



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη της θερμικής επεξεργασίας λατεριτών στην βελτιστοποίηση της λειοτρίβησης

Γεώργιος Γκάτσος

Εξεταστική Επιτροπή

Κων/νος Κομνίτσας, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής

Ευάγγελος Πετράκης, Επ. Καθηγητής

Χανιά

Οκτώβριος 2023

Πρόλογος

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθ. Κωνσταντίνου Κομνίτσα. Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της θερμικής επεξεργασίας στην λειοτρίβηση λατεριτών Καστοριάς. Η θερμική επεξεργασία ως μέθοδος προτιμάται στην βιομηχανία εμπλουτισμού, καθώς συμβάλλει στην αύξηση της ευθραυστότητας και τη μείωση της υγρασίας του υλικού, γεγονός που ευνοεί τη μετέπειτα επεξεργασία του με ξηρές μεθόδους.

Στην περίπτωση της Ελληνικής βαριάς βιομηχανίας αναζητούνται νέες μέθοδοι κατεργασίας των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων, με σκοπό την μείωση των υλικών και ενεργειακών δαπανών. Ένα από τα προβλήματα που προκύπτουν από την αναζήτηση των νέων αυτών μεθόδων είναι η εύρεση τρόπων βελτιστοποίησης της λειοτρίβησης. Παράλληλα το θέμα αυτό αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των θεωρητικών γνώσεων της φοίτησής μου στη Σχολή και των προβλημάτων που αντιμετωπίζονται στην πράξη.

Ευχαριστώ τον Επ. Καθ. κ. Ευάγγελο Πετράκη για την υπομονή που επέδειξε όλο αυτό το χρονικό διάστημα, την καθοδήγησή του σε κάθε σκέλος της διπλωματικής εργασίας και κυρίως για την διάθεση του να βοηθήσει.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτό το θέμα, καθώς και για την επικοινωνία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια του πειραματικού σκέλους της εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθ. κ. Μιχαήλ Γαλετάκη για την συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή αξιολόγησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την αδερφή μου και τη μητέρα μου, για την αμέριστη στήριξή τους και την αγάπη που μου έδωσαν όλο αυτό το διάστημα των σπουδών μου.

Περίληψη

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της επίδρασης της πύρωσης λατερίτη Καστοριάς στην απόδοση της λειοτριβήσης του μεταλλεύματος αυτού. Η πύρωση ως μέθοδος προτιμάται στην βιομηχανία εμπλουτισμού, καθώς μπορεί να συμβάλλει στην αύξηση της ευθραυστότητας του υλικού, ενώ μειώνει την υγρασία του, γεγονός που ευνοεί την μετέπειτα επεξεργασία του μεταλλεύματος με ξηρές μεθόδους.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ξηρή κοσκίνιση για την παραγωγή των κοκκομετρικών κλασμάτων - $3.35+1.70$ mm, $-0.850+0.425$ mm και $-0.212+0.106$ mm. Τα κλάσματα υποβλήθηκαν σε θερμική επεξεργασία με χρήση καμίνου για 1 ώρα σε θερμοκρασίες 250 °C και 500 °C. Τα κλάσματα αυτά αποτέλεσαν την τροφοδοσία του εργαστηριακού σφαιρόμυλου, με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από λειοτριβήσεις. Τα κλάσματα λειοτριβήθηκαν για συγκεκριμένους χρόνους δηλ. 0.5, 2, 4, 16, και 32 min και μελετήθηκαν τα προϊόντα που προέκυψαν με χρήση κινητικών μοντέλων λειοτριβήσης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο λατερίτης Καστοριάς που έχει υποστεί θερμική επεξεργασία στους 250 °C παρουσιάζει υψηλότερο ρυθμό θραύσης, ενώ ο λατερίτης που έχει πυρωθεί στους 500 °C παράγει μικρότερο ποσοστό λεπτομερών προϊόντων.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	2
Περίληψη	3
Κατάλογος εικόνων.....	7
Κεφάλαιο 1 : Νικέλιο.....	8
1.1 Ιδιότητες νικελίου	8
1.2 Εφαρμογές νικελίου	8
1.3 Παραγωγή νικελίου.....	9
1.4 Τιμή νικελίου	10
1.5 Αποθέματα νικελίου στην Ελλάδα και παγκοσμίως	11
1.6 Προέλευση νικελίου.....	12
1.6.1 Θειούχα κοιτάσματα.....	12
1.6.2 Λατεριτικά κοιτάσματα.....	12
1.7 Γεωλογική δομή των κοιτασμάτων	12
1.7.1 Αυτόχθονα ή πρωτογενή κοιτάσματα	13
1.7.2 Αλλόχθονα ή ετερογενή κοιτάσματα	13
1.7.3 Ψευδοαυτόχθονα κοιτάσματα.....	13
Κεφάλαιο 2: Νικελιούχοι λατερίτες	14
2.1 Προέλευση νικελιούχων λατεριτών.....	14
2.2 Παράγοντες που διευκολύνουν το σχηματισμό των νικελιούχων λατεριτικών κοιτασμάτων	14
2.3 Σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα.....	15
2.3.1 Ελληνικά Σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα	15
2.3.2 Μεταλλουργικές μέθοδοι παραγωγής σιδηρονικελίου νικελίου στην Ελλάδα	15
Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι εμπλουτισμού	16
3.1 Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων.....	16
3.2 Κατάτμηση υλικού.....	16
3.2.1 Δυνάμεις κατάτμησης	16
3.3 Θραύση.....	17
3.4 Λειοτρίβηση	17
3.4.1 Παράμετροι λειοτίβησης	17
Κεφάλαιο 4: Μαθηματικά μοντέλα κατάτμησης	19
4.1 Μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού (PBM).....	19
4.2 Συνάρτηση θραύσης (Breakage function)	19
4.3 Ρυθμός Θραύσης (Breakage rate).....	21

4.4 Επίδραση μεγέθους σφαίρας	22
4.5 Μέγεθος σφαιρών και ρυθμός θραύσης.....	22
Κεφάλαιο 5: Θερμική επεξεργασία μεταλλευμάτων.....	24
5.1 Επεξεργασία του μεταλλεύματος με θέρμανση σε κάμινο.....	24
5.2 Εφαρμογές της θερμικής επεξεργασίας στα μεταλλεύματα	24
5.2.1 Μετασχηματισμοί φάσεων	24
5.2.2 Αφυδάτωση και απομάκρυνση υδροξυλίων.....	24
5.2.3 Διάσπαση ανθρακικών	24
5.2.4 Θέρμανση και απότομη Ψύξη	24
Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές θέρμανσης –απότομης ψύξης στην πυρομεταλλουργία	25
6.1 Εργαστηριακές εφαρμογές της θέρμανσης στην βελτιστοποίηση του εμπλουτισμού	25
6.2 Εργαστηριακές εφαρμογές απότομης ψύξης στον εμπλουτισμό (quenching)	27
6.3 Εφαρμογές της θέρμανσης στην βελτιστοποίηση εμπλουτισμού λατεριτών	27
Κεφάλαιο 7: Χαρακτηρισμός λατερίτη	30
7.1 Γεωλογική περιγραφή περιοχής δείγματος	30
7.2 Ορυκτολογική Ανάλυση δείγματος με περιθλασίμετρο ακτίνων-X	30
7.3 Χημική Ανάλυση	31
7.4 Κοκκομετρική Ανάλυση	31
Κεφάλαιο 8: Εξοπλισμός	33
8.1 Εργαστηριακός θραυστήρας με σιαγόνες	33
8.2 Εργαστηριακός σφαιρόμυλος.....	33
8.3 Κλίβανος πύρωσης.....	34
8.4 Συσκευή κοσκίνισης	34
8.5 Κοκκομετρικός αναλυτής Laser	35
Κεφάλαιο 9: Πειραματική διαδικασία	36
9.1 Διαδικασία θραύσης.....	36
9.2 Πύρωση λατερίτη Καστοριάς.....	36
9.3 Εφαρμογή απότομης ψύξης (quenching) στον λατερίτη Καστοριάς	36
9.4 Διαδικασία λειοτρίβησης	36
9.5 Διαδικασία κοσκίνισης προϊόντων λειοτρίβησης	38
9.6 Απότομη ψύξη αρχικού υλικού (quenching)	38
Κεφάλαιο 10: Επεξεργασία των μετρήσεων.....	40
10.1 Αθροιστικός διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος	40
10.1.1 Τροφοδοσία -3.35 + 1.70 mm	40
10.1.2 Τροφοδοσία -0.850 + 0.425 mm.....	44
10.1.3 Τροφοδοσία -0.212+0.106 mm.....	46

10.1.4 Τροφοδοσία $-0.850+0.425$ mm (εφαρμογή απότομης ψύξης)	47
10.2 Επίδραση της θερμοκρασίας πύρωσης	49
10.2.1 Τροφοδοσία $-3.35 + 1.70$ mm	49
10.2.2 Τροφοδοσία $-0.850+0.425$ mm.....	51
10.2.3 Τροφοδοσία $-0.212+0.106$ mm.....	52
10.2.4 Τροφοδοσία $-0.850+0.425$ (εφαρμογή απότομης ψύξης).....	54
10.2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων βραδείας ψύξης σε αέρα και απότομης ένυδρης ψύξης για το κλάσμα τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm.	55
10.3 Προσδιορισμός του φαινόμενου συντελεστή σχήματος (shape factor)	57
10.4 Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στο μέγεθος d_{80} των προϊόντων λειοτρίβησης	60
10.4.1 Τροφοδοσία $-3.35+1.70$ mm	60
10.4.2 Τροφοδοσία $-0.850+0.425$ mm.....	61
10.4.3 Τροφοδοσία $-0.212+0.106$ mm.....	62
10.5 Προσδιορισμός του ρυθμού θραύσης	63
10.5.1 Τροφοδοσία $-3.35+1.70$ mm	63
10.5.2 Τροφοδοσία $-0.850+ 0.425$ mm.....	65
10.5.3 Τροφοδοσία $-0.212+0.106$ mm.....	67
10.6 Ρυθμός Θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας	69
10.7 Σχέση ρυθμού θραύσης- θερμοκρασίας πύρωσης.....	72
10.8 Συνάρτηση Θραύσης (μέθοδος ΒΙΙ)	74
11. Συμπεράσματα	77
Βιβλιογραφία	78
Ελληνική Βιβλιογραφία	78

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Οι χρήσεις του νικελίου (πηγή: https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications).....	8
Εικόνα 2: Απεικόνιση των χωρών με πόρους νικελίου (πηγή: https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/#02-nickel-availability/).....	9
Εικόνα 3: Οι διακυμάνσεις της παραγωγής νικελίου σε τόννους από το 1990 μέχρι το 2020 (πηγή: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information/).....	9
Εικόνα 4: Η τιμή του νικελίου από το 1991 μέχρι τον Μάιο του 2021 (πηγή: https://insg.org/index.php/about-nickel/production-usage/).....	10
Εικόνα 5: Τα αποθέματα νικελίου της Ελλάδας (πηγή: https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/).....	11
Εικόνα 6: Λογαριθμική αναπαράσταση της μαγνητικής επιδεκτικότητας του ιλμενίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας πύρωσης. (πηγή: Z.Cui, q.Liu*, T.H. Etsell, 2002).....	24
Εικόνα 7: Οι διακυμάνσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας του αιματίτη συναρτήσει του χρόνου φρύξης. Η αναλογία CO/αιματίτη είναι 1 προς 5. (πηγή: Z.Cui, Q. Liu*, T.H. Etsell, 2002).....	25
Εικόνα 8: Περιεκτικότητα Fe συναρτήσει του χρόνου εκχύλισης σε θειικό αμμώνιο. Η κάθε γραμμή αντιστοιχεί στις διαφορετικές θερμοκρασίες φρύξης της χαλαζιακής άμμου. (πηγή: Du X. et al., 2021).....	25
Εικόνα 9: Αποδέσμευση νικελίου % σε σχέση με το χρόνο εκχύλισης (h). Η κάθε γραμμή αναπαριστά τις διαφορετικές θερμοκρασίες φρύξης της προεπεξεργασίας των λατεριτών. (πηγή: A.Garces-Granda, G.T. Lapidus, O.J. Restrepo-Baena, 2018)	27
Εικόνα 10: Οι καμπύλες TG-DTA του λατερίτη. (πηγή: Jinhui et al., 2009).....	27
Εικόνα 11: Διαγράμμα XRD ορυκτολογικών φάσεων του λατερίτη για τις διάφορες θερμοκρασίες φρύξης. (πήγη: Li et al., 2009)	28
Εικόνα 12: Σιαγονωτός σπαστήρας FRITSCH pulverisette 1.....	32
Εικόνα 13: Εργαστηριακός σφαιρόμυλος τύπου Sepor (Batch Ball mill).....	33
Εικόνα 14: Κάμινος πύρωσης	33
Εικόνα 15:Κοκκομετρικός αναλυτής Master sizer S τύπου Malvern.....	34

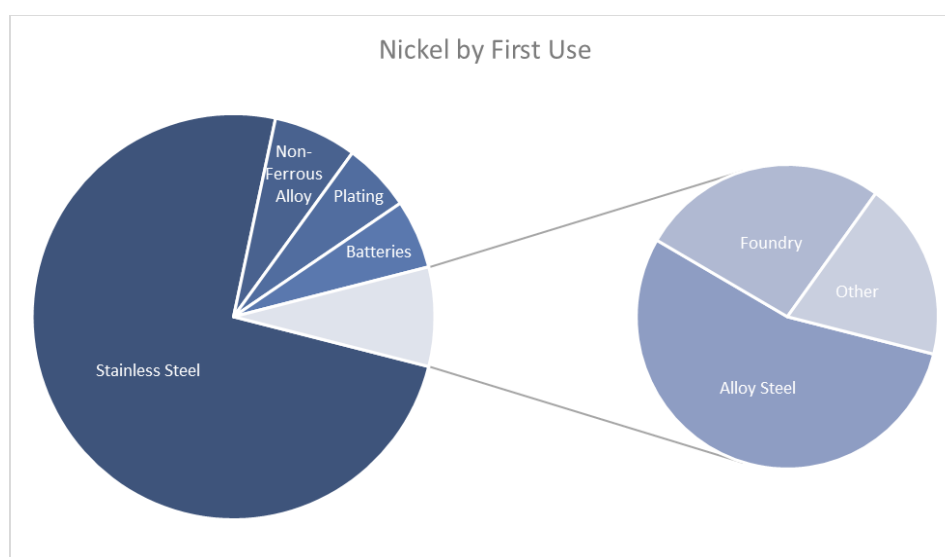
Κεφάλαιο 1 : Νικέλιο

1.1 Ιδιότητες νικελίου

Το νικέλιο έχει ατομικό αριθμό $z=28$, ατομικό βάρος 58.6934, σημείο τήξης $1453\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σημείο ζέσεως $2150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Σε στερεή μορφή έχει πυκνότητα 8908 kg/m^3 και μοριακό όγκο 6.59 cm^3 . Είναι το 5^ο πιο κοινό στοιχείο που συναντάται στη γη, ωστόσο η συγκέντρωσή του στο φλοιό της γης το καθιστά ένα από τα σπανιότερα μέταλλα. Ανακαλύφθηκε από τον Axel Fredrik Cronstedt το 1751. Εκ πρώτης όψεως, είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο το οποίο εμφανίζει τυπικές μεταλλικές ιδιότητες. Έχει σκληρότητα περίπου ίδια ή μεγαλύτερη του σιδήρου, 7.12 στην κλίμακα Mohs. Σε θερμοκρασίες κατώτερες των $385\text{ }^{\circ}\text{C}$, παρουσιάζει ελαφρύ μαγνητισμό. Έχει υψηλή αντοχή στις εξωγενείς μεταβολές. Δεν οξειδώνεται εύκολα στην ατμόσφαιρα, δεν διαλύεται σε όξινα διαλύματα (εκτός από το νιτρικό οξύ). Είναι πολύ συμπαγές μέταλλο που δεν επηρεάζεται από τα στοιχεία της φύσης και παραμένει αμετάβλητο σχηματικά. Στη φύση δεν βρίσκεται σε αυτοφυή μορφή. Εντοπίζεται σε πολλά διαφορετικά ορυκτά, με πιο σημαντικό τον πεντλανδίτη (Riley, 1977).

1.2 Εφαρμογές νικελίου

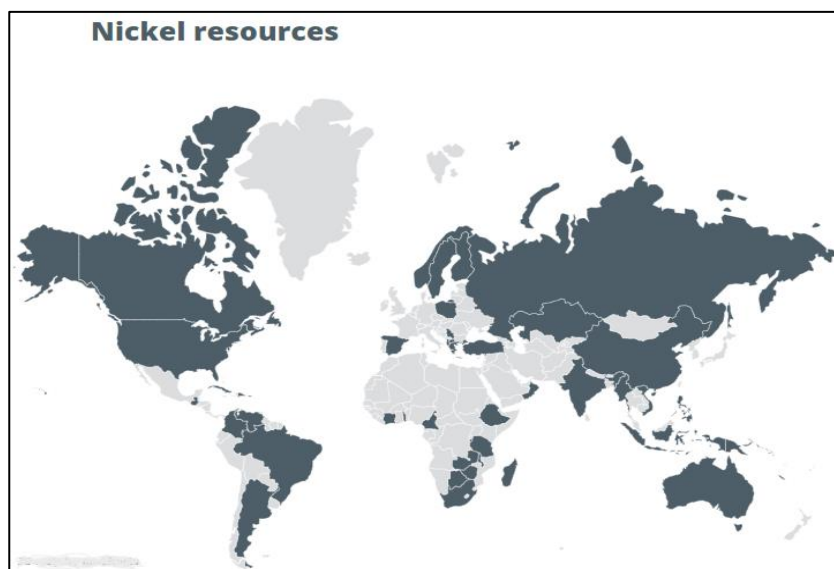
Το νικέλιο είναι ένα προϊόν με σταθερά υψηλή ζήτηση λόγω των πολλών ιδιοτήτων του. Η υψηλή του αντοχή αυξάνει την αντίστασή του στη διάβρωση. Η ολκιμότητα και η ελαστικότητά του το καθιστούν εύπλαστο. Αυτά τα κύρια χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή του, το συμπεριλαμβάνουν στα πιο σημαντικά προϊόντα της βιομηχανίας μετάλλων. Το μεγαλύτερο μέρος του νικελίου, χρησιμοποιείται στην παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα. Ένα μικρότερο μέρος χρησιμοποιείται στην παραγωγή κραμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο (κράματα για στρατιωτική-αεροδιαστημική χρήση). Το νικέλιο χρησιμοποιείται και στην επινικέλωση, δηλαδή την επικάλυψη με νικέλιο μεταλλικών επιφανειών ή κραμάτων, που προσδίδει αντοχή στη διάβρωση (Emsley, 2011). Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ενεργειακής μετάβασης, έχει αυξηθεί κατακόρυφα η ζήτηση του νικελίου για μαζική παραγωγή μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Στην Εικόνα 1 απεικονίζονται οι χρήσεις του νικελίου.



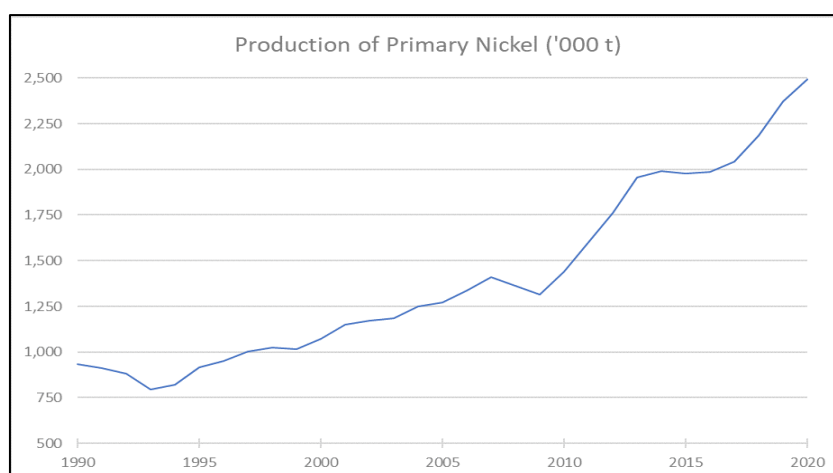
Εικόνα 1: Οι χρήσεις του νικελίου (πηγή: <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications>).

1.3 Παραγωγή νικελίου

Η ισχυρή παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη μέχρι το 2007 συνέβαλε στην ραγδαία αύξηση της παραγωγής πρωτογενούς μετάλλου νικελίου (Δουδούμης, 2011). Το 2007 η παγκόσμια πρωτογενής παραγωγή ήταν 1.4 Mt. Ωστόσο, η οικονομική κρίση οδήγησε σε χαμηλότερη παγκόσμια παραγωγή νικελίου την περίοδο 2008 έως 2009 και η παραγωγή πρωτογενούς μετάλλου μειώθηκε σε 1.3 Mt το τελευταίο έτος. Η παραγωγή ανέκαμψε γρήγορα το 2010 σε 1.45 Mt και αυξήθηκε περαιτέρω σε περίπου 2 Mt το 2013. Μεταξύ 2013 και 2016, η ετήσια παραγωγή ήταν περίπου σταθερή. Από τότε αυξάνεται, αγγίζοντας σχεδόν τους 3.3 Mt το 2022. Κατά μέσο όρο, η ετήσια αύξηση της παραγωγής μεταξύ 2000 και 2010 ήταν 3% και 5.6% από το 2010 έως το 2020 (<https://insg.org>). Στην Εικόνα 2 απεικονίζονται οι χώρες με πόρους νικελίου και στην Εικόνα 3 οι διακυμάνσεις της παραγωγής νικελίου σε τόνους από το 1990 έως το 2020.



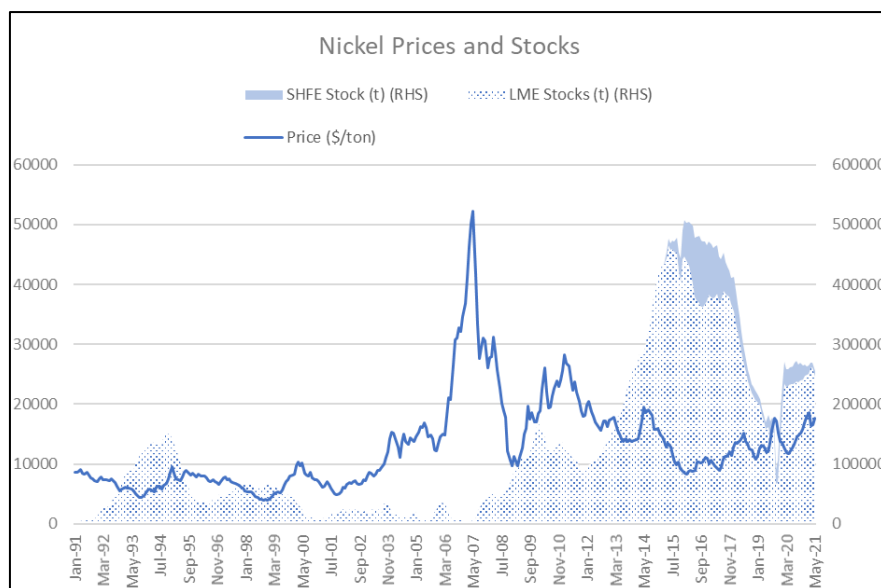
Εικόνα 2: Απεικόνιση των χωρών με πόρους νικελίου (πηγή:<https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/#02-nickell-availability/>).



Εικόνα 3: Οι διακυμάνσεις της παραγωγής νικελίου σε χιλιάδες τόνους από το 1990 μέχρι το 2020 (πηγή:<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information/>).

1.4 Τιμή νικελίου

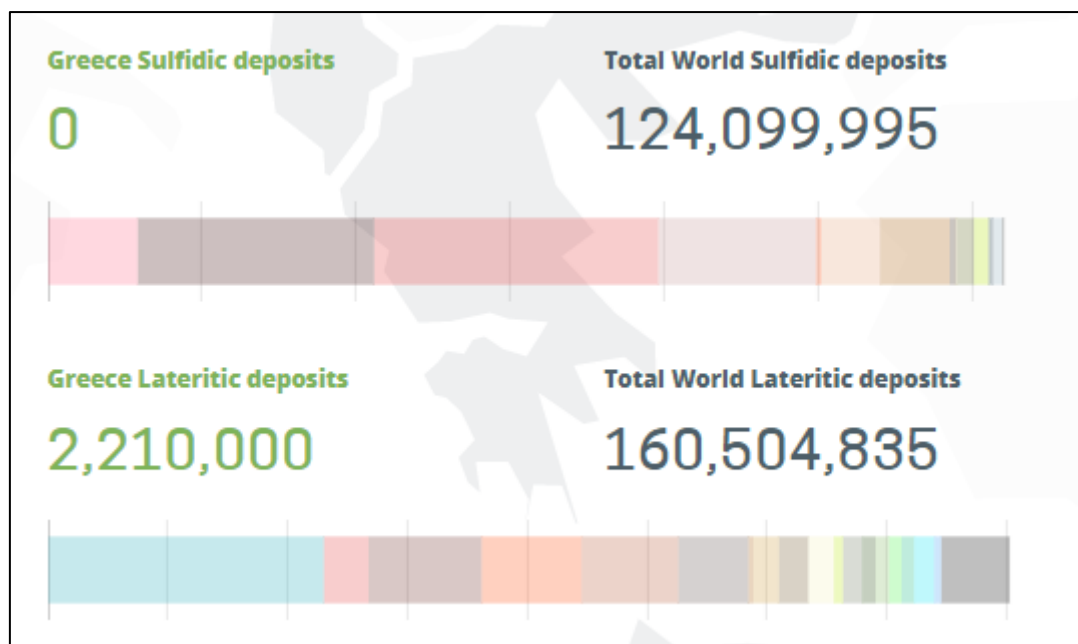
Η παραγωγή νικελίου είναι εμμέσως συνδεδεμένη με την παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη. Η ζήτηση αυξάνεται κάθε χρόνο από το 2000 με ρυθμό 3.8%. Η Ασία καλύπτει αυτή τη ζήτηση με το 82% της παγκόσμιας παραγωγής να ανήκει σε αυτήν. Η προσφορά και το μέγεθος παραγωγής είναι τα κύρια στοιχεία που επηρεάζουν την τιμή του νικελίου. Η τιμή του νικελίου σε βάθος 30 ετών παρουσιάζει χαρακτηριστική μεταβλητότητα. Η Εικόνα 4 παρουσιάζει την ιστορική τιμή του νικελίου σε ονομαστικές τιμές από το 1991 έως το 2021. Στο πρώτο μισό της δεκαετίας του 1990, η κατάρρευση του πρώην Ανατολικού Μπλοκ οδήγησε τις χώρες που το απαρτίζουν, να ξεκινήσουν τις εξαγωγές νικελίου. Ως αποτέλεσμα η προσφορά αυξήθηκε και οι χώρες της δύσης μείωσαν την εγχώρια παραγωγή τους, καθώς η τιμή του εισαγόμενου νικελίου ήταν μικρότερη από το κόστος παραγωγής. Από το 2^ο εξάμηνο του 2001, παρατηρείται μια αυξητική τάση στην τιμή του νικελίου φτάνοντας έως τα 52.200 \$/t στα τέλη του 1^{ου} μισού του 2007. Η τιμή του νικελίου με την ίδια ραγδαιότητα μειώθηκε στο χαμηλό των 9.700 \$/t στο τέλος του 2008. Στις αρχές του 2009, η τιμή του νικελίου άρχισε μια ακόμη ανοδική πορεία μέχρι φτάνοντας τα 24.100 \$/t μέχρι το τέλος του 2010. Η αύξηση της τιμής συνεχίστηκε και το 2011, φτάνοντας το τοπικό μέγιστο των 28.000 \$/t. Η τιμή στη συνέχεια παρουσίασε μείωση κάτω από 14.000 \$/t στα τέλη του 2013. Με την εφαρμογή απαγόρευσης εξαγωγής με επεξεργασμένων μεταλλευμάτων στην Ινδονησία τον Ιανουάριο του 2014, η τιμή του νικελίου ανέβηκε κοντά στα 20.000 \$/t τον Ιούλιο του 2014, αλλά στη συνέχεια μειώθηκε σταδιακά κάθε μήνα έως τον Φεβρουάριο του 2016 σε περίπου 8300\$/t. Ακολούθησε ένα έτος μεταβλητότητας περίπου στα 10.000 \$/t και από το τέλος του 2017, οι μηνιαίες μέσες τιμές έχουν ξεπεράσει σταθερά τα 10.000 \$/t, παρουσιάζοντας σταθερή ανοδική πορεία και κορυφή στα 15.100 \$/t τον Ιούνιο του 2018. Από το 2018 οι τιμές του νικελίου ήταν σταθερές με αξιοσημείωτες ωστόσο μηνιαίες μεταβολές. Μετά την κορύφωση του Σεπτεμβρίου του 2019 στα 17.700 \$/t, η τιμή του νικελίου παρουσίασε τεράστια πτώση στα 11.800 \$/t τον Απρίλιο του 2020. Η απότομη μείωση της τιμής οφείλεται στο αντίκτυπο της πανδημίας Covid-19, λόγω της οποίας η παγκόσμια βιομηχανία επιβαρύνθηκε σε όλους τους τομείς της. Μια περαιτέρω αύξηση στην τιμή του νικελίου οφείλεται στην ταχεία οικονομική ανάπτυξη που παρουσίασε η Κίνα στο 2^ο εξάμηνο του 2020. (<https://insg.org/index.php/about-nickel/production-usage/>). Σήμερα (Αύγουστος 2023) η τιμή του νικελίου αντιστοιχεί σε 20.400 \$/t.



Εικόνα 4: Η τιμή του νικελίου από το 1991 μέχρι τον Μάιο του 2021 (πηγή: <https://insg.org/index.php/about-nickel/production-usage/>).

1.5 Αποθέματα νικελίου στην Ελλάδα και παγκοσμίως

Κοιτάσματα νικελίου συναντώνται σε πολλές χώρες με ανεπτυγμένο βιομηχανικό υπόβαθρο όπως η Ρωσία, η Κίνα, η Αυστραλία και ο Καναδάς. Οξειδωμένα κοιτάσματα υπάρχουν σε χώρες με τροπικό κλίμα όπως η Ινδονησία, στην ευρύτερη περιοχή της Καραϊβικής (Κούβα, Δομινικανή Δημοκρατία) και σε χώρες της Λατινικής Αμερικής, αλλά και σε χώρες όπως Ελλάδα, Αλβανία και Ουκρανία. Τα παγκόσμια αποθέματα ανέρχονται σε 100 εκατομμύρια τόννους το 2023 (<https://www.statista.com/statistics/1003284/nickel-reserves-worldwide/>). Περίπου το 60% των αποθεμάτων αυτών απαντώνται σε λατερίτες και το υπόλοιπο 40% είναι σε θειούχες ενώσεις. Η Αυστραλία και η Ινδονησία έχουν παραπλήσια αποθέματα, κοντά στους 21 εκ. τόνους. Η Λατινική Αμερική κατέχει σχεδόν το ένα τέταρτο. Πιο συγκεκριμένα η Βραζιλία με 17% (16 εκ. τόνους) και η Κούβα με 6% (5.5 εκ. τόνους) έχουν τα μεγαλύτερα αποθέματα στη Νότια Αμερική (USGS,2022). Η Ελλάδα είναι προνομιούχος έναντι των άλλων χωρών της Ε.Ε., καθόσον στο υπέδαφος της απαντούν σε αφθονία σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα. Η εξόρυξη του νικελίου και η παραγωγή κοκκοποιημένου σιδηρονικελίου γίνεται από τη Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ, η οποία είναι μια από τις πέντε μεγαλύτερες βιομηχανίες παραγωγής σιδηρονικελίου στον κόσμο. Η εταιρεία εκμεταλλεύεται τα νικελιούχα κοιτάσματα που εντοπίζονται στους νομούς Εύβοιας, Βοιωτίας και Καστοριάς. Στην περιοχή της Εύβοιας λειτουργούν πέντε μεταλλεία επιφανειακής εκμετάλλευσης με μέση περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι 1-1.03%. Στο νομό Βοιωτίας βρίσκεται το μεταλλείο του Αγίου Ιωάννη στο οποίο η εξόρυξη πραγματοποιείται σε τρεις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις με περιεκτικότητα σε νικέλιο 1.05-1.1%. Τα μεταλλεία Καστοριάς παρουσιάζουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε νικέλιο σε σύγκριση με τα άλλα μεταλλεία (<http://www.larco.gr>). Από το Φεβρουάριο του 2020 η Γ.Μ.Μ.Α.Ε ΛΑΡΚΟ έχει εισέλθει σε καθεστώς ειδικής διαχείρισης (ΣΜΕ, 2021), με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση της παραγωγής νικελίου κατά 50% σε σχέση με το παραγωγικό της δυναμικό, από 12.000 τόνους το 2019 σε 6.000 τόνους το 2020. Στην Εικόνα 5 απεικονίζονται τα αποθέματα σιδηρονικελιούχου λατερίτη της Ελλάδας σε τόνους.



Εικόνα 5: Τα αποθέματα νικελίου σε λατερίτες σε τόνους στην Ελλάδα (πηγή: <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/>).

1.6 Προέλευση νικελίου

Οι περισσότεροι πόροι νικελίου συναντώνται στα λατεριτικά κοιτάσματα. Ωστόσο, στη φύση συναντώνται δύο τύποι κοιτασμάτων νικελίου ανάλογα με τον τρόπο γένεσής τους, τα θειούχα και τα λατεριτικά (Οικονομίδη, 2017).

1.6.1 Θειούχα κοιτάσματα

Πρόκειται για μαγματικής προέλευσης (υδροθερμικά) μεταλλεύματα πλούσια σε θείο. Το βασικό ορυκτό είναι ο πεντλανδίτης με χημικό τύπο $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ και ακολουθεί ο νικελιούχος πυρροτίτης όπου το νικέλιο εντοπίζεται σαν στερεό διάλυμα μέσα στο θειούχο ορυκτό του σιδήρου ($\text{Fe}_{\eta}\text{S}_{\eta+1}$). Τα θειούχα μεταλλεύματα έχουν περιεκτικότητα σε νικέλιο περίπου 1%. Τα τελευταία χρόνια, λόγω των μειωμένων αποθεμάτων, έχει μειωθεί αισθητά η παραγωγή νικελίου από θειούχα κοιτάσματα (McDonald & Whittington, 2008).

1.6.2 Λατεριτικά κοιτάσματα

Οι λατερίτες είναι έντονα αποσάθρωμένα υλικά, πλούσια σε δευτερογενή οξείδια του σιδήρου, του αργιλίου με σημαντικά ποσοστά χαλαζία και καολινίτη, χωρίς άλλα πρωτογενή πυριτικά ορυκτά. Συναντώνται σε τροπικό έως εύκρατο κλίμα σαν προϊόντα τελικής αποσάθρωσης με χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα. Ο λατερίτης φιλοξενεί αρκετά σημαντικά μεταλλικά στοιχεία (Evans, 1993). Μπορεί να αποτελέσει μέταλλευμα σιδήρου, αργιλίου και νικελίου. Οι λατερίτες αποτελούν το 70% των αποθεμάτων νικελίου παγκοσμίως, αλλά η επεξεργασία τους, λόγω της πολύπλοκης ορυκτολογίας και των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων, έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μόνο του 45% του νικελίου από τα κοιτάσματα αυτά (Rice, 2016).

1.7 Γεωλογική δομή των κοιτασμάτων

Παρατηρούνται τρεις διαφορετικές κατηγορίες γεωλογικών δομών στα κοιτάσματα νικελίου, τα αυτόχθονα, τα αλλόχθονα και τα ψευδοαυτόχθονα.

1.7.1 Αυτόχθονα ή πρωτογενή κοιτάσματα

Πρόκειται για κοιτάσματα που δεν έχουν μετακινηθεί ή μετακινήθηκαν ελάχιστα από το μητρικό πέτρωμα (οφιόλιθος) πάνω στο οποίο έλαβε χώρα ο σχηματισμός του σιδηρονικελιούχου κοιτάσματος μέσω της λατεριτικής αποσάθρωσης. Στα αυτόχθονα κοιτάσματα λατερίτη, η σαπρολιτική ζώνη συνήθως εμφανίζει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Ni και Co (Αποστολίκας, 2007).

1.7.2 Αλλόχθονα ή ετερογενή κοιτάσματα

Τα κοιτάσματα που έχουν μεταφερθεί από το μητρικό πέτρωμα κατά την περίοδο της άνω κρητιδικής επίκλυσης. Τα κοιτάσματα αυτά είναι υπερκείμενα σε τριαδικούς ή ιουρασικούς ασβεστόλιθους.

1.7.3 Ψευδοαυτόχθονα κοιτάσματα

Τα κοιτάσματα εκείνα τα οποία έχουν μεταφερθεί, αλλά βρίσκονται πάλι πάνω σε οφιόλιθους και δίνουν την εντύπωση πρωτογενών κοιτασμάτων (Augustithis, 1967).

Κεφάλαιο 2: Νικελιούχοι λατερίτες

2.1 Προέλευση νικελιούχων λατεριτών

Οι νικελιούχοι λατερίτες προέρχονται από χημική αποσάθρωση υπερβασικών πετρωμάτων, κυρίως δουνίτες, περιδοτίτες και σερπεντινίτες με περιεκτικότητα σε νικέλιο 0,2-0,4% (Golightly, 1981; Χρηστίδης, 2002). Το νικέλιο, μέσω χημικών διεργασιών, αντικαθιστά το Mg, Si και Ca και σχηματίζεται λατερίτης πλούσιος σε Ni. Οι νικελιούχοι λατερίτες παρουσιάζουν κατά κανόνα ομοιομορφία στην εμφάνισή τους με ανάπτυξη χαρακτηριστικής ζώνωσης. Οι τυπικοί Ni-λατερίτες αποτελούνται από κάτω προς τα πάνω από τους εξής ορίζοντες (Χρηστίδης, 2015) :

- Το μητρικό πέτρωμα, το οποίο μπορεί να είναι περιδοτίτης ή σερπεντίνης
- Τη ζώνη του εξαλλοιωμένου περιδοτίτη που λέγεται και ζώνη του σαπρολίτη. Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση νικελίου.
- Τη ζώνη του υπολειμματικού λατερίτη, η οποία διακρίνεται στις επιμέρους ζώνες:
 - Του πορώδους λειμωνίτη, των κονδύλων των οξειδίων σιδήρου με κροκαλοπαγοειδή εμφάνιση και του καλύμματος των οξειδίων του σιδήρου. Η ζώνη αυτή σπάνια υφίσταται εκμετάλλευση για νικέλιο.

Οι ζώνες αυτές μπορεί να παρουσιαστούν διαφοροποιημένες, ανάλογα το κοίτασμα. Σε πολλές περιπτώσεις, η ζώνη πορώδους λειμωνίτη μπορεί να είναι λεπτή λόγω διάβρωσης ή να μην εμφανίζεται υποζώνη κονδύλων οξειδίων σιδήρου. Σε κάθε περίπτωση, μεγαλύτερη συγκέντρωση νικελίου παρατηρείται στη σαπρολιτική ζώνη και ακολουθεί η λειμωνιτική υποζώνη με θεάσεις νικελιούχου λειμωνίτη.

2.2 Παράγοντες που διευκολύνουν το σχηματισμό των νικελιούχων λατεριτικών κοιτασμάτων

Η λατεριτίωση οδηγεί σε εμπλουτισμό σε νικέλιο που φτάνει 10 έως 30 φορές την αρχική συγκέντρωση. Η χημική διεργασία της λατεριτίωσης ευημερεί σε εδάφη με συγκεκριμένα τοπογραφικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά. Η μορφολογία και τα χαρακτηριστικά του εδάφους επηρεάζουν το βαθμό περατότητας της βροχής στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Η ορυκτολογία του μητρικού πετρώματος καθορίζει την επιδεκτικότητα των υλικών στη διάσπαση τους, μέσω διεργασιών εξαλλοίωσης (Mick Elias, 2002). Πιο συγκεκριμένα, οι σημαντικότεροι παράγοντες που ευνοούν την λατεριτίωση είναι (Χρηστίδης, 2002):

- Κλίση έως 20° στα πρηνή
- Τροπικό κλίμα με συνεχή διοχέτευση υγρασίας έως τα πιο βαθιά στρώματα
- Παρουσία υπερβασικών πετρωμάτων η οποία θα διευκολύνει τη λατεριτίωση
- Επίπεδο ανάγλυφο των εμφανίσεων ώστε να διευκολύνεται η σταθερή και αργή κίνηση του νερού κάτω από την επιφάνεια σε μεγαλύτερα βάθη

2.3 Σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα

2.3.1 Ελληνικά Σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα

Η γένεση των Ελληνικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων συνδέεται με την λατεριτική αποσάθρωση πετρωμάτων οφιολιθικών συμπλεγμάτων και την απόθεση των προϊόντων είτε *in situ* (αυτόχθονα), είτε ως χημικά ιζήματα σε καρστικά έγκοιλα Τριαδικών-Ιουρασικών ασβεστόλιθων ή πάνω από σερπεντινωμένα υπερβασικά πετρώματα (ετερόχθονα), καλυπτόμενα στη συνέχεια από Άνω Κρητιδικούς ασβεστόλιθους. Σε ορισμένες περιοχές (περιθώρια Μεσοελληνικής αύλακας), τα λατεριτικά προϊόντα καλύπτονται από Ολιγοκαινικά ή Μεσοκαινικά μολассικά ιζήματα (Αποστολίκας, 2010). Τα κοιτάσματα των νικελιούχων μεταλλευμάτων παράγονται από την εκχύλιση του ολιβίνη, του σερπεντίνη και του νικελιούχου μαγνητίτη. Ο τελευταίος προέρχεται υδροθερμικά από τον ολιβίνη πριν το στάδιο της αποσάθρωσης.

Κοιτάσματα Καστοριάς

Πρόκειται για αυτόχθονα κοιτάσματα τα οποία σχηματίστηκαν από τη χημική αποσάθρωση υπερβασικών πετρωμάτων (οφιολίθων), υπό συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και πυρίτιο (Zengolis et al., 2010). Το βασικότερο σιδηρούχο ορυκτό στο συνδετικό υλικό και στους πισσόλιθους είναι ο γκαϊτίτης. Η περιεκτικότητα σε Ni είναι 1.44% (Agatzini et al., 2004) και παρατηρείται μικρή αύξηση της συγκέντρωσης του από την επιφάνεια προς τα πιο βαθιά στρώματα.

Κοιτάσματα Βοιωτίας-Εύβοιας

Τα κοιτάσματα στις περιοχές Άγιος Ιωάννης Βοιωτίας και στην Εύβοια θεωρούνται δευτερογενή. Πρόκειται για διαβρωμένα κοιτάσματα, των οποίων το υλικό τους μεταφέρθηκε με τη βοήθεια της βαρύτητας ή του νερού και αποτέθηκε εκ νέου σε άλλη περιοχή. Οι λατερίτες αυτού του τύπου εξορύσσονται πιο εύκολα λόγω της ομοιομορφίας τους, ωστόσο έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε νικέλιο.

Κοιτάσματα Έδεσσας

Τα κοιτάσματα στην περιοχή της Έδεσσας είναι δευτερογενή. Έχουν προκύψει από μεταφορά του πρωτογενούς υλικού. Περιέχουν αξιόλογες ποσότητες οξειδίων όπως χρωμίτη, αιματίτη και μαγνητίτη (Τσιτσιπάτη, 2007). Τα προαναφερθέντα ορυκτά εγκλωβίζουν το Ni, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα στο στοιχείο αυτό.

2.3.2 Μεταλλουργικές μέθοδοι παραγωγής σιδηρονικελίου νικελίου στην Ελλάδα

Η εκμετάλλευση και ο εμπλουτισμός των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων στην Ελλάδα γίνεται από την εταιρεία ΛΑΡΚΟ. Οι μεταλλουργικές εγκαταστάσεις βρίσκονται στη Λάρυμνα του νομού Φθιώτιδας. Στο Μεταλλουργικό Εργοστάσιο συντελείται πυρομεταλλουργική επεξεργασία των λατεριτών με στόχο την παραγωγή σιδηρονικελίου περιεκτικότητας 18-24% σε νικέλιο.

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

- 1^η Φάση: Θραύση και ομογενοποίηση των λατεριτικών νικελιούχων μεταλλευμάτων και ανάμιξη τους με στερεά καύσιμα για προετοιμασία του Μεταλλουργικού Μίγματος (Μ.Μ).
- 2^η Φάση: Προθέρμανση μέχρι τους 800 °C και Προαναγωγή του Μεταλλεύματος σε Περιστροφικές Καμίνους.

- 3^η Φάση: Αναγωγική θέρμανση και τήξη μέχρι τους 1450 °C του προϊόντος εξαγωγής των περιστροφικών καμίνων σε Ηλεκτρικές Καμίνους για την παραγωγή τηγμένου κράματος Fe-Ni (12-16% Ni).
- 4^η Φάση: Εμπλουτισμός-Εξευγενισμός του τηγμένου κράματος Fe-Ni (12-16%) σε Μεταλλάκτες OBM με εμφύσηση οξυγόνου και προσθήκη ασβέστη σε θερμοκρασίες μέχρι 1700 °C για την παραγωγή κοκκοποιημένου κράματος Fe-Ni (18-24% Ni).

Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι εμπλουτισμού

3.1 Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων

Εμπλουτισμός ονομάζεται το σύνολο των διαδικασιών που πρέπει να υποστεί ένα μέταλλευμα για να διαχωριστεί το χρήσιμο ορυκτό από τα συνυπάρχοντα στείρα υλικά (Σταμπολιάδης, 2008). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των χρήσιμων ορυκτών από τα άχρηστα στηρίζονται στις διαφορές των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των ορυκτών. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραχθεί ένα προϊόν εμπλουτισμένο στο χρήσιμο ορυκτό, το ονομαζόμενο συμπύκνωμα, ενώ απορρίπτεται το άχρηστο υλικό, με όσο το δυνατόν μικρότερη συγκέντρωση στο χρήσιμο ορυκτό, ονομαζόμενο απόρριμμα.

3.2 Κατάτμηση υλικού

Η βελτίωση της αποδέσμευσης του χρήσιμου για την δημιουργία ενός ικανοποιητικού συμπυκνώματος, γίνεται με την κατάτμηση του αρχικού υλικού που μειώνει το μέγεθος του τεμαχιδίου. Ο όρος κατάτμηση περιλαμβάνει όλες τις μεθόδους ελάττωσης του μεγέθους υλικών (Πετράκης, 2004). Ύστερα ακολουθεί η επιλεγμένη μέθοδος εμπλουτισμού, όπου διαχωρίζεται το συμπύκνωμα από το απόρριμμα.

Η κατάτμηση περιλαμβάνει διαφορετικά στάδια, αναλόγως με το μέγεθος του υπό επεξεργασία υλικού. Η θραύση αποτελεί το πρώτο στάδιο της κατάτμησης από το αρχικό μέγεθος μέχρι περίπου 10 έως 2 mm. Για τα πιο λεπτόκοκκα προϊόντα η διαδικασία ονομάζεται λειοτρίβηση ή άλεση.

3.2.1 Δυνάμεις κατάτμησης

Για να αστοχήσει ένα σώμα, χρειάζεται να καταβληθούν δυνάμεις που να υπερβαίνουν τις αντίστοιχες δυνάμεις συνοχής του υλικού αυτού. Οι κυριότερες δυνάμεις που εξασκούν οι μηχανές κατάτμησης είναι οι ακόλουθες:

Θλίψη: Πρόκειται για τη συνηθέστερη μορφή δύναμης που χρησιμοποιείται στην κατάτμηση και εφαρμόζεται μέσω της συμπίεσης των σωμάτων μεταξύ δύο επιφανειών. Η πίεση εξασκείται από τη μία επιφάνεια ενώ η άλλη μένει ακίνητη (Σταμπολιάδης, 2008). Οι κυριότεροι τύποι μηχανών κατάτμησης με θλίψη είναι οι σιαγονωτοί, οι γυροσκοπικοί και οι κωνικοί σπαστήρες.

Κρούση: Είναι η απλούστερη δύναμη κατάτμησης και εξασκείται με την απότομη πρόσκρουση τεμαχίου επί ταχέως κινούμενης επιφάνειας ή αντιστρόφως, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του τεμαχίου (Σταμπολιάδης, 2008). Οι κυριότερες μηχανές κατάτμησης με κρούση είναι οι κρουστικοί περιστροφικοί σπαστήρες και εν μέρει οι σφαιρόμυλοι, οι ραβδόμυλοι και οι μύλοι αυτογενούς λειοτρίβησης.

Τριβή: Είναι η δύναμη κατάτμησης που εφαρμόζεται όταν το υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων και αντιθέτως κινούμενων επιφανειών που δημιουργούν διατμητικές τάσεις μέσα στο σώμα και ολίσθηση σε εσωτερικές επιφάνειες του σώματος. Ο σφυρόμυλος θεωρείται ως η κυριότερη μηχανή κατάτμησης με τριβή. Άλλες τέτοιες μηχανές είναι οι σφαιρόμυλοι και οι ραβδόμυλοι.

Διάτμηση: Είναι κυρίως εφελκυστική δύναμη και έχει περιορισμένη εφαρμογή στην κατάτμηση και εν μέρει παρατηρείται στους σφυρόμυλους και τους οδοντωτούς κυλινδρόμυλους.

3.3 Θραύση

Η θραύση περιλαμβάνει τα στάδια της κατάτμησης από το αρχικό μέγεθος μέχρι περίπου τα 10 έως 2mm. Σκοπός της πρωτογενούς θραύσης σε βιομηχανική κλίμακα είναι η μείωση του μεγέθους του εξορυσσόμενου υλικού που μπορεί να περιέχει όγκους μέχρι και ένα μέτρο, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί σε μεταφορικές ταινίες.

Οι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τις ανάγκες θραύσης του υλικού ήταν ο σιαγονωτός σπαστήρας και έπειτα για λεπτομερέστερη θραύση, ο κωνικός σπαστήρας. Ο σιαγονωτός σπαστήρας αποτελείται από δύο επιφάνειες, με την μία να είναι ακίνητη και την άλλη να κινείται υπο γωνία σε σχέση με την πρώτη. Το ρυθμιζόμενο άνοιγμα ανάμεσα στις επιφάνειες καθορίζει το μέγεθος του προϊόντος, το οποίο δεν είναι σταθερό.

3.4 Λειοτρίβηση

Η λειοτρίβηση διενεργείται σε μηχανές όπως ο ραβδόμυλος ή ο σφαιρόμυλος, όπου το μετάλλευμα λειοτριβείται μέσω της πτώσης και της κύλισης στο εσωτερικό τους (Σταμπολιάδης, 2008). Οι μηχανές αυτές αποτελούνται από ένα κυλινδρικό κέλυφος στηριγμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με υψηλές συχνότητες περιστροφής. Μέσα στο πακτωμένο κέλυφος, υπάρχει μονίμως ένα φορτίο από μεταλλικές ράβδους ή σφαίρες, που βρίσκονται σε συνεχή κίνηση λόγω της περιστροφής του μύλου.

Κατά την περιστροφή του μύλου οι μεταλλικές ράβδοι ή τα άλλα μέσα λειοτρίβησης είτε ανυψώνονται μέχρι που πολλές από αυτές αρχίζουν να κυλούνται πάνω στις άλλες, είτε ανυψώνονται περισσότερο μέχρι το σημείο που πέφτουν ελεύθερα προς τα κάτω και κατακρημνίζονται ακολουθώντας μια παραβολική τροχιά. Η πτώση και το κατακρύλισμα των ράβδων ή των σφαιρών λειοτριβεί το μετάλλευμα που συνυπάρχει με αυτές μέσα στο κέλυφος.

Σε μικρές συχνότητες περιστροφής δεν έχουμε ελεύθερη πτώση των ράβδων ή των σφαιρών του μύλου και απλά κυλούνται η μία πάνω στην άλλη. Η κίνηση αυτή δεν είναι αποδοτική και δημιουργεί πολύ ψιλό προϊόν. Σε κανονική λειτουργία του μύλου υπάρχει πτώση των μέσων λειοτρίβησης που δημιουργεί κρούσεις και την επιθυμητή κατάτμηση του μεταλλεύματος (Καρμάλη, 2015).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο σφαιρόμυλος (προσθήκη σφαιρών στο κέλυφος), μια επιλογή που προτιμάται όταν χρειάζεται λεπτομερέστερη λειοτρίβηση.

3.4.1 Παράμετροι λειοτρίβησης

Πριν την διεξαγωγή λειοτριβήσεων, είναι σημαντικό να ληφθούν υπ'όψιν δύο σημαντικοί παράμετροι. Αυτοί οι παράμετροι είναι ο συντελεστής πλήρωσης του μύλου σε σφαίρες J και ο συντελεστής πλήρωσης του μύλου σε υλικό f_c .

Ο συντελεστής πλήρωσης J ορίζεται ως ο λόγος του όγκου πλήρωσης των σφαιρών προς το διαθέσιμο όγκο του μύλου και ο συντελεστής f_c ως ο λόγος του όγκου πλήρωσης του υλικού προς τον διαθέσιμο όγκο του μύλου.

$$J = \frac{\text{Όγκος σφαιρών}}{\text{Όγκος μύλου}} \cdot \frac{1}{1-\varphi} \quad (\%) \quad (1)$$

$$f_c = \frac{\text{Όγκος υλικού}}{\text{Όγκος μύλου}} \cdot \frac{1}{1-\varphi} \quad (2)$$

όπου,

φ είναι το πορώδες του υλικού και των σφαιρών το οποίο θεωρείται ίσο με 0,4 ή 40% (Austin et al., 1984)

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών U με υλικό που υπολογίζεται,

$$U = \frac{f_c}{\varphi \cdot J} \quad (3)$$

Όσο μικρότερη είναι η διαφορά του συντελεστή πλήρωσης των κενών των σφαιρών U από την τιμή 1, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση των σωματιδίων του υλικού ανάμεσα στις σφαίρες.

Κεφάλαιο 4: Μαθηματικά μοντέλα κατάτμησης

Για τον έλεγχο της θραύσης απαιτούνται μοντέλα προσομοίωσης που αποσκοπούν στην ακριβέστερα δυνατή προσομοίωση της διαδικασίας. Πρόκειται για μαθηματικές προσεγγίσεις που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της διεργασίας της κατάτμησης.

Η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους σωματιδίων στα επιθυμητά όρια επιτυγχάνεται μέσω επαναλαμβανόμενων ενεργειών θραύσης. Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη διαδικασία, προβλέπει την κατανομή του μεγέθους του προϊόντος σε συνάρτηση με την αρχική τροφοδοσία, την ενέργεια που καταναλώνεται, ενώ περιέχει και τις μεταβλητές λειτουργίας του μύλου.

Τα μοντέλα προσομοίωσης βασίζονται σε 2 βασικές λειτουργίες (Πετράκης, 2017):

- Την πιθανότητα θραύσης ενός τεμαχιδίου συγκεκριμένου μεγέθους.
- Την κατανομή μάζας των τεμαχιδίων ενός υλικού που προκύπτουν από τη θραύση του.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το Μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού (Population Balance Model, PBM). Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη το ρυθμό θραύσης κάθε τάξης μεγέθους και τη μάζα του υλικού που παράχθηκε κάτω από ένα μέγεθος (αθροιστική συνάρτηση).

4.1 Μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού (PBM)

Το μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού αποτελεί ένα πλήρες ισοζύγιο μάζας για κάθε τάξη μεγέθους που συμμετέχει σε ένα μύλο πλήρους ανάμιξης και έχει σκοπό την εξήγηση του φαινομένου της λειοτριβήσης. Θεωρούμε ένα υλικό μάζας M σε ένα μύλο λειοτριβήσης το οποίο το χωρίζουμε σε $N+1$ τάξεις μεγέθους, ξεκινώντας από την 1 και καταλήγοντας στην $N+1$. Κάθε τάξη μεγέθους i αποτελείται από ένα ανώτερο μέγεθος x_i και ένα κατώτερο μέγεθος x_{i+1} και χαρακτηρίζεται από το δείκτη του ανώτερου μεγέθους του. Εάν μετά από χρόνο t λειοτριβήσης η τάξη μεγέθους i έχει μάζα $m_i(t)$, τότε η θεμελιώδης εξίσωση ισορροπίας μεγέθους-μάζας εκφράζεται με την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d[m_i](t)M}{dt} = -S_i m_i(t)M + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} S_j m_j(t)M \quad (4)$$

Όπου,

S_i : είναι ο ρυθμός θραύσης των τεμαχίων της τάξης μεγέθους i

$b_{i,j}$: είναι το κλάσμα μάζας των τεμαχίων αρχικού μεγέθους

j : τα τεμαχίδια τα οποία παρέμειναν στην τάξη μεγέθους i , μετά τη θραύση.

Άρα σύμφωνα με το μοντέλο, ο ρυθμός παραγωγής της τάξης μεγέθους i ισούται με το άθροισμα του ρυθμού εμφάνισης μεγέθους i που παράγεται από τη θραύση μεγαλύτερου μεγέθους j μείον το ρυθμό εξαφάνισης του i σε μικρότερα μεγέθη λόγω θραύσης (Πετράκης, 2017).

4.2 Συνάρτηση θραύσης (Breakage function)

Η συνάρτηση θραύσης χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατανομή μεγέθους που προκύπτει από τη θραύση ενός υλικού. Με απλά λόγια, δίνει μια πλήρη περιγραφή της κοκκομετρίας του προϊόντος.

Η συνάρτηση θραύσης $b_{i,j}$ για τεμάχια μεγέθους j που έσπασαν και παρέμειναν στη τάξη μεγέθους i ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$b_{i,j} = \frac{\text{μάζα του υλικού μεγέθους } j \text{ που έσπασε και παρέμεινε στη τάξη μεγέθους } i}{\text{μάζα του υλικού μεγέθους } j \text{ που έσπασε}} \quad (5)$$

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

$$B_{i,j} = \sum_{k=n}^i b_{k,j} \quad (6)$$

Όπου $b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j}$

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

Οι Austin και Bagga (1981), έδειξαν ότι οι τιμές του $B_{i,j}$ μπορούν να υπολογιστούν από την ανάλυση του μεγέθους των προϊόντων για ένα σύντομο χρονικό διάστημα λειοτριβήσης, χρησιμοποιώντας ως αρχική τροφοδοσία μια στενή τάξη μεγέθους τεμαχιδίων j . Για να το δείξουν αυτό χρησιμοποίησαν την σχέση (7):

$$B_{i,j} = \frac{\log[(1-P_i(0))/(1-P_i(t))]}{\log[(1-P_{j+1}(0))/(1-P_{j+1}(t))]} \quad (7)$$

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

Η παραπάνω σχέση προϋποθέτει ότι μια μικρή ποσότητα μικρότερων μεγεθών θα χρησιμοποιηθεί για να ξανασπάσει. Έχει παρατηρηθεί από έρευνες ότι τα σωστά αποτελέσματα λαμβάνονται όταν ο χρόνος της θραύσης έχει επιλεγεί για να δώσει μια ποσότητα από 20-30% θραυσμένου υλικού κάτω από το μέγεθος j (Austin et al., 1984).

Μια ακόμη εμπειρική σχέση για την αθροιστική συνάρτηση θραύσης, αποτελεί αυτή των Austin and Luckie (1972) η οποία αποτελεί το άθροισμα δύο γραμμών σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα:

$$B_{i,j} = \Phi_j \cdot \left(\frac{x_i - j}{x_j}\right)^\gamma + (1 - \Phi_j) \cdot \left(\frac{x_i - 1}{x_j}\right)^\beta \quad (8)$$

όπου,

x_j : είναι το μέγιστο μέγεθος τεμαχιδίου.

γ : είναι η κλίση του κατώτερου τμήματος ευθείας της καμπύλης.

β : είναι η κλίση του άνω τμήματος.

Φ_j : είναι το σημείο τομής του κατώτερου τμήματος της ευθείας με τον άξονα y .

Οι παράμετροι Φ_j , γ και β της θραύσης εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού. Το γ , που αντιστοιχεί στην κλίση του κατώτερου τμήματος της ευθείας με τον άξονα y , χαρακτηρίζει τη σχετική ποσότητα των λεπτομερών που παράχθηκαν από τη θραύση. Συνεπώς η παράμετρος αυτή έχει άμεση σχέση με την αποδοτικότητα της λειοτριβήσης.

4.3 Ρυθμός Θραύσης (Breakage rate)

Μετά την διαδικασία της λειοτριβήσης, από το υλικό τροφοδοσίας προκύπτει ένα προϊόν με τεμαχίδια μικρότερου μεγέθους. Ο ρυθμός θραύσης κάθε τάξης μεγέθους του υλικού δείχνει πόσο γρήγορα θραύονται τα τεμαχίδια όσο προχωράει η λειοτριβήση. Το μέγεθος, σαν όρος, είναι το στενό κλάσμα κόκκων που προκύπτει με κοσκίνιση και περιέχεται μεταξύ δύο συνεχόμενων κοσκίνων. Το κλάσμα αυτών των κόκκων το ονομάζουμε τάξη μεγέθους i και περιέχει κόκκους μεταξύ των ανοιγμάτων οπών x_i του ανώτερου κοσκίνου και του ανοίγματος οπών x_{i+1} του κατώτερου. Εάν εισάγουμε υλικό τάξης μεγέθους $i=1$ μέσα στο μύλο και λειοτριβήσουμε το υλικό για χρονικό διάστημα t , τότε είναι δυνατόν να υπολογίσουμε το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους αυτής. Αν M είναι η συνολική μάζα του υλικού στο μύλο και $m_i(t)$ είναι το κλάσμα μάζας των κόκκων της τάξης μεγέθους $i=1$, έχει βρεθεί ότι ο ρυθμός θραύσης της τάξης μεγέθους 1 είναι ανάλογος της ποσότητας $m_i(t)$ που έχει το μέγεθος αυτό. Αυτό φαίνεται από τη σχέση (7) (Austin and Luckie, 1972; Klimpel, 1997; Deniz, 2013):

$$\frac{d[m_i(t)M]}{dt} = S_i m_i(t)M \quad (9)$$

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

$$\frac{d[m_i(t)M]}{dt} = -S_i m_i(t)M \quad (10)$$

Όπου,

$m_i(t)$: το κλάσμα του υλικού του μεγέθους i μετά τη λειοτριβήση σε χρόνο t ,

S_i : ρυθμός θραύσης της τάξης μεγέθους σε min^{-1}

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

$$\frac{m_i(t)}{m_{i(0)}} = \exp(-S_i \cdot t) \quad (11)$$

Λογαριθμίζοντας την παραπάνω σχέση:

$$\log \frac{m_i(t)}{m_{i(0)}} = \frac{-S_i t}{2.3} \quad (12)$$

Η σχέση (12) δείχνει ότι σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα του βάρους που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους i σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης, η κλίση της ευθείας είναι ο ρυθμός θραύσης (S_i) της τάξης μεγέθους i .

4.4 Επίδραση μεγέθους σφαίρας

Η σωστή επιλογή του μεγέθους των σφαιρών στη διαδικασία λειοτρίβησης είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας αυτής (Πετράκης, 2017). Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι οι μεγάλες σφαίρες είναι πιο αποτελεσματικές για τα μεγάλα τεμαχίδια, ενώ οι μικρές σφαίρες πρέπει να προορίζονται για λειοτρίβηση λεπτότερων τεμαχιδίων. Τα πιο σκληρά και χονδρόκοκκα υλικά απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και μεγάλα μέσα, ενώ τα λεπτά υλικά απαιτούν μεγαλύτερη επιφάνεια λειοτρίβησης και μικρότερα μέσα (Napier-Munn et al. 1996). Η σχέση μεταξύ του βέλτιστου μεγέθους (x_m) τροφοδοσίας του μύλου και της διαμέτρου της σφαίρας (d) είναι η ακόλουθη:

$$x_m = k \cdot d^A \quad (13)$$

Όπου,

k, A : σταθερές,

d : διάμετρος σφαίρας.

Ως βέλτιστο μέγεθος x_m ορίζεται το μέγεθος αυτό για το οποίο ο ρυθμός θραύσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή. Η σχέση αυτή δείχνει ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος της σφαίρας, ο μέγιστος ρυθμός θραύσης επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερο μέγεθος τροφοδοσίας.

Οι Austin et al. (1976) αναφέρουν ότι η σταθερά k παίρνει τιμές από 10^{-3} έως $0,7 \cdot 10^{-3}$ για μαλακά μέχρι σκληρά υλικά ενώ, οι Napier-Munn et al. (1996) βρήκαν ότι η σταθερά k είναι της τάξης $0,44 \cdot 10^{-3}$.

Ο εκθέτης A έχει βρεθεί ότι συνήθως είναι ίσος με 2. Αυτό όμως δεν ισχύει για όλα τα υλικά. Οι Kotake et al. (2002) μετά από σειρά δοκιμών σε διάφορα υλικά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές του εκθέτη ανάλογα με το υλικό.

4.5 Μέγεθος σφαιρών και ρυθμός θραύσης

Μελέτες έχουν δείξει ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του ρυθμού θραύσης και του μεγέθους του τεμαχιδίου. Σύμφωνα με τη θεωρία θραύσης του Griffith (Austin et al., 1984), πολύ λεπτά τεμαχίδια είναι δύσκολο να θραυτούν με το ίδιο μέγεθος σφαιρών στο μύλο. Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος των τεμαχιδίων, πρέπει αντίστοιχα να αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης.

Τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών λειοτρίβησης σε μύλους (Austin et al., 1984) έδειξαν ότι ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται όσο αυξάνεται και το μέγεθος των τεμαχιδίων αλλά μέχρι ένα σημείο όπου γίνεται μέγιστος και στη συνέχεια μειώνεται. Αυτή τη συμπεριφορά του ρυθμού θραύσης φαίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_i = a_T x_i^a \cdot Q_{(xi)} = a_T x_i^a \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^A} \right) \quad (14)$$

Όπου,

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

a_T και μ : είναι παράμετροι που εξαρτώνται από τις συνθήκες της λειοτριβήσης.

a και Λ : είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό.

Η παράμετρος a είναι θετικός αριθμός και η τιμή του κυμαίνεται από 0.5 έως 1.5. Το Λ είναι ένας θετικός αριθμός όπου δείχνει πόσο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός θραύσης μετά το βέλτιστο μέγεθος. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του Λ , τόσο πιο γρήγορα μειώνονται οι τιμές.

Το $Q_{(x)}$ παίρνει τιμές μικρότερες του 1 όταν λαμβάνει χώρα μη ομαλή θραύση, δηλ. τα τεμαχίδια είναι πολύ μεγάλα και οι σφαίρες δεν είναι ικανές να τα θραύσουν ικανοποιητικά. Στα μικρότερα μεγέθη, όπου λαμβάνει χώρα ομαλή θραύση, το $Q(x)$ λαμβάνει τιμή ίση με 1 και η Σχέση (14) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$S_i = a_T x_i^a \quad (15)$$

Η σχέση αυτή αντιπροσωπεύει σε λογαριθμική κλίμακα μια ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση a είναι χαρακτηριστική του υλικού. Όταν $x_i = 1 \text{ mm}$ τότε ισχύει $S_i = a_T$. Δηλαδή a_T είναι ο ρυθμός θραύσης σε μέγεθος 1 mm.

Οι Austin et al. (1984) έδειξαν ότι οι παράμετροι του ρυθμού θραύσης για το ίδιο υλικό μεταβάλλονται ανάλογα με το μέγεθος της σφαίρας. Σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$a_T = a_0 \left(\frac{d_o}{d} \right)^\xi \quad (16)$$

$$\mu = \mu_o \left(\frac{d}{d_o} \right)^\eta \quad (17)$$

όπου,

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

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

ξ και η : σταθεροί εκθετικοί παράγοντες που αφορούν τη διάμετρο σφαίρας d στις παραμέτρους a και μ αντίστοιχα.

Το βέλτιστο μέγεθος των τεμαχιδίων x_m σε σχέση με την παράμετρο μ , για την ίδια διάμετρο σφαίρας, δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Austin et al., 1984):

$$x_m = \mu \left(\frac{a}{\Lambda - a} \right)^{1/\Lambda} \quad (18)$$

Στην παραπάνω σχέση το x_m είναι ανάλογο του μ , θεωρώντας ότι το a και το Λ είναι σταθερές για το ίδιο υλικό.

Κεφάλαιο 5: Θερμική επεξεργασία μεταλλευμάτων

5.1 Επεξεργασία του μεταλλεύματος με θέρμανση σε κάμινο

Γενικά, στην περίπτωση της λειοτρίβησης, το στάδιο της θερμικής επεξεργασίας χρησιμοποιείται προκειμένου να διασπαστεί η ορυκτολογική συνοχή των πρώτων υλών και να αυξηθεί η ευθραυστότητα, καθιστώντας με τον τρόπο αυτό ευκολότερη την περαιτέρω επεξεργασία τους με μεθόδους εμπλουτισμού ή/και με μεταλλουργικές μεθόδους.

Στη θερμική επεξεργασία, δεν απαιτείται προσθήκη αντιδραστηρίων και τα μεταλλεύματα συνήθως επεξεργάζονται θερμικά παρουσία αέρα, χωρίς να λαμβάνονται ιδιαίτερα προληπτικά μέτρα. Η θερμική επεξεργασία περιλαμβάνει μετασχηματισμό φάσεων, απομάκρυνση ελεύθερου ή δεσμευμένου νερού (αφυδάτωση, απομάκρυνση υδροξυλίων), αποδέσμευση διοξειδίου του άνθρακα (φρύξη), οξειδωση οργανικής ύλης ή οξειδίων διασθενούς σιδήρου, εκλεκτική τήξη συστατικών ή ολική τήξη μεταλλεύματος (Κομνίτσας, 2012).

5.2 Εφαρμογές της θερμικής επεξεργασίας στα μεταλλεύματα

5.2.1 Μετασχηματισμοί φάσεων

Όταν ορισμένα ορυκτά θερμαίνονται, μεταβάλλεται η κρυσταλλική τους δομή η οποία συνήθως συνοδεύεται από μεταβολή όγκου. Η μεταβολή αυτή προκαλεί σε πολλές περιπτώσεις τη δημιουργία ρωγμών και τον θρυμματισμό των στερεών καθιστώντας ευκολότερη την εκχύλισή τους.

5.2.2 Αφυδάτωση και απομάκρυνση υδροξυλίων

Ορισμένα ορυκτά περιέχουν στην κρυσταλλική τους δομή υδατικά μόρια ή ομάδες υδροξυλίων. Το ελεύθερο νερό ή το νερό σε κρυσταλλική μορφή απομακρύνονται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 400 °C. Η απομάκρυνση του νερού ονομάζεται αφυδάτωση. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου το νερό αποβάλλεται σε θερμοκρασία μεταξύ 400-600 °C, η διεργασία ονομάζεται απομάκρυνση υδροξυλίων και παράγονται υδρατμοί (Κομνίτσας, 2012).

5.2.3 Διάσπαση ανθρακικών

Η διεργασία αυτή λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες, προκαλώντας τη δημιουργία οξειδίων και είναι γνωστή ως φρύξη. Ανθρακικά ορυκτά με μεταλλουργικό ενδιαφέρον είναι ο μαγνησίτης και ο δολομίτης, τα οποία αποτελούν πρώτες ύλες για την παραγωγή μαγνησίου. Το οξείδιο του μαγνησίου που χρησιμοποιείται στα πυρίμαχα παράγεται με φρύξη του μαγνησίτη (Κομνίτσας, 2012).

5.2.4 Θέρμανση και απότομη ψύξη (quenching)

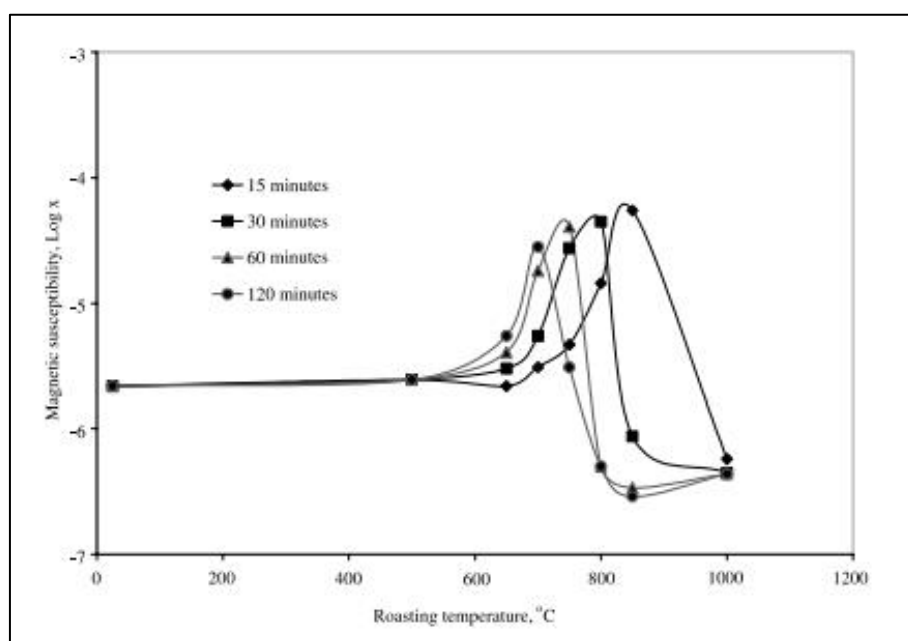
Η θέρμανση και απότομη ψύξη σε νερό προκαλεί θερμικό σοκ στο μέταλλευμα. Λόγω της συστολής των ορυκτολογικών φάσεων, δημιουργούνται εσωτερικές τάσεις εντός της δομής του μεταλλεύματος με αποτέλεσμα να μειώνονται οι δυνάμεις συνοχής του (Sikong et al., 2009). Σύμφωνα με τους Koleini and Barani (2008) ο δείκτης έργου του υλικού μειώνεται ενώ αυξάνεται ο ρυθμός θραύσης του.

Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές θέρμανσης –απότομης ψύξης στην πυρομεταλλουργία

6.1 Εργαστηριακές εφαρμογές της θέρμανσης στην βελτιστοποίηση του εμπλουτισμού

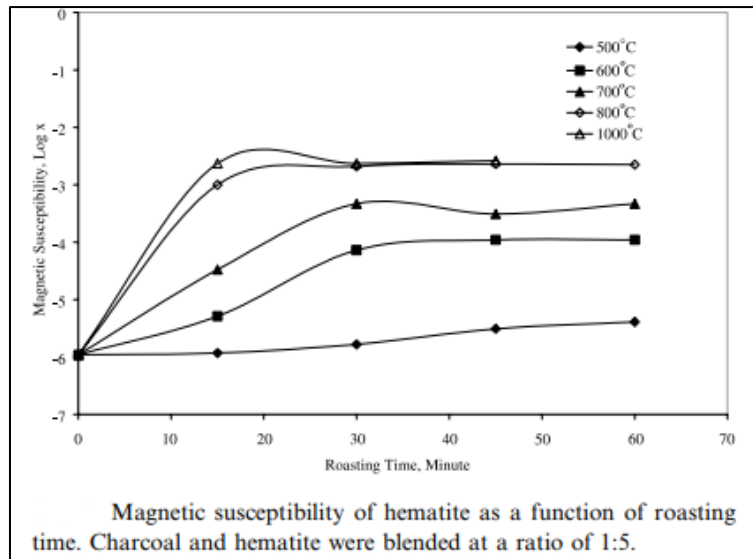
Η βιβλιογραφία αναφέρει πολλές έρευνες πάνω στην μελέτη της επίδρασης της θερμικής επεξεργασίας των μεταλλευμάτων στο στάδιο του εμπλουτισμού.

Οι Cui et al. (2002) μελέτησαν την επίδραση της θερμικής επεξεργασίας του ιλμενίτη και αιματίτη στον μαγνητικό διαχωρισμό τους. Παρατηρήθηκε ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα του ιλμενίτη αυξήθηκε μετά την αναγωγική θέρμανση με CO ή την φρύξη σε θερμοκρασίες 500 °C-1000 °C και συγκεκριμένους χρόνους. Η αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας εκτιμήθηκε σε δείγματα που παρέμειναν στην κάμινο για παραπάνω από 30 λεπτά και με καταγεγραμμένες θερμοκρασίες τουλάχιστον 650 °C. Στο θερμοκρασιακό φάσμα των 750 °C έως 1000 °C διαπιστώθηκαν οι υψηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας, ενώ με την αύξηση του χρόνου παραμονής των δειγμάτων στην κάμινο, παρατηρήθηκε απότομη μείωση αυτής. Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται η μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας πύρωσης για διάφορους χρόνους.



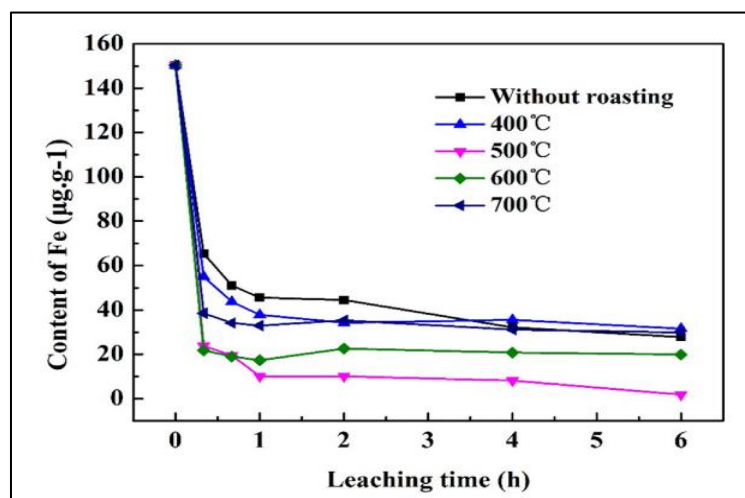
Εικόνα 6: Η μαγνητική επιδεκτικότητα του ιλμενίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας πύρωσης (πηγή: Cui et al., 2002).

Στον αιματίτη, η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι ακόμη χαμηλότερη από του ιλμενίτη και δεν μπορεί να οξειδωθεί περαιτέρω. Ως αποτέλεσμα, η φρύξη δεν είχε καμία επίδραση στον αιματίτη και δεν υπάρχουν μεταβολές στις μαγνητικές του ιδιότητες. Τα αποτελέσματα σε αναγωγικό περιβάλλον με προσθήκη μονοξειδίου του άνθρακα (CO), ήταν διαφορετικά. Από την Εικόνα 7, παρατηρείται ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα παραμένει σταθερή μέχρι τους 500 °C, ακόμη και μετά από παρατεταμένη παραμονή του αιματίτη στην κάμινο. Για θερμοκρασίες υψηλότερες των 500 °C, η μαγνητική επιδεκτικότητα αυξήθηκε σημαντικά και έφτασε σε επίπεδα συγκρίσιμα με αυτά του μαγνητίτη στους 800 °C έως 1000 °C, με παράλληλες αυξομειώσεις στην παροχή σε CO.



Εικόνα 7: Οι διακυμάνσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας του αιματίτη συναρτήσει του χρόνου φρόξης. Η αναλογία CO/αιματίτη είναι 1 προς 5 (πηγή: Cui et al., 2002).

Στην μελέτη των Xin et al. (2021) μελετάται η επίδραση της θέρμανσης σε αναγωγικό περιβάλλον φυσικής χαλαζιακής άμμου. Η θέρμανση χρησιμοποιείται ως μέθοδος για την βελτιστοποίηση της μεταγενέστερης απομάκρυνσης του σιδήρου από τους χαλαζιακούς κόκκους με εκχύλιση σε θειικό αμμώνιο. Πρωτίστως, μετρήθηκε η περιεκτικότητα σε σίδηρο από χαλαζιακή άμμο η οποία δεν είχε θερμανθεί σε κάμινω ως μέρος της προεπεξεργασίας, αλλά είχε αποκλειστικά εκχυλίστηκε με θειικό αμμώνιο (AS). Η συγκέντρωση του σιδήρου μειώθηκε από $145.2 \mu\text{g.g}^{-1}$ σε $26.61 \mu\text{g.g}^{-1}$, το οποίο σημαίνει πως το μεγαλύτερο μέρος του σιδήρου διαλύθηκε και απομακρύνθηκε στο όξινο διάλυμα. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για χαλαζιακή άμμο προθερμασμένη σε κάμινω. Φάνηκε ότι η θερμική επεξεργασία είχε ισχυρή επίδραση στην αναγωγική συμπεριφορά του σιδήρου. Πιο συγκεκριμένα, για προθέρμανση σε θερμοκρασία 500°C , το ποσοστό απομάκρυνσης του σιδήρου ήταν αξιοσημείωτο, καθώς η συγκέντρωση σε σίδηρο περιορίστηκε στα $1.82 \mu\text{g.g}^{-1}$. Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται η περιεκτικότητα Fe στη χαλαζιακή άμμο συναρτήσει του χρόνου εκχύλισης για διάφορες θερμοκρασίες θέρμανσης.



Εικόνα 8: Περιεκτικότητα Fe συναρτήσει του χρόνου εκχύλισης σε θειικό αμμώνιο. Η κάθε γραμμή αντιστοιχεί στις διαφορετικές θερμοκρασίες θέρμανσης της χαλαζιακής άμμου (πηγή: Xin et al., 2021).

Η θέρμανση των μεταλλευμάτων πριν τον εμπλουτισμό χρησιμοποιείται και για προληπτικούς λόγους, για την απομάκρυνση βλαβερών ουσιών που είναι εν δυνάμει επικίνδυνες για τους ανθρώπους και το περιβάλλον.

Οι Chen et al. (2021) μελέτησαν την επίδραση της θέρμανσης προϊόντων καμίνου τήξης θειϊκού χαλκού σε χαμηλές θερμοκρασίες στην απομάκρυνση αρσενικού (speiss). Με προσθήκη 30 wt% πυρίτη και πύρωση στους 550 °C για 30 λεπτά, περισσότερο από το 92% του αρσενικού εξατμίστηκε σε μορφή τριοξειδίου του αρσενικού, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του θειϊκού χαλκού συγκρατήθηκε και επέστρεψε ως εμπλουτισμένη σε χαλκό τροφοδοσία στο τηγμένο μέρος.

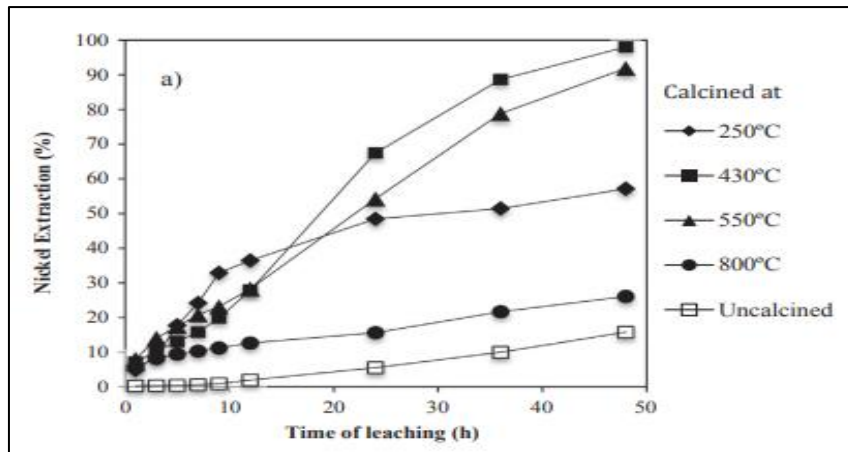
6.2 Εργαστηριακές εφαρμογές απότομης ψύξης στον εμπλουτισμό (quenching)

Αρκετές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την επίδραση της απότομης ψύξης στην βελτιστοποίηση της αποδέσμευσης των χρήσιμων στοιχείων από μεταλλεύματα. Οι Abbes et al. (2020) μελέτησαν μια σειρά από διεργασίες εμπλουτισμού σε πετρώματα περιεκτικότητας 20 wt% σε φώσφορο από την περιοχή Sra Quertane της Τυνισίας. Αρχικά η θέρμανση του μεταλλεύματος αύξησε την περιεκτικότητα σε P₂O₅ σε 24.24 wt%. Η περαιτέρω επεξεργασία του με τη μέθοδο quenching βελτίωσε την περιεκτικότητα σε φώσφορο κατά 3 wt%.

Οι Sefiu et al. (2020) ανέπτυξαν μια έρευνα συλλέγοντας εφαρμογές και αποτελέσματα διαφορετικών μεθόδων επεξεργασίας των μεταλλευμάτων. Σε μια εφαρμογή στην οποία αναφέρεται η έρευνα, οι Dash et al. (2019) απέδειξαν ότι η θερμική κατεργασία αιματίτη χαμηλής ποιότητας μπορεί να βελτιώσει το μεταγενέστερο μαγνητικό διαχωρισμό του. Τα αντιπροσωπευτικά δείγματα, βάρους 200g και κοκκομετρίας 10mm, θερμάνθηκαν σε εργαστηριακή κάμινο και μετά το πέρας του χρόνου παραμονής τους στις αντίστοιχες θερμοκρασίες, υπέστησαν απότομη ψύξη (quenching). Η ανάλυση των δειγμάτων που ακολούθησε τον μαγνητικό διαχωρισμό (wet high intensity magnetic separation (WHIMS), 25% solids) έδειξε ότι η αποδέσμευση του σιδήρου στον αιματίτη βελτιώθηκε σε ένα εύρος από 15 έως 20%, για θερμοκρασίες πύρωσης 500-800 °C.

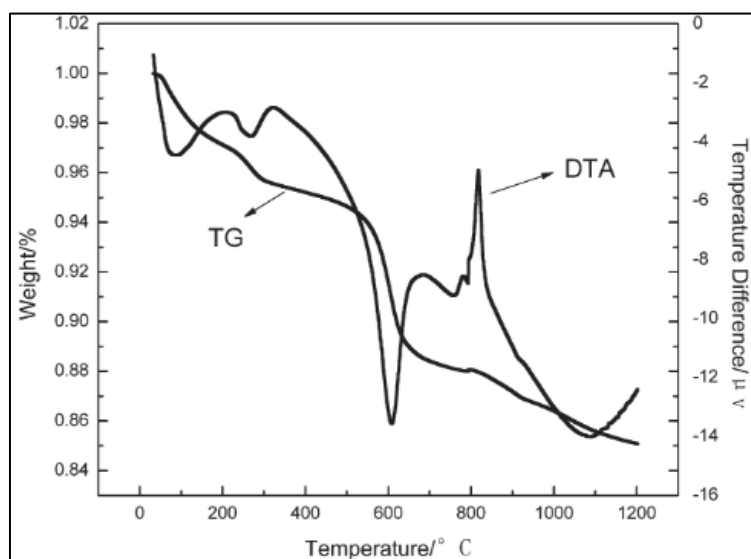
6.3 Εφαρμογές της θέρμανσης στην βελτιστοποίηση εμπλουτισμού λατεριτών

Οι Garces-Granda et al. (2018) μελέτησαν την επίδραση της θερμικής επεξεργασίας λατεριτών χαμηλής περιεκτικότητας νικελίου στην αναγωγική συμπεριφορά τους. Αρχικά, τα δείγματα του λατερίτη θερμάνθηκαν σε οξειδωτικές συνθήκες σε διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης. Αργότερα, το κάθε δείγμα εκχυλίστηκε με αναγωγικά μέσα. Τα δείγματα που είχαν θερμανθεί στους 250 °C, 430 °C, 550 °C και 800 °C για 2 ώρες, επέδειξαν βελτίωση στην ανάκτηση νικελίου με αναγωγικά μέσα κατά 57,1%, 98.0%, 91.9% και 26,1% αντίστοιχα (Εικόνα 9). Η ειδική επιφάνεια του δείγματος στους 800 °C παρουσίασε μείωση και ως αποτέλεσμα η ανάκτηση του νικελίου ήταν λιγότερο αποδοτική σε σύγκριση με τις άλλες θερμοκρασίες θέρμανσης. Η αυξημένη ανάκτηση νικελίου από το θερμικά επεξεργασμένο μετάλλευμα φαίνεται να οφείλεται στην αυξημένη ειδική επιφάνεια που δημιουργήθηκε λόγω της απομάκρυνσης νερού από τον γκαϊτίτη.

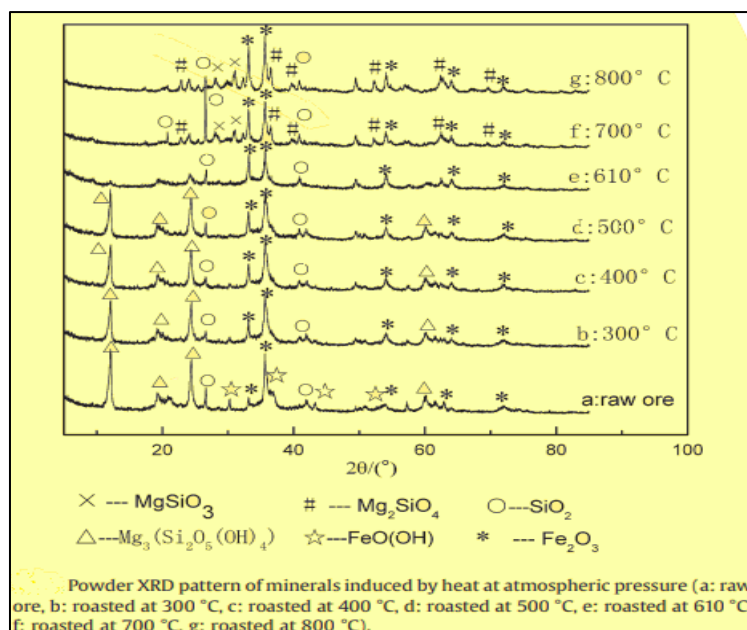


Εικόνα 9: Αποδόσμευση νικελίου % σε σχέση με το χρόνο εκχύλισης (h). Η κάθε γραμμή αναπαριστά τις διαφορετικές θερμοκρασίες επεξεργασίας των λατερίτων (πηγή: Garcés-Granda et al., 2018).

Οι Li et al. (2009) επίσης εξέτασαν την επίδραση της θέρμανσης στην ορυκτολογική σύσταση του λατερίτη. Η θέρμανση πραγματοποιήθηκε σε ατμοσφαιρική πίεση. Ο μετασχηματισμός φάσεων των ορυκτών του λατερίτη που είχε υποστεί θέρμανση σε διάφορες θερμοκρασίες, μελετήθηκε με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X (XRD, Εικόνα 11). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της θέρμανσης, στο διάγραμμα DTA-TG (Differential Temperature Change-Temperature Gradient, Εικόνα 10) η απελευθέρωση του απορροφημένου νερού μέσω της απομάκρυνσης των υδροξυλίων από τον γκαϊτίτη και τον λιζαρδίτη, εντοπίστηκαν στις θερμοκρασίες 277 °C και 610 °C αντίστοιχα. Η ιδανική θερμοκρασία πύρωσης παρατηρείται στους 300 °C, όπου το νικέλιο ενσωματώνεται ομοιόμορφα στην ορυκτολογική δομή του γκαϊτίτη. Στους 277 °C ο γκαϊτίτης μετατρέπεται σε αιματίτη (οξείδιο του σιδήρου), καθώς σε αυτή τη θερμοκρασία απελευθερώνεται νερό από το ορυκτολογικό πλέγμα. Ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ποσοστό του νικελίου είναι διαθέσιμο στην εκχύλιση με οξέα. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες πύρωσης η ειδική επιφάνεια μειώνεται, λόγω της συσσωμάτωσης, κάτι που δεν διευκολύνει την ανάκτηση του νικελίου.



Εικόνα 10: Οι καμπύλες TG-DTA του λατερίτη (πηγή: Jinhui et al., 2009).



Εικόνα 11: Ακτινοδιάγραμμα XRD λατερίτη για διάφορες θερμοκρασίες φρύξης (πηγή: Jinhui et al., 2009).

Οι Li et al. (2012) εξέτασαν την επίδραση της θέρμανσης με αναγωγικά μέσα στο μαγνητικό διαχωρισμό του σιδηρονικέλιου. Παρήγαγαν κράμα σιδηρονικέλιου από ένα λατερίτη με περιεκτικότητες 1.91% σε νικέλιο και 22.1% σε σίδηρο. Κατά την αναγωγή του νικελιούχου λατερίτη με χρήση θειϊκού νατρίου σε θερμοκρασία υψηλότερη των 800 °C, παρατηρήθηκε ότι η αναγωγή του σιδήρου δεν εμποδιζόταν λόγω του σχηματισμού φαγιαλίτη ή φορστερίτη, αλλά το μεγαλύτερο μέρος του σιδήρου απελευθεωνόταν από τα πυριτικά του πετρώματος. Ο εμπλουτισμός σε νικέλιο βελτιώθηκε με τον σχηματισμό FeS, καθώς αποφεύχθηκε η πλήρης μεταλλοποίηση του σιδήρου. Ο τρουλίτης FeS χρησίμευσε σαν παράγοντας ενεργοποίησης της φάσης της τήξης και επιτάχυνε την συσσώρευση σωματιδίων σιδηρονικέλιου. Ως αποτέλεσμα βελτιώθηκε ο μαγνητικός διαχωρισμός του σιδηρονικέλιου.

Κεφάλαιο 7: Χαρακτηρισμός λατερίτη

7.1 Γεωλογική περιγραφή περιοχής δείγματος

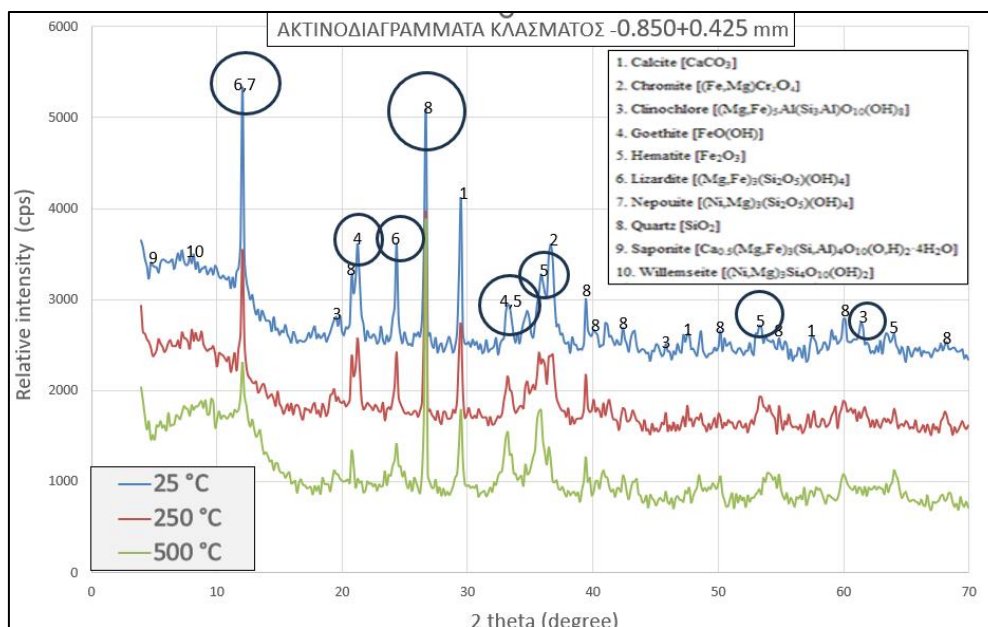
Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε λατερίτης Καστοριάς. Η γεωλογική δομή της περιοχής αντιπροσωπεύεται από σχηματισμούς της Υποπελαγωνικής Ζώνης. Το κοίτασμα αναπτύσσεται επί σερπεντινιτών και καλύπτεται από Μειοκαινικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας, τα οποία αποτελούνται από ασβεστολιθικά-οφιολιθικά κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και μάργες (Αποστολίκας, 2010).

Η μεταλλοφορία κατανέμεται σε τρία επιμέρους κοιτάσματα και είναι συνέχεια της αντίστοιχης του σχηματισμού Devol της Αλβανίας. Εμφανίζονται όλες οι ζώνες που έχουν οι λατεριτικοί φλοιοί αποσάθρωσης (σιδηρούχο κάλυμμα – γκαϊτιτική – νοντρονιτική – σαπρονιτική ζώνη). Το μεταλλοφόρο σώμα αναπτύσσεται υπό μορφή μεγάλου μεγέθους φακών, με κυμαινόμενο πάχος της συνολικής μεταλλοφορίας αλλά και των επί μέρους ζωνών και εναλλαγές της κατανομής του νικελίου τόσο κατά την κατακόρυφη, όσο και κατά την οριζόντια εξέλιξη της μεταλλοφορίας.

Τα πρωτογενή λατεριτικά κοιτάσματα Ιεροπηγής και Παλαιοχωρίου σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου λατεριτίωσης των υπερβασικών πετρωμάτων του Ελλαδικού χώρου. Γεωλογικές προϋποθέσεις ύπαρξης αντίστοιχης μεταλλοφορίας υπάρχουν επίσης στο ανατολικό και δυτικό περιθώριο της Μεσοελληνικής αύλακας (Αποστολίκας, 2010)

7.2 Ορυκτολογική Ανάλυση δείγματος με περιθλασίμετρο ακτίνων-X

Στο Διάγραμμα 7.1 παρουσιάζονται οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις του αρχικού μεταλλεύματος μεγέθους $-3.35+1.70$ mm και των αντίστοιχων κλασμάτων που υποβλήθηκαν σε θέρμανση στους 250°C και 500°C .



Διάγραμμα 7.1: Ακτινοδιαγράμματα αρχικού κλάσματος $-0.850+0.425$ mm και των κλασμάτων που πυρώθηκαν στους 250°C και 500°C .

Από την ορυκτολογική ανάλυση εντοπίστηκαν ο ασβεστίτης [CaCO_3], ο λιζαρδίτης [$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$], ο νεπουϊτης [$(\text{Ni,Mg})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$], ο αιματίτης [Fe_2O_3] και ο γκαϊτίτης

[FeO(OH)]. Ο χαλαζίας [SiO₂] αποτελεί τη συχνότερη ορυκτολογική φάση με πολλές εμφανίσεις στις υψηλότερες εντάσεις 2-theta. Σε μικρότερη συχνότητα εμφανίζονται ο βιλλεμζέιτης [(Ni,Mg)₃Si₄O₁₀(OH)₂] και ο κλινοχλωρίτης [(Mg,Fe)₅Al].

Στο Διάγραμμα 7.1 φαίνονται οι διαφοροποιήσεις των ορυκτολογικών φάσεων ανάμεσα στο πυρωμένο στους 500 °C λατερίτη και στα άλλα κλάσματα. Σε αρκετά σημεία του 2-theta φάσματος για θερμοκρασία πύρωσης 500 °C παρατηρείται η αφυδροξυλίωση του γκαιτίτη (290-330 °C) και η ταυτόχρονη εμφάνιση της φάσης του αιματίτη. Αυτό οφείλεται στη διάσπαση των υδροξειδίων και το σχηματισμό μεταλλικών οξειδίων. Επίσης στο ακτινοδιάγραμμα των 500 °C παρατηρείται η έναρξη της αφυδροξυλίωσης του λιζαρδίτη, η οποία οδηγεί σε σχηματισμό άμορφου SiO₂. Κατά την αφυδροξυλίωση το υλικό απελευθερώνει νερό σε μορφή υδρατμών.

7.3 Χημική Ανάλυση

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του λατερίτη, με τα κύρια στοιχεία του σε μορφή οξειδίων. Η υψηλότερη τιμή του NiO παρατηρείται στο μη θερμικά επεξεργασμένο κλάσμα -3.35+1.70 mm με 1.62%, ενώ εξίσου υψηλή είναι και στο κλάσμα -3.35+1.70 mm μετά από πύρωση στους 500 °C με 1.59%.

Πίνακας 1: Χημική Ανάλυση λατερίτη για όλες τις θερμοκρασίες πύρωσης.

Λατερίτης		Χημικές Αναλύσεις %									
Κλάσμα (mm)	Θερμοκρασία (°C)	NiO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CoO	MgO	CaO	Mn ₃ O ₄	Cr ₂ O ₃	*LOI
-3.35(αρχικό)	25	1.34	21.79	28.77	2.29	0.04	18.96	8.61	0.38	1.01	16.8
-3.35+1.70	25	1.62	22.69	31.60	1.17	0.05	21.19	3.74	0.38	0.96	16.6
-3.35+1.70	250	1.38	22.43	29.61	2.36	0.04	19.52	8.86	0.46	1.21	14.1
-3.35+1.70	500	1.59	24.48	31.06	1.30	0.04	20.23	9.56	0.43	1.07	11.3
*Απώλεια πύρωσης στους 1050 °C για 3 h											

7.4 Κοκκομετρική Ανάλυση

Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του μεταλλεύματος λατερίτη Καστοριάς. Το αρχικό υλικό πέρασε από το σιαγονωτό σπαστήρα πολλαπλές φορές έτσι ώστε όλο το μέταλλευμα να έχει μέγεθος -3.35 mm. Ακολούθησε υγρή κοσκίνιση στο κόσκινο -0.106 mm. Το κλάσμα +0.106 mm τοποθετήθηκε στο φούρνο για ξήρανση. Μετά την ξήρανση του υλικού πραγματοποιήθηκε κοσκίνιση στη μηχανή κοσκίνισης σε συγκεκριμένη σειρά κοσκίνων για 6 λεπτά. Μετρήθηκε το βάρος του υλικού που παρέμεινε σε κάθε κόσκινο και υπολογίστηκε το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%). Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης. Στο Διάγραμμα 7.2 φαίνεται η καμπύλη αθροιστικής κατανομής του αρχικού υλικού.

Πίνακας 2: Κοκκομετρική κατανομή αρχικού δείγματος.

Μέγεθος (mm)	Βάρος (g)	Βάρος %	Αθρ. διερχόμενο βάρος%
3.35	0	0	100
1.7	263.30	50.89	49.11
0.85	120.60	23.31	25.80
0.425	51.70	9.99	15.81
0.212	29.60	5.72	10.09
0.106	16.10	3.11	6.98
-0.106	36.10	6.98	
Σύνολο	517.40	100	



Διάγραμμα 7.2: Καμπύλη αθροιστικής κατανομής βάρους του αρχικού υλικού.

Κεφάλαιο 8: Εξοπλισμός

8.1 Εργαστηριακός θραυστήρας με σιαγόνες

Για τη θράυση του μεταλλεύματος χρησιμοποιήθηκε σιαγονωτός σπαστήρας τύπου FRITSCH pulverisette 1 (Εικόνα 12). Αποτελείται από μία ακίνητη επιφάνεια, σχεδόν κατακόρυφη, απέναντι στην οποία βρίσκεται μια δεύτερη κινητή επιφάνεια υπό γωνία. Η κίνηση της δεύτερης επιφάνειας συνθλίβει τα σώματα που βρίσκονται μεταξύ των δύο επιφανειών, που ενεργούν σαν είδος σιαγόνων. Το άνοιγμα στο πάνω μέρος των σιαγόνων καθορίζει το μέγεθος των τεμαχίων της τροφοδοσίας, ενώ το άνοιγμα στο κάτω μέρος καθορίζει το μέγεθος του προϊόντος που δεν είναι σταθερό. Ο θραυστήρας διαθέτει πέντε θέσεις που αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα αποκένωσης (Πετράκης, 2004).



Εικόνα 12: Σιαγονωτός σπαστήρας FRITSCH pulverisette 1.

8.2 Εργαστηριακός σφαιρόμυλος

Για την λειοτρίβηση του υλικού χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός σφαιρόμυλος (Εικόνα 13) ασυνεχούς λειτουργίας τύπου Sepor (Batch ball mill) του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού, εσωτερικής διαμέτρου 20.4 cm και μήκους 16.6 cm, ο οποίος περιστρεφόταν με συχνότητα περιστροφής 66 rpm, με τη βοήθεια ενός συστήματος περιστρεφόμενων κυλίνδρων (ράουλα). Τα χαρακτηριστικά του σφαιρόμυλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά σφαιρόμυλου.

Εσωτερική Διάμετρος, D (cm)	20,4
Εσωτερικό Μήκος, L (cm)	16,6
Όγκος μύλου, V (cm ³)	5423
Συχνότητα Περιστροφής, N (rpm)	66
Κρίσιμη Συχνότητα περιστροφής, N _c (rpm)	93,7



Εικόνα 13: Εργαστηριακός σφαιρόμυλος τύπου Sepor (Batch Ball mill).

8.3 Κλίβανος πύρωσης

Για την πύρωση του υλικού, χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακή κάμινος προγραμματιζόμενης θερμοκρασίας και ώρας (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Κάμινος πύρωσης.

8.4 Συσκευή κοσκίνισης

Για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής κατανομής του αρχικού υλικού και των προϊόντων λειοτρίβησης χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός δονητής κοσκίνων τύπου RETSCH VE 1000. Τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται η συγκεκριμένη συσκευή είναι (Πετράκης, 2004):

- Ένα σύστημα χρονομέτρησης το οποίο επιτρέπει κοσκίνιση από 1 έως 99 λεπτά διακοπτόμενης ή συνεχούς λειτουργίας
- Ένα σύστημα δόνησης το οποίο παρέχει δυνατότητα ρύθμισης του εύρους δόνησης από 0 έως 3 mm

- Ένα σύνολο εξαρτημάτων τα οποία συγκρατούν τα κόσκινα το ένα κάτω από το άλλο.

Η κοσκίνιση των υλικών έγινε χρησιμοποιώντας τυποποιημένα κόσκινα ASTM (RETCHE, 5657) διαμέτρου $\Phi 200$ mm και βάθους 50 mm, ενώ το εύρος δόνησης της μηχανής που επιλέχθηκε ήταν 0.6 mm.

8.5 Κοκκομετρικός αναλυτής Laser

Για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε ο κοκκομετρικός αναλυτής Master sizer S της Malvern (Εικόνα 15). Ο αναλυτής είναι ένα σύστημα Laser He/Ne ισχύος 2mW. Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στην εκτροπή των ακτίνων laser, όταν αυτές προσπίπτουν σε κόκκους. Η γωνία εκτροπής εξαρτάται από το μέγεθος του κόκκου και συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο το μέγεθος, τόσο μικρότερη η γωνία και αντίστροφα. Οι βασικές μονάδες από τις οποίες αποτελείται ο αναλυτής είναι:

- Οπτική μονάδα μέτρησης
- Σύστημα υπολογιστή
- Μονάδα αιώρησης του δείγματος
- Λειτουργικό πρόγραμμα της Malvern



Εικόνα 15: Κοκκομετρικός αναλυτής Master sizer S τύπου Malvern.

Κεφάλαιο 9: Πειραματική διαδικασία

9.1 Διαδικασία θραύσης

Αρχικά, ο λατερίτης Καστοριάς ποσότητας περίπου 100 κιλών θραύστηκε στο σιαγονωτό σπαστήρα, στο μέγιστο άνοιγμα αποκένωσης (θέση 5), για την μείωση του μεγέθους των μεγάλων τεμαχιδίων του υλικού. Το δείγμα μετέπειτα κοσκινίστηκε σε προκαθορισμένα κλάσματα. Το υλικό θραύστηκε περαιτέρω στο μεσαίο άνοιγμα (θέση 3). Ύστερα, από την θραύση με τον σιαγονωτό προχωρήσαμε σε δεύτερη διαδικασία θραύσης με τον κωνικό σπαστήρα, για περαιτέρω μείωση του μεγέθους του υλικού. Από την συνολική διαδικασία θραύσης, δημιουργήθηκαν τρία στενά κοκκομετρικά κλάσματα (-3,35+1.70 mm, -0.850+0.425 mm και -0.212+0.106 mm), το καθένα βάρους 6 kg, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές λειοτρίβησης.

9.2 Πύρωση λατερίτη Καστοριάς

Κάθε κλάσμα παρέμεινε στην κάμινο πύρωσης για χρόνο παραμονής 2 h. Οι θερμοκρασίες στις οποίες μελετήθηκε η επίδραση της θέρμανσης ήταν 250 °C και 500 °C και οι κατανομές των προϊόντων λειοτρίβησης συγκρίθηκαν με εκείνες όταν το μέταλλευμα δεν είχε υποστεί θερμική επεξεργασία (θερμοκρασία περιβάλλοντος).

9.3 Εφαρμογή απότομης ψύξης (quenching) στον λατερίτη Καστοριάς

Σε διαφορετικό πειραματικό σκέλος, μελετήθηκε η επίδραση της απότομης ψύξης (quenching) στην βελτιστοποίηση της λειοτρίβησης του λατερίτη, στο κλάσμα -825+425 μm για θερμοκρασίες πύρωσης 250 °C και 500 °C. Η απότομη ψύξη (quenching) είναι η διαδικασία κατά την οποία το υλικό ψύχεται απ'ευθείας από την κάμινο με την βύθισή του σε νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η διεργασία αυτή προκαλεί θερμικό σοκ στο υλικό, λόγω της ακαριαίας θερμοκρασιακής μεταβολής.

9.4 Διαδικασία λειοτρίβησης

Τα στενά κοκκομετρικά κλάσματα (-3.35+1.70mm, -0.850+0.425mm και -0.212+0.106 mm) λειοτριβήθηκαν στον εργαστηριακό σφαιρόμυλο για διαφορετικούς χρόνους. Οι χρόνοι που επιλέχθηκαν ήταν 0.5, 2 και 4 min για τα κλάσματα -0.850+0.425 mm και -0.212+0.106 mm. Το κλάσμα -3.35+1.70 mm λειοτριβήθηκε και σε άλλους χρόνους (0.5, 2, 4, 16 και 32 min). Ως μέσα λειοτρίβησης χρησιμοποιήθηκαν σφαίρες διαμέτρου 25.4 mm, 12.7 mm και 6.5 mm συνολικού βάρους 5.14 κιλών .

Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές λειοτριβήσεων για το αρχικό κλάσμα και κάθε ένα από τα κλάσματα τα οποία είχαν πυρωθεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες (250 °C και 500 °C).

Για το σφαιρόμυλο ο όγκος υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση:

$$V = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot L \quad (19)$$

Η συχνότητα περιστροφής (N) και η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής (N_c) υπολογίστηκαν από τις σχέσεις:

$$N = 70\% \cdot N_c \quad (20)$$

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (21)$$

Τα χαρακτηριστικά της λειοτρίβησης για τις σφαίρες, το υλικό και τον μύλο φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά σφαιρών.

Διάμετρος d (mm)	25.4	12.7	6.5
Αριθμός	26	206	1508
Μάζα ανά σφαίρα (g)	67.3	8.4	1.1
Πυκνότητα $\rho_{\text{σφ}}$ (g/cm ³)	7.84	7.84	7.84
Πορώδες (%)	40	40	40
Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών j	20	20	20

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά υλικού

Πορώδες (%)	40
Φαινόμενη πυκνότητα ρ_b (g/cm ³)	1.18
Συντελεστής πλήρωσης υλικού στο μύλο, f_c (%)	4
Συντελεστής πλήρωσης κενών των σφαιρών με υλικό U (%)	50

Σύμφωνα με τους Πίνακες 4 και 5, ο συντελεστής πλήρωσης των σφαιρών j και υλικού f_c είναι ίσος με 0.2 (20%) και 0.04 (4%) αντίστοιχα. Το πορώδες θεωρήθηκε ίσο με 0.4 (40%). Η φαινόμενη πυκνότητα του υλικού είναι 1.18 g/cm³ και ο όγκος του μύλου όπως προκύπτει από την Σχέση (19), υπολογίστηκε σε 5423 cm³.

Η ποσότητα των σφαιρών (m_b) και του υλικού (M) που χρησιμοποιήθηκαν στο σφαιρόμυλο για κάθε δοκιμή υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις αντίστοιχα:

$$m_b = 0.6 \cdot J \cdot \text{πυκνότητα σφαίρας} \cdot \text{όγκος μύλου} \quad (22)$$

$$M = f_c \cdot \text{φαινόμενη πυκνότητα υλικού} \cdot \text{όγκος μύλου} \quad (23)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται:

Η μάζα των σφαιρών $m_b=5104.5\text{g}$

και

η μάζα του υλικού τροφοδοσίας του μύλου $M=256.1\text{ g}$

Η αναλογία στερεών και νερού για κάθε δοκιμή ήταν 60% και 40% αντίστοιχα, με την ποσότητα του νερού στον μύλο να είναι 170.1 g.

9.5 Διαδικασία κοσκίνισης προϊόντων λειοτρίβησης

Τα προϊόντα λειοτρίβησης των αρχικών κλασμάτων τροφοδοσίας $-3.35+1.70\text{ mm}$ και $-0.850+0.425\text{ mm}$ κοσκινίστηκαν αρχικά εν υγρώ στο κόσκινο 0.106 mm για την απομάκρυνση των λεπτομερών, ενώ το προϊόν λειοτρίβησης του μεγέθους $-0.212+0.106\text{ mm}$ κοσκινίστηκε στο κόσκινο 0.053 mm . Το υλικό που παρέμεινε στο κόσκινο 0.106 mm (για τα κλάσματα τροφοδοσίας $-3.35+1.75\text{ mm}$ και $-0.850+0.425\text{ mm}$) και στο κόσκινο 0.053 mm (για τα κλάσματα τροφοδοσίας $-0.212+0.106\text{ mm}$ αντίστοιχα) ξηράθηκε σε κάμινο, ενώ ο πολφός ο οποίος πέρασε από τα κόσκινα 0.106 mm και 0.053 mm , παρέμεινε για τουλάχιστον 2 μέρες και μετά το βυθισθέν υλικό οδηγήθηκε για ξήρανση.

Το παραμένον στα κόσκινα υλικό της υγρής κοσκίνισης (κλάσμα $+0.106\text{ mm}$ και $+0.053\text{ mm}$), μετά το πέρας της ξήρανσης, κοσκινίστηκε εν ξηρώ σε σειρά κοσκίνων για τον υπολογισμό της κοκκομετρικής κατανομής του προϊόντος λειοτρίβησης. Η κοσκίνιση πραγματοποιήθηκε με χρήση του εργαστηριακού δονητή κοσκίνων τύπου RETSCH VE 1000. Τοποθετήθηκαν στο δονητή τα κατάλληλα κόσκινα για κάθε κλάσμα το ένα πάνω στο άλλο και κατά φθίνουσα σειρά μεγέθους (από πάνω προς τα κάτω). Η κοσκίνιση για κάθε υλικό ρυθμίστηκε στα 6 min με παλλόμενη δόνηση στα 0.60 mm .

Τα κόσκινα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν με σειρά από πάνω προς τα κάτω ήταν :

- Για το κλάσμα $-3.35+1.70\text{ mm}$:
1.70, 0.850, 0.425, 0.212, 0.106 mm
- Για το κλάσμα $-0.850+0.425\text{ mm}$:
0.425, 0.212, 0.106 mm
- Για το κλάσμα $-0.212+0.106\text{ mm}$:
0.106, 0.075, 0.053 mm

Μετά την κοσκίνιση, το υλικό το οποίο είχε παραμείνει στο κάθε κόσκινο, μεταφερόταν στην ζυγαριά για τη μέτρηση του βάρους του. Το άθροισμα από τα βάρη των κλασμάτων δεν έπρεπε να έχει αξιοσημείωτη απόκλιση (έως 1% διαφορά) από το βάρος του αρχικού δείγματος.

9.6 Απότομη ψύξη αρχικού υλικού (quenching)

Το αρχικό κλάσμα $-0.850+0.425\text{ mm}$ αρχικά κοσκινίστηκε εν υγρώ στο κόσκινο 0.425 mm , για την απομάκρυνση λεπτότερων τεμαχιδίων. Το παραμένον υλικό στα κόσκινα ($+0.425\text{ mm}$) οδηγήθηκε για ξήρανση στο φούρνο. Το υλικό από το φούρνο χωρίστηκε σε 2 ίσες ποσότητες (1200 g το κάθε μέρος) για την εφαρμογή της απότομης ψύξεως. Το ένα μέρος του υλικού τοποθετήθηκε στη κάμινο στους $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ για 1 h και το άλλο μέρος αντίστοιχα στους $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ για 1 h. Μετά το πέρας της πύρωσης, το υλικό εμβαπτίστηκε απευθείας σε νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ύστερα αφέθηκε να διηθεί σε δοχεία για 1 μέρα. Το παραμένον υλικό οδηγήθηκε στον φούρνο σε χαμηλή θερμοκρασία για ξήρανση. Μετέπειτα χωρίστηκε σε 8 ίσα μέρη των 256.1 g για τις λειοτριβήσεις.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές λειοτριβήσεων για διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης και απότομης ψύξης (250 °C και 500 °C) και χρόνους (0.5, 2, 4, 16 min), δηλ. συνολικά 8 λειοτριβήσεις. Τα ποσοστά στερεών και νερού στο μύλο ήταν 60% και 40% αντίστοιχα, επομένως προστέθηκαν 170.1 g νερού.

Κάθε ένα από τα προϊόντα λειοτρίβησης κοσκινίστηκαν αρχικά εν υγρώ στο κόσκινο 0.053 mm για την απομάκρυνση των λεπτομερών. Το υλικό που παρέμεινε στο κόσκινο (κλάσμα +0.053 mm) ξηράνθηκε σε φούρνο, ενώ το υλικό που πέρασε από το κόσκινο (κλάσμα -0.053 mm), αφού διηθήθηκε πλήρως, οδηγήθηκε και αυτό στο φούρνο για ξήρανση.

Το παραμένον υλικό (+0.053 mm) κοσκινίστηκε εν ξηρώ στη σειρά κοσκίνων 0.425 mm, 0.212 mm, 0.106 mm και 0.053 mm, ενώ το βάρος του λεπτομερούς κλάσματος -0.053 mm μετρήθηκε μετά την ξήρανση. Τέλος μετρήθηκαν τα βάρη που παρέμειναν σε κάθε κόσκινο για την εύρεση της κοκκομετρικής κατανομής των προϊόντων λειοτρίβησης.

Κεφάλαιο 10: Επεξεργασία των μετρήσεων

10.1 Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος

Για την περιγραφή της κοκκομετρικής κατανομής των προϊόντων λειοτρίβησης των κλασμάτων - 3.35+1.70mm, -0.850+0.425 mm και -0.212+0.106 mm χρησιμοποιήθηκε το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται το αθροιστικό διερχόμενο βάρος (%) από κάθε μέγεθος, για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης για το αρχικό κλάσμα και μετά από πύρωση αυτού σε θερμοκρασίες 250 °C και 500 °C. Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα της αθροιστικής κατανομής βάρους (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος προϊόντος για κάθε υλικό τροφοδοσίας ξεχωριστά.

10.1.1 Τροφοδοσία -3.35 + 1.70 mm

Πίνακας 6: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του αρχικού κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm του και μετά από πύρωσή του στους 250 °C και 500 °C.

Αρχικό						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
3.35	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1.7	59.20	29.87	16.52	40.80	70.13	83.48
0.85	17.57	16.24	11.08	23.22	53.88	72.41
0.425	5.13	6.26	4.54	18.09	47.62	67.87
0.212	2.94	4.28	3.09	15.15	43.34	64.77
0.106	2.74	6.02	5.36	12.41	37.32	59.41
-0.106	12.41	37.32	59.41	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			
250 °C						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
3.35	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1.7	61.96	30.70	17.16	38.04	69.30	82.84
0.85	17.50	17.98	11.62	20.54	51.32	71.22
0.425	4.54	6.68	4.81	16.00	44.64	66.41
0.212	2.62	4.58	3.31	13.38	40.05	63.10
0.106	2.42	5.96	5.50	10.96	34.10	57.60
-0.106	10.96	34.10	57.60	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			

500 °C						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
3.35	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1.7	56.52	32.30	21.57	43.48	67.70	78.43
0.85	20.40	18.02	10.61	23.07	49.68	67.81
0.425	6.08	6.91	4.36	17.00	42.76	63.45
0.212	3.52	4.96	3.32	13.47	37.80	60.13
0.106	3.06	6.53	5.94	10.41	31.27	54.19
-0.106	10.41	31.27	54.19	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			

Στο κλάσμα -3.35+1.70 mm έγινε περαιτέρω μελέτη της επίδρασης της θερμικής επεξεργασίας του λατερίτη και για χρόνους λειοτρίβησης 16 και 32 min.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για 16 min και 32 λεπτά χρόνο λειοτρίβησης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 και Πίνακα 8 αντίστοιχα.

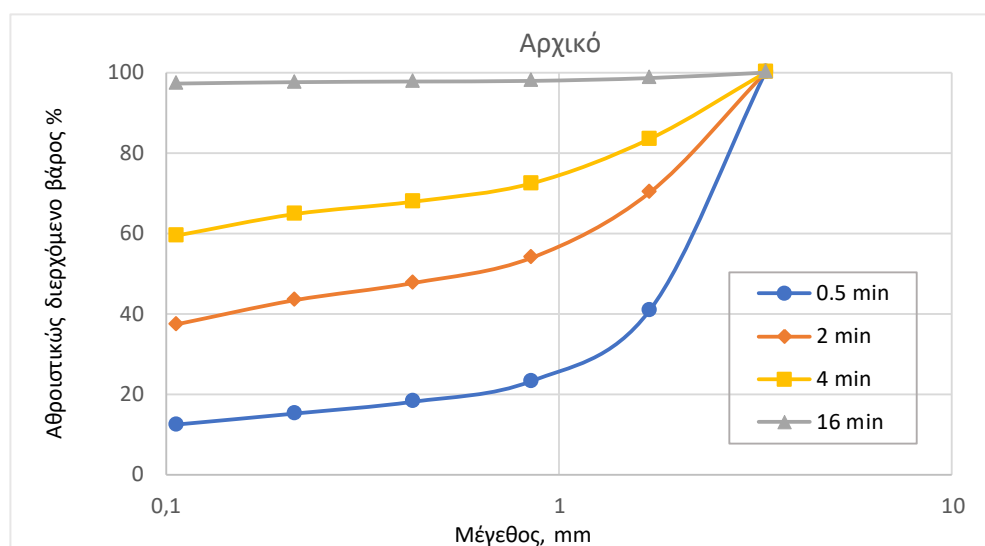
Πίνακας 7: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του αρχικού κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm και μετά από πύρωση στους 250 °C και 500 °C.

Μέγεθος mm	Αρχικό		250 °C		500 °C	
	Βάρος %	Αθρ. διερχόμενο Βάρος %	Βάρος %	Αθρ. διερχόμενο Βάρος %	Βάρος %	Αθρ. διερχόμενο Βάρος %
	16 min	16 min	16 min	16 min	16 min	16 min
3.35	0.00	100.00	0.00	100	0.00	100.00
1.70	1.36	98.64	4.48	95.52	1.74	98.26
0.85	0.70	97.93	2.59	92.93	0.77	97.49
0.425	0.16	97.78	0.46	92.47	0.23	97.26
0.212	0.16	97.62	0.31	92.16	0.23	97.03
0.106	0.35	97.27	0.50	91.66	0.35	96.68
-0.106	97.27		91.66		96.68	
Σύνολο	100.00		100.00		100.00	

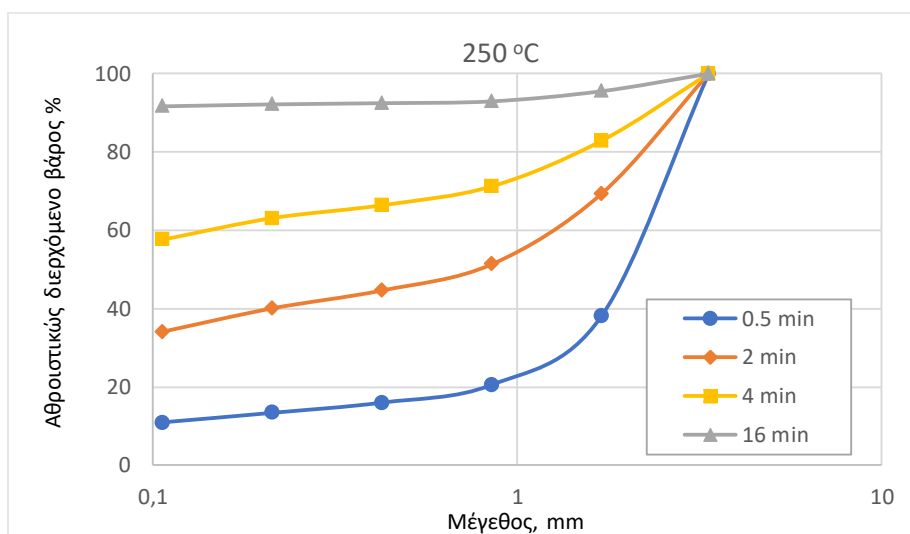
Πίνακας 8: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του αρχικού κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm και μετά από πύρωσή του στους 250 °C και 500 °C.

Μέγεθος (mm)	Αρχικό		250 °C		500 °C	
	Βάρος %	Αθρ. διερχόμενο Βάρος %	Βάρος %	Αθρ. διερχόμενο Βάρος %	Βάρος %	Αθρ. διερχόμενο Βάρος %
	32min	32min	32min	32min	32min	32min
3.35	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
1.7	0.00	100	0.59	99.41	0.50	98.93
0.85	0.00	100	0.00	99.41	0.27	98.65
0.425	0.00	100	0.00	99.41	0.00	98.65
0.212	0.00	100	0.00	99.41	0.00	98.65
0.106	1.62	98.38	0.00	00.41	0.00	98.65
0.075	0.36	98.02	0.00	99.41	0.00	98.65
0.053	0.51	97.51	0.00	99.41	0.00	98.50
-0.053	97.51	0.00	99.41	0.00	99.23	0.00
Σύνολο	100.00		100.00		100.00	

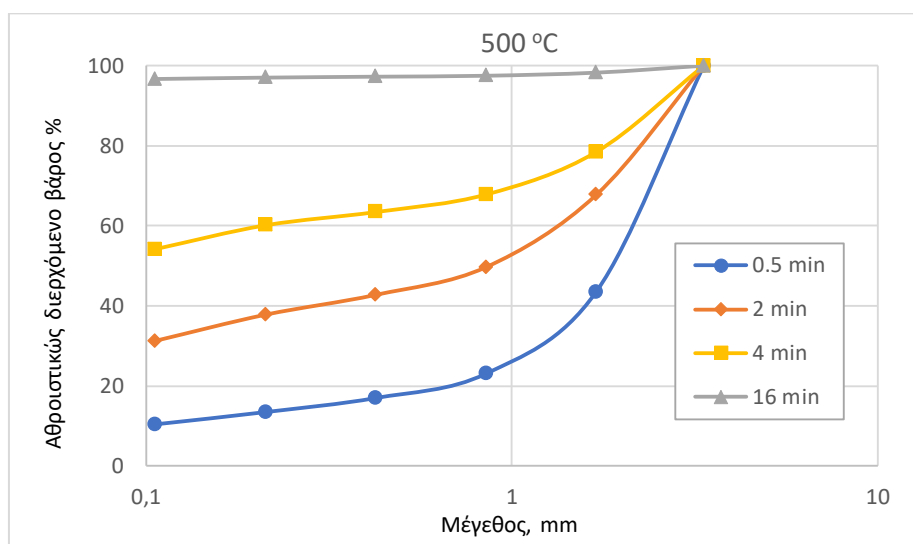
Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν τα Διαγράμματα 10.1, 10.2 και 10.3 που δείχνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους.



Διάγραμμα 10.1: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm του αρχικού υλικού σε διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 10.2: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 σε διάφορους χρόνους λειοτρίβησης στους 250 °C.



Διάγραμμα 10.3: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm σε διάφορους χρόνους λειοτρίβησης στους 500 °C.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης, το μέγεθος του υλικού μικραίνει, καθώς οι καμπύλες μετατοπίζονται προς τα αριστερά, δηλαδή προς τα λεπτότερα κλάσματα.

Στα διαγράμματα δεν έχουν συμπεριληφθεί οι λειοτριβήσεις χρονικής διάρκειας 32 min, όπου το 97.5% έως 99% του προϊόντος διέρχεται από το λεπτότερο κόσκινο (53 μm).

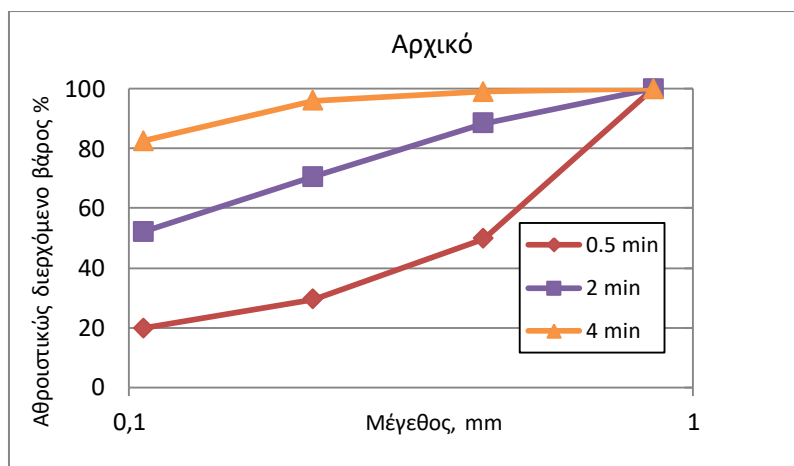
10.1.2 Τροφοδοσία -0.850 + 0.425 mm

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κοκκομετρικού κλάσματος -850+425 μm για όλες τις θερμοκρασίες πύρωσης και όλους τους χρόνους λειοτρίβησης.

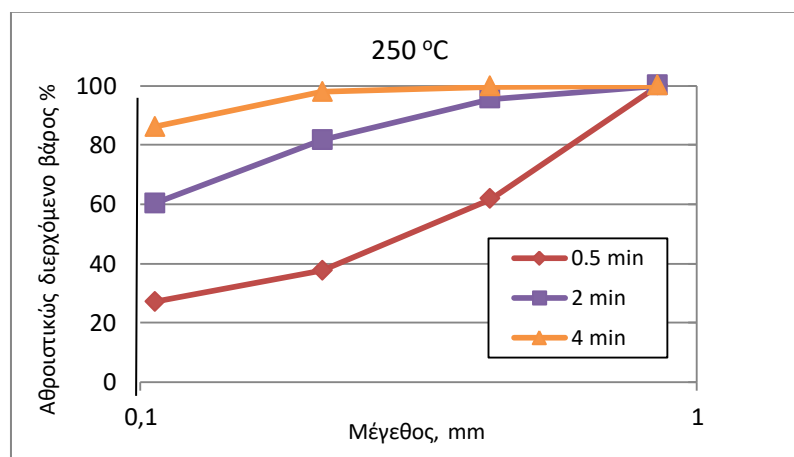
Πίνακας 9: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) στο κλάσμα τροφοδοσίας -850+425 μm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωση στους 250 °C και 500 °C.

Αρχικό						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
0.85	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.425	50.28	11.56	0.91	49.72	88.44	99.09
0.212	20.24	17.85	3.12	29.49	70.60	95.97
0.106	9.69	18.40	13.36	19.80	52.20	82.60
-0.106	19.80	52.20	82.60	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			
250 °C						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
0.85	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.425	38.32	4.52	0.35	61.68	95.48	99.65
0.212	23.98	13.77	1.78	37.7	81.71	97.88
0.106	10.52	21.52	11.77	27.18	60.20	86,11
-0.106	27.18	60.20	86.11	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			
500 °C						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5 in	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
0.85	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.425	51.53	8.25	0.62	48.47	91.75	99.38
0.212	20.47	20.62	3.40	28	71.13	95.98
0.106	9.17	22.82	18.23	18.83	48.31	77.75
-0.106	18.83	48.31	77.75	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			

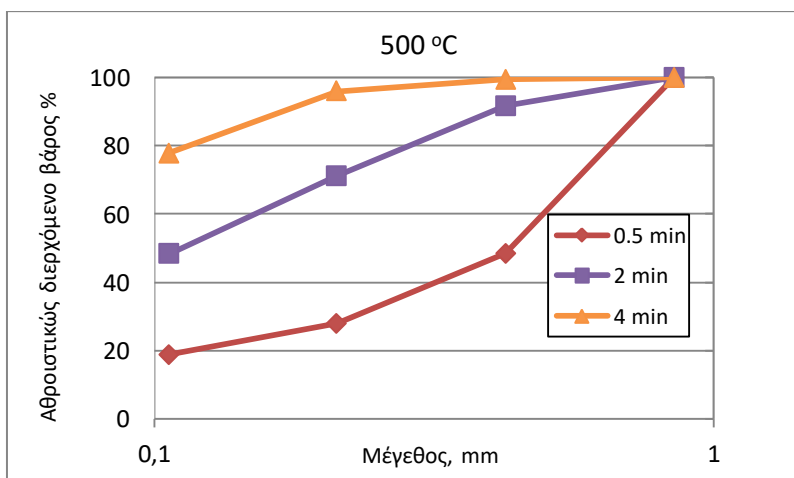
Από τον Πίνακα 9, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα που δείχνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης για το αρχικό και για θερμοκρασίες πύρωσης 250 °C και 500 °C.



Διάγραμμα 10.4: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm του αρχικού υλικού για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 10.5: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης σε 250 °C.



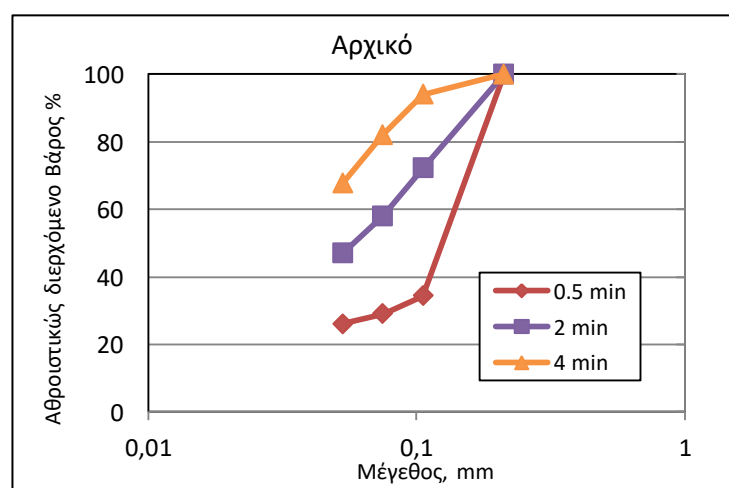
Διάγραμμα 10.6: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης σε 500 °C.

10.1.3 Τροφοδοσία -0.212+0.106 mm

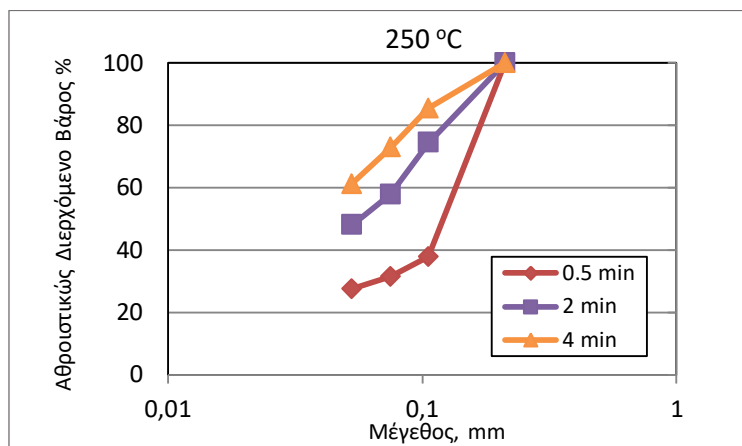
Πίνακας 10: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -0.212+0.106 mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους 250 °C και 500 °C.

Αρχικό						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
0.212	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.106	65.66	27.82	5.94	34.34	72.18	94.06
0.075	5.29	14.18	12.03	29.05	58.00	82.03
0.053	3.02	11.03	14.33	26.03	46.97	67.70
-0.053	26.03	46.97	67.70	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			
250 °C						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
0.212	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.106	62.18	25.76	14.68	37.82	74.24	85.32
0.075	6.46	16.41	12.48	31.36	57.83	72.84
0.053	3.88	9.90	11.72	27.48	47.93	61.12
-0.053	27.48	47.93	61.12	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			
500 °C						
Μέγεθος mm	Βάρος %			Αθρ. διερχόμενο βάρος %		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
0.212	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
0.106	72.51	35.95	9.72	27.49	64.05	90.28
0.075	7.09	14.16	16.36	20.40	49.89	73.92
0.053	3.43	10.39	11.35	16.97	39.50	62.57
-0.053	16.97	39.50	62.57	0.00	0.00	0.00
Σύνολο	100.00	100.00	100.00			

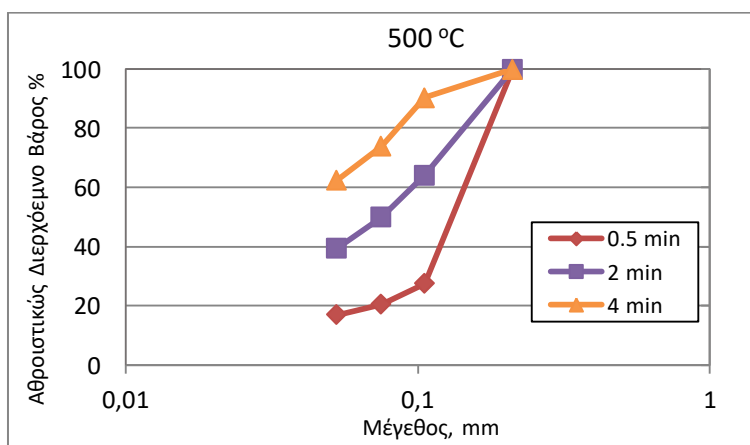
Από τον Πίνακα 10 προκύπτουν τα διαγράμματα που δείχνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 10. 7: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm του αρχικού υλικού για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 10.1: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης για 250 °C.



Διάγραμμα 10.2: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης για 500 °C.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος, οπότε και οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα κλάσματα.

10.1.4 Τροφοδοσία $-0.850+0.425$ mm (εφαρμογή απότομης ψύξης)

Η ίδια επεξεργασία μετρήσεων ακολουθείται για τον λατερίτη στον οποίο εφαρμόστηκε πύρωση και ύστερα η διεργασία της απότομης ψύξης (quenching). Χρησιμοποιήθηκε τροφοδοσία $-0.850+0.425$ mm, σε μια σειρά 8 δοκιμών για θερμοκρασίες quenching 250 °C και 500 °C.

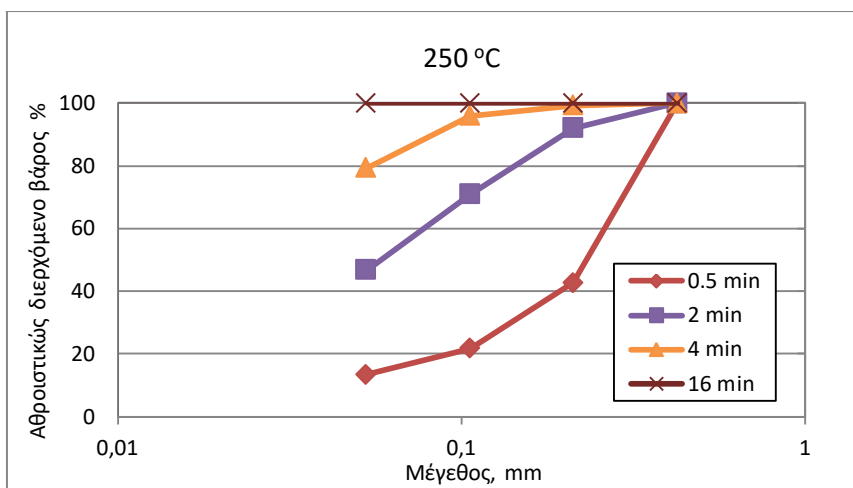
Πίνακας 11: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm για θερμοκρασία 250 °C μετά από εφαρμογή απότομης ψύξης..

250 °C								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. διερχόμενο βάρος %			
	0.5 min	2 min	4 min	16 min	0.5 min	2 min	4 min	16 min
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.425	57.33	7.98	0.7	0.00	56.01	93.44	99.30	100.00
0.212	20.91	21.11	3.38	0.00	28.43	72.84	95.92	100.00
0.106	8,27	24.13	16.50	0.00	18.01	47.03	79.42	100.00
0.53	4.17	15.22	25.08	2.01	14.20	33.76	54.34	97.99
-0.53	9.3	31.56	54.35	97.91				

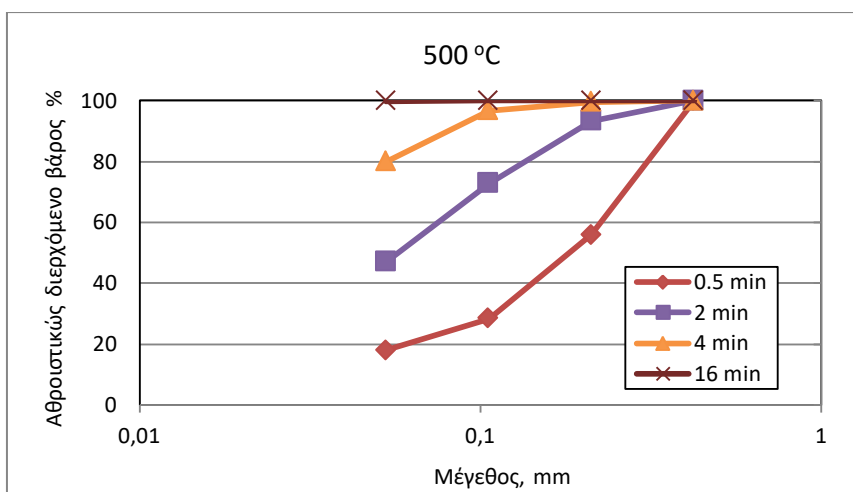
Πίνακας 12: Κατανομή αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm για θερμοκρασία 500 °C μετά από εφαρμογή απότομης ψύξης.

500 °C								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. διερχόμενο βάρος %			
	0.5 min	2 min	4 min	16 min	0.5 min	2 min	4 min	16 min
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.425	43.99	6.56	0.35	0.00	56.01	93.44	99.65	100.00
0.212	27.58	20.61	2.87	0.00	28.43	72.84	96.78	100.00
0.106	10.42	25.81	16.83	0.04	18.01	47.03	79.95	99.96
0.53	3.81	13.27	24.00	1.31	14.20	33.76	55.95	98.61
-0.53	14.20	33.76	55.95	98.61				

Από τους παραπάνω πίνακες, προκύπτουν τα διαγράμματα που παρουσιάζουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 10.3: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm (απότομη ψύξη) για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης σε θερμοκρασία 250 °C.

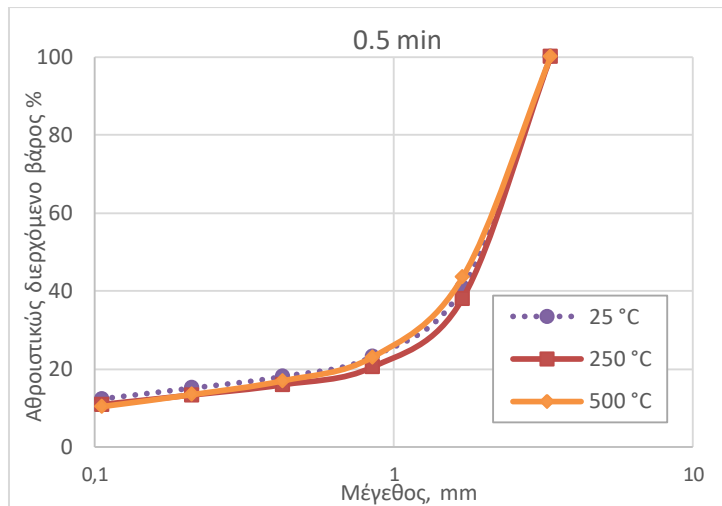


Διάγραμμα 10.4: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm (απότομη ψύξη) για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης σε θερμοκρασία 500 °C.

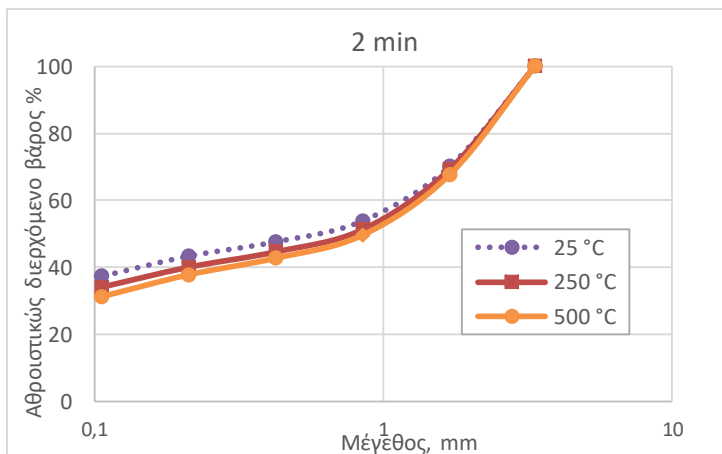
10.2 Επίδραση της θερμοκρασίας πύρωσης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) συναρτήσει του μεγέθους των τεσσάρων κοκκομετρικών κλασμάτων ($-3.35+1.70$ mm, $-0.850+0.425$ mm, $-0.212+0.106$ mm και το κλάσμα $-0.850+0.425$ mm μετά την εφαρμογή της απότομης ψύξης) για διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης ανά χρόνο λειοτρίβησης.

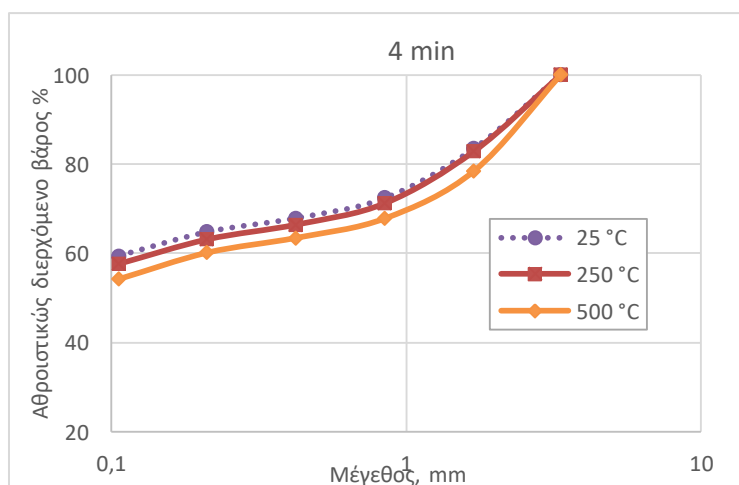
10.2.1 Τροφοδοσία $-3.35 + 1.70$ mm



Διάγραμμα 10.5: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ για χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min.



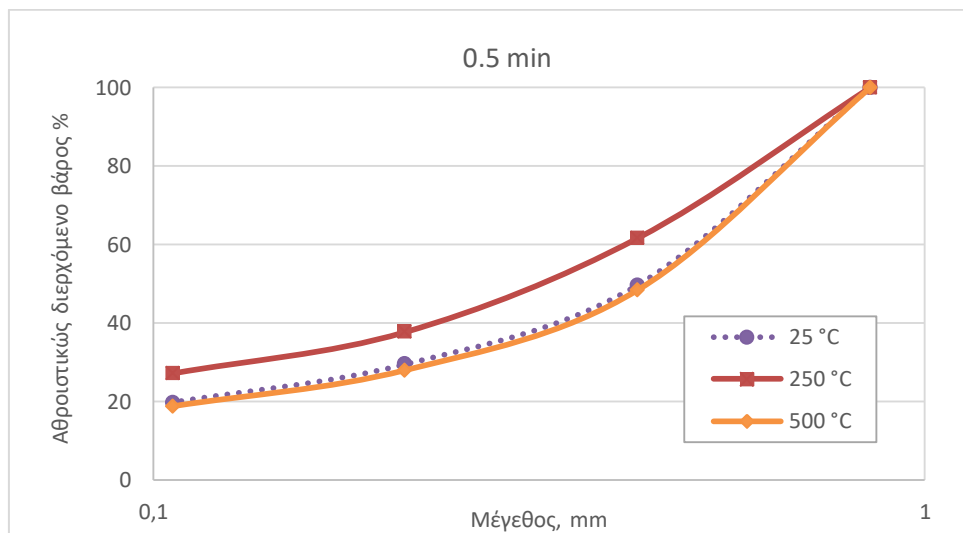
Διάγραμμα 10.6: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ για χρόνο λειοτρίβησης 2 min.



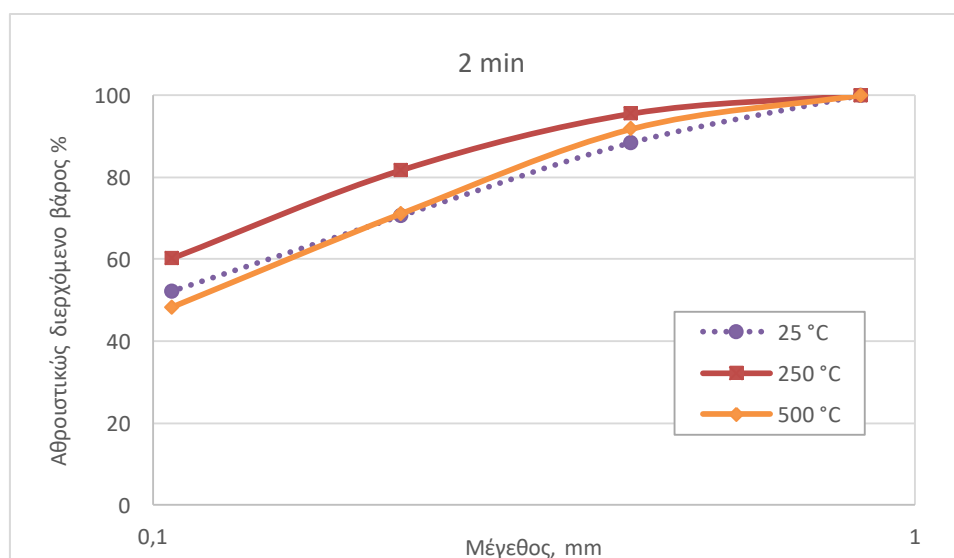
Διάγραμμα 10.7: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ για χρόνο λειοτρίβησης 4 min.

Στα παραπάνω διαγράμματα, οι διαφορές των αθροιστικών κατανομών βάρους για διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης είναι μικρές. Όμως, στα Διαγράμματα 10.13 και 10.14 (χρόνοι λειοτρίβησης 2 και 4 min) παρατηρείται μετατόπιση της αθροιστικής κατανομής βάρους προς τα χονδρότερα κλάσματα για θερμοκρασία πύρωσης 500 °C.

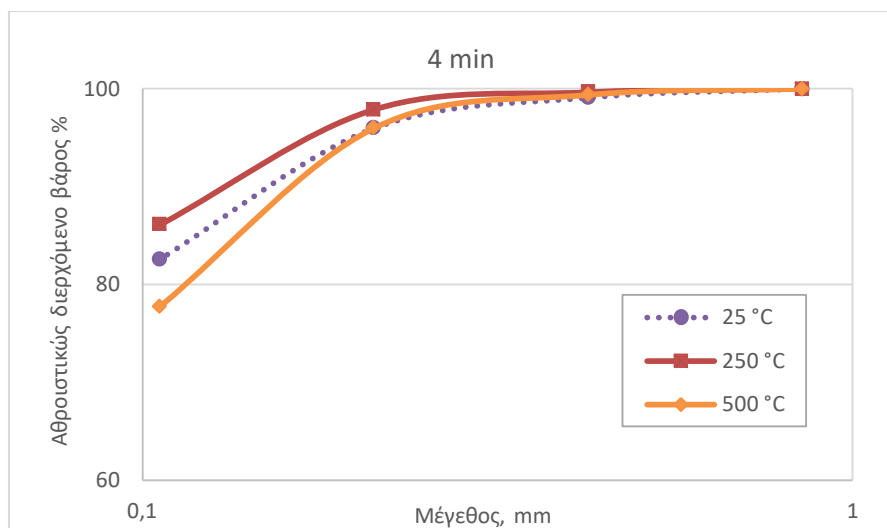
10.2.2 Τροφοδοσία -0.850+0.425 mm



Διάγραμμα 10.8: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους 250 °C και 500 °C για χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min.



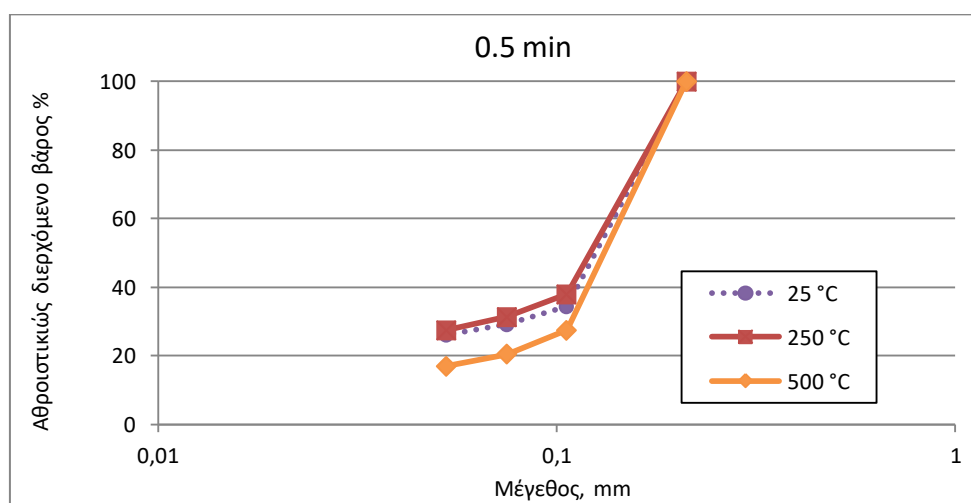
Διάγραμμα 10.9: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους 250 °C και 500 °C για χρόνο λειοτρίβησης 2 min.



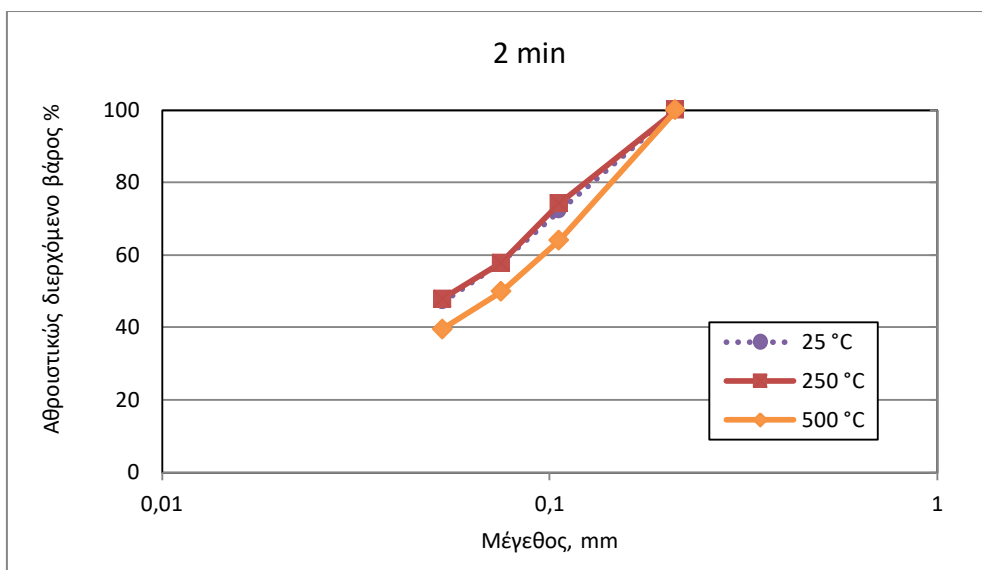
Διάγραμμα 10.10: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος $-0.850+0.425$ mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους 250°C και 500°C για χρόνο λειοτρίβησης 4 min.

Στα παραπάνω διαγράμματα για χρόνους λειοτρίβησης 0.5 min και 2 min υπάρχει εμφανής μετατόπιση των καμπυλών της αθροιστικής κατανομής βάρους προς τα λεπτότερα κλάσματα για θερμοκρασία πύρωσης 250°C . Για το χρόνο λειοτρίβησης 4 min είναι εμφανής η μετατόπιση στα μικρότερα μεγέθη προϊόντων.

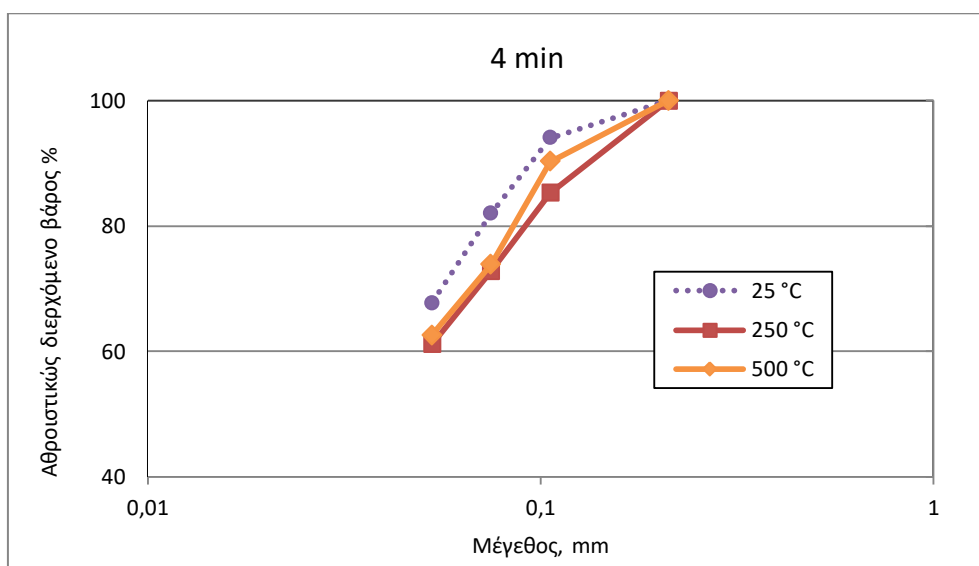
10.2.3 Τροφοδοσία $-0.212+0.106$ mm



Διάγραμμα 10.11: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους 250°C και 500°C για χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min.



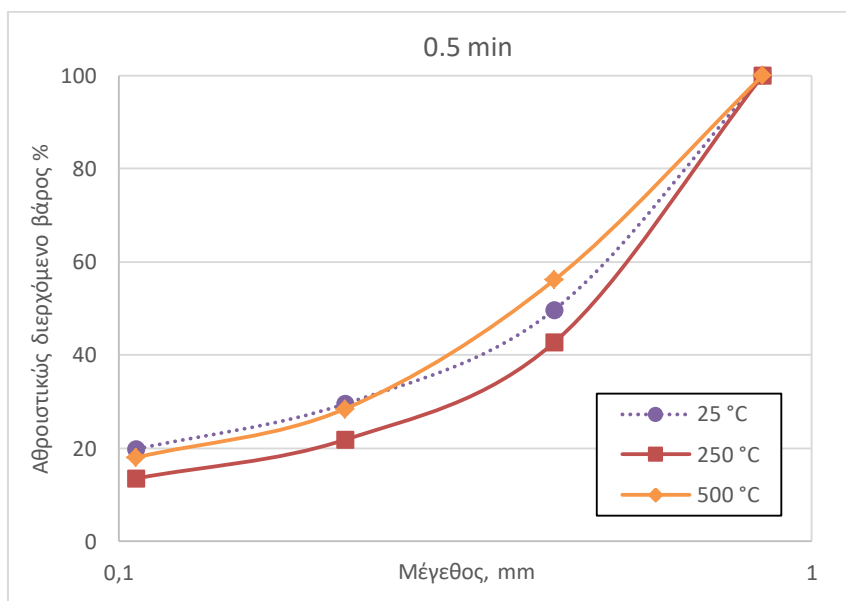
Διάγραμμα 10.12: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ για χρόνο λειοτρίβησης 2 min.



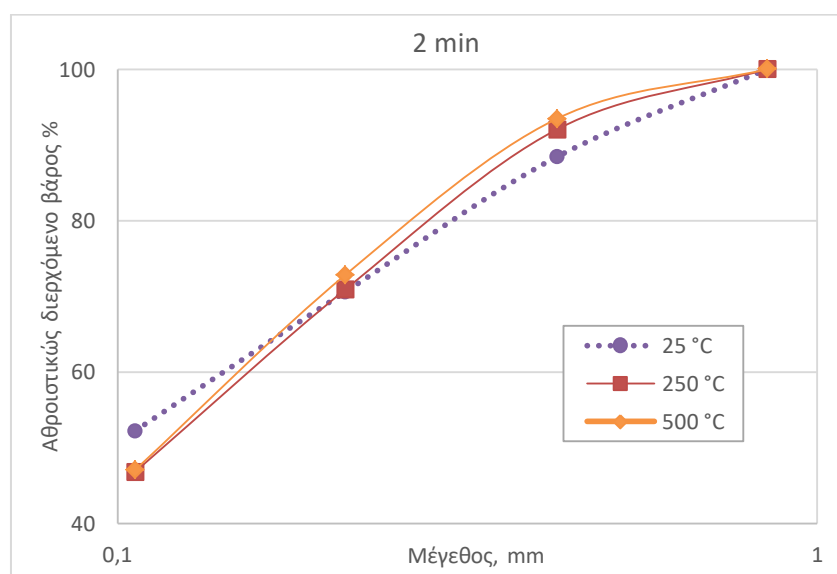
Διάγραμμα 10.13: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ για χρόνο λειοτρίβησης 4 min.

Στα παραπάνω διαγράμματα για χρόνους λειοτρίβησης 0.5 min και 2 min η καμπύλη αθροιστικής κατανομής βάρους είναι μετατοπισμένη προς τα χονδρότερα κλάσματα για θερμοκρασία πύρωσης $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Για το χρόνο λειοτρίβησης 4 min και θερμοκρασία $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι εμφανής η μετατόπιση στα μικρότερα μεγέθη προϊόντων.

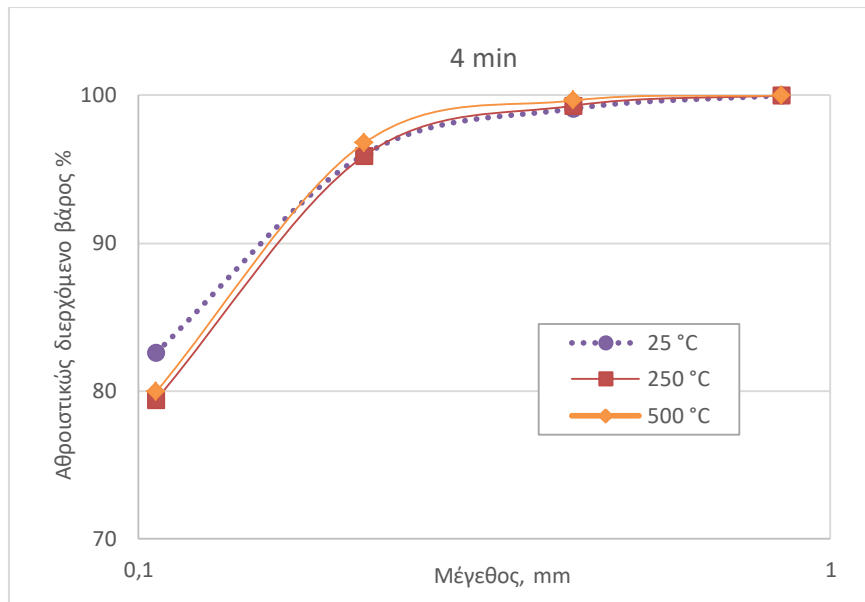
10.2.4 Τροφοδοσία $-0.850+0.425$ (εφαρμογή απότομης ψύξης)



Διάγραμμα 10. 14: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm από εφαρμογή απότομης ψύξης (quenching) σε θερμοκρασίες $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ για χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζεται και η κατανομή βάρους του μεταλλεύματος που δεν υπέστη θερμική επεξεργασία ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$).



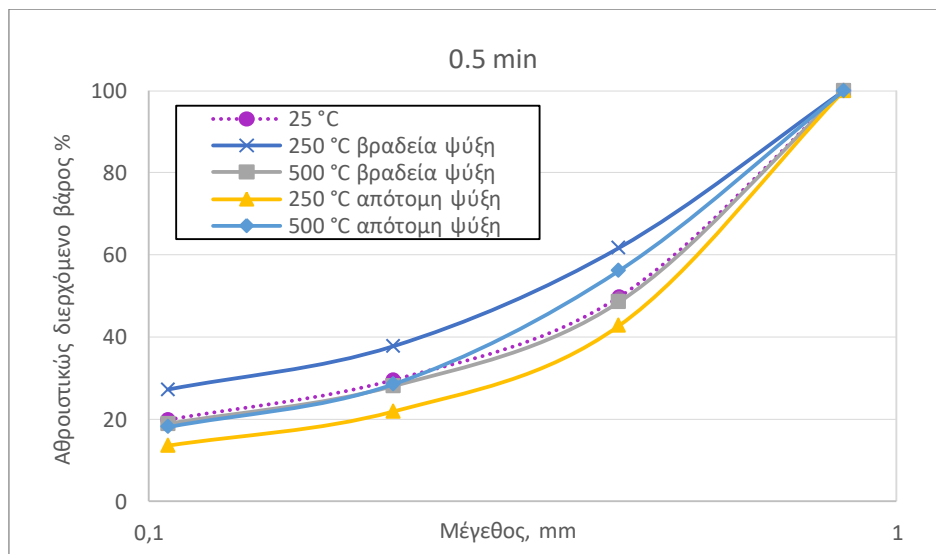
Διάγραμμα 10. 15: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm από εφαρμογή απότομης ψύξης (quenching) σε θερμοκρασία $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ για χρόνο λειοτρίβησης 2 min. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζεται και η κατανομή βάρους του μεταλλεύματος που δεν υπέστη θερμική επεξεργασία ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$).



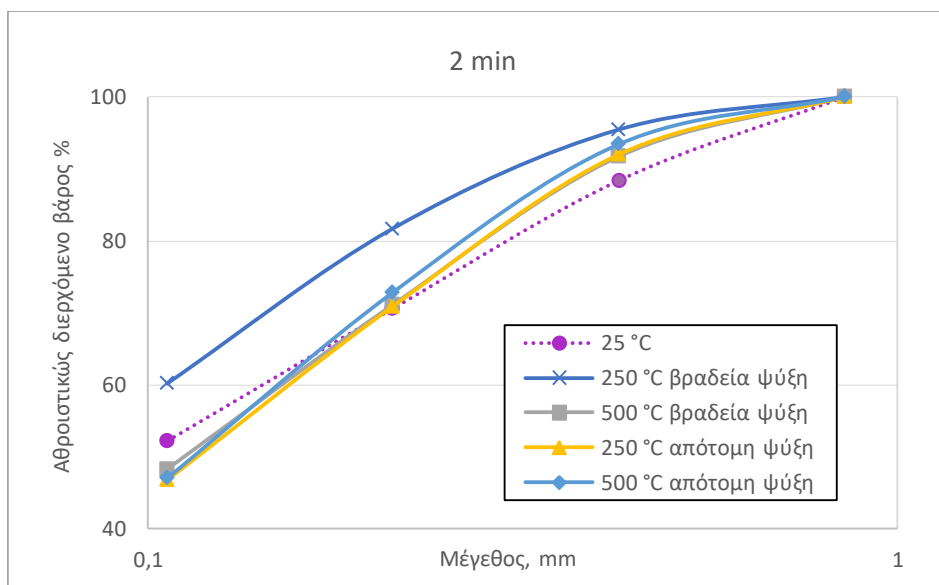
Διάγραμμα 10. 16: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm (quenching) από εφαρμογή απότομης ψύξης σε θερμοκρασία 250 °C και 500 °C για χρόνο λειοτρίβησης 4 min. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζεται και η κατανομή βάρους του μεταλλεύματος που δεν υπέστη θερμική επεξεργασία (25 °C).

Από τα Διαγράμματα 10.22 και 10.23 (χρόνοι λειοτρίβησης 2 και 4 min) φαίνεται ότι οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες σχεδόν ταυτίζονται. Επίσης, στο Διάγραμμα 10.21 για χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min, η καμπύλη για θερμοκρασία πύρωσης 500 °C είναι μετατοπισμένη στα αριστερά, δηλαδή το προϊόν αποτελείται σε μεγαλύτερο βαθμό από λεπτότερα κλάσματα σε σχέση με το προϊόν των 250 °C.

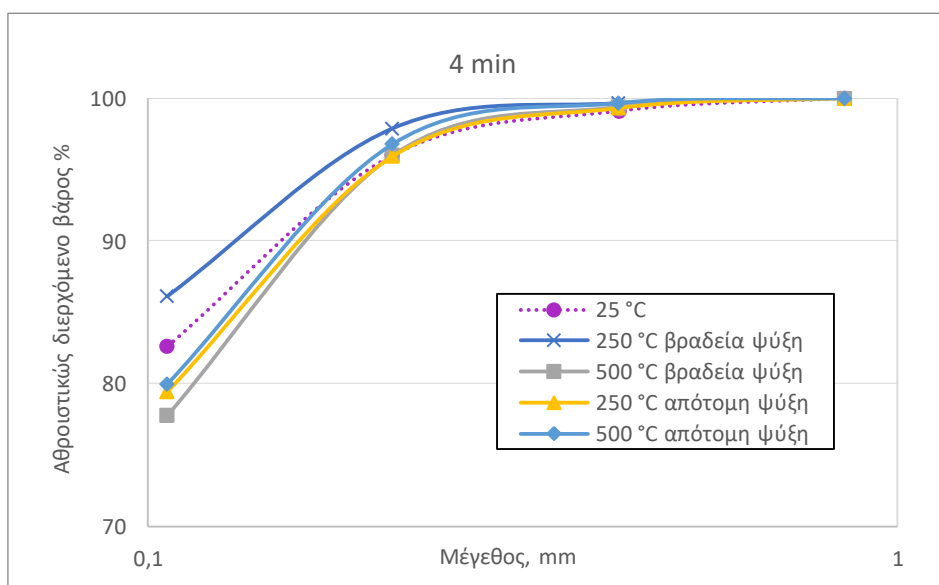
10.2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων βραδείας ψύξης σε αέρα και απότομης ένυδρης ψύξης για το κλάσμα τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm.



Διάγραμμα 10. 24: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm από εφαρμογή πύρωσης και απότομης ψύξης για όλες τις θερμοκρασίες και χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min.



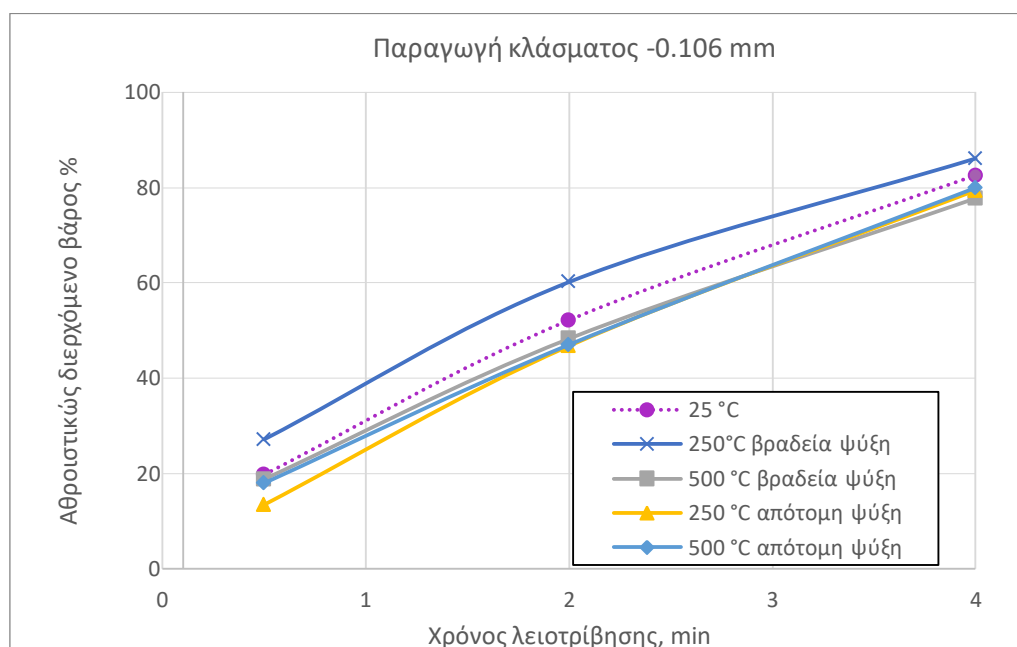
Διάγραμμα 10. 25: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm από εφαρμογή πύρωσης και απότομης ψύξης για όλες τις θερμοκρασίες και χρόνο λειτουργίας 2 min.



Διάγραμμα 10. 26: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm από εφαρμογή πύρωσης και απότομης ψύξης για όλες τις θερμοκρασίες και χρόνο λειτουργίας 4 min.

Από τα διαγράμματα όλων των χρόνων λειτουργίας φαίνεται ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία πύρωσης 250 °C (βραδεία ψύξη σε αέρα), είναι περισσότερο μετατοπισμένη προς τα αριστερά, δηλ. προς τα λεπτότερα κλάσματα, ενώ για την ίδια θερμοκρασία (250 °C) η εφαρμογή της απότομης ψύξης οδηγεί σε χονδρότερα προϊόντα (μετατοπισμένη προς τα δεξιά). Αυτό σημαίνει ότι για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία η εφαρμογή της απότομης ψύξης δεν είναι ευεργετική για τη λειτουργία και επιφέρει αντίθετα από τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Από την άλλη, η εφαρμογή

της απότομης ψύξης μετά από πύρωση του μεταλλεύματος στους 500 °C οδηγεί σε ελαφρώς μικρότερα μεγέθη προϊόντων σε σχέση με τη βραδεία ψύξη σε αέρα στην ίδια θερμοκρασία. Στο Διάγραμμα 10.27 συγκρίνεται η παραγωγή του κοκκομετρικού κλάσματος -0.106 mm για το κλάσμα τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm από τις εφαρμογές πύρωσης και απότομης ψύξης για όλες τις θερμοκρασίες επεξεργασίας.



Διάγραμμα 10. 27: Κατανομή του διερχόμενου βάρους % του κλάσματος -106 mm συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης για το κλάσμα τροφοδοσίας -0.850+0.425. Για λόγους σύγκρισης, έχει προστεθεί και η κατανομή του προϊόντος λειοτρίβησης που δεν υπέστη θερμική επεξεργασία (25 °C)

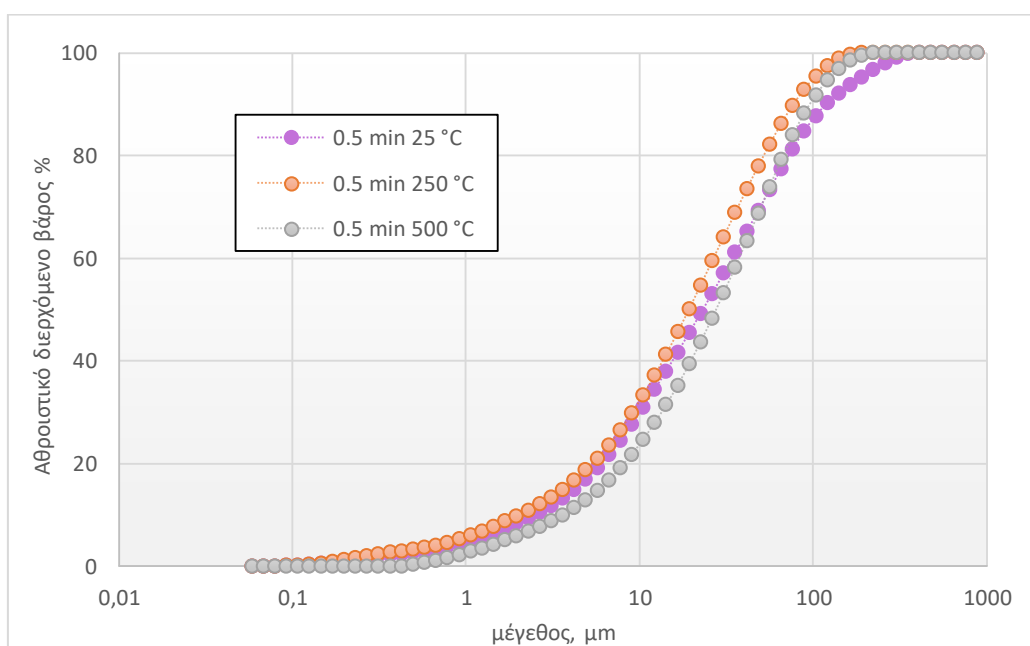
Από το διάγραμμα 10.27 είναι εμφανές ότι από το υλικό το οποίο έχει πυρωθεί στους 250 °C και έχει βραδέως ψυχθεί, παράγεται το περισσότερο λεπτομερές προϊόν (-0.106 mm) με τη λειοτρίβησή του. Επομένως, η πύρωση στους 250 °C με βραδεία ψύξη είναι η μέθοδος αυτή που αυξάνει παραπάνω την απόδοση της λειοτρίβησης συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους.

10.3 Προσδιορισμός του φαινόμενου συντελεστή σχήματος (shape factor)

Στην πειραματική διαδικασία, ένα μεγάλο μέρος των προϊόντων λειοτρίβησης είχε μέγεθος -106 μm. Απαραίτητος για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους υλικών μικρότερων των 106 μm, ήταν ο υπολογισμός ενός αριθμού που να χαρακτηρίζει την κοκκομετρία, σε αναλογία με το αντίστοιχο επίπεδο θέρμανσης. Πρόκειται για τον προσδιορισμό του φαινόμενου συντελεστή σχήματος, που είναι ο λόγος του αντιπροσωπευτικού μεγέθους μιας μεθόδου, προς το μέγεθος άλλης μεθόδου (Πετράκης, 2019).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων που προέρχονται από την κοσκίνιση -106 μm , προσδιορίζεται με χρήση του κοκκομετρικού αναλυτή Laser, ο οποίος μετράει το ισοδύναμο μέγεθος (ή διάμετρο σφαίρας) ίσου όγκου με αυτόν του τεμαχίου.

Για τη σύγκριση των δύο μεθόδων (Laser και κοσκίνιση) δημιουργήθηκαν 3 στενά κοκκομετρικά κλάσματα, $-0.600+0.425 \text{ mm}$, $-0.212+0.150 \text{ mm}$ και $-0.075+0.053 \text{ mm}$ με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης. Τα κλάσματα αυτά οδηγήθηκαν στον αναλυτή Laser για τον προσδιορισμό του μέσου μεγέθους d_{50} των κοκκομετρικών κατανομών των προϊόντων λειοτριβήσεως για διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης.



Διάγραμμα 10.28: Αθροιστική κατανομή βάρους (%) συναρτήσει του μεγέθους για το αρχικό υλικό και το πυρωμένο στους 250 °C και 500 °C, όπως προέκυψαν από την ανάλυση με Laser.

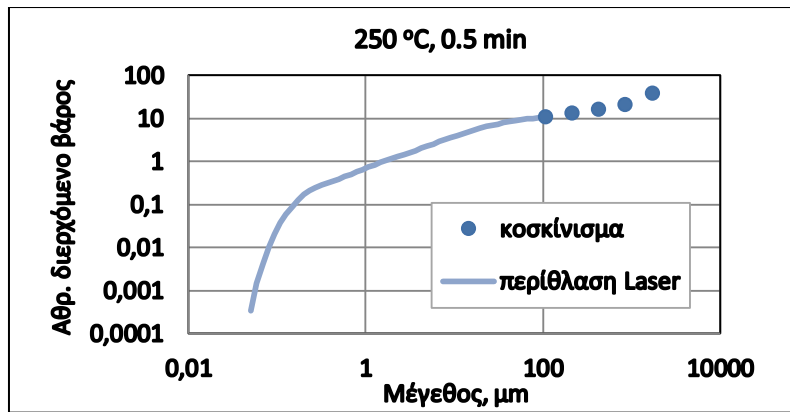
Ο συντελεστής σχήματος είναι ο αριθμός που περιγράφεται από τον λόγο d_{50}/d_p όπου το d_p είναι το γεωμετρικό μέσο μέγεθος του κάθε κλάσματος με τη μέθοδο της κοσκίνισης. Το d_{50} υπολογίζεται μέσω μιας φόρμουλας του excel. Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται οι συντελεστές σχήματος για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα που εξετάστηκε.

Πίνακας 13: Υπολογισμός συντελεστή σχήματος (shape factor).

Κατώτερο μέγεθος κλάσματος (μm)	Ανώτερο μέγεθος κλάσματος (μm)	Μέσο μέγεθος κλάσματος (d_p)	Μέγεθος d_{50} (Laser)	Λόγος d_{50}/d_p
425	600	505.0	574.3	1.14
150	212	178.3	213.0	1.19
53	75	63.0	70.4	1.12
Μέσος όρος				1.15

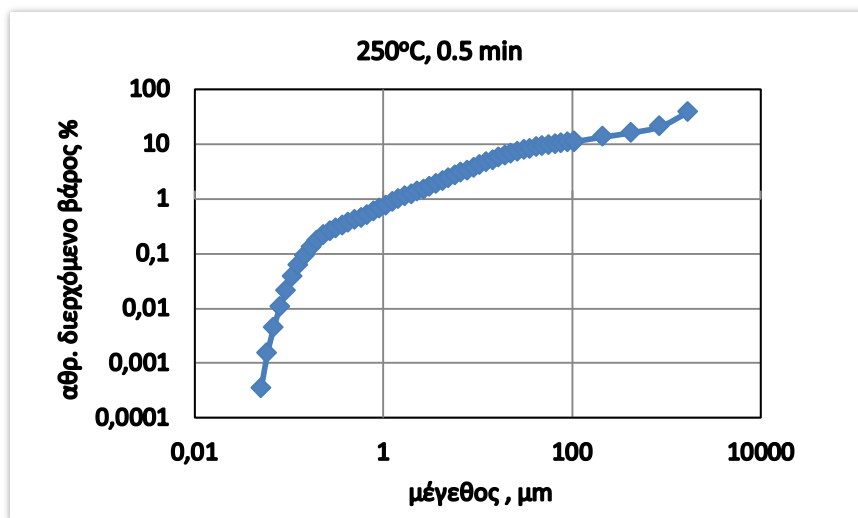
Ο συντελεστής σχήματος χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση των κατανομών μεγέθους των προϊόντων λειοτρίβησης της κοσκίνισης (+106 μm) και του αναλυτή Laser (-106 μm).

Οι καμπύλες κατανομής από τις δύο διαφορετικές μεθόδους δεν αποτελούν συνέχεια της άλλης. Η κατανομή που έχει προκύψει από τον αναλυτή Laser είναι μετατοπισμένη σε χονδρότερα κλάσματα. Το Διάγραμμα 10.29 προκύπτει από την διαίρεση των ισοδύναμων μεγεθών σφαίρας με το συντελεστή σχήματος για θερμοκρασία πύρωσης 250 °C και χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min. Στο Διάγραμμα 10.29, μετά τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζεται το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm. Παρατηρείται ότι η κατανομή που προέκυψε από τον αναλυτή Laser μετατοπίζεται σε λεπτότερα κλάσματα και κάτω από την κατανομή μεγέθους κοσκίνων.



Διάγραμμα 10.29: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -3.35+1.70 mm σε θερμοκρασία 250 °C και χρόνο λειοτριβήσης 0.5 min. Με κουκκίδες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κοσκίνησης (+106 μm) και με συνεχή γραμμή του αναλυτή Laser (-106 μm).

Στο Διάγραμμα 10.30 παρουσιάζεται η συνολική αθροιστική κατανομή βάρους των προϊόντων λειοτριβήσης του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm και θερμοκρασίας πύρωσης 250 °C μετά το συνδυασμό των δύο μεθόδων.



Διάγραμμα 10.30: Η συνολική κατανομή μεγέθους τεμαχιδίων μετά το συνδυασμό των δύο μεθόδων.

10.4 Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στο μέγεθος d_{80} των προϊόντων λειοτριβήσης

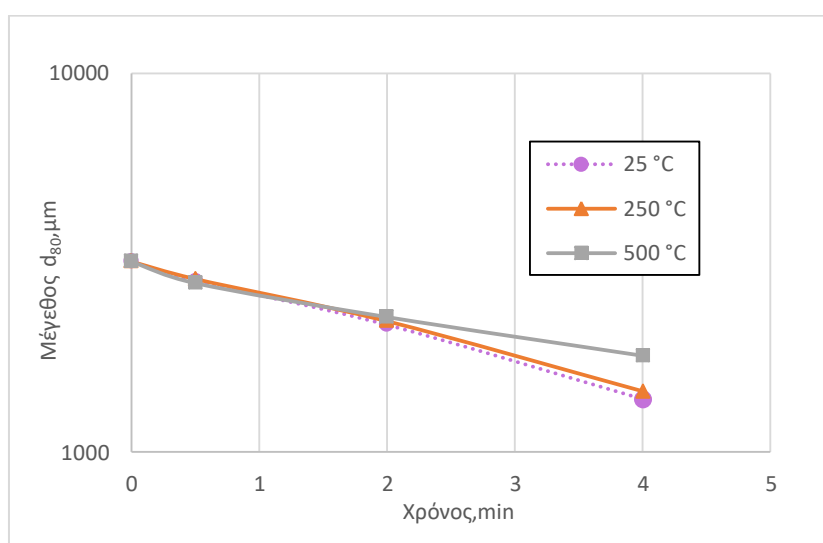
Μέσω μιας συνάρτησης στο λογισμικό excel, βρέθηκαν για όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα οι τιμές του d_{80} και σχηματίστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα του μεγέθους d_{80} συναρτήσει του χρόνου.

10.4.1 Τροφοδοσία -3.35+1.70 mm

Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του μεγέθους d_{80} (μm) του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.70 mm και στο Διάγραμμα 10.30 απεικονίζεται το d_{80} συναρτήσει του χρόνου λειοτριβήσης.

Πίνακας 14: Τιμές μεγέθους d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm.

Χρόνος (min)	d_{80} (μm)		
	25 °C	250 °C	500 °C
0	3185	3185	3185
0.5	2829.6	2864.0	2793.0
2	2168.6	2217.0	2273.0
4	1381.4	1448.7	1797.0



Διάγραμμα 10.31: Το μέγεθος d_{80} του κλάσματος τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm του αρχικού υλικού και μετά από πύρωσή του στους 250 °C και 500 °C.

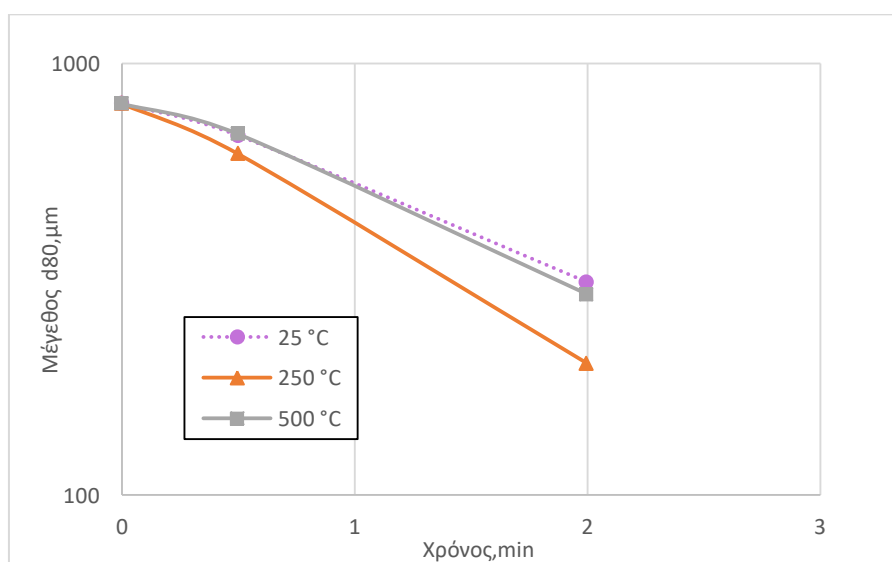
Στο Διάγραμμα 10.31 παρατηρείται διαφοροποίηση των τιμών του d_{80} για θερμοκρασία πύρωσης 500°C. Το d_{80} για 0 °C και για θερμοκρασία 250 °C δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτη μεταβολή. Για θερμοκρασία 500 °C, το d_{80} διαφοροποιείται συγκριτικά με τις άλλες θερμοκρασίες, με την χαμηλότερη τιμή να αντιστοιχεί για χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min, ενώ για χρόνο 4 min υπάρχει σαφής αυξημένη τιμή d_{80} σε σχέση με τα επίπεδα θέρμανσης 25 °C ($d_{80}=1381.4$) και 250 °C ($d_{80}=1448.7$).

10.4.2 Τροφοδοσία $-0.850+0.425$ mm

Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του μεγέθους d_{80} του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm και στο Διάγραμμα 10.31 απεικονίζεται το d_{80} συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης.

Πίνακας 15: Τιμές μεγέθους του d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm.

Χρόνος (min)	d_{80} (μm)		
	25 °C	250 °C	500 °C
0	807	807	807
0.5	681.2	617.2	686.5
2	311.8	202.0	292.3



Διάγραμμα 10.32: Το μέγεθος d_{80} του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm του αρχικού κλάσματος και μετά από πύρωσή του στους 250 °C και 500 °C.

Από το Διάγραμμα 10.32 παρατηρείται μια σαφής διαφοροποίηση για θερμοκρασία πύρωσης 250 °C, με μια σημαντική μείωση του d_{80} για χρόνο λειοτρίβησης 2 min.

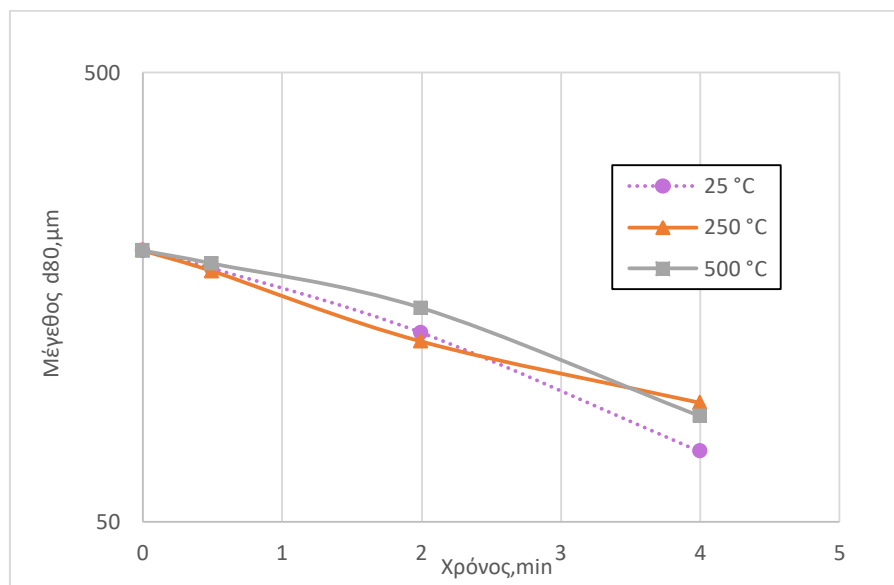
10.4.3 Τροφοδοσία $-0.212+0.106$ mm

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του μεγέθους d_{80} του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm και στο Διάγραμμα 10.33 απεικονίζεται το d_{80} συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης.

Πίνακας 16: Τιμές μεγέθους του d_{80} για το κλάσμα τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm.

Χρόνος (min)	d_{80} (μm)
--------------	---------------

	25 °C	250 °C	500 °C
0	201	201	201
0.5	183.4	180.8	188.1
2	131.9	126.1	149.8
4	71.7	92.1	86.0



Διάγραμμα 10.33: Τιμές μεγέθους του d_{80} του κλάσματος τροφοδοσίας $-0.212+0.106 \text{ mm}$ του αρχικού κλάσματος και μετά από πύρωσή του στους $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Από το Διάγραμμα 10.33 για το κλάσμα $-0.212+0.106$ παρατηρείται ότι ο ρυθμός μείωσης του d_{80} δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις για τις διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης. Το υλικό που δεν υπέστη θερμική επεξεργασία, παρουσίασε την μικρότερη τιμή d_{80} για χρόνο λειοτρίβησης 4 min.

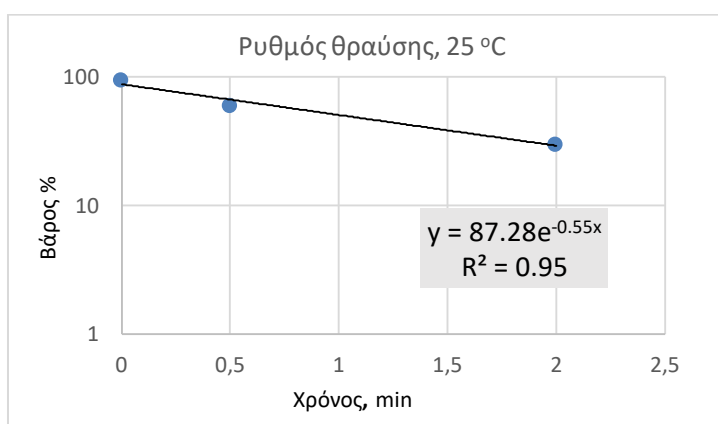
10.5 Προσδιορισμός του ρυθμού θραύσης

Με τη Σχέση (11) προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία παριστάνουν το βάρος (%) του υλικού που παραμένει στην τάξη μεγέθους τροφοδοσίας συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης. Ο ρυθμός θραύσης S_i προσδιορίζεται από την κλίση της ευθείας για κάθε θερμοκρασία πύρωσης.

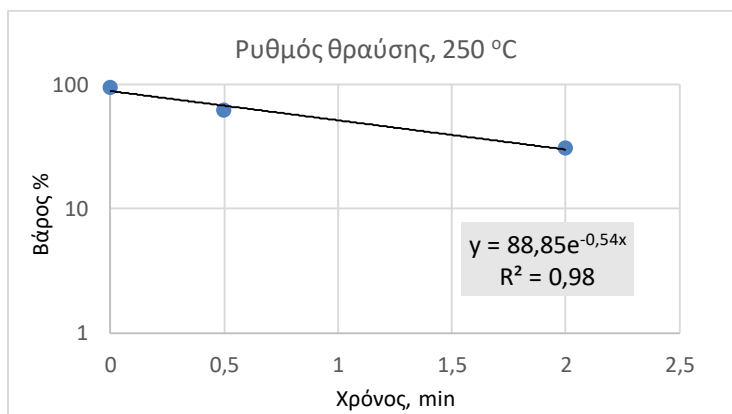
10.5.1 Τροφοδοσία $-3.35+1.70 \text{ mm}$

Πίνακας 17: Βάρος (%) παραμένοντος υλικού στην τάξη μεγέθους τροφοδοσίας $-3.35+1.70\text{ mm}$ συναρτήσει του χρόνου λειοτριβήσης για θερμοκρασία περιβάλλοντος και θερμοκρασίες πύρωσης $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

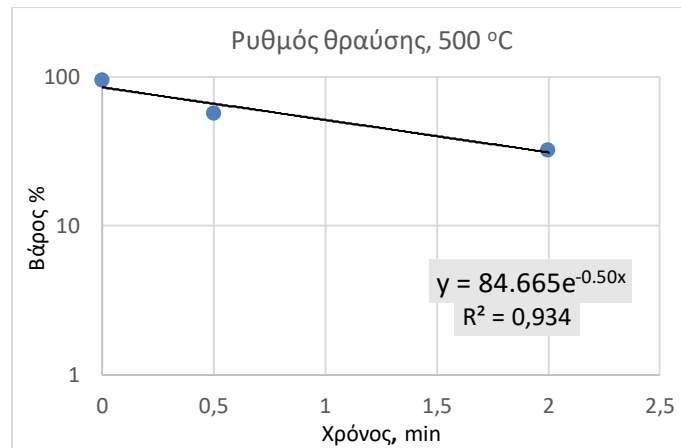
Χρόνος (min)	Παραμένον βάρος %		
	$25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$250\text{ }^{\circ}\text{C}$	$500\text{ }^{\circ}\text{C}$
0	95	95	95
0.5	59.2	62	56.5
2	29.9	30.7	32.3



Διάγραμμα 10.34: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-3.35+1.70\text{ mm}$ για θερμοκρασία περιβάλλοντος $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 10.35: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-3.35+1.70\text{ mm}$ για θερμοκρασία πύρωσης $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 10.36: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm για θερμοκρασία πύρωσης 500°C .

Οι ρυθμοί θραύσης που προκύπτουν από τα διαγράμματα φαίνονται στον Πίνακα 18:

Πίνακας 18: Ρυθμοί θραύσης της τάξης μεγέθους τροφοδοσίας $-3.35+1.70$ mm για θερμοκρασία περιβάλλοντος και διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης.

Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	S_i (min^{-1})
25	0.55
250	0.54
500	0.50

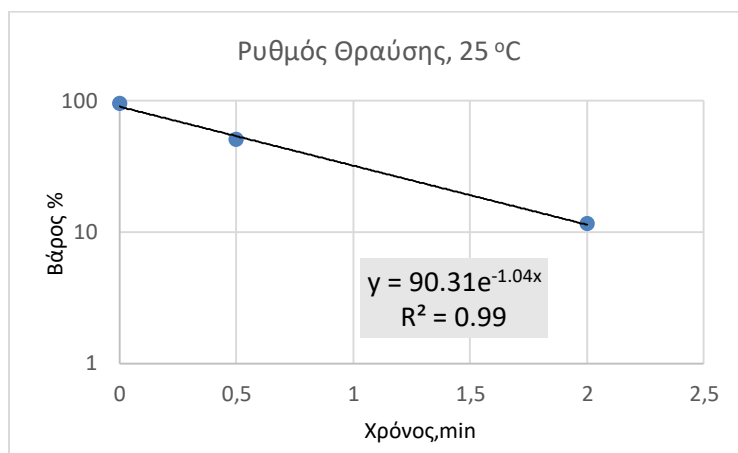
Από τον Πίνακα 18, για την τάξη μεγέθους $-3.35+1.70$ mm ο ρυθμός θραύσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας πύρωσης, με την μεγαλύτερη μεταβολή να παρατηρείται από τους 250°C στους 500°C (-7.4 %).

10.5.2 Τροφοδοσία $-0.850+0.425$ mm

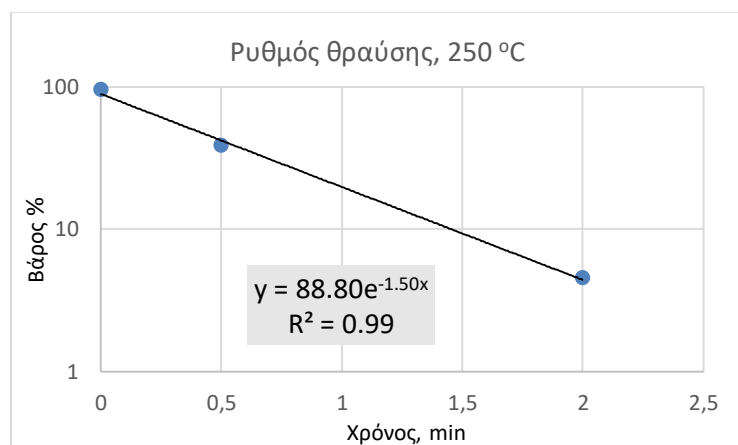
Πίνακας 19: Βάρος (%) παραμένοντος υλικού στην τάξη μεγέθους τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm για όλους τους χρόνους λειοτριβήσης για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C και θερμοκρασίες πύρωσης 250°C και 500°C .

Χρόνος (min)	Παραμένον βάρος %		
	25°C	250°C	500°C
0	95	95	95
0.5	50.28	38.32	51.53

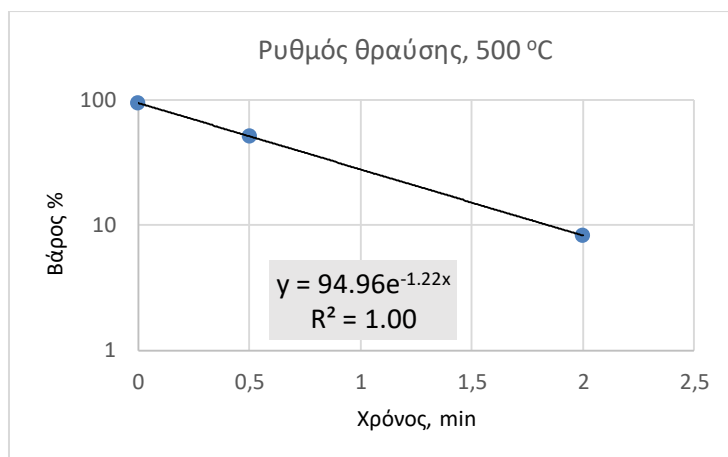
2	11.56	4.51	8.25
---	-------	------	------



Διάγραμμα 10.37: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C.



Διάγραμμα 10.38: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm για θερμοκρασία πύρωσης 250°C.



Διάγραμμα 10.39: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm για θερμοκρασία πύρωσης 500 °C.

Οι ρυθμοί θραύσης του κλάσματος $-0.850+0.425$ mm που προκύπτουν από τα διαγράμματα φαίνονται στον Πίνακα 20:

Πίνακας 20: Ρυθμοί θραύσης της τάξης μεγέθους τροφοδοσίας $-0.850+0.425$ mm για θερμοκρασία περιβάλλοντος και διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης.

Θερμοκρασία (°C)	S_i (min ⁻¹)
25	1.04
250	1.50
500	1.22

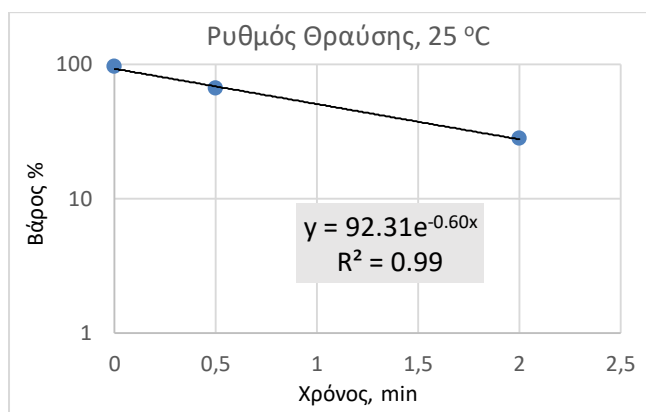
Όπως παρατηρείται, για θερμοκρασία πύρωσης 250 °C προκύπτει η υψηλότερη τιμή του ρυθμού θραύσης με σημαντική διαφορά συγκριτικά με τις άλλες θερμοκρασίες (+30.6% από θερμοκρασία περιβάλλοντος και +18.9% από θερμοκρασία πύρωσης 500 °C).

10.5.3 Τροφοδοσία $-0.212+0.106$ mm

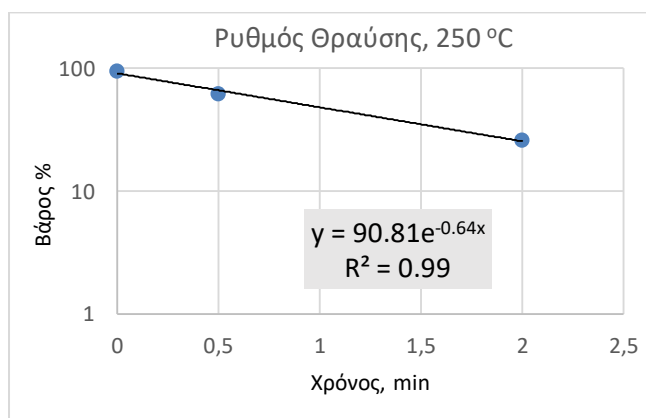
Πίνακας 21: Βάρος (%) παραμένοντος υλικού στην τάξη μεγέθους τροφοδοσίας $-0.212+0.106$ mm για θερμοκρασία περιβάλλοντος και θερμοκρασίες πύρωσης 250 °C και 500 °C.

Χρόνος (min)	Παραμένον βάρος %		
	25 °C	250 °C	500 °C

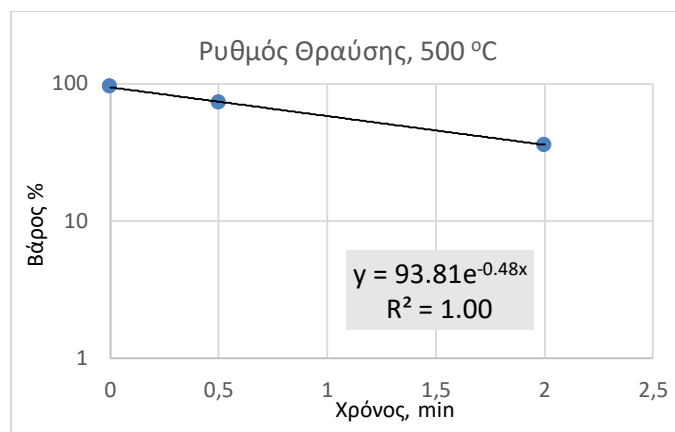
0	95	95	95
0.5	65.66	62.18	72.51
2	27.82	25.76	35.95



Διάγραμμα 10.40: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-0.212+0.106 \text{ mm}$ για θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Διάγραμμα 10.41: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-0.212+0.106 \text{ mm}$ για θερμοκρασία πύρωσης 250 °C.



Διάγραμμα 10.42: Υπολογισμός ρυθμού θραύσης του μεγέθους τροφοδοσίας $-0.212+0.106 \text{ mm}$ για θερμοκρασία πύρωσης 500°C .

Ο Πίνακας 22 έχει συγκεντρωτικά όλους τους ρυθμούς θραύσης:

Πίνακας 22: Ρυθμοί θραύσης της τάξης μεγέθους $-0.212+0.106 \text{ mm}$ για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C και θερμοκρασίες πύρωσης 250°C και 500°C .

Θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$)	$S_i \text{ (min}^{-1}\text{)}$
25	0.60
250	0.64
500	0.48

Για το κλάσμα $-212+106 \text{ }\mu\text{m}$, η υψηλότερη τιμή του ρυθμού θραύσης παρατηρείται για θερμοκρασία 250°C , ενώ με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας πύρωσης στους 500°C ο ρυθμός θραύσης μειώνεται αισθητά.

10.6 Ρυθμός Θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας

Για την εύρεση του ρυθμού θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας, χρησιμοποιήθηκε η εντολή solver του προγράμματος Excel. Η Σχέση (14) περιλαμβάνει τις παραμέτρους α_t , α , μ και Λ . Στόχος της επίλυσης είναι να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων ώστε να τείνει προς το μηδέν η διαφορά τετραγώνων των πειραματικών τιμών του ρυθμού θραύσης και του μοντέλου θραύσης. Οι παράμετροι α και Λ εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υλικού και

διαφοροποιούνται για τις διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης . Οι παράμετροι α και μ εξαρτώνται από τις συνθήκες λειοτρίβησης, οι οποίες επίσης μεταβάλλονται για τις διάφορες θερμοκρασίες πύρωσης (25, 250 και 500 °C). Το μέγεθος τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ανώτερο μέγεθος της κάθε τάξης μεγέθους. Στους Πίνακες 23, 24 και 25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση για τα κλάσματα τροφοδοσίας $-3.35+1.70$, $-0.850+0.425$ και $-0.425+0.212$ mm για όλες τις θερμοκρασίες πύρωσης του λατερίτη.

Πίνακας 23: Πειραματικές και μετρούμενες τιμές του ρυθμού θραύσης για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C.

25 °C			
Ανώτερο μέγεθος (mm)	Πειραματικό S_i (exp)	Μοντέλο S_i (meas)	Διαφορά τετραγώνων $(S_{i(\text{exp})}-S_{i(\text{meas})})^2$
3.35	0.55	0.55	0.00
0.850	1.04	1.04	0.00
0.212	0.68	0.68	0.00
Σύνολο			0.00

Πίνακας 24: Πειραματικές και μετρούμενες τιμές του ρυθμού θραύσης για θερμοκρασία πύρωσης 250 °C.

250 °C			
Ανώτερο μέγεθος (mm)	Πειραματικό S_i (exp)	Μοντέλο S_i (meas)	Διαφορά τετραγώνων $(S_{i(\text{exp})}-S_{i(\text{meas})})^2$
3.35	0.54	0.54	0.00
0.850	1.50	1.48	0.00
0.212	0.64	0.68	0.00
Σύνολο			0.00

Πίνακας 25: Πειραματικές και μετρούμενες τιμές του ρυθμού θραύσης για θερμοκρασία πύρωσης 500 °C.

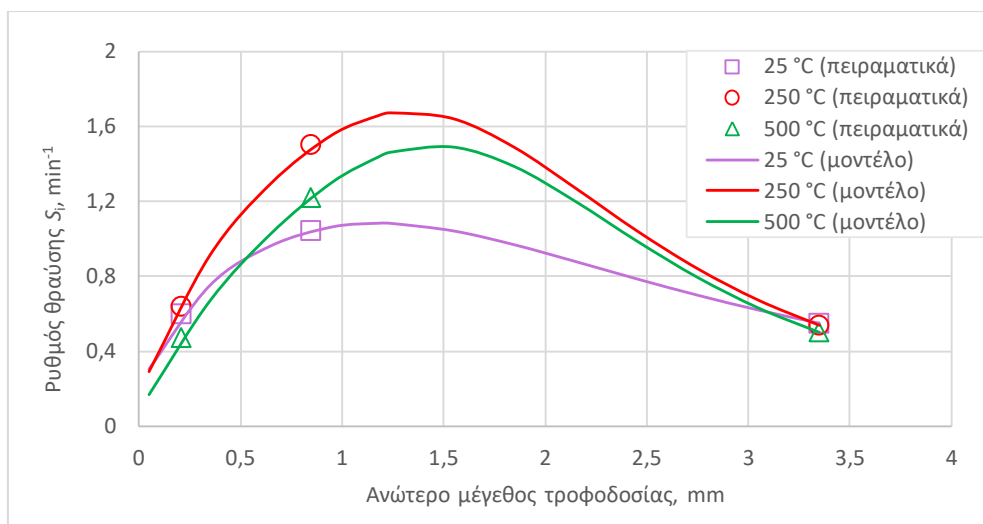
500°C			
Ανώτερο μέγεθος (mm)	Πειραματικό $S_i(\text{exp})$	Μοντέλο $S_i(\text{meas})$	Διαφορά τετραγώνων $(S_{i(\text{exp})}-S_{i(\text{meas})})^2$
3.35	0.50	0.50	0.00
0.850	1.22	1.22	0.00
0.212	0.48	0.47	0.00
Σύνολο			0.00

Στον Πίνακα 26 σημειώνονται συγκεντρωτικά όλες οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν από την επίλυση για τις διάφορες θερμοκρασίες πύρωσης.

Πίνακας 26: Τιμές παραμέτρων του τύπου που υπολογίστηκαν για θερμοκρασίες 25 °C, 250 °C και 500 °C.

T (°C)	α_T	α	μ	Λ
25	1.25	0.47	2.12	2.40
250	1.69	0.59	2.10	3.60
500	1.41	0.71	2.14	3.85

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του ρυθμού θραύσης που προκύπτει συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας για θερμοκρασίες 25 °C, 250 °C και 500 °C.



Διάγραμμα 10.43: Σχέση ρυθμού θραύσης πειραματικών μετρήσεων και υπολογιστικών τιμών του ρυθμού θραύσης συναρτήσει του ανώτερου μεγέθους τροφοδοσίας για διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης.

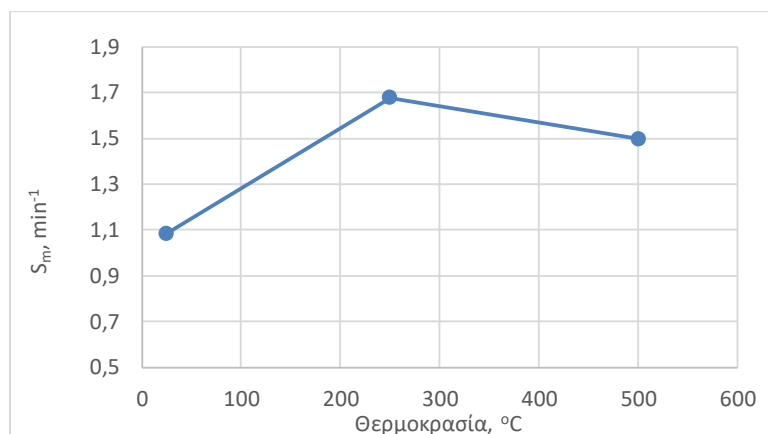
Στο Διάγραμμα 10.43 παρατηρείται διαφοροποίηση στις τιμές των ρυθμών θραύσης για θερμοκρασία περιβάλλοντος και για τις διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης (250 °C και 500 °C). Γενικά, όσο αυξάνεται το μέγεθος τροφοδοσίας, τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης μέχρι να φτάσει την ανώτερη τιμή του και ύστερα ακολουθεί η ελάττωσή του για μεγαλύτερο μέγεθος τροφοδοσίας. Για θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο μέγιστος ρυθμός θραύσης αντιστοιχεί σε βέλτιστο μέγεθος τροφοδοσίας κοντά στα 1.20 mm όπως και για τους 250 °C, ενώ στους 500 °C η κορυφή βρίσκεται κοντά στα 1.5 mm. Η υψηλότερη τιμή του ρυθμού θραύσης παρατηρείται για θερμοκρασία πύρωσης 250 °C με τιμή κοντά στο 1.67 min⁻¹.

10.7 Σχέση ρυθμού θραύσης- θερμοκρασίας πύρωσης

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές του ρυθμού θραύσης για τις διάφορες θερμοκρασίες πύρωσης.

Πίνακας 27: Μέγιστος ρυθμός θραύσης (S_m) συναρτήσει της θερμοκρασίας πύρωσης.

Θερμοκρασία (°C)	S_m (min ⁻¹)
25	1.083
250	1.672
500	1.489



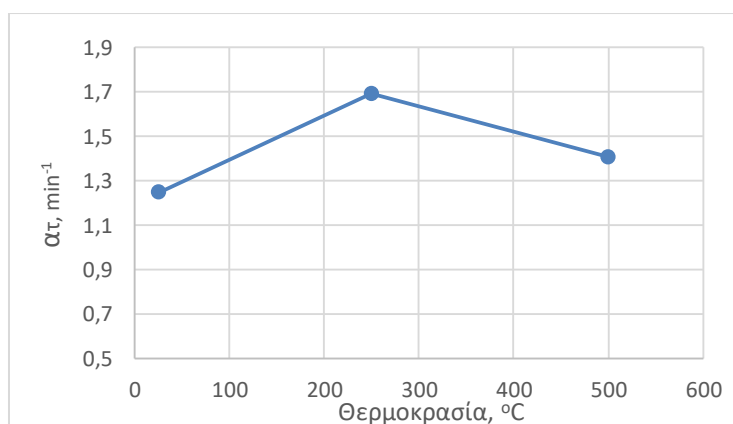
Διάγραμμα 10.44: Μέγιστος ρυθμός θραύσης S_m (min^{-1}) συναρτήσει των θερμοκρασιών πύρωσης.

Ο μέγιστος ρυθμός θραύσης αντιστοιχεί στους 250 °C, ενώ με αύξηση της θερμοκρασίας στους 500 °C φαίνεται να μειώνεται η τιμή του ρυθμού θραύσης. Ο Πίνακας 28 παρουσιάζει τις τιμές α_T (ρυθμός θραύσης για μέγεθος τροφοδοσίας 1mm) που αντιστοιχούν στις διαφορετικές θερμοκρασίες επεξεργασίας του υλικού.

Πίνακας 28: Οι τιμές της παραμέτρου α_T συναρτήσει της θερμοκρασίας πύρωσης.

Θερμοκρασία (°C)	$\alpha_T(\text{min}^{-1})$
25	1.247
250	1.692
500	1.408

Στο Διάγραμμα 10.45 απεικονίζεται η σχέση της παραμέτρου α_T με την θερμοκρασία:



Διάγραμμα 10.45: Σχέση του ρυθμού θραύσης α_T (min^{-1}) συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Ο ρυθμός θραύσης α_T αυξάνεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C) προς τη θερμοκρασία 250 °C και ακολουθεί αξιόλογη μείωση της τιμής για θερμοκρασία πύρωσης 500 °C.

10.8 Συνάρτηση Θραύσης (μέθοδος ΒΙΙ)

Το αντικείμενο της επίλυσης του μοντέλου ήταν να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές που ελαχιστοποιούν το σφάλμα, δηλαδή προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες παράμετροι έτσι ώστε οι τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν τις πειραματικές τιμές και να μειωθεί η απόκλιση τους. Χρησιμοποιήθηκε η εντολή solver του προγράμματος Excel και έγινε επίλυση του μοντέλου με τη μέθοδο ΒΙΙ και τη χρήση των Σχέσεων (7) και (8). Επειδή αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη μόνο για στενά κοκκομετρικά κλάσματα και μικρούς χρόνους λειοτρίβησης, επιλέχθηκε ένα κλάσμα μεγέθους $-3.35+2.36$ mm, ενώ ο χρόνος λειοτρίβησης περιορίστηκε στα 0.5 min. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση για το κλάσμα $-3.35+1.70$ mm για όλες τις θερμοκρασίες πύρωσης (25 °C, 250 °C και 500 °C)

Πίνακας 29: Πειραματικές και μετρούμενες τιμές της συνάρτησης θραύσης για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C.

25 °C			
Σχετικό μέγεθος	Μοντέλο $B_{i,j \text{ meas}}$	Πειραματικό $B_{i,j \text{ exp}}$	Διαφορά Τετραγώνων $(B_{i,j \text{ exp}} - B_{i,j \text{ meas}})$
1.00	1.00	1.00	0.00
0.51	0.56	0.56	0.00
0.25	0.42	0.42	0.00
0.13	0.35	0.34	0.00
0.06	0.28	0.28	0.00

Πίνακας 30: Πειραματικές και μετρούμενες τιμές της συνάρτησης θραύσης για θερμοκρασία πύρωσης 250 °C.

250 °C			
Σχετικό μέγεθος	Μοντέλο $B_{i,j \text{ meas}}$	Πειραματικό $B_{i,j \text{ exp}}$	Διαφορά Τετραγώνων $(B_{i,j \text{ exp}} - B_{i,j \text{ meas}})$
1.00	1.00	1.00	0.00
0.51	0.54	0.54	0.00

0.25	0.41	0.41	0.00
0.13	0.34	0.33	0.00
0.06	0.27	0.27	0.00

Πίνακας 31: Πειραματικές και μετρούμενες τιμές της συνάρτησης θραύσης για θερμοκρασία πύρωσης 500 °C.

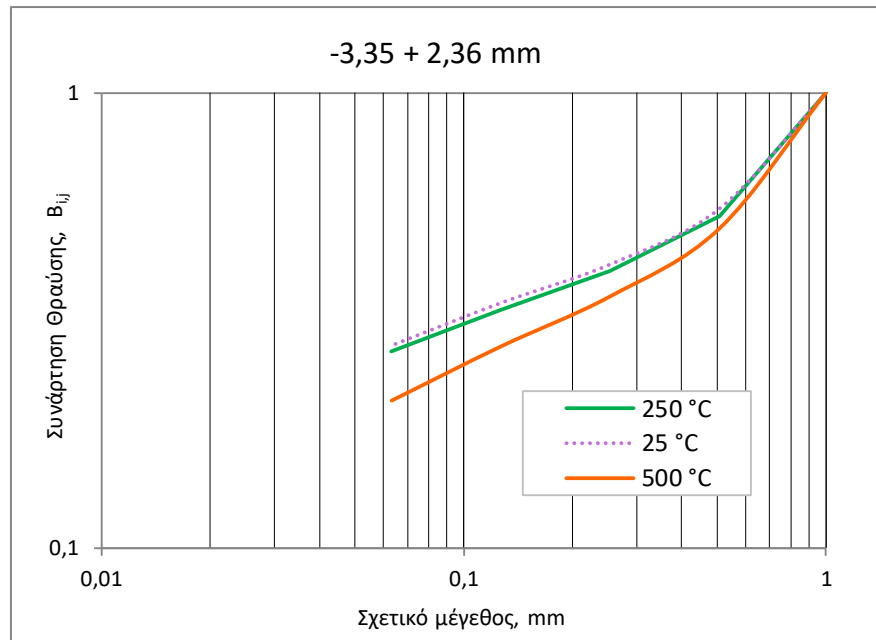
500 °C			
Σχετικό μέγεθος	Μοντέλο $B_{i,j \text{ meas}}$	Πειραματικό $B_{i,j \text{ exp}}$	Διαφορά Τετραγώνων $(B_{i,j \text{ exp}} - B_{i,j \text{ meas}})$
1.00	1.00	1.00	0.00
0.51	0.50	0.50	0.00
0.25	0.36	0.36	0.00
0.13	0.28	0.28	0.00
0.06	0.21	0.21	0.00

Οι παράμετροι ϕ , β και γ υπολογίζονται με βάση τη Σχέση (8). Συγκεκριμένα, οι παράμετροι ϕ και β αναφέρονται στη θραύση των χονδρών τεμαχιδίων που πλησιάζουν το μέγεθος τροφοδοσίας. Γενικά, όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές τους, τόσο περισσότερο θραύονται τα χονδρά τεμαχίδια. Η παράμετρος γ δείχνει την παραγωγή των ψιλών κλασμάτων. Μικρότερες τιμές του γ αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη παραγωγή ψιλών. Στον Πίνακα 32 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν.

Πίνακας 32: Τιμές των παραμέτρων ϕ , β και γ για τις διαφορετικές θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία (°C)	ϕ	β	γ
25	0.61	3.03	0.28
250	0.59	3.25	0.28
500	0.59	3.22	0.37

Στο
10.46



Διάγραμμα

παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση θραύσης συναρτήσει του σχετικού μεγέθους:

Διάγραμμα 10.46: Αθροιστική συνάρτηση θραύσης συναρτήσει του σχετικού μεγέθους για 25 °C, 250 °C και 500 °C.

Από το Διάγραμμα 10.46 φαίνεται μια διαφοροποίηση των καμπυλών της συνάρτησης θραύσης για τις διάφορες θερμοκρασίες πύρωσης, ιδιαίτερα όταν το κλάσμα πυρωθεί στους 500 °C. Η παράμετρος φ έχει μικρή απόκλιση ανάμεσα στις διαφορετικές θερμοκρασίες, ενώ η παράμετρος β είναι μικρότερη στους 25 °C συγκριτικά με τους 250 °C και 500 °C. Η παράμετρος γ έχει ίδια τιμή για τις θερμοκρασίες 25 °C και 250 °C. Η μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου γ παρουσιάζεται στους 500 °C, δηλαδή σε αυτή τη θερμοκρασία έχουμε την μικρότερη παραγωγή ψιλών κλασμάτων από τη λειοτρίβηση.

11. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η βελτιστοποίηση της λειοτρίβησης λατερίτη σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο μετά από θερμική επεξεργασία του υλικού σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, τρία στενά κοκκομετρικά κλάσματα, τα οποία υποβλήθηκαν σε θερμική επεξεργασία σε κάμινο, αποτέλεσαν τις τροφοδοσίες του εργαστηριακού μύλου.

Από τα διαγράμματα αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος προέκυψε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος, για κάθε θερμοκρασία πύρωσης. Η μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας έδειξε ότι γενικά η πύρωση στους 250 °C δεν επηρεάζει το μέγεθος του προϊόντος της λειοτρίβησης, ενώ στους 500 °C οδηγεί σε χονδρότερο προϊόν σε σχέση με το μέταλλευμα που δεν είχε υποστεί θερμική επεξεργασία. Μόνο στο κλάσμα τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm φάνηκε ότι η θέρμανση στους 250 °C επηρεάζει τα αποτελέσματα της λειοτρίβησης και συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του μεγέθους του προϊόντος.

Για το κλάσμα τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm που υπέστη απότομη ψύξη (quenching) πριν τη λειοτρίβηση, φάνηκε ότι οι καμπύλες κατανομής βάρους των 500 °C είναι ελαφρώς μετατοπισμένες προς τα λεπτότερα κλάσματα σε σχέση με αυτές των 250 °C. Από τη σύγκριση της βραδείας και της απότομης ψύξης μετά από θέρμανση, φαίνεται ότι με τη βραδεία ψύξη παράγεται περισσότερο λεπτομερές υλικό (-0.106 mm) από τη λειοτρίβηση. Μάλιστα, η πιο αποδοτική επιλογή ήταν για τη βραδεία ψύξη στους 250 °C.

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων του μεγέθους d_{80} , προέκυψε ότι το χονδρό κλάσμα (-3.35+1.70 mm) που δεν είχε υποστεί πύρωση πριν τη λειοτρίβηση, παρήγαγε λεπτότερο προϊόν συγκριτικά με τα επίπεδα πύρωσης των 250 °C και 500 °C. Για το μεσαίο (-0.850+0.425 mm) και το μικρό (-0.212+0.106 mm) κλάσμα, φάνηκε ότι το επίπεδο πύρωσης των 250 °C ήταν αυτό για το οποίο παράχθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό λεπτομερών προϊόντων.

Από τη μελέτη της κινητικής της λειοτρίβησης φάνηκε ότι ο ρυθμός θραύσης (S_i) του λατερίτη αυξάνεται με αύξηση του μεγέθους τροφοδοσίας μέχρι ένα βέλτιστο μέγεθος και ύστερα μειώνεται. Το βέλτιστο μέγεθος τροφοδοσίας για το αρχικό κλάσμα και για το κλάσμα που θερμάνθηκε στους 250 °C ήταν κοντά στο 1.20 mm, ενώ για τους 500 °C στο 1.50 mm. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι υψηλότερες τιμές του ρυθμού θραύσης (min^{-1}) αντιστοιχούν στα κλάσματα τροφοδοσίας που είχαν πυρωθεί στους 250 °C. Συμπεραίνεται ότι ο λατερίτης Καστοριάς που έχει υποστεί θερμική επεξεργασία στους 250 °C λειοτριβείται γρηγορότερα.

Με τη χρήση του κινητικού μοντέλου του ρυθμού θραύσης, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι του αρχικού δείγματος και συγκρίθηκαν με τις παραμέτρους του δείγματος που είχε υποστεί θέρμανση, υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες. Οι παράμετροι S_i και α παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές για λατερίτη πυρωμένο στους 250 °C, το οποίο υποδηλώνει ότι ο λατερίτης αυτός λειοτριβείται γρηγορότερα συγκριτικά με τα άλλα επίπεδα θερμοκρασίας.

Από την ανάλυση της συνάρτησης θραύσης υπολογίστηκαν οι παράμετροι $B_{i,j}, \gamma, \phi$ και β για τις θερμοκρασίες πύρωσης του μεταλλεύματος λατερίτη. Παρατηρήθηκε ότι τα χονδρά τεμαχίδια του λατερίτη που έχει υποστεί επεξεργασία με πύρωση στους 250 °C θραύονται περισσότερο σε σχέση με τις άλλες θερμοκρασίες που δοκιμάστηκαν. Επίσης, ο λατερίτης που έχει πυρωθεί στους 500 °C, παράγει μικρότερο ποσό λεπτομερών προϊόντων.

Η μελέτη της Ορυκτολογικής Ανάλυσης του λατερίτη έδειξε ότι οι μετατροπές ορυκτολογικών φάσεων και οι διαφοροποιήσεις στη δομή του μεταλλεύματος ανάμεσα στις διαφορετικές θερμοκρασίες πύρωσης, μπορεί να επηρεάζουν τα αποτελέσματα της λειοτρίβησης.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αλεβίζος Γ. (1997): Ορυκτολογία, γεωχημεία και γένεση ιζηματογενών νικελιούχων σιδηρομεταλλευμάτων Λοκρίδας (Κεντρική Ελλάδα). Διδακτορική Διατριβή
- Αποστολίκας Α. (2007): Το κοίτασμα σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος λεκάνης Κωπαΐδας Νομού Βοιωτίας, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Αποστολίκας Α. (2010): Κοιτασματολογία Νικελίου-Εκδόσεις Εφύρα.
- Δουδούμης Α. (2011): Έρευνα και Στρατηγική Ανάλυση της Εταιρίας Παραγωγής Σιδηρονικελίου <<LARCO>>, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών και Διοίκησης, Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου.
- Καρμάλη Β. (2015): Βελτιστοποίηση λειοτρίβησης χαλαζίτη σε σφαιρόμυλο, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κομνίτσας Κ. (2012): Μεταλλουργικές διεργασίες, Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Οικονομίδη Χ. (2017): Υδρομεταλλουργική Κατεργασία Λατεριτών με Χλωριούχα Διαλύματα, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
- Πετράκης Ε. (2004): Σχέση ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την λειοτρίβηση ψαθυρών υλικών, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πετράκης Ε. (2017): Μοντελοποίηση της σχέσης ενέργειας-διαστασιακών ιδιοτήτων των προϊόντων κατάτμησης σε σφαιρόμυλο, Διδακτορική Διατριβή, Πολύτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Σταμπολιάδης Η. (2008): Μηχανική των τεμαχιδίων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Σταμπολιάδης Η. (2008): Εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Τσιτσιπάτη Μ. (2007): Ορυκτολογία και Γεωχημεία των Σιδηρονικελιούχων Λατεριτικών εμφανίσεων του Βερμίου, Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Χρηστίδης Γ. (2002): Κοιτασματολογία Ι (Γενικές αρχές-μεταλλικά ορυκτά), Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Χρηστίδης Γ. (2015): Κοιτασματολογία, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Ξένη Βιβλιογραφία

- Abbes et al. (2020): Thermal Beneficiation of Sra quertane (Tunisia) Low-Grade Phosphate Rock, Minerals 2020, 10, 937
- Agatzini-Leonardou S., Zafiratos I.G. & Spathis D. (2004): Beneficiation of a Greek serpentinitic nickeliferous ore, Part I. Mineral processing, Hydrometallurgy 74:259-265.
- Augustithis S.S. (1967): On the phenomenology and geochemistry of differential leaching and element agglutination processes, Chemical Geology, Volume 2.
- A. Garcés-Granda, G.T. Lapidus & O.J. Restrepo-Baena (2018): The effect of calcination as pre treatment to enhance the nickel extraction from low-grade laterites, Minerals Engineering 120: 127-131.
- Austin L.G., Shojl K. & Luckie P.T. (1976): The Effect of Ball Size on Mill Performance, Powder Technology 14:71-79.

- Austin L.G. & Bagga P. (1981): An analysis of fine dry grinding in ball mills, *Powder Technology* 28:83-90.
- Austin L.G. & Luckie P.T. (1972): Methods for determination of breakage distribution parameters, *Powder Technology* 5:215-222.
- Austin L.G., Klimpel R.R. & Luckie P.T. (1984): *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*, Society of Mining Engineers of AIME, New York.
- Cui Z., Liu Q. & Etsell T.H. (2002): Magnetic properties of ilmenite, hematite and oilsand minerals after roasting, *Minerals Engineering* 15:1121-1129.
- Chen Y. et al. (2021): Treatment of high-arsenic copper smelting flue dust with high copper sulfate, Arsenic separation by low temperature roasting, *Minerals Engineering* 164:106796.
- Dash N., Rath S.S. & Angadi S.I. (2019): Thermally assisted magnetic separation and characterization studies of a low-grade hematite ore, *Powder Technology* 346:70-77.
- Deniz V. (2013): Effect of mill speed on kinetic breakage four different particulate pumices, *Particulate Science and Technology* 31:101-108.
- Elias M., Donaldson M.J. & Giorgetta N. (1981): Geology, mineralogy and chemistry of lateritic nickel-cobalt deposits near Kalgoorlie, Western Australia, *Economic Geology* 76:1775-1783
- Emsley J. (2011): *An A-Z Guide to the Elements*, Oxford University Press.
- Evans A.M. (1993): *Ore geology and Industrial Minerals*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 390pp.
- Golightly J.P. (1981): Nickeliferous laterite deposits, *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume:710-735.
- Klimpel R.R. & Austin L.G. (1977): The Back-Calculation of Specific Rates of Breakage and Non-Normalized Breakage Distribution Parameters from Batch Grinding Data, *Mineral Processing* 4:7-32.
- Koleini J.S.M. & Barani K. (2008): The effect of microwave radiation upon grinding energy of an iron ore, University of Tarbiat Modares and Namvaran Consulting Engineering Company.
- Kotake N. et al. (2002): Experimental study on the grinding rate constant of solid materials in a ball mill, *Powder Technology* 122:101-108.
- Li G. et al. (2012): Beneficiation of nickeliferous laterite by reduction roasting in the presence of sodium sulfate, *Minerals Engineering* 32:19-26.
- Li J. et al. (2009): Effect of pre-roasting on leaching the laterite, *Hydrometallurgy* 99:84-88
- McDonald R.G., Wittington B.I. (2008): Atmospheric acid leaching of nickel laterites review Part 1, Sulphuric acid technologies, *Hydrometallurgy* 91:35-55.
- Napier-Munn T.J. et al. (1996): *Mineral Comminution Circuits. Their Operation and Optimization*, JKMRC, Queensland, Australia.
- Petrakis E., Komnitsas K. (2019): Effect of Energy Input in a Ball Mill on Dimensional Properties of Grinding Products. An Official International Peer-reviewed Journal of the society Mining, Metallurgy & Exploration, 36:803-816. ISSN 2524-3462.
- Petrakis E., Karmali V. & Komnitsas K. (2018): Factors affecting nickel upgrade during selective grinding of low-grade limonitic laterites, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 1-10.
- Rice M.N. (2016): A hydrochloric acid process for nickeliferous laterites, *Minerals Engineering*, 88:28-52.
- Riley J.F. (1977): The pentlandite group: new data and an appraisal of structure-composition relationships, *Mineral. Mag.*, 41:345-349.
- Sefiu O. Adewuyi, Hussin A.M. Ahmed & Haitham M.A. Ahmed (2020): Methods of Ore Pretreatment for Comminution Energy Reduction, *Minerals* 2020, Volume 10, Issue 5.

- Sikong L. & Bunsin T. (2009): Mechanical property and cutting rate of microwave treated granite, Songklanakarin J. Sci. Technol., 31(4): 447-452.
- Xin D., Dashan Y., Shuilin Z., Zhiming S. & Chunquan L. (2021): Deep insight into the reductive roasting treatment on iron removing from quartz, Advanced Powder Technology 32:4825-4832.
- Zevgolits E., Zografidis C. & Halkia I.(2010): The reducibility of the Greek nickeliferous laterites: a review, Miner Process Extr Metall. 119(1):9-17.

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- Nickel Institute
(<https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications>,
<https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/#02-nickel-availability/>)
(τελευταία πρόσβαση 14/5/2023)
- International Nickel Study Group
(<https://insg.org/index.php/about-nickel/production-usage>)
(τελευταία πρόσβαση 25/4/2023)
- Orykta.gr
(<http://www.orykta.gr/geologia-oryktologia/dimiourgia-ekseliksi-gis>)
(τελευταία πρόσβαση 25/4/2023)
- United States Geological Survey
(<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information>)
(τελευταία πρόσβαση 22/6/2023)
- Sme.gr
(<https://www.sme.gr/wpcontent/uploads/2022/10/%CE%95%CF%84%CE%AE%CF%83%CE%B9%CE%B1-%CE%88%CE%BA%CE%B8%CE%B5%CF%83%CE%B7-%CE%94%CF%81%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CE%BF%CF%84%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD-2021.pdf>)
(τελευταία πρόσβαση 21/9/2023)