεται σε 19,42% στο +0,075 mm ενώ στα αντίστοιχα μεγέθη, για χρόνο λειοτρίβησης 8 min είναι 17,13% και αυξάνεται σε 18,28%. Όσον αφορά το διάγραμμα 4.37, ακολουθεί την ίδια τάση με το διάγραμμα 4.36. Η κατανομή % του Fe_2O_3 (ανάκτηση R %) καθώς και η ανάλυση % του, αυξάνονται όσο μειώνεται το μέγεθος του υλικού ενώ συγχρόνως, στο ίδιο μέγεθος όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης μειώνεται η ανάλυση

και η κατανομή για το Fe_2O_3 , με εξαίρεση τους χρόνους 8 και 12 min όπως προαναφέρθηκε.

Τέλος, στα διαγράμματα (4.38 – 4.39) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αθροιστικώς παραμένουστος βάρους με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες % σε TiO_2 σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος. Στα διαγράμματα παρουσιάζεται και η αθροιστική κατανομή βάρους του TiO_2 για κάθε μέγεθος προϊόντος.



Διάγραμμα 4.38: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του αθροιστικώς παραμένουστος βάρους, σε σχέση με την ανάλυση του TiO_2 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης



Διάγραμμα 4.39: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ανάκτησης, στο αθροιστικώς παραμένον βάρος, σε σχέση με την ανάλυση του TiO_2 για τους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Στο Διάγραμμα 4.38 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, μειώνεται το αθροιστικώς παραμένον βάρος στο αντίστοιχο μέγεθος, ενώ το αθροιστικώς παραμένον βάρος συνολικά αυξάνεται, καθώς το μέγεθος του προϊόντος μειώνεται. Οσον αφορά την ανάλυση % του TiO_2 , δεν παρουσιάζει σαφή τάση, ούτε ιδιαίτερη μεταβολή όσον αφορά τον χρόνο λειοτρίβησης και το μέγεθος του προϊόντος. Τέλος, η ανάκτηση του TiO_2 στο Διάγραμμα 4.39 παρουσιάζει την ίδια τάση με την καμπύλη του αθροιστικώς παραμένουστος βάρους, στο Διάγραμμα 4.38.

4.5 Δοκιμές Επίπλευσης

Τα αποτελέσματα από την 1^η δοκιμή επίπλευσης (SHP, starch, oleic acid, pH = 10,5) που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού, παρουσιάζονται στον Πίνακα 24.

Πίνακας 24 : Αποτελέσματα 1^{ης} δοκιμής Επίπλευσης (SHP, starch, oleic acid, pH=10,5)

1 ^η δοκιμή		Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
Συμπύκνωμα	11,73	64,12	21,67	1,87	4,90	34,29	2,96	11,71	11,61	11,28	11,85
Συμπύκνωμα 2	26,87	64,93	20,53	1,76	4,80	36,89	3,16	27,16	25,20	24,31	26,60
Απόρριμμα2	61,40	63,94	22,53	2,04	4,86	31,34	2,84	61,13	63,20	64,41	61,55
	100,00	64,23	21,89	1,94	4,85	33,02	2,93	100,00	100,00	100,00	100,00

Από τη διακύμανση των τιμών της περιεκτικότητας % σε Al₂O₃, δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη μεταβολή. Συγκεκριμένα, η τιμή του συμπυκνώματος είναι 64,12% (μείωση 0,16%), ενώ του απορρίμματος 63,94% (μείωση 0,45%). Η διαφορά μεταξύ των δύο, είναι ελάχιστη έως αμελητέα. Η μοναδική αύξηση περιεκτικότητας % σε Al₂O₃ είναι στο συμπύκνωμα 2 με τιμή 64,93% (αύξηση 1,09%). Επίσης, η διακύμανση της περιεκτικότητας του Fe₂O₃, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή. Συγκεκριμένα, η τιμή του συμπυκνώματος είναι 21,67% (μείωση 1,01%) ενώ η τιμή του απορρίμματος 22,53% (αύξηση 2,91%). Παρατηρώντας τη διακύμανση και στα υπόλοιπα οξείδια, προκύπτει πως δεν υπάρχει ιδιαίτερη μεταβολή μεταξύ των προϊόντων επίπλευσης.

Στη 2^η δοκιμή επίπλευσης δεν παρουσιάστηκε κάποια βελτίωση όσον αφορά τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 25.

Πίνακας 25 Αποτελέσματα 2^{ης} δοκιμής Επίπλευσης (SHP, oleic acid, pH=8)2

2η δοκιμή		Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
Συμπύκνωμα	56,90	56,49	24,23	2,28	4,30	24,78	2,33	56,62	57,44	60,08	56,39
Απόρριμμα	43,10	57,15	23,70	2,00	4,39	28,58	2,41	43,38	42,56	39,92	43,61
	100,00	56,77	24,00	2,16	4,34	26,29	2,37	100,00	100,00	100,00	100,00

Από τις αναλύσεις των προϊόντων, δεν προκύπτει εμπλουτισμός του μεταλλεύματος. Αρχικά, παρατηρείται αντίθετο από το αναμενόμενο αποτέλεσμα όσον

αφορά την περιεκτικότητα του Al_2O_3 . Συγκεκριμένα, προκύπτει πως η μεγαλύτερη τιμή είναι στο απόρριμμά και όχι στο συμπύκνωμα, γεγονός που αντιβαίνει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Η τιμή του Al_2O_3 στο συμπύκνωμα είναι 56,49% (μείωση 0,5%) με κατανομή βάρους 56,62% ενώ στο απόρριμμα είναι 57,15% (αύξηση 0,66%) με κατανομή βάρους 43,38%. Το ίδιο παρατηρείται και στην περιεκτικότητα των προϊόντων για το Fe_2O_3 , μόνο που η αναμενόμενη τιμή έπρεπε να είναι μεγαλύτερη στο απόρριμμα, και όχι στο συμπύκνωμα. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του συμπυκνώματος είναι 24,23% (αύξηση 0,95%) ενώ του απορρίμματος είναι 23,70% (μείωση 1,26%).

Τα αποτελέσματα της 3^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 26.

Πίνακας 26: Αποτελέσματα 3^{ης} δοκιμής Επίπλευσης (SHP, Sodium metasilicate, oleic acid, pH=8)

3η δοκιμή		Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al/Si	Al/Fe	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
Συμπύκνωμα	22,50	53,06	26,73	2,68	4,45	19,80	1,99	20,85	26,60	28,89	23,04
Συμπύκνωμα2	43,55	59,34	20,53	1,81	4,24	32,78	2,89	45,14	39,56	37,77	42,50
Απόρριμμα	33,95	57,36	22,53	2,05	4,41	27,98	2,55	34,01	33,84	33,34	34,46
	100,00	57,25	22,60	2,09	4,34	27,43	2,53	100,00	100,00	100,00	100,00

Παρατηρώντας τις αναλύσεις των προϊόντων, προκύπτει ότι η διαδικασία δεν ήταν επιτυχής. Αρχικά, το Al_2O_3 έχει μικρότερη τιμή περιεκτικότητας στο συμπύκνωμα και όχι στο απόρριμμα. Συγκεκριμένα, οι δύο τιμές είναι 53,06% (μείωση 7,36%) και 57,36% (αύξηση 0,18%) με κατανομή 20,85% και 34,01% αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη τιμή του είναι στο συμπύκνωμα 2 με περιεκτικότητα 59,34% (αύξηση 3,64%) και κατανομή 45,14%. Όσον αφορά το Fe_2O_3 , η περιεκτικότητά του είναι μεγαλύτερη στο συμπύκνωμα, με τιμή 26,73% (αύξηση 18,25%) ενώ στο απόρριμμα είναι 22,53% (μείωση 0,23%). Τέλος, στα δύο άλλα στοιχεία δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή. Το TiO_2 παραμένει στα ίδια επίπεδα, ενώ στο SiO_2 παρουσιάζεται μια μικρή μείωση στην περιεκτικότητά του στο συμπύκνωμα 2, ενώ αυξάνεται ξανά στο απόρριμμα.

4.6 Μαγνητικός Διαχωρισμός

Για την επίτευξη του μαγνητικού διαχωρισμού πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές, σε τρεις διαφορετικούς μαγνήτες. Ο χρόνος λειοτρίβησης υπολογίστηκε από τις συσχετίσεις του αθροιστικώς παραμένοντος βάρους για το μέγεθος +300 μm , με τον

αντίστοιχο χρόνο λειοτρίβησης (διάγραμμα 4.8) έτσι ώστε το 50% της τροφοδοσίας να διέρχεται από κόσκινο 0,300 mm. Από τις τρεις εξισώσεις, προέκυψαν τρεις χρόνοι λειοτρίβησης του υλικού για κάθε συντελεστή πλήρωσης f_c . Για την 1^η δοκιμή, με συντελεστή $f_c = 0,05$ ο χρόνος λειοτρίβησης είναι 2,72 min, για τη 2^η δοκιμή με συντελεστή $f_c = 0,1$ ο χρόνος λειοτρίβησης είναι 6,59 min και τέλος, για τη 3^η δοκιμή με συντελεστή $f_c = 0,15$ ο χρόνος λειοτρίβησης είναι 11 min.

Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες 27-29.

4.6.1 Μαγνητικός διαχωρισμός χρόνο λειοτρίβησης $t = 2,72$ min, και $f_c = 0,05$

Στον Πίνακα 27 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 1^{ης} δοκιμής για $f_c = 0,05$. Η τροφοδοσία για το μαγνητικό διαχωρισμό, προέκυψε μετά από χρόνο λειοτρίβησης $t = 2,72$ min.

Πίνακας 27: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κλάσματος -3,35+1,18 mm για χρόνο λειοτρίβησης $t=2,72$ min, μέσω του μαγνήτη perm role

		Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους(%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
M1	33,27	60,48	20,73	2,13	3,63	28,42	2,92	31,89	38,64	33,70	33,00
M2	39,05	64,29	16,68	2,15	3,65	29,94	3,85	39,78	36,51	39,91	38,95
MM2	27,67	64,61	16,03	2,00	3,71	32,23	4,03	28,33	24,86	26,40	28,05
Αρχικό	100	63,11	17,85	2,10	3,66	30,03	3,54	100	100	100	100

Το πρώτο κλάσμα -3,35+1,18 mm διαχωρίστηκε στον ταινιοφόρο μαγνήτη Perm role. Παρατηρώντας τις αναλύσεις των προϊόντων, προκύπτει ότι το Fe₂O₃ παρουσιάζει μικρότερη τιμή στο μη μαγνητικό προϊόν (MM2), καθώς τα μαγνητικά του σιδήρου συγκεντρώθηκαν στα δύο προϊόντα μαγνητικό 1 (M1) και μαγνητικό 2 (M2). Η τιμή στο MM2 είναι 16,03% (μείωση 10,17%), ενώ η περιεκτικότητα στο M1 είναι 20,73% (αύξηση 16,13%). Όσον αφορά το Al₂O₃, παρουσιάζεται μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας στο MM2, η οποία είναι 64,61% (αύξηση 2,37%) με κατανομή 28,33%, ενώ η μικρότερη τιμή είναι στο M1, με τιμή 60,48% και κατανομή 31,89%. Στο TiO₂ δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή στην περιεκτικότητά του. Τέλος, ο λόγος Al/As παραμένει σε υψηλά επίπεδα (≈ 30) και στα τρία προϊόντα του διαχωρισμού.

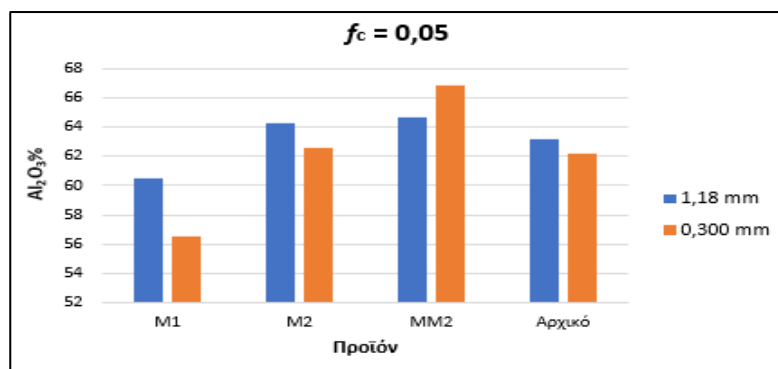
Το δεύτερο κλάσμα -1,18+0,300 mm διαχωρίστηκε στο μαγνήτη υψηλής έντασης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 28.

Πίνακας 28: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κλάσματος -1,18+0,300 mm, για χρόνο λειοτρίβησης $t=2,72$ min μέσω του μαγνήτη High-induced Role

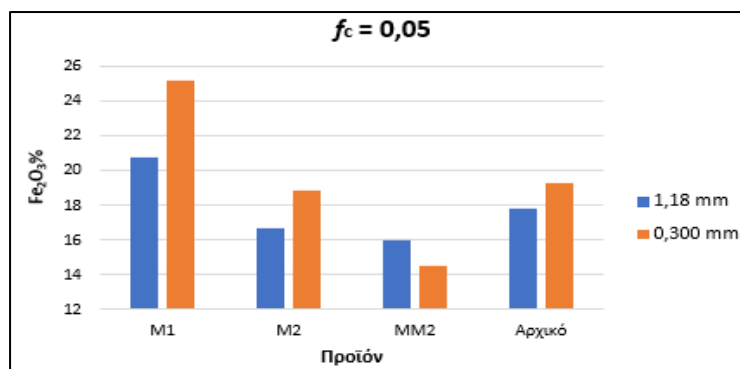
		Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
M1	37,04	56,56	25,16	2,12	3,82	26,69	2,25	33,68	48,26	48,34	37,46
M2	19,72	62,57	18,87	1,46	3,80	42,78	3,32	19,83	19,26	17,76	19,83
MM2	43,24	66,85	14,51	1,27	3,73	52,54	4,61	46,48	32,48	33,89	42,70
Αρχικό	100	62,20	19,31	1,62	3,78	38,31	3,22	100	100	100	100

Παρατηρείται ότι στο M1 αυξάνεται η περιεκτικότητα % σε Fe₂O₃ ενώ μειώνεται η περιεκτικότητα % σε Al₂O₃. Συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα για το Fe₂O₃ είναι 25,16% (αύξηση 30,28%) και για το Al₂O₃ είναι 56,56% (μείωση 9,06%) με κατανομή 33,68%. Στο MM2 προκύπτει ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα, καθώς η περιεκτικότητα σε Al₂O₃ είναι 66,85% (αύξηση 7,84%) με κατανομή 46,48% ενώ σε Fe₂O₃ είναι 14,51% (μείωση 24,89%). Όσον αφορά το TiO₂ δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη μεταβολή στην τιμή του. Τέλος, στο λόγο Al/Si παρουσιάζεται διακύμανση της περιεκτικότητας από 26 έως 52.

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα 4.40 - 4.41 των περιεκτικοτήτων Al₂O₃ και Fe₂O₃ για τα μεγέθη τροφοδοσίας +1,18 mm και +0,300 mm.



Διάγραμμα 4.40: Περιεκτικότητα % Al₂O₃ στα κλάσματα -3,35+1,18 mm και -1,18+0,300 mm, για τα αντίστοιχα προϊόντα του διαχωρισμού.



Διάγραμμα 4.41: Περιεκτικότητα % Fe₂O₃, κλάσματα -3,35+1,18 mm και -1,18+0,300 mm, για τα αντίστοιχα προϊόντα του διαχωρισμού.

Στο Διάγραμμα 4.40 παρουσιάζεται τάση αύξησης της περιεκτικότητας σε Al_2O_3 μεταξύ των προϊόντων του διαχωρισμού. Στα δύο κλάσματα, το προϊόν με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Al_2O_3 είναι το MM2 ενώ με μικρότερη το M1. Πιο συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα στο κλάσμα -1,18+0,300 mm είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το αντίστοιχο -3,35+1,18 mm, ενώ στο M1 ισχύει το αντίθετο, δηλαδή η περιεκτικότητα σε Al_2O_3 είναι μεγαλύτερη στο -3,35+1,18 mm ενώ στο -1,18+0,300 mm μικρότερη.

Όσον αφορά το Fe_2O_3 , από το Διάγραμμα 4.41 παρατηρείται τάση μείωσης από μεταξύ των προϊόντων του διαχωρισμού. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 μεταξύ των κλασμάτων είναι στο M1, ενώ στο MM2 η μικρότερη. Συγκεκριμένα, στο M1, η περιεκτικότητα του -1,18+0,300 mm είναι μεγαλύτερη από το -3,35+1,18 mm, ενώ στο MM2 η μεγαλύτερη περιεκτικότητα είναι στο -3,35+1,18 mm και η μικρότερη στο -1,18+0,300 mm.

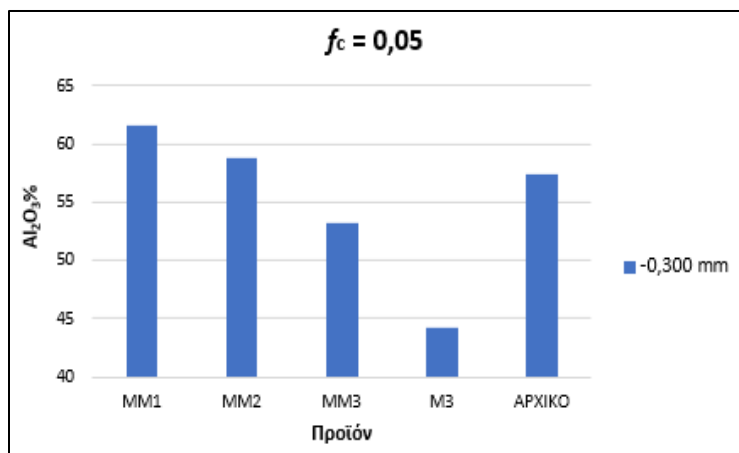
Τέλος, το μέγεθος -0,300 mm διαχωρίστηκε σε υγρό μαγνητικό διαχωριστή. Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στον Πίνακα 29.

Πίνακας 29: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο μέγεθος -0,300 mm, για χρόνο λειοτριβήσης $t=2,72$ min μέσω υγρού μαγνητικού διαχωριστή

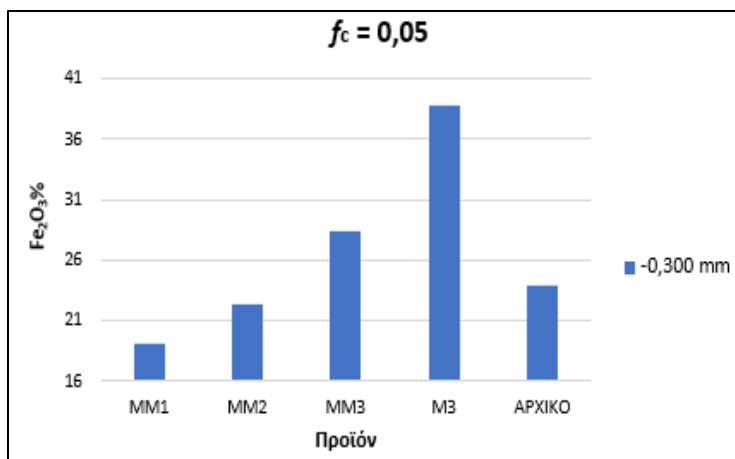
		Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al/Si	Al/Fe	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
MM1	37,28	61,59	19,10	1,94	4,67	31,67	3,22	40,05	29,81	32,39	37,60
MM2	28,90	58,74	22,38	2,11	4,60	27,89	2,63	29,62	27,08	27,20	28,71
MM3	26,96	53,19	28,34	2,52	4,64	21,15	1,88	25,02	31,99	30,30	27,02
M3	6,87	44,28	38,71	3,30	4,50	13,44	1,14	5,30	11,13	10,11	6,67
ΑΡΧΙΚΟ	100	57,31	23,89	2,24	4,63	25,61	2,40	100	100	100	100

Το μέγεθος -0,300 mm είναι το πιο λεπτομερές από τα τρία κλάσματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές του μαγνητικού διαχωρισμού. Η μεγαλύτερη τιμή του Fe_2O_3 παρατηρείται στο M3, με τιμή 38,71% (αύξηση 62,03%). Η μεγαλύτερη τιμή για το Al_2O_3 βρίσκεται στο MM1 και είναι 61,59% (αύξηση 7,46%) με κατανομή 40,05% ενώ το Fe_2O_3 στο προϊόν είναι 19,10% (μείωση 20,02%). Το TiO_2 δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή στην τιμή του, ενώ ο λόγος Al/Si κυμαίνεται από 13 έως 31, από το M3 στο MM1.

Στα διαγράμματα 4.42-4.43 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα των οξειδίων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 29.



Διάγραμμα 4.42: Περιεκτικότητα % Al₂O₃, για το μέγεθος -0,300 mm, στα αντίστοιχα προϊόντα του διαχωρισμού



Διάγραμμα 4.43: Περιεκτικότητα % Fe₂O₃, για το μέγεθος -0,300 mm στα αντίστοιχα προϊόντα του διαχωρισμού.

Στο Διάγραμμα 4.42 παρατηρείται τάση μείωσης της περιεκτικότητας του Al₂O₃. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Al₂O₃ είναι στο MM1 ενώ η μικρότερη στο M3. Αντιθέτως, στο Διάγραμμα 4.43 η περιεκτικότητα του Fe₂O₃ ακολουθεί ακριβώς την αντίθετη τάση. Παρουσιάζει αυξητική τάση στα προϊόντα του διαχωρισμού. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα είναι στο M3 ενώ η μικρότερη στο MM1.

4.6.2 Μαγνητικός διαχωρισμός σε χρόνο λειοτρίβησης $t=6,59$ min και $f_c = 0,1$

Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες 30-32. Η τροφοδοσία για τις δοκιμές προέκυψε από χρόνο λειοτρίβησης $t = 6,59$ min.

Στον Πίνακα 30, που αντιστοιχεί στο διαχωρισμό του κλάσματος -3,35+1,18 mm, παρουσιάζονται αναλυτικά οι αναλύσεις από κάθε προϊόν της δοκιμής.

Πίνακας 30: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κλάσματος -3,35+1,18 mm για χρόνο λειοτριβήσης $t=6,59$ min, μέσω του μαγνήτη perm role

		Ανάλυση (%)				Λόγοι (%)		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
M1	28,74	61,51	20,09	1,93	3,62	31,89	3,06	27,72	33,15	34,06	28,60
M2	35,82	64,24	16,94	1,62	3,72	39,55	3,79	36,08	34,83	35,74	36,62
MM	35,44	65,12	15,74	1,39	3,57	46,96	4,14	36,19	32,02	30,20	34,78
ΣΥΝΟΛΟ	100,00	63,77	17,42	1,63	3,64	39,18	3,66	100,00	100,00	100,00	100,00

Η μεγαλύτερη τιμή του Al₂O₃ είναι στο μη μαγνητικό προϊόν, με τιμή 65,12% (αύξηση 2,12%) και κατανομή 36,19%. Όσον αφορά το Fe₂O₃, η μέγιστη περιεκτικότητα % του είναι στο μαγνητικό 1 με τιμή 20,09% (αύξηση 15,34). Στο MM, η περιεκτικότητα του Fe₂O₃ είναι η μικρότερη που παρατηρείται με τιμή 15,74% (μείωση 9,66%). Το TiO₂ δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή και η περιεκτικότητά του κυμαίνεται στο 3,5%, ενώ ο λόγος Al/Si κυμαίνεται από 31 έως 46, από το M1 στο MM.

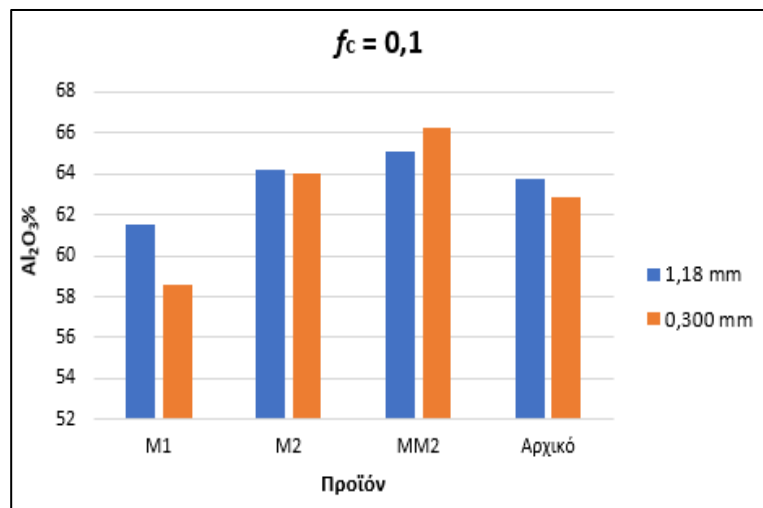
Τα αποτελέσματα για το διαχωρισμό του επόμενου κλάσματος -1,18+0,300 mm παρουσιάζονται στον Πίνακα 31.

Πίνακας 31: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού κλάσματος -1,18+0,300 mm, για χρόνο λειοτριβήσης $t=11$ min μέσω του μαγνήτη High-induced Role

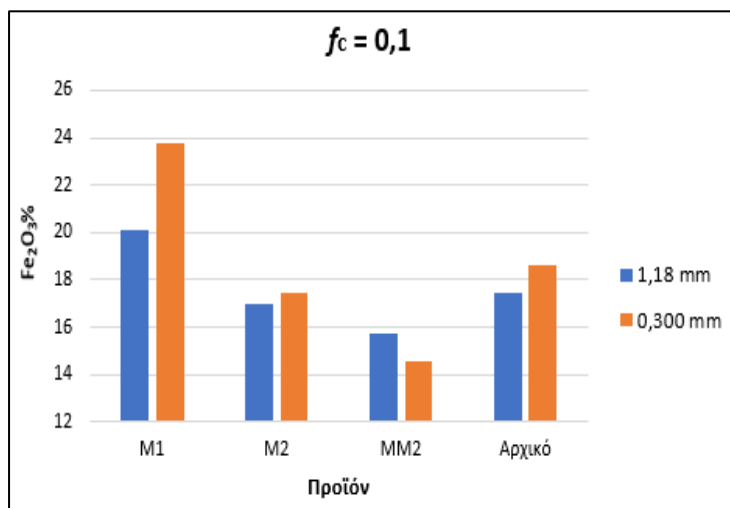
		Ανάλυση (%)				Λόγοι (%)		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
M1	38,33	58,57	23,75	1,97	3,70	29,78	2,47	35,70	48,79	47,89	37,72
M2	19,20	63,98	17,48	1,42	3,90	45,21	3,66	19,53	17,98	17,26	19,92
MM	42,47	66,29	14,60	1,29	3,75	51,33	4,54	44,77	33,22	34,85	42,36
ΣΥΝΟΛΟ	100,00	62,89	18,66	1,57	3,76	39,95	3,37	98,63	107,10	96,71	103,34

Από τον πίνακα 31 παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη περιεκτικότητα % σε Al₂O₃ είναι στο μη μαγνητικό προϊόν, με τιμή 66,29% (αύξηση 5,41%) και κατανομή 44,77%. Η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας για το Fe₂O₃ βρίσκεται όπως αναμένεται στο μαγνητικό προϊόν, με τιμή 23,75% (αύξηση 27%) ενώ η μικρότερη είναι στο μη μαγνητικό, με τιμή 14,60% (μείωση 21,17). Όσον αφορά το TiO₂, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή στα προϊόντα, και κυμαίνεται στο 3,80% ενώ ο λόγος Al/Si κυμαίνεται από 29 έως 51.

Στα διαγράμματα 4.44 - 4.45 παρουσιάζεται η διακύμανση της περιεκτικότητας των οξειδίων σε κάθε προϊόν.



Διάγραμμα 4.44: Περιεκτικότητα % Al_2O_3 στα κλάσματα $-3,35+1,18\text{ mm}$ και $-1,18+0,300\text{ mm}$ για τα αντίστοιχα προϊόντα του διαχωρισμού



Διάγραμμα 4.45: Περιεκτικότητα % Fe_2O_3 στα κλάσματα $-3,35+1,18\text{ mm}$ και $-1,18+0,300\text{ mm}$ για τα αντίστοιχα προϊόντα του διαχωρισμού.

Στο Διάγραμμα 4.44 η περιεκτικότητα του Al_2O_3 παρουσιάζει αυξητική τάση στα προϊόντα του διαχωρισμού. Μεταξύ των δύο κλασμάτων, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Al_2O_3 παρατηρείται στο MM2, ενώ η μικρότερη στο M1. Πιο συγκεκριμένα, το κλάσμα $-1,18+0,300$ έχει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο MM2, ενώ στο M1 τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα έχει το $-3,35+1,18\text{ mm}$. Όσον αφορά το Fe_2O_3 , από το Διάγραμμα 4.45 προκύπτει τάση μείωσης της περιεκτικότητας μεταξύ των προϊόντων του διαχωρισμού, και στα δύο κλάσματα. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα % του Fe_2O_3 παρατηρείται στο M1 και στα δύο κλάσματα, με μεγαλύτερη αυτήν του κλάσματος $-1,18+0,300\text{ mm}$, ενώ η μικρότερη περιεκτικότητα του είναι στο MM2, με μεγαλύτερη τιμή αυτήν του κλάσματος $-3,35+1,18\text{ mm}$.

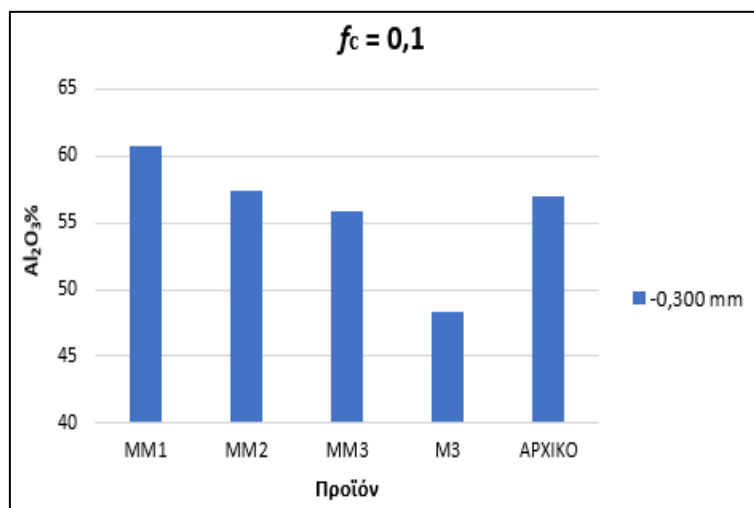
Στον Πίνακα 32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το διαχωρισμό του κλάσματος $-0,300\text{ mm}$.

Πίνακας 32: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού του μεγέθους -0,300 mm για χρόνο λειοτρίβησης $t=6,59 \text{ min}$, μέσω υγρού μαγνητικού διαχωριστή

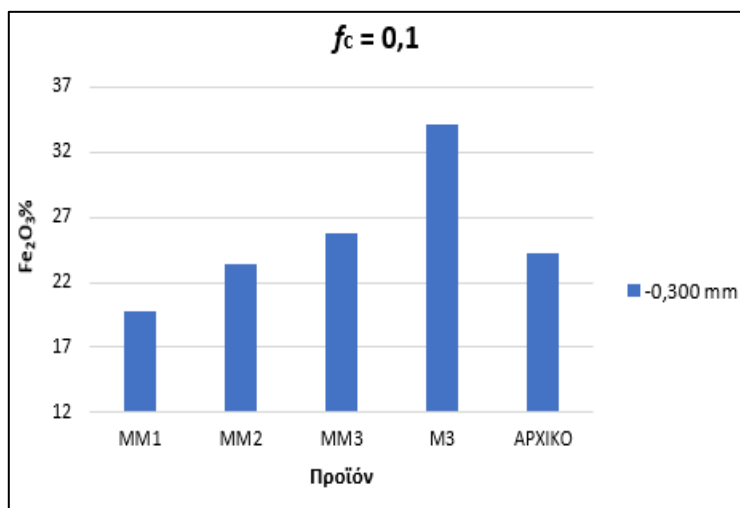
Προϊόν	Βάρος (%)	Ανάλυση (%)				Λόγοι (%)		Κατανομή (%)			
		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
MM1	41,44	60,72	19,77	1,94	4,81	31,38	3,07	44,17	33,90	36,37	42,87
MM2	19,91	57,36	23,43	2,21	4,73	25,94	2,45	20,05	19,30	19,96	20,25
MM3	22,53	55,91	25,74	2,17	4,46	25,73	2,17	22,11	23,99	22,20	21,61
M3	16,12	48,27	34,19	2,93	4,40	16,45	1,41	13,67	22,81	21,46	15,26
ΣΥΝΟΛΟ	100,00	56,96	24,17	2,20	4,65	25,84	2,36	100,00	100,00	100,00	100,00

Από τον Πίνακα 32 προκύπτει ότι η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας % του Al₂O₃ είναι στο MM1 με τιμή 60,72% (αύξηση 6,6%) και κατανομή 44,17%. Όσον αφορά την περιεκτικότητα % του Fe₂O₃, η μεγαλύτερη τιμή είναι στο M3, με τιμή 34,19% (αύξηση 41,4%) ενώ η μικρότερη τιμή είναι στο MM1 με τιμή 19,77% (μείωση 18,2%). Το TiO₂ δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτη μεταβολή, ενώ ο λόγος Al/Si κυμαίνεται από 16 έως 31 από το M3 έως MM1.

Στα διαγράμματα 4.46-4.47 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα των οξειδίων Al₂O₃, Fe₂O₃ σε κάθε προϊόν.



Διάγραμμα 4.46:: Περιεκτικότητα % Al₂O₃ για το μέγεθος -0,300 mm, στα αντίστοιχα προϊόντα του διαχωρισμού.



Διάγραμμα 4.47: Περιεκτικότητα % Fe₂O₃ για το μέγεθος -0,300 mm, στα αντίστοιχα προϊόντα του διαχωρισμού

Όπως και στα αντίστοιχα διαγράμματα του συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$, η περιεκτικότητα του Al₂O₃ στο Διάγραμμα 4.46, παρουσιάζει τάση μείωσης στα προϊόντα του διαχωρισμού. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Al₂O₃ παρατηρείται στο MM1, ενώ η

μικρότερη στο M3. Αντιθέτως, στο Διάγραμμα 4,47 που αφορά το Fe_2O_3 , η περιεκτικότητα παρουσιάζει αυξητική τάση στα προϊόντα. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα είναι στο M3 και η μικρότερη στο MM1.

4.6.3 Μαγνητικός διαχωρισμός σε χρόνο λειοτρίβησης $t = 11 \text{ min}$ και $f_c = 0,15$

Τα αποτελέσματα της δοκιμής για συντελεστή $f_c = 0,15$ παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες 33-35. Η τροφοδοσία του διαχωρισμού προέκυψε από χρόνο λειοτρίβησης $t = 11 \text{ min}$.

Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού του πρώτου κλάσματος $-3,35+1,18 \text{ mm}$ παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 33.

Πίνακας 33: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού του κλάσματος $-3,35+1,18 \text{ mm}$ για χρόνο λειοτρίβησης $t=11 \text{ min}$, μέσω του μαγνήτη Perm role

		Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al/Si	Al/Fe	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
M1	26,17	61,44	19,97	2,07	3,59	29,66	3,08	25,08	30,20	33,06	25,90
M2	40,41	64,62	17,05	1,58	3,64	40,98	3,79	40,73	39,82	38,86	40,55
MM	33,42	65,60	15,52	1,38	3,64	47,63	4,23	34,20	29,99	28,08	33,55
ΣΥΝΟΛΟ	100,00	64,12	17,30	1,64	3,63	39,11	3,71	100,00	100,00	100,00	100,00

Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα για το Al_2O_3 είναι 65,60% (αύξηση 2,31%) με κατανομή 34,20%. Όσον αφορά την περιεκτικότητα του Fe_2O_3 , η μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζεται, όπως αναμένεται στο M1 με τιμή 19,97% (αύξηση 15,40%) ενώ η μικρότερη τιμή είναι στο MM με τιμή 15,52% (μείωση -10,29%). Δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή στην περιεκτικότητα του TiO_2 , η οποία κυμαίνεται στο 3,60%, ενώ ο λόγος Al/Si κυμαίνεται από 29 έως 47.

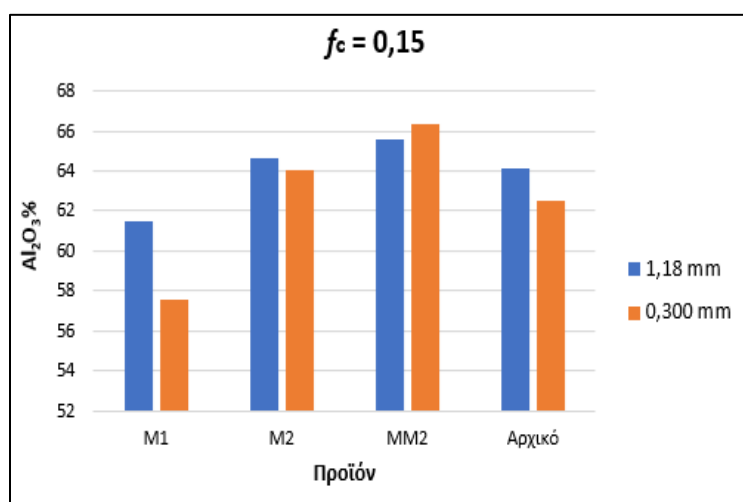
Παρακάτω, στον Πίνακα 34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του διαχωρισμού του κλάσματος -1,18+0,300 mm.

Πίνακας 34 Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού του κλάσματος -1,18+0,300 mm, για χρόνο λειοτρίβησης $t=11$ min, μέσω του μαγνήτη High induced Roll

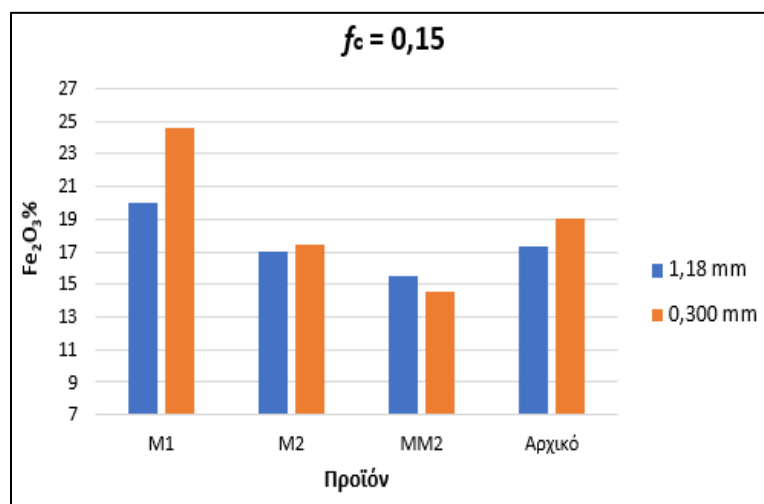
Προϊόν	Βάρος (%)	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
M1	39,22	57,54	24,54	2,05	3,84	28,04	2,35	36,12	50,65	49,82	39,69
M2	18,18	64,07	17,38	1,43	3,80	44,67	3,69	18,64	16,62	16,13	18,20
MM	42,60	66,35	14,60	1,29	3,75	51,37	4,55	45,24	32,72	34,05	42,10
ΣΥΝΟΛΟ	100,00	62,48	19,00	1,62	3,79	38,67	3,29	100,00	100,00	100,00	100,00

Από τον Πίνακα 34 προκύπτει ότι η μεγαλύτερη τιμή του Al₂O₃ βρίσκεται στο MM με τιμή 66,35% (αύξηση 6,19%) και κατανομή 45,24%. Όσον αφορά το Fe₂O₃, η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας του παρατηρείται στο M1 με τιμή 24,54% (αύξηση 29,14%), ενώ η μικρότερη τιμή της στο MM και ισούται με 14,60% (μείωση 29,18%). Η περιεκτικότητα του TiO₂ δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη μεταβολή. Τέλος, όσον αφορά τις τιμές του λόγου Al/Si, κυμαίνονται από 28 έως 51.

Στα διαγράμματα 48 - 49 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα των οξειδίων για κάθε προϊόν διαχωρισμού.



Διάγραμμα 48: Περιεκτικότητα % Al₂O₃ στα κλάσματα -3,35+1,18 mm και -1,18+0,300 mm σε κάθε προϊόν του διαχωρισμού



Διάγραμμα 49: Περιεκτικότητα % Fe₂O₃ στα κλάσματα -3,35+1,18 mm και -1,18+0,300 mm σε κάθε προϊόν του διαχωρισμού.

Στο Διάγραμμα 48 όπως και στα αντίστοιχα διαγράμματα του Al_2O_3 , παρουσιάζεται αυξητική τάση στην περιεκτικότητα % του Al_2O_3 στα προϊόντα του διαχωρισμού. η μεγαλύτερη τιμή και στα δύο κλάσματα είναι στο MM2 προϊόν. Συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα του Al_2O_3 στο κλάσμα -1,18+0.300 mm είναι μεγαλύτερη από το - 3,35+1,18 mm. Αντιθέτως, στο Διάγραμμα 49 που αφορά την περιεκτικότητα του Fe_2O_3 παρατηρείται τάση μείωσης της περιεκτικότητας του στα προϊόντα. Η μεγαλύτερη τιμή είναι στο M1 και στα δύο κλάσματα, ενώ το κλάσμα -1,18+0,300 mm παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας μεταξύ των δύο κλασμάτων στο M1.

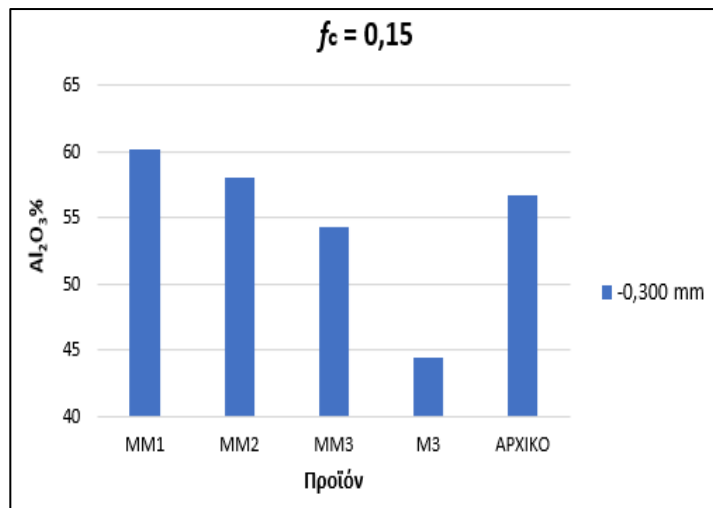
Τα αποτελέσματα από το διαχωρισμό του λεπτόκοκκου κλάσματος -0,300 mm παρουσιάζονται στον Πίνακα 35.

Πίνακας 35: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού για χρόνο λειοτρίβησης $t=11 \text{ min}$, μέσω υγρού μαγνητικού διαχωριστή

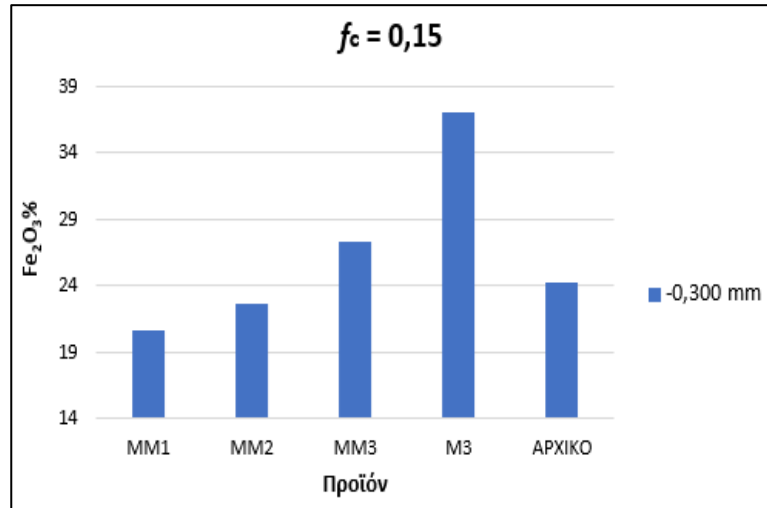
		Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή βάρους (%)			
Προϊόν	Βάρος (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al/Si	Al/Fe	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
MM1	44,16	60,17	20,57	2,14	4,72	28,06	2,92	46,84	37,45	41,06	45,07
MM2	23,94	58,09	22,62	2,20	4,65	26,39	2,57	24,52	22,32	22,86	24,07
MM3	21,18	54,24	27,36	2,34	4,50	23,14	1,98	20,26	23,88	21,53	20,61
M3	10,71	44,39	37,04	3,13	4,43	14,17	1,20	8,38	16,35	14,55	10,26
ΑΡΧΙΚΟ	100,00	56,73	24,26	2,31	4,63	24,60	2,34	100,00	100,00	100,00	100,00

Η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας % του Al_2O_3 είναι στο MM1, με τιμή 60,17% (αύξηση 6,07%) και κατανομή 46,84%. Όσον αφορά το Fe_2O_3 , η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας του παρατηρείται στο M3, με τιμή 37,04% (αύξηση 52,65%) ενώ η μικρότερη τιμή στο MM1, με τιμή 20,57% (μείωση 15,21%). Η περιεκτικότητα του TiO_2 δε μεταβάλλεται σημαντικά, και κυμαίνεται στο 4,5%, ενώ ο λόγος Al/Si κυμαίνεται από 14 έως 28.

Στα διαγράμματα 50-51 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα των οξειδίων για κάθε προϊόν διαχωρισμού.



Διάγραμμα 50: Περιεκτικότητα % Al_2O_3 για το μέγεθος -0,300 mm, σε κάθε προϊόν διαχωρισμού



Διάγραμμα 51: Περιεκτικότητα % Fe_2O_3 για το μέγεθος -0,300 mm, σε κάθε προϊόν διαχωρισμού

Στο Διάγραμμα 50 η περιεκτικότητα του Al_2O_3 παρουσιάζει τάση μείωσης στα προϊόντα του διαχωρισμού. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Al_2O_3 στο μέγεθος παρατηρείται στο MM1 ενώ η μικρότερη στο M3. Όσον αφορά την περιεκτικότητα του Fe_2O_3 , όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 51, ακολουθεί ακριβώς αντίθετη τάση, καθώς αυξάνεται στα προϊόντα του διαχωρισμού. Η μεγαλύτερη τιμή είναι στο M3 ενώ η μικρότερη στο MM1.

4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού διαχωρισμού

Για τη σύγκριση των κλασμάτων, εξετάστηκαν οι περιεκτικότητες των προϊόντων των μεγεθών +0,300 mm (Perm role, High induced role,) και -0,300 mm (Υγρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής κλίσης πεδίου).

Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα % του Al_2O_3 στο μέγεθος +0,300 mm, στους τρεις συντελεστές πλήρωσης f_c (0,05, 0,1, 0,15) και στους τρεις χρόνους λειοτρίβησης (2,72 , 6,59 και 11 min) καταγράφεται στο προϊόν MM2. Στον Πίνακα 36 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του MM2 στους τρεις συντελεστές f_c (0,05, 0,1, 0,15) του μύλου.

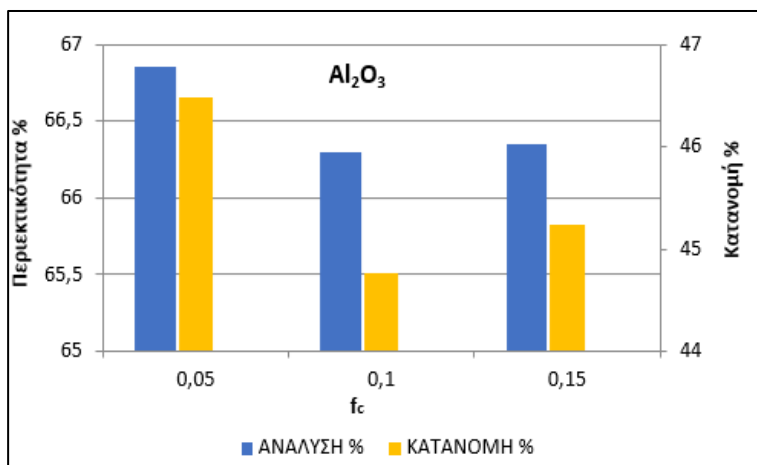
Πίνακας 36: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για μη μαγνητικό προϊόν 2, στις τρεις διαφορετικές πληρώσεις f_c του μύλου

Μη μαγνητικό 2								
+0.300 mm	Ανάλυση %				Κατανομή %			
f_c	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
0,05	66,85	14,51	1,27	3,73	46,5	32,5	33,9	42,7
0,1	66,29	14,60	1,29	3,75	44,77	33,22	34,85	42,36
0,15	66,35	14,60	1,29	3,75	45,24	32,72	34,05	42,10

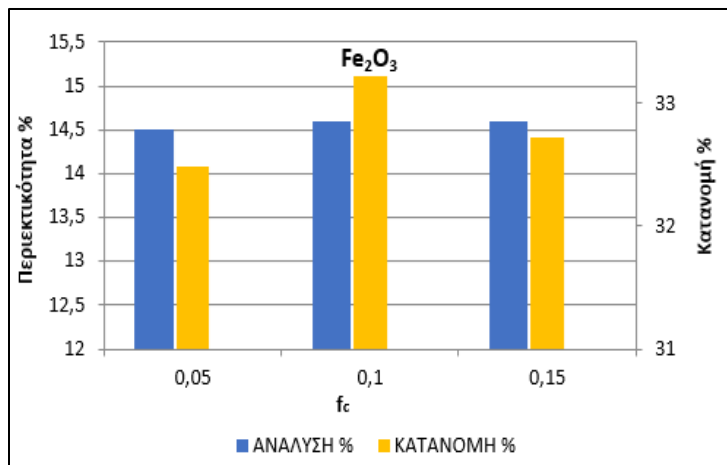
Από τον Πίνακα 36 προκύπτει ότι η τιμή της περιεκτικότητας % του Al₂O₃ κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, με τιμή 66% και στους τρεις συντελεστές πλήρωσης του μύλου. Η μεγαλύτερη καταγράφεται στο συντελεστή $f_c = 0,05$ με τιμή 66,85% και κατανομή 46,5%, ενώ στον ίδιο συντελεστή το Fe₂O₃ έχει τη μικρότερη τιμή που παρατηρείται, 14,51%, με κατανομή 32,5%. Επίσης, παρατηρείται ότι και στις τρεις πληρώσεις η κατανομή ανέρχεται σχεδόν 45% που σημαίνει πως σχεδόν η μισή ποσότητα Al₂O₃ που βρίσκεται στο κλάσμα, κατανέμεται στο συγκεκριμένο προϊόν.

Συγκεκριμένα, η κατανομή του Al₂O₃ στα f_c ανέρχεται στο 46,5%, 44,77% και 45,24% αντίστοιχα. Όσον αφορά το Fe₂O₃ η τιμή του παραμένει στα ίδια επίπεδα, γύρο στο 14,55% και στους τρεις συντελεστές πλήρωσης f_c . Τέλος, η κατανομή του ανέρχεται γύρο στο 33%, που σημαίνει πως σχεδόν το 1/3 της ποσότητας του Fe₂O₃ του κλάσματος κατανέμεται στο συγκεκριμένο προϊόν.

Στα διαγράμματα 52-53 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των αναλύσεων και της κατανομής, του προϊόντος MM2 από το μέγεθος +0,300 mm για κάθε πλήρωση f_c του μύλου.



Διάγραμμα 52: Περιεκτικότητας και κατανομής για το μη μαγνητικό 2 προϊόν του Al_2O_3 , στις τρεις πληρώσεις f_c του μύλου.



Διάγραμμα 53: Περιεκτικότητας και κατανομής για το μη μαγνητικό 2 προϊόν του Fe_2O_3 , στις τρεις πληρώσεις f_c του μύλου.

Στο Διάγραμμα 52 όσο αυξάνεται ο συντελεστής πλήρωσης f_c , η περιεκτικότητα % του μεγέθους σε Al_2O_3 μειώνεται. Η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας παρατηρείται στον μικρότερο συντελεστή πλήρωσης. Γενικά δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές περιεκτικότητας για τους τρεις συντελεστές πλήρωσης. Όσον αφορά την κατανομή, παρουσιάζει μέγιστη τιμή στο μικρότερο συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$. Από το Διάγραμμα 53 προκύπτει ότι η περιεκτικότητα % του Fe_2O_3 , ακολουθεί αυξητική τάση. Όσο μεγαλώνει ο συντελεστής πλήρωσης, αυξάνεται και η περιεκτικότητα. Τέλος, όσον αφορά την κατανομή, η μεγαλύτερη είναι στο ενδιάμεσο συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,1$.

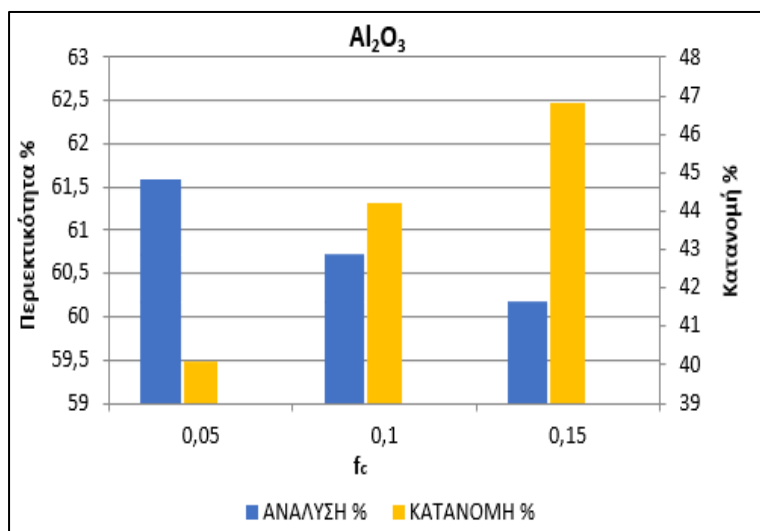
Όσον αφορά το δεύτερο κλάσμα -0,300 mm, η μεγαλύτερη τιμή περιεκτικότητας % του Al_2O_3 καταγράφεται στο MM1 προϊόν, στο συντελεστή $f_c = 0,05$ με τιμή 61,59%. Στον Πίνακα 37 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του μη μαγνητικού προϊόντος 1 και στις τρεις πληρώσεις f_c του μύλου.

Πίνακας 37: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για μη μαγνητικό προϊόν 1, στις τρεις διαφορετικές πληρώσεις f_c του μύλου

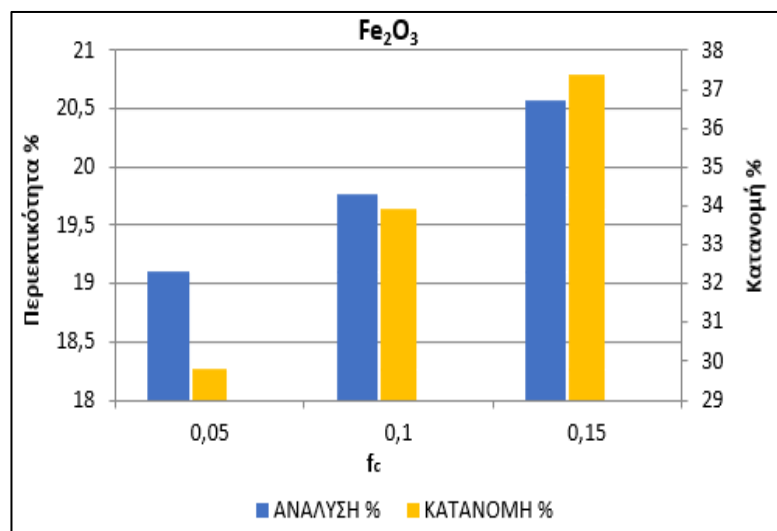
Μη μαγνητικό 1								
-0.300 mm	ANALYSE %				Κατανομή %			
f_c	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
0,05	61,59	19,10	1,94	4,67	40,10	29,80	32,4	37,6
0,1	60,72	19,77	1,94	4,81	44,20	33,90	36,4	42,9
0,15	60,17	20,57	2,14	4,72	46,80	37,40	41,1	45,1

Από τον Πίνακα 37 παρατηρείται ότι στην περιεκτικότητα του Al_2O_3 υπάρχει διακύμανση στο εύρος των τιμών, που ανέρχεται στο 1.2%. Η μέγιστη τιμή περιεκτικότητας είναι στο συντελεστή $f_c = 0,05$ με τιμή 61,59% και κατανομή 40,1%. Όσον αφορά τους άλλους συντελεστές, η περιεκτικότητα τους ανέρχεται στο 60,72% και 60,17% για $f_c = 0,1$ και 0,15 αντίστοιχα, με κατανομή 44,2% και 46,8%. Η περιεκτικότητα του Fe_2O_3 στα μεγέθη κυμαίνεται από 19-20%, με τη μέγιστη τιμή να είναι 20,57% με κατανομή 37,4%.

Στα διαγράμματα 54-55 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των αναλύσεων και της κατανομής, του προϊόντος MM1 από το μέγεθος -0,300 mm για κάθε πλήρωση f_c του μύλου.



Διάγραμμα 54: Περικτικότητα και κατανομή για το μη μαγνητικό 1 προϊόν του Al_2O_3 , στις τρεις πλήρώσεις f_c του μύλου.



Διάγραμμα 55: Περικτικότητα και κατανομή για το μη μαγνητικό 1 προϊόν του Fe_2O_3 , στις τρεις πλήρώσεις f_c του μύλου.

Στο Διάγραμμα 54 η περιεκτικότητα με την κατανομή είναι αντιστρόφως ανάλογες. Όσο ο συντελεστής πλήρωσης f_c αυξάνεται, η περιεκτικότητα του προϊόντος σε Al_2O_3 μειώνεται ενώ αντιθέτως, η κατανομή αυξάνεται. Στο μικρότερο συντελεστή $f_c = 0,05$ παρατηρείται η μεγαλύτερη περιεκτικότητα, ενώ συγχρόνως η μικρότερη κατανομή, ενώ στο μεγαλύτερο συντελεστή $f_c = 0,15$ βρίσκεται η μικρότερη περιεκτικότητα και παρατηρείται η μεγαλύτερη κατανομή. Τέλος, στο Διάγραμμα 55, η περιεκτικότητα και η κατανομή ακολουθούν την ίδια αυξητική τάση. Όσο μεγαλώνει ο συντελεστής πλήρωσης, αυξάνεται τόσο η περιεκτικότητα, όσο και η κατανομή του Al_2O_3 στο μέγεθος.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε ο εμπλουτισμός των ορυκτών του αργιλίου σε μετάλλευμα βωξίτη μέσω εκλεκτικής λειοτρίβησης, ενώ πραγματοποιήθηκαν δοκιμές επίπλευσης και μαγνητικού διαχωρισμού για περαιτέρω εμπλουτισμό του μεταλλεύματος σε συγκεκριμένα κοκκομετρικά κλάσματα.

Από την κοκκομετρική ανάλυση του αρχικού υλικού φάνηκε ότι η περιεκτικότητα του Al_2O_3 στα χονδρόκοκκα κλάσματα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα λεπτόκοκκα. Παρατηρείται μια τάση μείωσης από τα χονδρόκοκκα στα λεπτόκοκκα κλάσματα. Η τιμή της περιεκτικότητας κυμαίνεται από 60,12% έως και 48,89%, με ενδιάμεσες τιμές περιεκτικότητας γύρω στο 56-59%. Ο λόγος οξειδίων Al/Si είναι σε πάρα πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, με τιμή 35,14 ενώ ο λόγος Al/Fe ισούται με 2,59.

Από τη μελέτη των αθροιστικών κατανομών βάρους προέκυψε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης του υλικού όλο και περισσότερο μειώνεται το μέγεθος του. Το μέγεθος όμως του προϊόντος εξαρτάται από την πλήρωση του υλικού f_c . Ο μικρότερος συντελεστής πλήρωσης του μύλου $f_c = 0,05$ οδηγεί σε λεπτότερο προϊόν αλλά όμως σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Αντίστοιχα, όταν η πλήρωση του υλικού είναι $f_c = 0,05$ ο ρυθμός θραύσης του υλικού είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τις μεγαλύτερες πληρώσεις f_c (0,1 και 0,15) του μύλου με υλικό.

Από τη μελέτη της εκλεκτικής λειοτρίβησης προέκυψε ότι η μεγαλύτερη τιμή στην περιεκτικότητα % του Al_2O_3 είναι 65,15% (αύξηση 6,28%) στο χονδρό κλάσμα (-3,35+1,18 mm) για χρόνο λειοτρίβησης 8 min, όταν ο συντελεστής πλήρωσης είναι $f_c = 0,05$. Γενικά, παρατηρείται ότι για ένα συγκεκριμένο μέγεθος όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης του μεταλλεύματος, η περιεκτικότητα % του Al_2O_3 αυξάνεται πάνω από αυτό το μέγεθος, ενώ όσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος η περιεκτικότητα του μειώνεται, και στους τρεις συντελεστές πλήρωσης f_c . Το γεγονός αυτό, δείχνει ότι για συγκεκριμένο μέγεθος προϊόντος, σε μεγαλύτερα ενεργειακά επίπεδα, το υλικό πάνω από αυτό το μέγεθος εμπλουτίζεται ως προς το Al_2O_3 .

Όσον αφορά την ανάκτηση, οι μεγαλύτερες τιμές ανάκτησης % παρατηρήθηκαν στο συντελεστή $f_c = 0,15$. Παρατηρήθηκε ότι για το ίδιο μέγεθος προϊόντος, όσο αυξάνεται

ο χρόνος λειοτρίβησης του υλικού μειώνεται η ανάκτηση R% του Al_2O_3 , ενώ συγχρόνως αυξάνεται η περιεκτικότητα του στο ίδιο μέγεθος. Γενικά, όσο μειώνεται το μέγεθος του υλικού, αυξάνεται η ανάκτηση % σε Al_2O_3 . Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη ανάκτηση R% (90,62%) βρέθηκε στο χρόνο λειοτρίβησης 2 min, στο μέγεθος +0,075 mm, με ανάλυση 62,32% (αύξηση 2,06%), ενώ στους συντελεστές $f_c = 0,05$ και 0,1 στις αντίστοιχες συνθήκες, η ανάκτηση ανέρχεται σε 84,02% με ανάλυση 62,69% (αύξηση 2,70%) και 89,30% με ανάλυση 63,29% (αύξηση 1,91%), αντίστοιχα. Γενικά δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή στην περιεκτικότητα % του Al_2O_3 , μεταξύ των συντελεστών στους χρόνους λειοτρίβησης, διαφέρει όμως σημαντικά η ανάκτηση του στο αντίστοιχο μέγεθος.

Στη δοκιμή επίπλευσης, δεν επιτεύχθηκε εμπλουτισμός του μεταλλεύματος. Κατά την 1^η δοκιμή, στο συμπύκνωμα 1 η περιεκτικότητα του Al_2O_3 είναι 64,12% (μείωση 0,16%) με κατανομή βάρους 56,6%, ενώ στο συμπύκνωμα 2 η περιεκτικότητα του είναι 64,93% (αύξηση 1,09%) με κατανομή βάρους 43,4%. Στη 2^η δοκιμή επίπλευσης, στο συμπύκνωμα το Al_2O_3 έχει περιεκτικότητα 56,49% (μείωση 0,5%) με κατανομή βάρους 56,6% ενώ στο απόρριμμα 57,19% (αύξηση 0,66) με κατανομή βάρους 43,38%. Υπό κανονικές συνθήκες θα έπρεπε να αυξηθεί η περιεκτικότητα στο συμπύκνωμα (επιπλεύσαν) και να μειωθεί στο απόρριμμα (παραμένον). Τέλος, στην 3^η δοκιμή επίπλευσης στο συμπύκνωμα 1 η περιεκτικότητα του Al_2O_3 είναι 53,06% (μείωση 7,23%) με κατανομή βάρους 20,85%, στο συμπύκνωμα 2 παρουσιάζει αύξηση, καθώς είναι 59,34% (αύξηση 3,64%) με κατανομή βάρους 45,14% ενώ τέλος στο απόρριμμα παρουσιάζει επίσης αύξηση, με τιμή 57,36% (αύξηση 0,18%) με κατανομή βάρους 34,01%.

Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού, παρατηρήθηκε μια τάση αύξησης της περιεκτικότητας % του Al_2O_3 στο μη μαγνητικό προϊόν, με αντίστοιχη μείωση της περιεκτικότητας του Fe_2O_3 . Από τις χημικές αναλύσεις προκύπτει ότι στο ενοποιημένο μέγεθος +0,300 mm η μεγαλύτερη περιεκτικότητα % του Al_2O_3 βρίσκεται στο MM2 προϊόν και στους τρεις συντελεστές πλήρωσης. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα % του Al_2O_3 (66,85%, αύξηση 7,28%) προέκυψε στο μικρότερο συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$ και για χρόνο λειοτρίβησης 2,72 min, ενώ στις ίδιες συνθήκες παρατηρείται και η μεγαλύτερη τιμή του λόγου οξειδίων Al/Si

(52.54) και του λόγου Al/Fe (4.61). Η περιεκτικότητα % του F_2O_3 στο MM2 βρέθηκε να είναι 14,51%, του SiO_2 1.27% και του TiO_2 3,73%. Στο μέγεθος -0,300 mm, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα % του Al_2O_3 και για τους τρεις συντελεστές πλήρωσης που επιλέχθηκαν ήταν στο MM1 προϊόν. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Al_2O_3 προέρχεται από τον ίδιο συντελεστή $f_c = 0,05$, στον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης 2,72 min, και ισούται με 61,59% (αύξηση 7,46%). Σε αυτές τις συνθήκες η περιεκτικότητα του F_2O_3 είναι 19.10%, του SiO_2 1.94% και του TiO_2 4.67%.

Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διπλωματική εργασία, προτείνονται οι παρακάτω δοκιμές για μελλοντική έρευνα.

- Περαιτέρω μελέτη της εκλεκτικής λειοτρίβησης σε άλλες συνθήκες πχ διαφορετικό μέγεθος σφαιρών, διαφορετικούς συντελεστές πλήρωσης υλικού ή σφαιρών και τέλος διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης
- Εφαρμογή της επίπλευσης σε διαφορετικές συνθήκες, με χρήση διαφορετικών αντιδραστηρίων
- Μικροσκοπική εξέταση του αρχικού δείγματος και προϊόντων, καθώς και μελέτη αποδέσμευσης των ορυκτών του αργιλίου
- Εφαρμογή άλλων μεθόδων εμπλουτισμού ή μεταλλουργικών διεργασιών πχ αναγωγική φρύξη σε επιλεγμένα προϊόντα λειοτρίβησης

Βιβλιογραφία

Διεθνείς Αναφορές

- Ou. L. M, Feng. Q. M, Zhang G. F. & Chen. Y. (2008), *Comminution property of bauxite and selective separation of Al and Si in Bauxite*, Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 117, 179-184.
- Zhu. Y, Han. Y, Tian. Y, Hong. W.(2011), *Medium Characteristics on Selective Grinding of Low Grade Bauxite*, School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China. 158, 159-166

Ελληνικές Αναφορές

- Γεωργιάτης Ε. (2003), *Σημειώσεις για τη μέθοδο Bayer και Hall-Heroult*, σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία Αλουμινίου», Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Πολυτεχνική σχολή
- Κούρκης Γ. (2009), *Εμπλουτισμός μεταλλεύματος βωξίτη Παρνασσού-Γκιώνας*, διπλωματική εργασία, Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μαρίνη Α. (2018), *Εκλεκτική λειοτρίβηση λατερίτη Καστοριάς*, διπλωματική εργασία, Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πετράκης Ε. (2004), *Σχέση ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την λειοτρίβηση ψαθυρών υλικών*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πετράκης Ε. (2017), *Μοντελοποίηση της σχέσης ενέργειας-διαστασιακών ιδιοτήτων των προϊόντων κατάτμησης σε σφαιρόμυλο*, Διδακτορική διατριβή, Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Σταμπολιάδης Η., (2008) *Εμπλουτισμός Μεταλλευμάτων*, σημειώσεις μαθήματος, Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Φραγκίσκος Α. & Κατράκης Σ., (1979). *Μελέτη του εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών*, Αθήνα, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.
- Χριστίδης Γ. (1999), *Κοιτασματολογία II (Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα)*, σημειώσεις μαθήματος, Χανιά

Διαδικτυακές αναφορές

- <http://curiousprofessional.com/bauxite-alumina-and-aluminium-guide-bauxite-101/> (πρόσβαση στις 18/5/2019)
- <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/sites/rawmaterials/files/Bauxite%20-alumina%20-aluminium%20Presentation%20.pdf> (πρόσβαση στις 17/5/2019)

- <https://www.focus-economics.com/commodities/base-metals/aluminium> (πρόσβαση στις 3/5/2019)
- <https://www.ga.gov.au/data-pubs/data-and-publications-search/publications/australian-minerals-resource-assessment/bauxite> (πρόσβαση στις 3/5/2019)
- <https://www.mytilineos.gr/el-gr/metallurgy-and-mining/activities> (πρόσβαση στις 15/9/2019)
- https://www.mytilineos.gr/Uploads/FINANCIALS/2019/PR_MYT_FIN_RESULTS_1H_2019_GR.pdf (πρόσβαση στις 7/10/2019)
- <http://www.orykta.gr/oryktes-protes-yles-tis-ellados/metalleytika-orykta/131-boxitis> (Πρόσβαση στις 15/4/2019)
- http://www.oryktosploutos.net/2011/01/blog-post_2346.html (Πρόσβαση στις 17/4/2019)
- <https://thebauxiteindex.com/en/cbix/industry-101/bauxite-101/bauxite-production> (πρόσβαση στις 8/5/2019)
- <https://www.worldofchemicals.com/591/chemistry-articles/manufacturing-of-alumina-through-bayer-process.html> (πρόσβαση 12/5/2019)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Π 1: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος για συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,05$ στους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Μέγεθος (mm)	Βάρος%				Αθρ. διερχ. βάρος%			
	t=2 (min)	t=4 (min)	t=8 (min)	t=12 (min)	t=2 (min)	t=4 (min)	t=8 (min)	t=12 (min)
3,35					100	100	100	100
2,36	12,14	11,63	7,38	6,54	87,86	88,37	92,62	93,46
1,7	8,82	8,09	4,72	4,48	79,04	80,28	87,90	88,98
1,18	7,38	6,01	3,32	2,73	71,66	74,27	84,58	86,25
0,85	5,27	3,94	1,92	1,42	66,39	70,32	82,66	84,83
0,6	6,18	4,14	1,88	1,28	60,21	66,18	80,78	83,55
0,425	6,89	4,50	2,04	1,09	53,31	61,68	78,74	82,45
0,3	7,93	6,11	3,18	1,57	45,39	55,57	75,56	80,88
0,212	7,60	6,99	5,32	2,62	37,79	48,58	70,25	78,26
0,15	8,01	8,90	10,04	6,83	29,78	39,67	60,21	71,43
0,106	6,51	8,46	11,68	11,44	23,27	31,21	48,53	59,99
0,075	3,79	5,26	7,52	9,00	19,48	25,95	41,01	50,99
-0,075	19,48	25,95	41,01	50,99	0,00	0,00	0,00	0,00

Π 2: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος για συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,1$ στους τέσσερις χρόνους λειοτρίβησης

Μέγεθος (mm)	Βάρος%				Αθρ. διερχ. βάρος%			
	t=2 (min)	t=4 (min)	t=8 (min)	t=12 (min)	t=2 (min)	t=4 (min)	t=8 (min)	t=12 (min)
3,35					100	100	100	100
2,36	19,86	15,22	12,69	9,15	80,14	84,78	87,31	90,85
1,7	12,90	10,92	8,52	6,83	67,24	73,86	78,78	84,02
1,18	10,41	8,61	6,10	4,57	56,83	65,24	72,68	79,45
0,85	7,11	5,54	3,67	2,55	49,72	59,70	69,01	76,90
0,6	7,23	6,29	3,88	2,60	42,50	53,41	65,14	74,29
0,425	6,74	6,45	4,24	2,95	35,76	46,96	60,90	71,34
0,3	6,32	7,01	6,08	4,75	29,44	39,96	54,82	66,60
0,212	5,37	6,75	7,26	7,12	24,07	33,20	47,56	59,48
0,15	5,24	6,73	9,12	10,54	18,83	26,48	38,44	48,94
0,106	4,14	5,96	8,54	11,23	14,69	20,52	29,90	37,71
0,075	2,31	3,18	5,05	5,91	12,38	17,34	24,86	31,80
-0,075	12,38	17,34	24,86	31,80	0,00	0,00	0,00	0,00

Π 3: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος για συντελεστή πλήρωσης $f_c = 0,15$ στους τέσσερις χρόνους λειοτριβήσης

	Βάρος%				Αθρ. διερχ. βάρος%			
Μέγεθος (mm)	t=2 (min)	t=4 (min)	t=8 (min)	t=12 (min)	t=2 (min)	t=4 (min)	t=8 (min)	t=12 (min)
3,35					100	100	100	100
2,36	18,08	18,36	14,22	11,67	81,92	81,64	85,78	88,33
1,7	12,43	12,25	9,63	8,39	69,49	69,39	76,15	79,94
1,18	10,62	9,90	7,77	6,33	58,87	59,49	68,37	73,61
0,85	7,62	6,72	5,19	4,15	51,25	52,77	63,18	69,46
0,6	8,29	7,08	5,78	4,62	42,96	45,70	57,40	64,84
0,425	7,40	6,73	6,17	5,15	35,56	38,97	51,23	59,68
0,3	6,91	6,76	7,22	6,89	28,65	32,20	44,01	52,79
0,212	5,48	5,73	6,77	7,52	23,17	26,47	37,24	45,28
0,15	5,30	5,79	7,51	8,75	17,87	20,68	29,73	36,53
0,106	4,26	4,79	6,51	8,08	13,60	15,89	23,22	28,45
0,075	2,42	2,42	3,74	4,39	11,18	13,48	19,48	24,06
-0,075	11,18	13,48	19,48	24,06	0	0	0	0

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Π 4: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσης $t=2$ min, στο $f_c = 0,05$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,05$	t=2 min	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	28,80	63,98	17,11	2,11	3,35	30,33	3,74	30,18	24,70	27,11	25,27
+0,300	55,53	63,55	17,55	2,15	3,51	29,61	3,62	57,81	48,86	53,19	51,03
+0,075	81,81	62,69	18,53	2,02	3,67	31,06	3,38	84,02	76,02	73,69	78,71

Π 5: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσης $t=4$ min, στο $f_c = 0,05$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,05$	t=4 min	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	26,11	64,71	17,00	1,74	3,58	37,22	3,81	27,57	21,96	24,03	23,95
+0,300	45,09	64,15	17,51	1,67	3,63	38,31	3,66	47,20	39,05	39,96	41,98
+0,075	75,14	63,19	18,44	1,65	3,75	38,37	3,43	77,47	68,51	65,49	72,24

Π 6: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσεως $t=8 \text{ min}$, στο $f_c = 0,05$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,05$	$t=8 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	15,86	65,15	16,42	1,77	3,44	36,87	3,97	16,85	13,01	14,89	14,06
+0,300	25,10	64,71	16,78	1,74	3,54	37,21	3,86	26,50	21,04	23,19	22,87
+0,075	60,67	63,52	18,07	1,66	3,73	38,25	3,52	62,87	54,76	53,53	58,24

Π 7: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσεως $t=12 \text{ min}$, στο $f_c = 0,05$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,05$	$t=12 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	14,74	64,91	15,77	2,36	3,59	27,54	4,12	15,68	11,56	17,24	13,50
+0,300	20,50	64,94	15,73	2,33	3,55	27,87	4,13	21,82	16,03	23,70	18,55
+0,075	45,26	64,05	17,06	1,91	3,67	33,48	3,76	47,51	38,39	42,96	42,43

Π 8: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσεως $t=2 \text{ min}$, στο $f_c = 0,1$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,1$	$t=2 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	43,17	65,01	17,83	2,15	3,94	30,27	3,65	45,19	38,89	45,07	42,77
+0,300	70,56	63,90	18,35	1,97	3,88	32,37	3,48	72,60	65,44	67,71	68,87
+0,075	87,62	63,29	18,82	1,93	3,91	32,79	3,36	89,30	83,35	82,21	86,21

Π 9: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσεως $t=4 \text{ min}$, στο $f_c = 0,1$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,1$	$t=4 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι (%)		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	34,76	64,74	16,90	1,65	3,59	39,16	3,83	36,50	29,61	31,04	32,17
+0,300	60,04	64,11	17,55	1,60	3,64	40,05	3,65	62,45	53,14	51,93	56,36
+0,075	82,66	63,28	18,33	1,61	3,73	39,37	3,45	84,85	76,37	71,77	79,57

Π 10: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσης $t=8 \text{ min}$, στο $f_c = 0,1$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,1$	$t=8 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	27,32	64,65	16,96	1,69	3,54	38,23	3,81	28,89	22,95	24,58	24,75
+0,300	45,18	63,94	17,58	1,64	3,67	38,94	3,64	47,26	39,34	39,47	42,39
+0,075	75,14	63,19	18,34	1,61	3,75	39,28	3,45	77,67	68,26	64,31	72,14

Π 11: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσης $t=12 \text{ min}$, στο $f_c = 0,1$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,1$	$t=12 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	20,55	64,89	16,62	1,79	3,56	36,33	3,90	21,75	17,16	19,32	18,55
+0,300	33,40	64,25	17,15	1,75	3,67	36,72	3,75	35,00	28,78	30,75	31,06
+0,075	68,20	63,49	17,84	1,66	3,81	38,33	3,56	70,62	61,11	59,45	65,82

Π 12: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσης $t=2 \text{ min}$, στο $f_c = 0,15$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,15$	$t = 2 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	41,13	63,00	18,42	1,71	3,76	36,84	3,42	42,43	37,48	37,78	39,32
+0,300	71,35	62,72	18,75	1,70	3,79	36,85	3,35	73,28	66,16	65,23	68,83
+0,075	88,82	62,32	19,14	1,69	3,83	36,95	3,26	90,64	84,10	80,47	86,55

Π 13: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσης $t=4 \text{ min}$, στο $f_c = 0,15$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,15$	$t = 4 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al/Si	Al/Fe	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
+1,18	40,51	63,35	18,07	1,76	3,73	36,05	3,51	42,05	36,08	37,45	38,39
+0,300	67,80	62,78	18,69	1,70	3,79	37,01	3,36	69,74	62,46	60,49	65,37
+0,075	86,52	62,40	19,09	1,68	3,83	37,12	3,27	88,47	81,42	76,49	84,21

Π 14: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσης $t=8 \text{ min}$, στο $f_c = 0,15$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,15$	$t = 8 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al/Si	Al/Fe	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
+1.18	32,03	64,24	17,13	1,70	3,64	37,77	3,75	33,34	27,78	29,61	30,12
+0.300	56,69	63,77	17,74	1,63	3,70	39,12	3,59	58,58	50,94	50,24	54,14
+0.075	81,53	63,31	18,28	1,62	3,76	39,16	3,46	83,64	75,47	71,66	79,10

Π 15: Αθροιστικώς παραμένον βάρος για χρόνο λειοτριβήσης $t=12 \text{ min}$, στο $f_c = 0,15$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ											
$f_c=0,15$	$t = 12 \text{ min}$	Ανάλυση (%)				Λόγοι		Κατανομή (%)			
Μέγεθος (mm)	Βάρος (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Al/Si	Al/Fe	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2
+1.18	26,73	63,77	17,45	1,80	3,73	35,51	3,65	27,90	23,09	25,86	25,29
+0.300	47,83	63,30	17,98	1,69	3,77	37,53	3,52	49,56	42,57	43,45	45,79
+0.075	76,92	62,89	18,49	1,63	3,81	38,56	3,40	79,19	70,43	67,58	74,44