



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΟΝ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΕΡΓΟΥ BOND**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΑΝΑΗΣ Π. ΤΣΑΚΙΡΗ

Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων – Μεταλλουργού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Κ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΟΝ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΕΡΓΟΥ BOND**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΑΝΑΗΣ Π. ΤΣΑΚΙΡΗ

Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων – Μεταλλουργού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Κ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΤΣΙΜΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2012

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	I
Πρόλογος.....	II
Περίληψη.....	III
Abstract	IV
1. Εισαγωγή.....	1
2. Θεωρητικό μέρος.....	2
2.1 Αδρανή υλικά.....	2
2.2 Ασβεστόλιθος.....	5
2.3 Κατάτμηση (ελάττωση μεγέθους).....	7
2.4 Θεωρία κατάτμησης.....	13
3. Σκοπός της παρούσας μελέτης.....	16
4. Πειραματικό μέρος.....	17
Γενικά.....	17
4.1 Προετοιμασία του υλικού.....	17
4.1.1 Θραύση.....	17
4.1.2 Δειγματοληψία.....	18
4.1.3 Ταξινόμηση.....	19
4.2 Κατανομή Rosin - Rammler.....	21
4.3 Περίθλαση ακτίνων-X (X-Ray Diffraction, XRD).....	23
4.4 Η δοκιμή Bond.....	25
4.5 Προετοιμασία δειγμάτων για τη δοκιμή Bond.....	30
5. Πειραματική διαδικασία – Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα.....	32
5.1 Περίθλαση ακτίνων – X (XRD).....	32
5.2 Κοκκομετρική ανάλυση στο υλικό αρχικής τροφοδοσίας.....	34
5.3 Δοκιμές προσδιορισμού του δείκτη Bond.....	37
6. Βιβλιογραφία.....	56
Βιογραφικό σημείωμα.....	58

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Τσακαλάκη Κωνσταντίνο για την ανάθεση της εργασίας αυτής και κυρίως για την καθοδήγηση, την προθυμία του να μου παρέχει την πολύτιμη βοήθειά του, την κατανόησή του και την άριστη συνεργασία μας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλία Σαμμά Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργό για την καλή του, πάντοτε, διάθεση να με βοηθήσει σε ό,τι και αν χρειάστηκα, την υποστήριξη και το αληθινό ενδιαφέρον του, καθώς και τη συνάδελφό μου Βασιλική Ανδριανάκη για τη βοήθεια και τη συμπαράστασή της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, που υπήρξε για μένα κάτι παραπάνω από πολύτιμη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια κα Θ. Περράκη για τη βοήθειά της και τη διάθεση του περιθλασίμετρου ακτίνων – X.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στους καθηγητές κ. Σ. Τσιβιλή και κ. Σ. Τσίμα, μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου καθώς και στους φίλους μου για την πολύτιμη ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν.

Πρόλογος

Σημαντικό ρόλο σε μία βιομηχανία ή μεταλλευτική επιχείρηση παίζει το κέρδος που θα αποκομίσει από το παραγόμενο προϊόν. Επομένως είναι χρήσιμο να μπορεί να εκτιμήσει το κόστος που θα απαιτηθεί για την εξόρυξη και την επεξεργασία των διαφόρων μεταλλευμάτων και πετρωμάτων ώστε να μετατραπούν σε εμπορεύσιμα προϊόντα.

Προκειμένου να γίνει ο εμπλουτισμός και η επεξεργασία των μεταλλευμάτων, καθώς και η εξόρυξη και παραγωγή διαφόρων αδρανών υλικών, είναι απαραίτητη η διαδικασία της κατάτμησης (θραύση και λειοτρίβηση). Ακριβείς και ταχείες μέθοδοι υπολογισμού του κόστους κάθε βήματος της διαδικασίας αυτής έχουν αναπτυχθεί με σκοπό τη βελτιστοποίησή της.

Στις μέρες μας μία τυπική μέθοδος που χρησιμοποιείται από τις βιομηχανίες για την πρόβλεψη του κόστους της διαδικασίας άλεσης ενός υλικού είναι η δοκιμή Bond. Πρόκειται για μία αυτοτελή δοκιμή σε κλειστό κύκλωμα θραύσης – κοσκίνισης (ξηρή κοσκίνιση), μέσω της οποίας υπολογίζεται ο δείκτης έργου Bond (W_i). Ο δείκτης αυτός αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται (kWh/t) για την κατάτμηση ενός τόνου υλικού από θεωρητικά άπειρο μέγεθος τεμαχίων, σε προϊόν με χαρακτηριστικό μέγεθος τεμαχίων 100 μm . Η παραπάνω δοκιμή παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για το σχεδιασμό κυκλωμάτων άλεσης με σφαιρόμυλο.

Στην παρούσα εργασία προσδιορίζεται ο δείκτης έργου Bond ασβεστολιθικού πετρώματος και μελετάται η επίδραση της χαρακτηριστικής κοκκομετρίας του υλικού σε αυτόν [1, 2, 3].

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας του προϊόντος λειοτριβήσης ασβεστολιθικού πετρώματος στο δείκτη έργου Bond. Ο δείκτης έργου Bond χρησιμοποιείται ευρέως από τις βιομηχανίες, καθώς μέσω αυτού γίνεται μια εκτίμηση της ενέργειας που απαιτείται για την κατάτμηση ενός υλικού και επομένως η επιλογή των κατάλληλων μηχανών κατάτμησης.

Καταρχήν, έγινε προσδιορισμός των ορυκτολογικών φάσεων του υλικού με περιθλασιμετρία ακτίνων – Χ (XRD) και βρέθηκε ότι πρόκειται για καθαρό ασβεστίτη (CaCO_3).

Μετά από θραύση στον εργαστηριακό θραυστήρα σιαγόνων, έτσι ώστε το μέγεθος των τεμαχίων να είναι μικρότερο από 3.327 mm και δειγματοληψία του υλικού, έγινε κοκκομετρική ανάλυση στο υλικό αρχικής τροφοδοσίας, υπολογίστηκε το φαινόμενο ειδικό του βάρους και προετοιμάστηκαν τα απαραίτητα δείγματα για τις δοκιμές. Οι δοκιμές Bond πραγματοποιήθηκαν στον εργαστηριακό σφαιρόμυλο του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων Ε.Μ.Π., για τέσσερα διαφορετικά μεγέθη προϊόντος (90 μm , 125 μm , 150 μm και 180 μm) και βρέθηκε ότι ο δείκτης έργου αυξάνει όσο μικραίνει το μέγεθος του προϊόντος λαμβάνοντας τιμές από 18.24 έως 21.8 kWh/t.

Abstract

The present study deals with the definition of the Bond work index of limestone and the variation in this work index as a function of screen aperture. The Bond work index is the most widely used means of estimating the energy required for comminution and is currently used in the minerals industry to provide data fundamental to the design of commercial milling installations.

First of all, the material was analyzed by diffraction of X- rays and all the diffraction peaks detected could be assigned to CaCO_3 .

The index was determined on a laboratory-scale using a Bond ball-mill. The material was first crushed in a jaw crusher in order to be reduced to minus 6 mesh (3.327 mm) and then passed through a sample splitter. Afterwards its apparent specific gravity was calculated, the feed was screened to determine its size distribution and the samples needed for the tests were collected from the original feed.

The Bond grindability tests carried out for four different limiting screen sizes (90 μm , 125 μm , 150 μm και 180 μm) and it was observed that the indices increased as the finer screen size was used.

1. Εισαγωγή

Στην Ελλάδα τα αδρανή υλικά είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομία, αφού αντιπροσωπεύουν το 45% περίπου της συνολικής παραγωγής βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων. Το κυρίαρχο πέτρωμα που χρησιμοποιείται στον Ελληνικό χώρο ως αδρανές υλικό είναι ο ασβεστόλιθος, δεδομένου ότι τα ασβεστολιθικά πετρώματα καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις σε όλα τα διαμερίσματα της χώρας.

Για την παραγωγή και την επεξεργασία των αδρανών απαραίτητη είναι η διαδικασία της κατάτμησης για την παραγωγή των κατάλληλων κοκκομετρικών κλασμάτων (διαβαθμίσεων). Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του πετρώματος που πρόκειται να εξορυχτεί, γίνεται η επιλογή του κατάλληλου τρόπου εξόρυξης, επεξεργασίας όπως επίσης και των μηχανών κατάτμησης.

Σημαντικό ρόλο παίζει η ενέργεια που απαιτείται για την κατάτμηση των πετρωμάτων και προκειμένου να υπολογιστεί έχουν αναπτυχθεί πολλές θεωρίες. Η θεωρία του Bond έχει επικρατήσει σήμερα και ο υπολογισμός του δείκτη έργου Bond για τον προσδιορισμό της θραυστικότητας ενός πετρώματος βοηθάει στην επιλογή και διαστασιολόγηση του εξοπλισμού για τη θραύση και στο σχεδιασμό κυκλωμάτων άλεσης.

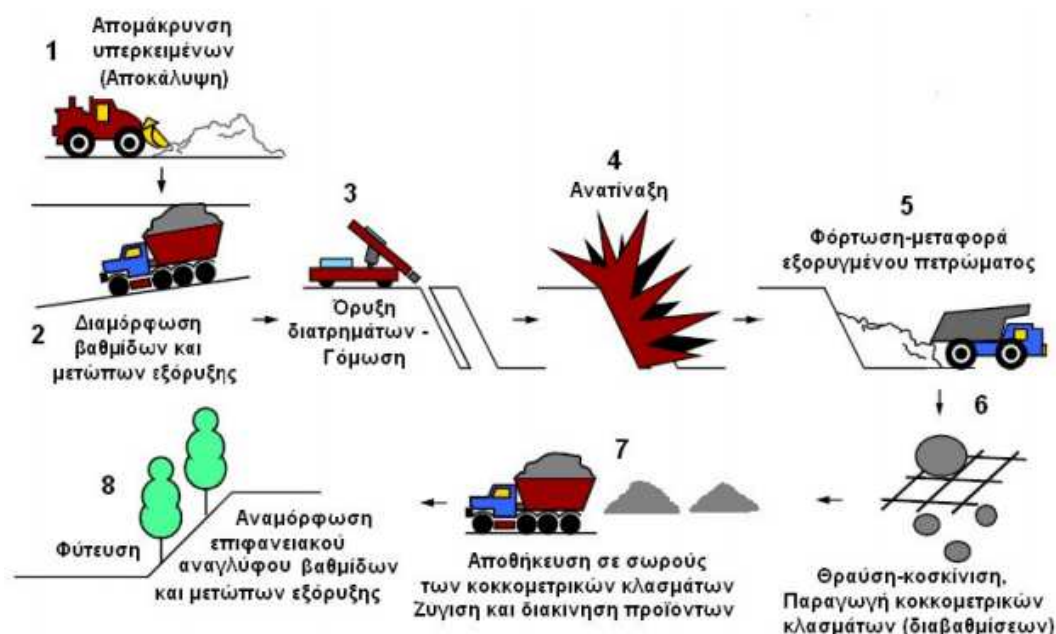
2. Θεωρητικό μέρος

2.1 Αδρανή υλικά

Αδρανή είναι τα διαβαθμισμένα, ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης, υλικά που χρησιμοποιούνται είτε με συγκολλητικό μέσο (για παρασκευή κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, ασφαλτομιγμάτων κλπ) είτε αυτούσια (έρμα σιδηροδρομικών γραμμών, στραγγιστηρίων, φίλτρων διηθήσεως ή καθαρισμού, ως βράχοι θωράκισης, κλπ), σε πάσης φύσεως τεχνικά έργα. Τα αδρανή υλικά οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικώς αδρανή κατά τη χρήση (εφαρμογή) τους. Συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος. Τα καταλληλότερα πετρώματα για να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή υλικά είναι τα ασβεστολιθικά.

Η εξόρυξη και παραγωγή των αδρανών υλικών περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Σχήμα 1):

- Απομάκρυνση του υπερκείμενου στρώματος
- Διαμόρφωση βαθμίδων, μετώπων εξόρυξης και οδών προσπέλασης
- Όρυξη διατρημάτων – γόμωση
- Ανατίναξη
- Φόρτωση και μεταφορά του εξορυγμένου πετρώματος
- Παραγωγή κοκκομετρικών κλασμάτων με διεργασίες θραύσης – κοσκίνισης
- Αποθήκευση σε σωρούς των κοκκομετρικών κλασμάτων
- Ζύγιση και διακίνηση προϊόντων
- Αναμόρφωση του επιφανειακού αναγλύφου βαθμίδων και μετώπων εξόρυξης



Σχήμα 1 : Αλληλουχία φάσεων εξόρυξης και παραγωγής αδρανών υλικών

Έχουν εμφανιστεί και νέοι όροι, όπως *ανακυκλωμένα αδρανή* και *τεχνητά αδρανή*. Τα ανακυκλωμένα αδρανή προέρχονται από ανακύκλωση Αποβλήτων Κατασκευών & Κατεδαφίσεων, και περιλαμβάνουν για παράδειγμα χρησιμοποιημένα τούβλα, σπασμένο σκυρόδεμα, πλινθοδομές και τοιχοποιίες, ενώ τα τεχνητά αδρανή παράγονται από βιομηχανικές δραστηριότητες κατά τη διάρκεια επεξεργασίας ή επανεπεξεργασίας αποβλήτων, παραπροϊόντων και υπολειμμάτων. Τα τεχνητά αδρανή μερικές φορές αναφέρονται και ως δευτερογενή αδρανή. Επιπρόσθετα, εξορυκτικά (ή μεταλλευτικά) απόβλητα, προερχόμενα αντίστοιχα από αναζήτηση, εξόρυξη, επεξεργασία και αποθήκευση ορυκτών πρώτων υλών (πόρων) και εργασίες σε λατομεία, μπορεί να επεξεργαστούν για την παραγωγή αδρανών.

Τα αδρανή πρέπει να διαθέτουν τρία βασικά χαρακτηριστικά:

- Επαρκή αντοχή
- Επαρκή πρόσφυση λόγω σχήματος και επιφανειακού αναγλύφου
- Χημική συνάφεια συνεκτικότητα με την τσιμεντοκονία.

Άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι η αντοχή του μητρικού πετρώματος, η καθαρότητα (ύπαρξη ή όχι πρόσμεικτων ουσιών), η χημική τους συμπεριφορά, η κοκκομετρική διαβάθμιση (το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων).

Τα αδρανή υλικά με βάση τη χρήση τους χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- I. Αδρανή για παρασκευή τσιμεντοσκυροδέματος
- II. Αδρανή για παρασκευή ασφαλτομιγμάτων
- III. Αδρανή κονιαμάτων
- IV. Αδρανή για ογκόλιθους για υδραυλικά και λιμενικά έργα
- V. Αδρανή για έρμα σιδηροδρομικής γραμμής
- VI. Αδρανή υλικά για βάσεις και υποβάσεις σταθεροποιημένες ή όχι για χρήση σε οδοστρώματα και έργα πολιτικού μηχανικού

Η κύρια χρήση των αδρανών είναι στην παραγωγή σκυροδέματος. Το 70 – 80% κατά βάρος του σκυροδέματος αποτελείται από αδρανή. Εξασφαλίζουν μεγάλη σταθερότητα όγκου και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κατασκευών σε σχέση με την περίπτωση χρήσης μόνο τσιμεντοκονιάματος

Τα ασφαλτικά μίγματα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή έργων οδοποιίας, αεροδρομίων και γενικά όπου πρόκειται να κυκλοφορήσουν ή να σταθμεύσουν τροχοφόρα. Τα αδρανή χρησιμοποιούνται στα ασφαλτομίγματα σε ποσοστό 90 – 95% κατά βάρος. Σκοπός τους είναι να μεταφέρουν το φορτίο κάθετα στα υποκείμενα στρώματα με την ελάχιστη συνδρομή του ασφαλτικού συνδετικού, διατηρώντας το έργο στο οποίο συμμετέχουν στην αρχική του μορφή και προσδίδοντάς του ειδικές ιδιότητες ανάλογα με τη χρήση και τις απαιτήσεις σχεδιασμού.

Η χρήση αδρανών στα κονιάματα γίνεται για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους. Τα κονιάματα που δεν περιέχουν αδρανή συστέλλονται κατά την πήξη και τη σκλήρυνση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικών τάσεων και τελικά επιφανειακών ρωγματώσεων.

Χονδρόκοκκα κυρίως αδρανή και ογκόλιθοι χρησιμοποιούνται σε λιμενικά και άλλα υδραυλικά έργα. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο μπορεί να είναι φυσικά, τεχνητά, ανακυκλωμένα αδρανή ή μίγματα αυτών.

Το έρμα συνήθως αποτελείται από θραυστά αδρανή και πρέπει να εξασφαλίζει απόσβεση κατά το μεγαλύτερο μέρος των δονήσεων του συρμού, ικανοποιητική διανομή των φορτίων και γρήγορη αποστράγγιση των ομβρίων υδάτων. Η εκλογή του αδρανούς είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ανθεκτικότητα του έρματος το οποίο πρέπει να αποτελείται από κόκκους υγιείς, σκληρούς, ανθεκτικούς, απαλλαγμένους από βλαπτικές προσμίξεις, τόσο κατά την παραγωγή όσο και κατά την αποθήκευση, μεταφορά και παράδοση του υλικού μέχρι την τελική χρήση.

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται στις στρώσεις βάσεων ή υποβάσεων θα πρέπει να μπορούν να εξασφαλίσουν ικανοποιητική ευστάθεια υπό συνθήκες επαναλαμβανόμενης φόρτισης [4, 5, 6, 7].

2.2 Ασβεστόλιθος

Ο ασβεστόλιθος είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα, που προέρχεται από την καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου ως ασβεστίτη ή ως αραγωνίτη. Χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή τσιμέντου, σκυροδέματος και κονιαμάτων, στην αρχιτεκτονική ως οικοδομικό υλικό (μάρμαρα κλπ) και στη γλυπτική. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί πρέπει να αποκτήσει το κατάλληλο μέγεθος, αναλόγως της χρήσης για την οποία προορίζεται, μέσω των διαδικασιών της θραύσης, της άλεσης και της ταξινόμησης [8].

Η κύρια χρήση του ασβεστόλιθου είναι σαν αδρανές υλικό στο σκυρόδεμα και σαν βασικό συστατικό του κλίνκερ του τσιμέντου (αποτελεί περίπου το 80% των πρώτων υλών του κλίνκερ). Όταν ο αλεσμένος ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται στο τσιμέντο σαν κύριο συστατικό, μετά το κλίνκερ, τότε αναφερόμαστε στα ασβεστολιθικά τσιμέντα πόρτλαντ, που χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ευρώπη. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1 υπάρχουν δύο κατηγορίες, η CEM II/A-L και η CEM II/B-L στις οποίες η περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο φτάνει το 20 με 30% αντιστοίχως. Εκτός από αυτές τις ειδικές κατηγορίες, ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται και σε άλλα κοινά ευρωπαϊκά τσιμέντα σε ποσοστό τουλάχιστον 0 - 5%.

Το πλεονέκτημα της παραγωγής ασβεστολιθικών τσιμέντων στην Ελλάδα, είναι η μείωση του κόστους παραγωγής, η εξοικονόμηση καυσίμου, η αύξηση της παραγωγικής ικανότητας των βιομηχανικών μονάδων, η αξιοποίηση των υψηλών αποθεμάτων ασβεστόλιθου στην Ελλάδα και η περιβαλλοντική ελάφρυνση (μείωση εκπομπών CO₂ κατά την παραγωγή του τσιμέντου το οποίο αντικαθιστά).

Παρότι ο ασβεστόλιθος συμπεριφέρεται κατά μεγάλο βαθμό ως αδρανές υλικό, έχει ευνοϊκή επίδραση στην ενυδάτωση του τσιμέντου, αφού οι πολύ λεπτοί κόκκοι του αποτελούν πυρήνες κρυστάλλωσης των προϊόντων ενυδάτωσης του κλίνκερ, με αποτέλεσμα την ταχύτερη καταβύθιση τους. Επίσης, η προσθήκη ασβεστόλιθου έχει γενικά θετική επίδραση στην ανάπτυξη των αντοχών του τσιμέντου.

Όσον αφορά στις ιδιότητες του σκυροδέματος με ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland, αυτά παρουσιάζουν ικανοποιητικές αντοχές και πολύ καλή πλαστικότητα και εργασιμότητα για συμμετοχή ασβεστόλιθου έως και 20%. Ακόμη, τα

σκυροδέματα με ασβεστολιθικά τσιμέντα δεν διαφοροποιούνται σημαντικά συγκρινόμενα με τα σκυροδέματα που περιέχουν αμιγή τσιμέντα, όσον αφορά στην υδατοαπορροφητικότητα, στο πορώδες, στην αντίσταση έναντι του φαινομένου παγώματος/τήξης και στη διαπερατότητα [7].

Ο ασβεστόλιθος συμβάλλει κατά ένα μέρος και στην αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Κατά την καύση συμβατικών στερεών καυσίμων σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ένας από τους κυριότερους εκπεμπόμενους ρύπους είναι το διοξείδιο του θείου (SO_2). Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για τη μείωση των ρύπων. Από τις διαθέσιμες σήμερα τεχνικές αποθείωσης των καυσαερίων, η υγρή μέθοδος με ασβεστόλιθο είναι η περισσότερο διαδεδομένη. Περίπου 80% από τα εγκατεστημένα διεθνώς συστήματα αποθείωσης καυσαερίων βασίζονται στη μέθοδο αυτή. Τα καυσαέρια διέρχονται από πύργο απορρόφησης, όπου καταιονίζονται με υδατικό αιώρημα ασβεστόλιθου. Το διοξείδιο του θείου μετατρέπεται σε θειικό ασβέστιο (γύψος) και συλλέγεται στον πυθμένα του πύργου απορρόφησης. Ο ασβεστόλιθος προτιμάται από άλλες πρώτες ύλες, καθώς βρίσκεται διαθέσιμος σε μεγάλες ποσότητες στις περισσότερες χώρες και σε χαμηλότερη τιμή [9, 10].

Ο ασβεστόλιθος έχει χρησιμοποιηθεί για δεκαετίες, για την αύξηση της τιμής του pH και την καταβύθιση των μετάλλων σε όξινα νερά μεταλλείων. Η δραστηριότητά του εξαρτάται σημαντικά από την καθαρότητά του, δηλ. την περιεκτικότητά του σε CaCO_3 . Παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος αγοράς και είναι το ασφαλέστερο και ευκολότερο στη χρήση αντιδραστήριο, ενώ η λάσπη εξουδετέρωσης που δημιουργείται είναι πυκνή και σχετικά εύκολη στη διαχείριση [11].

Επιπλέον χρησιμοποιείται

- Ως πρώτη ύλη για την παρασκευή οξειδίου του ασβεστίου, υδροξειδίου του ασβεστίου και ασβεστοκονιάματος.
- Σε μορφή λεπτομερούς υλικού (πούδρα) στην ουδετεροποίηση των όξινων εδαφών.
- Στην οδοποιία και ως έρμα των σιδηροδρομικών γραμμών.
- Στον καθαρισμό των μετάλλων, αφού σε υψηλές θερμοκρασίες ενώνεται με τις ακαθαρσίες του λιωμένου μετάλλου και αποβάλλεται ως σκουριά.
- Στα ορυχεία, όπου λειοτριβημένος ασβεστόλιθος ψεκάζεται πάνω σε εκτεθειμένες επιφάνειες από λιγνίτη. Αυτή η επικάλυψη βελτιώνει τη φωτεινότητα και μειώνει την ποσότητα της σκόνης λιγνίτη που ελευθερώνεται με την κίνηση. Έτσι

επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα του εισπνεόμενου αέρα και μειώνεται ο κίνδυνος έκρηξης που δημιουργείται από τα εύφλεκτα σωματίδια λιγνίτη στην ατμόσφαιρα.

- Στις ζωοτροφές καθώς και στο ψωμί και τα δημητριακά, σαν πηγή ασβεστίου για τα ζώα και τους ανθρώπους αντίστοιχα.
- Στη μέθοδο χύτευσης με άμμο, σαν ασβεστολιθική άμμος.
- Σαν πρόσθετο στις οδοντόκρεμες, στα χαρτιά, στα πλαστικά, στα χρώματα, στα φάρμακα, στα καλλυντικά κ.ά. [12, 13, 14].

2.3 Κατάτμηση (ελάττωση μεγέθους)

Προκειμένου να παραχθούν τα αδρανή αλλά και για να αποκτήσουν το επιθυμητό μέγεθος τεμαχίων ανάλογα με τη χρήση τους, είναι απαραίτητη η διαδικασία της κατάτμησης.

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

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

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

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

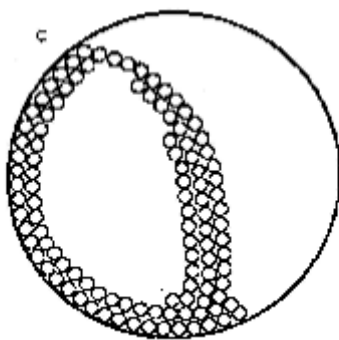
Το βασικό μηχάνημα μιας διάταξης άλεσης είναι ο μύλος. Υπάρχουν πολλά είδη μύλων που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει επειδή τα διάφορα

υλικά δεν αλέθονται όλα με τον ίδιο τρόπο. Έτσι άλλα υλικά απομειώνονται σε μέγεθος με κρούση, άλλα με κοπή, άλλα με τριβή, άλλα με σύνθλιψη κλπ. Η λειοτριβήση γίνεται κυρίως σε μύλους κυλιόμενου φορτίου (ραβδόμυλοι, σφαιρόμυλοι, κροκαλόμυλοι, αυτογενείς λειοτριβείς). Γίνεται επίσης και σε μύλους περιφερόμενων τροχών (ξηρή άλεση).

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

Οι σφαιρόμυλοι είναι κυλινδρικοί χαλύβδινοι θάλαμοι που μπορούν να περιστρέφονται γύρω από ένα οριζόντιο άξονα, οι οποίοι περιέχουν χαλύβδινες σφαίρες διαφόρων διαμέτρων για τη λειοτριβήση του υλικού. Οι διαστάσεις τους ποικίλουν ανάλογα με το είδος της άλεσης που πρόκειται να εκτελέσουν.

Κατά τη λειτουργία του σφαιρόμυλου, οι σφαίρες εκτελούν, λόγω τριβής με τα τοιχώματα του μύλου αλλά και λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων, κυκλική τροχιά μέχρι κάποιο οριακό σημείο, που βρίσκεται π.χ. κοντά στην κορυφή της τροχιάς τους. Εκεί, λόγω του βάρους τους χάνουν την επαφή τους με τα τοιχώματα του κελύφους και πέφτουν προς τον πυθμένα, όπου όμως παρασύρονται από το κέλυφος της μηχανής και πάλι. Η δύναμη που κρατά σε επαφή τις σφαίρες μεταξύ τους και με τα τοιχώματα κατά τη διάρκεια της κίνησης προς τα πάνω είναι η φυγόκεντρη. Κατά την επαφή τους με τα τοιχώματα οι σφαίρες κυλούν επίσης μεταξύ τους, οπότε προκαλείται επιπλέον (μερική) άλεση του υλικού λόγω τριβής. Το μεγαλύτερο όμως ποσοστό άλεσης συμβαίνει στη ζώνη σύγκρουσης, κατά την ελεύθερη πτώση των σφαιρών και την πρόσκρουσή τους με το προς κατάτμηση στερεό υλικό και με το κάτω μέρος του μύλου (Σχήμα 2).



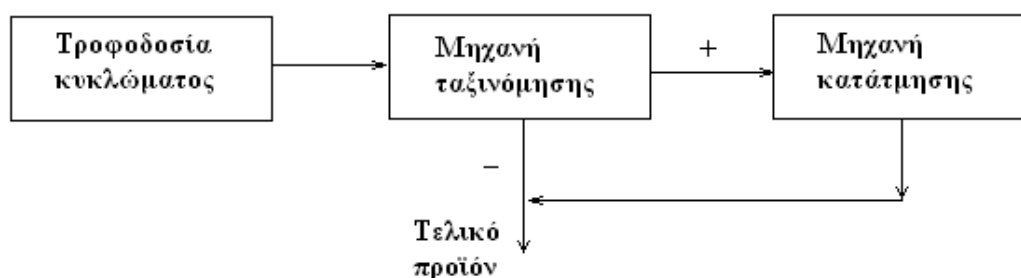
Σχήμα 2: Τροχιά σφαιρών κατά τη λειτουργία ενός σφαιρόμυλου

Οι διατάξεις άλεσης, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

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

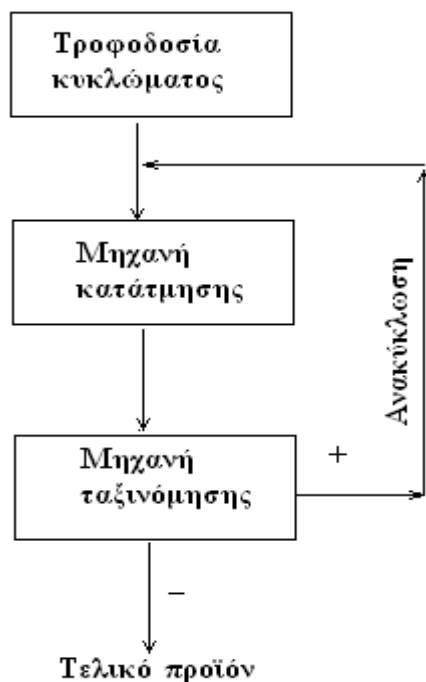
Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν διατάξεις στις οποίες η προς άλεση ουσία εισάγεται στο μύλο, αλέθεται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα ανάλογα με την επιδιωκόμενη λεπτότητα και στη συνέχεια εξάγεται προκειμένου να εισέλθει άλλη και να επαναληφθεί ο ίδιος κύκλος.

Στη διάταξη ανοικτού κυκλώματος, με την παρεμβολή της μηχανής ταξινόμησης, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του ποσοστού της τροφοδοσίας του κυκλώματος με μέγεθος τεμαχίων μικρότερο ή ίσο του επιθυμητού (προ της εισαγωγής της τροφοδοσίας στη μηχανή της κατάτμησης) και η κατάτμηση του υπόλοιπου ποσοστού με μέγεθος τεμαχίων μεγαλύτερο ή ίσο του επιθυμητού (Σχήμα 3).

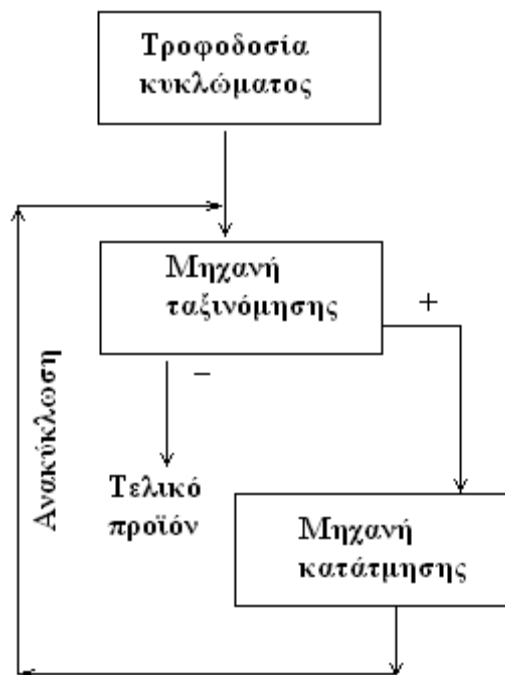


Σχήμα 3: Ανοιχτό κύκλωμα κατάτμησης

Τα κλειστά κυκλώματα διακρίνονται σε άμεσα και έμμεσα. Στα άμεσα κλειστά κυκλώματα η μηχανή ταξινόμησης τοποθετείται μετά τη μηχανή κατάτμησης και έτσι επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του ποσοστού του προϊόντος της μηχανής κατάτμησης με μέγεθος τεμαχίων μικρότερο ή ίσο του επιθυμητού και η επιστροφή (ανακύκλωση) του υπόλοιπου ποσοστού, με μέγεθος τεμαχίων μεγαλύτερο ή ίσο του επιθυμητού, στην τροφοδοσία της μηχανής κατάτμησης (Σχήμα 4). Στα έμμεσα κυκλώματα επιτυγχάνεται (με παρεμβολή της μηχανής ταξινόμησης προ της μηχανής κατάτμησης) η απομάκρυνση και κατάτμηση των αντίστοιχων ποσοστών της τροφοδοσίας του κυκλώματος που προαναφέρθηκαν στα ανοιχτά κυκλώματα και η επιστροφή (ανακύκλωση) του προϊόντος της μηχανής κατάτμησης στην τροφοδοσία της μηχανής ταξινόμησης (Σχήμα 5).



Σχήμα 4: Κλειστό άμεσο κύκλωμα κατάτμησης



Σχήμα 5: Κλειστό έμμεσο κύκλωμα κατάτμησης

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

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

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

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

➤ **Σκληρότητα**

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

➤ **Επιφανειακή ενέργεια**

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

➤ **Υγροσκοπικότητα**

Είναι ιδιότητα που χαρακτηρίζει την τάση ενός στερεού να προσροφά στην επιφάνειά του υγρασία από την ατμόσφαιρα. Εκφράζεται με το καλούμενο υγροσκοπικό σημείο, που είναι η κρίσιμη σχετική υγρασία, πάνω από την οποία το υλικό θα προσροφά υγρασία από το περιβάλλον, ενώ κάτω από το σημείο αυτό θα συμβαίνει το αντίθετο. Παίζει μεγάλο ρόλο κυρίως στην αποθήκευση των στερεών.

➤ **Φαινόμενη πυκνότητα και πορώδες**

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

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

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

➤ **Ηλεκτροστατικές δυνάμεις**

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

➤ **Αλεστικότητα**

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

(grindability) επινοήθηκαν διάφορες εμπειρικές εξισώσεις, που οδηγούν στους αντίστοιχους εμπειρικούς δείκτες, όπως είναι η εξίσωση Bond [7, 15, 16, 17].

2.4 Θεωρία κατάτμησης

Η θεωρία κατάτμησης αναφέρεται στη σχέση μεταξύ της παρεχόμενης ενέργειας και του μεγέθους των τεμαχίων του προϊόντος άλεσης. Πολλές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί αλλά καμία από αυτές δεν είναι πλήρως ικανοποιητική.

Το πρόβλημα κυρίως σχετίζεται με το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που παρέχεται σε μια μηχανή κατάτμησης ή άλεσης καταναλώνεται από το ίδιο το μηχάνημα και μόνο ένα μικρό ποσοστό είναι διαθέσιμο για τη θραύση του υλικού.

Έχει αποδειχθεί, για παράδειγμα, ότι σε ένα σφαιρόμυλο το ποσοστό της ενέργειας που είναι διαθέσιμο για την ελάττωση του μεγέθους του υλικού είναι μικρότερο από το 1% της συνολικής παρεχόμενης ενέργειας. Το μεγαλύτερο ποσοστό καταναλώνεται στην παραγωγή της θερμότητας.

Επιπλέον, σε ένα υλικό με μεγάλη πλαστικότητα, ένα ποσό ενέργειας καταναλώνεται κατά την αλλαγή σχήματος (παραμόρφωση) του υλικού. Το σχήμα αυτό διατηρείται χωρίς να δημιουργείται σημαντική νέα επιφάνεια. Σε όλες τις θεωρίες άλεσης γίνεται υπόθεση ότι το υλικό είναι ψαθυρό, έτσι ώστε να μην καταναλώνεται ενέργεια στην παραμόρφωσή του.

Αναμένεται ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση ενός υλικού και η νέα επιφάνεια που δημιουργείται κατά τη διαδικασία αυτή συσχετίζονται με κάποιο τρόπο. Αυτή η σχέση όμως φανερώνεται μόνο όταν η ενέργεια που καταναλώνεται για τη δημιουργία της νέας επιφάνειας μπορεί να μετρηθεί ξεχωριστά.

Η παλαιότερη θεωρία είναι αυτή του Rittinger (1867), σύμφωνα με την οποία η ενέργεια που καταναλώνεται στην ελάττωση μεγέθους του υλικού είναι ανάλογη της νέας επιφάνειας που δημιουργείται.

$$E = K \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)$$

Όπου E είναι η παρεχόμενη ενέργεια, D_1 είναι το αρχικό μέγεθος των τεμαχίων, D_2 είναι το τελικό μέγεθος των τεμαχίων και K μια σταθερά.

Η εφαρμογή του νόμου αυτού στην πράξη δεν είχε την αναμενόμενη προσέγγιση. Αυτό πιθανό να οφείλεται στη δυσκολία που παρουσιάζει να μετρηθεί η πραγματικά

καταναλισκόμενη ενέργεια για τη θραύση και μόνο και η παραγόμενη νέα επιφάνεια των τεμαχίων.

Η δεύτερη θεωρία (1885) είναι του Kick σύμφωνα με την οποία, η απαιτούμενη ενέργεια είναι ανάλογη με τη μείωση του όγκου των τεμαχίων, $E = cV$. Η ειδική ενέργεια κατάτμησης παραμένει σταθερή (c) για ένα δεδομένο λόγο κατάτμησης, είναι ανεξάρτητη από τα f και p (f είναι το μέγεθος των τεμαχίων της τροφοδοσίας και p το μέγεθος των τεμαχίων του προϊόντος) και εξαρτάται μόνο από το λόγο κατάτμησης R ($R = f/p$). Σύμφωνα με τη θεωρία του Kick, η ενέργεια που απαιτείται για τη λειοτρίβηση του υλικού είναι ανάλογη με $\log R/\log 2$ [16, 18].

Στις αρχές του 20ου αιώνα, οι βιομηχανίες σφαιρόμυλων και κάποια ερευνητικά εργαστήρια ανέπτυξαν και πραγματοποιούσαν διάφορες αυτοτελείς δοκιμές λειοτρίβησης σε σφαιρόμυλους και ραβδόμυλους με σκοπό τον προσδιορισμό της αντίστασης που παρουσίαζαν διάφορα μεταλλεύματα, ορυκτά και αδρανή στη λειοτρίβησή τους. Αυτές οι δοκιμές άλεσης, ήταν απαραίτητες για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ενέργειας για τη λειοτρίβηση των υλικών στο επιθυμητό μέγεθος προϊόντος. Κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του 20^{ου} αιώνα, καμία από αυτές τις μεθόδους δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η ενέργεια που απαιτείται για τη λειοτρίβηση κάποιου υλικού σε βιομηχανική κλίμακα.

Το 1930 ο A. Chalmers προσέλαβε τον F. Bond για να σχεδιάσει και να κατασκευάσει ένα εργαστήριο για δοκιμές και επεξεργασία μεταλλευμάτων και ορυκτών. Ο Bond ανέπτυξε δοκιμές θραύσης σε ραβδόμυλο και σφαιρόμυλο και με τη βοήθεια αυτών πραγματοποίησε δύο μελέτες:

- Η πρώτη μελέτη έγινε για να εξετάσει αν οι δύο υπάρχουσες θεωρίες άλεσης (η θεωρία Rittinger και η θεωρία του Kick) ήταν σωστές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και οι δύο έδιναν μη συγκρίσιμα, μεταξύ τους, αποτελέσματα. Επίσης ανέπτυξε μία θεωρία σύμφωνα με την οποία η ενέργεια που απαιτείται για την άλεση (E) είναι συνάρτηση της διαφοράς του αντιστρόφου της τετραγωνικής ρίζας του μεγέθους των τεμαχίων της τροφοδοσίας (x_f) και του προϊόντος του υλικού (x_p). Δηλαδή: $E = K \left(\frac{1}{\sqrt{x_p}} - \frac{1}{\sqrt{x_f}} \right)$, όπου K μια σταθερά. Η θεωρία αυτή είναι γνωστή ως «η τρίτη θεωρία για την άλεση, ή θεωρία του Bond».
- Η δεύτερη μελέτη έγινε με σκοπό τη συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων του σφαιρόμυλου που χρησιμοποιείται και των αποτελεσμάτων της λειοτρίβησης

του υλικού που εξετάζεται μέσω του συντελεστή έργου. Από τη μελέτη αυτή προέκυψαν δύο εξισώσεις: α) η εξίσωση που προσδιορίζει το συντελεστή έργου μέσω των δοκιμών άλεσης και β) η εξίσωση Bond η οποία χρησιμοποιεί το δείκτη έργου για να προσδιορίσει την ενέργεια που απαιτείται για την άλεση.

Ο Bond με το δείκτη έργου εισήγαγε μία νέα μέθοδο για τον προσδιορισμό της ενέργειας που απαιτείται για την άλεση μεταλλευμάτων, βιομηχανικών ορυκτών ή πετρωμάτων και, σε βιομηχανική κλίμακα, περιέγραψε μία μαθηματική μέθοδο για να χρησιμοποιείται ο δείκτης έργου στο σχεδιασμό κυκλωμάτων άλεσης [19, 20].

3. Σκοπός της παρούσας μελέτης

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν ο προσδιορισμός του δείκτη έργου Bond ασβεστολιθικού πετρώματος και μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας του υλικού σε αυτόν.

Ο δείκτης έργου προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής Bond, για μεγέθη προϊόντος 90 μm , 125 μm , 150 μm και 180 μm .

Επίσης μελετήθηκε το υλικό ως προς τη σύστασή του, με την ταυτοποίηση των ορυκτολογικών του φάσεων μέσω της τεχνικής της περίθλασης ακτίνων – X (XRD).

Οι εργαστηριακές συσκευές που χρειάστηκαν για την περάτωση της μελέτης ήταν οι ακόλουθες:

- Εργαστηριακός θραυστήρας σιαγόνων, RHINO TM, για τη θραύση των ογκωδών τεμαχίων του ασβεστολιθικού πετρώματος (προετοιμασία του υλικού για τις δοκιμές Bond).
- Εργαστηριακή συσκευή κοσκίνισης Rotap, TYLER με κόσκινα τετραγωνικών βροχίδων (σε mm): 2.36, 1.68, 1.18, 0.85, 0.6, 0.425, 0.3, 0.18, 0.15 και 0.125.
- Μηχανή κοσκίνισης Alpine Air Jet Sieve 200 LS-N για την ταξινόμηση του λεπτομερούς υλικού με κόσκινα τετραγωνικών βροχίδων (σε mm): 0.09, 0.075, 0.063, 0.053 και 0.045.
- Περιθλασίμετρο ακτίνων-X D8 Focus Bruker για την ταυτοποίηση των ορυκτολογικών φάσεων του υλικού
- Συσκευή δειγματοληψίας Jones.
- Σφαιρόμυλος για τον προσδιορισμό του δείκτη έργου Bond. Ο σφαιρόμυλος έχει μήκος 305 mm και διάμετρο 305 mm. Περιέχει 285 χαλύβδινες σφαίρες συγκεκριμένων μεγεθών, κατανεμημένες από πλευράς μεγέθους όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 1), με συνολικό φορτίο μάζας 20125 g.

Πίνακας 1: Διαστάσεις και κατανομή των χαλύβδινων σφαιρών

Διάμετρος χαλύβδινης σφαίρας (mm)	Πλήθος σφαιρών
38.10	43
31.75	67
25.40	10
19.05	71
15.87	94
Σύνολο	285

4. Πειραματικό μέρος

Γενικά

Οι εργαστηριακές δοκιμές που αφορούσαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η προετοιμασία του υλικού, η τεχνική της περίθλασης ακτίνων – X, η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, η προετοιμασία των δειγμάτων καθώς οι εργαστηριακές συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση.

4.1 Προετοιμασία του υλικού

Η προετοιμασία του προς εξέταση υλικού περιλαμβάνει την θραύση του σε ικανοποιητικό βαθμό, τη δειγματοληπτική διαίρεσή του σε ισοβαρή περίπου μέρη για τις ξεχωριστές δοκιμές που θα ακολουθήσουν και την ταξινόμησή του σε κοκκομετρικά κλάσματα.

4.1.1 Θραύση

Το προς εξέταση ασβεστολιθικό πέτρωμα ήταν σε μορφή μεγάλων τεμαχίων (Εικόνα 1), γι' αυτό χρειάστηκε αρχικά να θραυστεί σε μικρότερα κομμάτια με τη βοήθεια σφυριού πάνω σε μεταλλική χαλύβδινη πλάκα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η τροφοδότησή του στο θραυστήρα σιαγόνων του εργαστηρίου (Εικόνα 2). Ακολούθησε η διαδικασία θραύσης του υλικού στον εργαστηριακό θραυστήρα σιαγόνων RHINO TM με άνοιγμα περίπου 4 mm, με επανειλημμένες ανακυκλώσεις του κοκκομετρικού κλάσματος + 3.327 mm με σκοπό όλο το παραγόμενο υλικό να είναι κάτω από 3.327 mm.



Εικόνα 1: Ασβεστολιθικό πέτρωμα
προς εξέταση

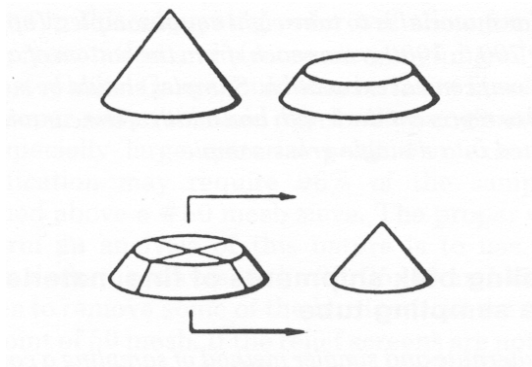


Εικόνα 2: Εργαστηριακός
Θραυστήρας σιαγόνων RHINO TM

4.1.2 Δειγματοληψία

Η δειγματοληπτική εργασία περιλαμβάνει τη διχοτόμηση του υλικού σε δύο «απόλυτα όμοια», στο μισό περίπου βάρος του αρχικού. Γίνεται με τη μέθοδο του κώνου και της τεταρτοτόμησης ή με ειδικές δειγματοληπτικές συσκευές διχοτόμησης.

Στη μέθοδο κώνου και τεταρτοτόμησης το υλικό αφού αναμιχθεί πλήρως συγκεντρώνεται σε σωρό. Με ένα φτυάρι ή μια σανίδα ο σωρός επιπεδώνεται και στη συνέχεια με λεπίδα ή σταυρό δειγματοληψίας χωρίζεται σε τέσσερα ίσα μέρη (τεταρτημόρια). Τα δύο αντιδιαμετρικά μέρη απομακρύνονται και τα άλλα δύο που απομένουν αναμιγνύονται μεταξύ τους και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μέχρις ότου επιτευχθεί το επιθυμητό βάρος υλικού (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Μέθοδος κώνου και τεταρτοτόμησης

Εναλλακτικά υπάρχουν διάφορες ειδικές δειγματοληπτικές συσκευές για δειγματοληψία, όπως η συσκευή δειγματοληψίας Jones, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ερευνητική εργασία. Η συσκευή αυτή αποτελείται από δύο σειρές 6 ή 10 κεκλιμένων οχετών, που με εναλλαγή της κατεύθυνσης έχουν τοποθετηθεί μέσα σε ένα ορθογώνιο πλαίσιο, έτσι ώστε ο μισός αριθμός των οχετών να βρίσκεται προς τη μία πλευρά και ο άλλος μισός προς την άλλη. Με τη βοήθεια ενός φτυαριού αποχύνεται το δείγμα ομοιόμορφα σε όλο το πλάτος του υποδοχέα και ρέει μέσω των οχετών στους κάδους υποδοχής που βρίσκονται από κάτω. Με αυτό τον τρόπο, το δείγμα χωρίζεται σε μικρές λωρίδες διαφορετικής ροής και διχοτομείται σε δύο όμοια δείγματα (Εικόνα 4), [16].

Στο υλικό θραύσης (-3.327 mm), πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία, με το δειγματολήπτη Jones (Εικόνα 4), έτσι ώστε να προετοιμαστούν κατάλληλα τα δείγματα για το μύλο Bond, για την περίθλαση των ακτίνων – X καθώς και για τον προσδιορισμό του φαινόμενου ειδικού βάρους του θραυσμένου υλικού. Η τιμή του φαινόμενου ειδικού βάρους είναι απαραίτητη για τον καθορισμό της ποσότητας (τροφοδοσία) των δειγμάτων στο μύλο Bond.



Εικόνα 4: Δειγματολήπτης Jones

4.1.3 Ταξινόμηση

Με τη χρήση συγκεκριμένης σειράς κοσκίνων γίνεται η ταξινόμηση του υλικού σε κοκκομετρικά κλάσματα, δηλαδή ομάδες τεμαχίων με περίπου τις ίδιες διαστάσεις (μεταξύ δύο ορίων). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *κοκκομετρική ανάλυση*.

Ταξινόμηση έγινε σε δείγμα αρχικής τροφοδοσίας έτσι ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος F (μέγεθος βροχίδας κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του υλικού της αρχικής τροφοδοσίας) καθώς και μετά από κάθε πειραματική διαδικασία, στο προϊόν λειοτρίβησης, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η μάζα του παραγόμενου υπομεγέθους και το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου από την οποία διέρχεται το 80% του προϊόντος λειοτρίβησης.

Για την ταξινόμηση του υλικού μέχρι 125 μm χρησιμοποιήθηκε η εργαστηριακή συσκευή κοσκίνισης Rotap, TYLER (Εικόνα 5) ενώ για την ταξινόμηση του λεπτομερούς υλικού (από 90 μm και κάτω) έγινε *αεροκοσκίνιση* με την εργαστηριακή μηχανή Alpine Air Jet Sieve 200 LS-N (Εικόνα 6). Στην *αεροκοσκίνιση*, η κοσκίνιση διενεργείται σε κάθε κόσκινο ξεχωριστά με τη διαβίβαση ρεύματος αέρα χαμηλής πίεσης, που με κυκλική κίνηση διέρχεται διαμέσου της επιφάνειας κοσκίνισης (πλέγμα) και μέσα από τα τεμάχια και απομακρύνεται παρασύροντας τα λεπτότερα, από τη βροχίδα του κοσκίνου, τεμαχίδια. Τα λεπτομερή τεμάχια συλλέγονται σε φίλτρο, ενώ τα χονδρομερέστερα (παραμένον στο πλέγμα) συλλέγονται από το κόσκινο [16].



Εικόνα 5: εργαστηριακή συσκευή κοσκίνισης Rotap, TYLER



Εικόνα 6: Εργαστηριακή μηχανή Alpine Air Jet Sieve 200 LS-N

4.2 Κατανομή Rosin - Rammler

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από μια διεργασία ταξινόμησης γίνεται με την εύρεση μιας εξίσωσης κατανομής που συσχετίζει το μέγεθος των τεμαχίων (ή κάποια συνάρτησή του) με το βάρος (ή κάποια συνάρτησή του). Ανάμεσα στις πολλές στατιστικές συναρτήσεις που έχουν προταθεί για μια τέτοια εξίσωση είναι και η συνάρτηση των Rosin και Rammler, που έχει τη μορφή:

$$R = 100 \exp \left[- \left(\frac{x}{k} \right)^n \right] \quad (1)$$

Όπου:

- R το αθροιστικό (%) παραμένον σε κόσκινο ανοίγματος x ,
- k και n σταθερές, χαρακτηριστικές του υλικού.

Αν είναι γνωστές οι τιμές των k και n για ένα ορισμένο υλικό, για το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί η εξίσωση Rosin – Rammler, τότε η κατανομή μεγέθους τεμαχίων είναι πλήρως καθορισμένη. Οι σταθερές προσδιορίζονται γραφικά από την ευθεία γραμμή που προκύπτει «τακτοποιώντας» την εξίσωση 1 με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\frac{100}{R} = \exp \left[\left(\frac{x}{k} \right)^n \right] \quad (2)$$

ή

$$\ln \left(\frac{100}{R} \right) = \left(\frac{x}{k} \right)^n \quad (3)$$

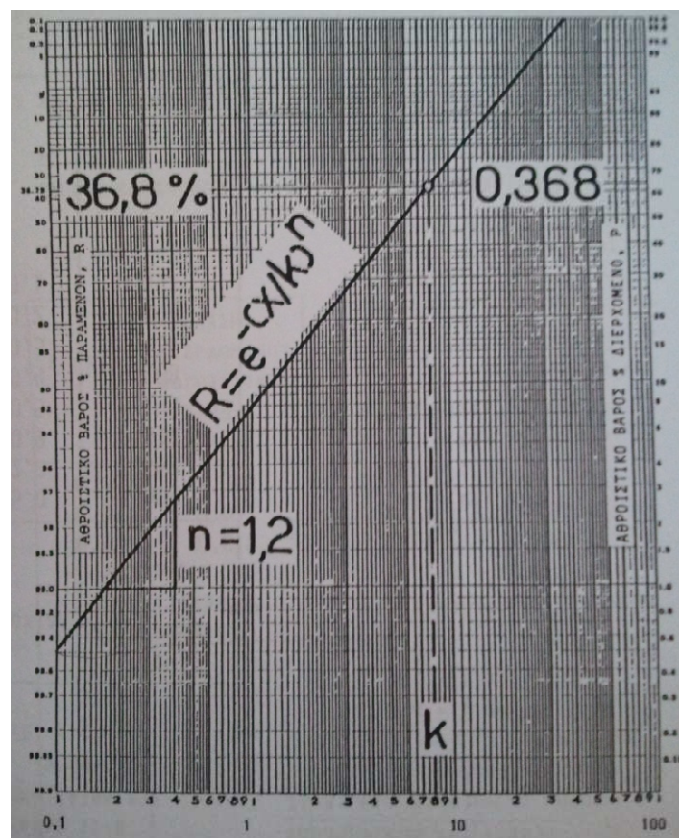
ή

$$\ln \left[\ln \left(\frac{100}{R} \right) \right] = n \cdot \ln(x) - n \cdot \ln(k) \quad (4)$$

Από την παραπάνω εξίσωση (εξίσωση 4) προκύπτει ότι το n είναι η κλίση της γραμμής $\ln(\ln(100/R))$ ως προς $\ln(x)$ και ότι η τομή της γραμμής με τον άξονα των τεταγμένων ισούται με το $n \cdot \ln(k)$. Αν στην τελευταία εξίσωση θέσουμε $x = k$, τότε έχουμε:

$$R = 100 \exp[-(1)^n] = \frac{100}{e} = 36.8\% \quad (5)$$

Δηλαδή η σταθερά k είναι το άνοιγμα της βροχίδας που θα συγκρατήσει το 36.8% του δείγματος και είναι γνωστή ως συντελεστής μεγέθους της κατανομής. Η τιμή του n (κλίση της ευθείας) ονομάζεται συντελεστής ομοιομορφίας της κατανομής, αντιστοιχεί στην εφαπτομένη της γωνίας α που σχηματίζει η ευθεία με τον οριζόντιο άξονα και περιγράφει την ομοιομορφία του υλικού. Η γραφική παράσταση της συνάρτησης γίνεται πιο απλά με τη χρήση του «χαρακτηριστικού» λογαριθμικού διαγράμματος Rosin – Rammler (Σχήμα 6), [15].



Σχήμα 6: Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης Rosin - Rammler

4.3 Περίθλαση ακτίνων-X (X-Ray Diffraction, XRD)

Η τεχνική της περίθλασης των ακτίνων-X χρησιμοποιείται ευρέως για την ταυτοποίηση μιας κρυσταλλικής ουσίας .

Οι περισσότερες ουσίες, όπως μέταλλα, κράματα ή ορυκτά, στη στερεή κατάσταση είναι συνήθως κρυσταλλικά σώματα, δηλαδή εμφανίζουν κρυσταλλική δομή. Αυτό σημαίνει ότι τα άτομα, μόρια ή ιόντα του στερεού κρυσταλλικού σώματος έχουν μία διάταξη στο χώρο, η οποία παρουσιάζει περιοδικότητα και στις τρεις διαστάσεις. Το μικρότερο σύνολο των δομικών μονάδων που μπορεί να δώσει μία τέτοιας μορφής διάταξη αποτελεί τη θεμελιώδη κυψελίδα της κρυσταλλικής δομής. Το τμήμα του υλικού που έχει την ίδια συνεχή κρυσταλλική δομή σε όλη του την έκταση ονομάζεται κρύσταλλος ή κρυσταλλίτης, ενώ η επανάληψη της στοιχειώδους κυψελίδας στο χώρο οδηγεί στο σχηματισμό του κρυσταλλικού πλέγματος.

Τα κρυσταλλικά σώματα κατατάσσονται σε 7 κρυσταλλικά συστήματα, τα οποία όπως απέδειξε ο Bravais, συνδέονται με 14 διαφορετικά είδη κρυσταλλικών πλεγμάτων (πλέγματα Bravais). Από τα 14 αυτά είδη, τα σημαντικότερα είναι τα ακόλουθα εφόσον σε αυτά κρυσταλλώνονται τα περισσότερα κρυσταλλικά υλικά:

Κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα (FCC)

Κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα (BCC)

Μεγίστης πυκνότητας εξαγωνικό σύστημα (HCP)

Σε έναν κρύσταλλο ή πλέγμα, μια ομάδα παράλληλων κρυσταλλογραφικών ή πλεγματικών επιπέδων συμβολίζεται με μια ομάδα ακέραιων αριθμών, που είναι γνωστοί ως δείκτες Miller και συμβολίζονται ως (hkl). Κάθε ομάδα πλεγματικών επιπέδων χαρακτηρίζεται από ένα μήκος d , το οποίο εκφράζει τη σταθερή για τη συγκεκριμένη ομάδα απόσταση μεταξύ γειτονικών επιπέδων.

Οι ακτίνες X είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκη κύματος πολύ μικρά (από 0.01 έως 0.25 nm), τα οποία είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις αποστάσεις μεταξύ των ατόμων στη συμπυκνωμένη φάση (στερεά και υγρή). Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν τη μελέτη της δομής των συμπυκνωμένων φάσεων της ύλης με την περίθλαση ακτίνων - X.

Η μέθοδος βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων-X γνωστού μήκους κύματος λ , επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος του εξεταζόμενου δείγματος και στη συνέχεια τον προσδιορισμό των εσωτερικών

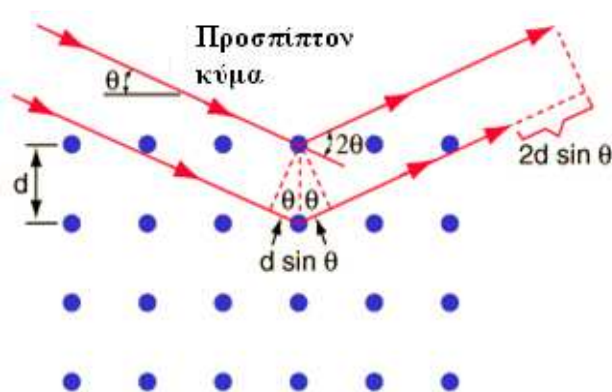
διαστημάτων d των επιπέδων του πλέγματος τα οποία είναι χαρακτηριστικά της κάθε φάσης.

Για τον υπολογισμό του d , καταγράφεται η ένταση της περιθλώμενης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη γωνία 2θ , όπου θ η γωνία πρόσπτωσης. Από την εξίσωση του νόμου του Bragg υπολογίζεται το d για τα διάφορα επίπεδα (hkl). Στη συνέχεια με τη βοήθεια κατάλληλης βάσης δεδομένων και από προσωπική εμπειρία και αξιολόγηση, προσδιορίζεται το είδος των φάσεων του υπό εξέταση υλικού.

Σύμφωνα με το νόμο του Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta,$$

όπου λ το μήκος κύματος των ακτίνων-X και n η τάξη περίθλασης (στις περισσότερες περιπτώσεις η περίθλαση είναι πρώτης τάξης οπότε $n = 1$)



Σχήμα 7: Πρόσπτωση ακτίνων X σε έναν κρύσταλλο.

Στις εργαστηριακές διατάξεις για την παραγωγή των ακτίνων-X χρησιμοποιούνται οι καθοδικοί σωλήνες. Οι ακτίνες-X παράγονται μέσα στους καθοδικούς σωλήνες με την πρόσκρουση μιας δέσμης ηλεκτρονίων πάνω σε ένα μεταλλικό στόχο, που λέγεται άνοδος. Η δέσμη των ηλεκτρονίων παράγεται από ένα νήμα το οποίο θερμαίνεται με τη διέλευση μερικών δεκάδων mA και παράγει ηλεκτρόνια τα οποία επιταχύνονται, με τάση μερικών δεκάδων kV, προς την άνοδο. Το μέταλλο της ανόδου είναι αυτό που καθορίζει το μήκος κύματος των ακτίνων-X. Η έντασή τους καθορίζεται από το ρεύμα που διέρχεται από το νήμα. Από τα ηλεκτρόνια που προσκρούουν στο μέταλλο της ανόδου μόνο ένα μικρό ποσοστό παράγει ακτίνες-X. Τα υπόλοιπα απορροφούνται από το μέταλλο αυτό με αποτέλεσμα να το θερμαίνουν. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ψύξη της ανόδου με νερό.

Η πειραματική διάταξη XRD αποτελείται από τα εξής:

- Την πηγή ακτίνων X συγκεκριμένου μήκους κύματος λ
- Τον ανιχνευτή ακτίνων X (απαριθμητής counter)
- Το γωνιόμετρο

Το δείγμα εξετάστηκε με περιθλασίμετρο ακτίνων – X τύπου D8 Focus Bruker (Εικόνα 7) με τις ακόλουθες λειτουργίες: ακτινοβολία CuK α , ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$), φίλτρο Ni, ένταση 30 mA, τάση 40 kV και ταχύτητα γωνιόμετρου $1^\circ/\text{min}$. Η ταυτοποίηση των ορυκτολογικών φάσεων, έγινε με βάση τις χαρακτηριστικές τους ανακλάσεις. Η εξέταση με περιθλασιμετρία ακτίνων – X έγινε σε κονιοποιημένο δείγμα [21].



Εικόνα 7: Περιθλασίμετρο ακτίνων-X – D8 Focus Bruker

4.4 Η δοκιμή Bond

Η εξίσωση που προτείνεται από τον Bond είναι:

$$W = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (6)$$

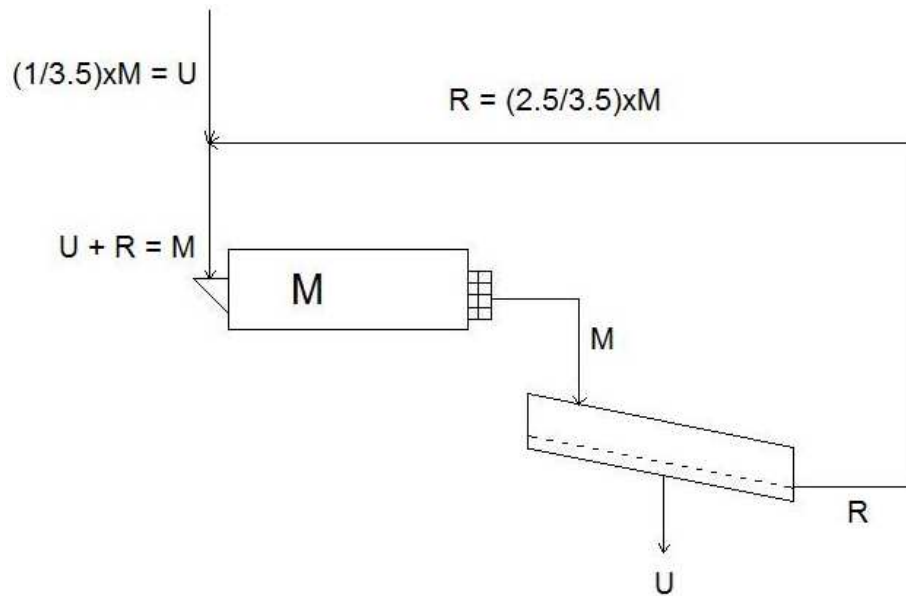
Η εξίσωση του Bond (Εξίσωση 6) δίνει την ειδική ενέργεια λειοτρίβησης W (kWh/short ton) συναρτήσει: του δείκτη έργου λειοτρίβησης W_i (δείκτης λειοτρίβησης Bond, kWh/short ton), που προσδιορίζεται από ξεχωριστές δοκιμές με ραβδόμυλο και σφαιρόμυλο, του μεγέθους F (μm) της τροφής και του μεγέθους P (μm) του προϊόντος (τετραγωνικές βροχίδες πλέγματος κόσκινου από τις οποίες περνάει το 80% του βάρους της τροφής και του προϊόντος αντίστοιχα).

Αν η τιμή του W είναι γνωστή από τη βιομηχανία, τότε αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του δείκτη έργου W_i .

Ο δείκτης έργου Bond (W_i) αντιπροσωπεύει την ειδική ενέργεια κατάτμησης ενός τόνου υλικού με θεωρητικά άπειρο μέγεθος τεμαχίων, σε προϊόν με χαρακτηριστικό μέγεθος τεμαχίων 100 μm .

Ο δείκτης έργου (W_i) προσδιορίζεται μέσω της δοκιμής Bond, η οποία είναι μια αυτοτελής δοκιμή ξηρής λειοτριβήσης κλειστού κυκλώματος κατάτμησης στην οποία η μηχανή κατάτμησης (σφαιρόμυλος) συνδυάζεται με τη μηχανή ταξινόμησης (κόσκινο αναφοράς) σε κλειστό κύκλωμα. Η διαδικασία λειοτριβήσης επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί κυκλοφορούν φορτίο 250%.

Στη δοκιμή Bond το προς εξέταση υλικό αρχικά θραύεται και κοσκινίζεται, έτσι ώστε το μέγεθος των τεμαχίων αυτού να είναι μικρότερο από 3.327 mm. Η μάζα του υλικού (M) που θα αποτελέσει την τροφοδοσία του μύλου είναι ίση με τη μάζα που καταλαμβάνει όγκο 700 cm^3 . Αρχικά τροφοδοτείται το πρώτο δείγμα στο μύλο Bond και λειοτριβείται για ένα αυθαίρετα επιλεγόμενο αριθμό περιστροφών μύλου ($N= 50, 100$ ή 150 rev/min) και στη συνέχεια αυτό κοσκινίζεται. Το υπερμέγεθος (R) επιστρέφει πίσω στο μύλο για να λειοτριβηθεί, αφού προστεθεί σε αυτό ποσότητα υλικού αρχικής τροφοδοσίας (-3.327 mm) ίση με αυτή που απομακρύνθηκε ως υπομέγεθος (U), έτσι ώστε η συνολική μάζα της τροφοδοσία του μύλου για τη δεύτερη δοκιμή να είναι πάλι ίση με M (Σχήμα 8). Για το δεύτερο στάδιο ο αριθμός περιστροφών προσδιορίζεται έτσι ώστε βαθμιαία να επιτευχθεί κυκλοφορούν φορτίο 250%. Η ίδια διαδικασία κοσκινίσματος και άλεσης επαναλαμβάνεται μέχρι το υπομέγεθος που παράγεται ανά περιστροφή μύλου να είναι σταθερό για τους τρεις τελευταίους κύκλους λειοτριβήσης.



Σχήμα 8: Η δοκιμή Bond

Στη δοκιμή Bond ο δείκτης έργου προσδιορίζεται σε εργαστηριακή κλίμακα χρησιμοποιώντας ένα σφαιρόμυλο Bond (Εικόνα 8) και προσομοιώνοντας ξηρή λειοτρίβηση σε κλειστό κύκλωμα, όπως προαναφέρθηκε, μέχρι να επιτευχθεί 250% κυκλοφορούν φορτίο. Αυτό συμβαίνει μόνο μετά από 7 – 10 κύκλους λειοτρίβησης, που κάνουν τη διαδικασία εκτενή και περίπλοκη και άρα επιρρεπή σε λάθη. Για το λόγο αυτό η διαδικασία τελικά απλοποιήθηκε από τους Magdalinovic & Cumpujerovic (1983), Magdalinovic(1989), έτσι ώστε ο προσεγγιστικός υπολογισμός του δείκτη έργου να προκύπτει ικανοποιητικά από δύο μόνο στάδια άλεσης. Η διαδικασία αναλύεται ακολούθως.



Εικόνα 8: Εργαστηριακός μύλος Bond

Οι εξισώσεις που ισχύουν στη δοκιμή Bond για κυκλοφορούν φορτίο 250% είναι οι ακόλουθες:

$$U + R = M \quad (7)$$

$$\frac{R}{U} = 2.5 \quad (8)$$

όπου R είναι η μάζα του υπερμεγέθους, U είναι η μάζα υλικού από την αρχική τροφοδοσία, η οποία ισούται με τη μάζα του υπομεγέθους και M είναι η μάζα της τροφοδοσίας του μύλου.

Από τις εξισώσεις 7 και 8 προκύπτουν οι ακόλουθες για τα R και U:

$$R = \frac{2.5}{3.5} M \quad (9)$$

$$U = \frac{1}{3.5} M \quad (10)$$

Η συνολική μάζα του υπερμεγέθους στην αρχή της άλεσης, ισούται με :

$R_o = \frac{2.5}{3.5} M + \frac{1}{3.5} M r_o$ (11), όπου το r_o είναι η αναλογία του υπερμεγέθους στην αρχική τροφοδοσία.

Έχει βρεθεί ότι κατά την άλεση στο μύλο Bond, η διαδικασία ακολουθεί τη γενική εξίσωση της κινητικής $R = R_o e^{-kt}$ (12). Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε:

$$\frac{2.5}{3.5} M = \left(\frac{2.5}{3.5} + \frac{1}{3.5} r_o \right) M e^{-kt_c} \quad (13)$$

Από την εξίσωση (13) προκύπτει ότι ο χρόνος άλεσης t_c , μετά τον οποίο προκύπτει υπερμέγεθος (R) ίσο με $(2.5/3.5)M$ (το οποίο αντιστοιχεί στο 250% κυκλοφορούν φορτίο) είναι ίσος με :

$$t_c = \frac{\ln(1 + 0.4r_o)}{k} \quad (14)$$

k είναι μία σταθερά η οποία από τη γενική εξίσωση της κινητικής στο μύλο Bond προκύπτει ίση με:

$$k = \frac{\ln R_o - \ln R}{t} \quad (15)$$

Επειδή όμως στη δοκιμή Bond αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ο αριθμός των περιστροφών του μύλου και όχι ο χρόνος άλεσης έχουμε ότι:

$$t = \frac{N}{n} \quad (16)$$

όπου n είναι ο αριθμός των περιστροφών που κάνει ο μύλος το λεπτό και N είναι ο αριθμός των περιστροφών που έκανε ο μύλος για τη διεξαγωγή της δοκιμής. Επομένως έχουμε:

$$k = \frac{n(\ln R_0 - \ln R)}{N} \quad (17) \quad \text{και}$$

$$N_c = n \frac{\ln(1 - 0.4r_0)}{k} \quad (18)$$

N_c είναι ο αριθμός των περιστροφών του μύλου έτσι ώστε να επιτευχθεί το υπερμέγεθος με μάζα $(2.5/3.5)M$.

Αναλυτικότερα η διαδικασία που ακολουθείται σε μία εργαστηριακή δοκιμή Bond είναι η ακόλουθη:

Το προς εξέταση υλικό θραύεται αρχικά με θραυστήρα έτσι ώστε όλη η τροφοδοσία να έχει μέγεθος τεμαχίων μικρότερο από 3.327 mm. Ακολουθώς, γίνεται κοκκομετρική ανάλυση της τροφοδοσίας και προσδιορίζεται το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του υλικού τροφοδοσίας (F). Από την αρχική τροφοδοσία συλλέγεται δείγμα με όγκο 700 cm^3 και μετρείται η μάζα του (M). Η μάζα M θα αποτελέσει την τροφοδοσία του σφαιρόμυλου.

Ο προσδιορισμός του δείκτη έργου του εξεταζόμενου υλικού γίνεται σε δύο στάδια, επομένως είναι απαραίτητη η προετοιμασία δύο δειγμάτων. Από την εξίσωση (9), $R = (2.5/3.5)M$, γίνεται ο υπολογισμός του υπερμεγέθους R και στη συνέχεια από επαρκές δείγμα της αρχικής τροφοδοσίας συλλέγεται υπερμέγεθος μάζας $2R$, ώστε να αρκεί για την πραγματοποίηση των δύο σταδίων. Επίσης συλλέγονται και δύο δείγματα από την αρχική τροφοδοσία με μάζα το καθένα $U = (1/3.5)M$ (εξίσωση 10). Αναμιγνύοντας το υπερμέγεθος μάζας R με ένα δείγμα από την αρχική τροφοδοσία μάζας U παρασκευάζεται το συνολικό δείγμα (M) που θα τροφοδοτηθεί στο μύλο.

Πριν την άλεση του δείγματος υπολογίζεται η ποσότητα του υπερμεγέθους R_0 και κατόπιν αυτό τροφοδοτείται στο σφαιρόμυλο και λειοτριβείται για ένα αυθαίρετα επιλεγόμενο αριθμό περιστροφών ($N = 50, 100$ ή 150 rev/min). Μετά τη λειοτρίβηση, συλλέγεται το δείγμα, κοσκινίζεται και υπολογίζεται η μάζα του υπερμεγέθους μετά την άλεση (R). Τώρα είναι εφικτός ο υπολογισμός της σταθεράς k και του αριθμού των περιστροφών του μύλου (N_c) που απαιτούνται για τη λειοτρίβηση του δεύτερου δείγματος από τις εξισώσεις 17 και 18 αντίστοιχα.

Το δεύτερο δείγμα τροφοδοτείται στο μύλο και υφίσταται άλεση για N_c αριθμό περιστροφών και μετά τη λειοτρίβηση, μετριέται η μάζα του υπερμεγέθους και του υπομεγέθους. Η μάζα του υπερμεγέθους πρέπει να είναι ίση με $(2.5/3.5)M$ και η μάζα του υπομεγέθους (m) πρέπει να είναι: $m = (1/3.5) M$. Γίνεται κοκκομετρική ανάλυση του λειοτριβημένου δείγματος και προσδιορίζεται γραφικά το μέγεθος P , που αντιστοιχεί στη βροχίδα του κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του παραχθέντος υπομεγέθους. Ακολούθως είναι δυνατός ο υπολογισμός του μεγέθους G , δηλαδή του παραγόμενου υπομεγέθους σε γραμμάρια ανά περιστροφή (g/rev) του μύλου κατά το δεύτερο στάδιο:

$$G = (m/N_c) - (1/3.5) \cdot (M/N_c) \cdot (1 - r_o) \quad (19)$$

Ο δείκτης έργου μπορεί τώρα να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση (εξίσωση 20),

$$W_i = 1.1 \cdot \frac{44.5}{P_c^{0.23} \cdot G^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{P^{0.5}} - \frac{10}{F^{0.5}} \right)} \quad (kWh/t) \quad (20)$$

όπου:

- P_c , είναι το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου αναφοράς, δηλαδή το μέγεθος προϊόντος στο οποίο αντιστοιχεί ο υπολογιζόμενος δείκτης Bond.
- G , είναι το παραγόμενο υπομέγεθος σε γραμμάρια ανά περιστροφή του μύλου.
- p είναι το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του παραχθέντος υπομεγέθους.
- F , είναι το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του υλικού τροφοδοσίας [15, 22, 23].

4.5 Προετοιμασία δειγμάτων για τη δοκιμή Bond

Υπολογίζεται το φαινόμενο ειδικό βάρος του προς εξέταση ασβεστολιθικού πετρώματος (φ.ε.β.) συλλέγοντας δειγματοληπτικά, με τη μέθοδο Jones, 700 cm^3 δείγματος αρχικής τροφοδοσίας και μετρώντας τη μάζα του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μάζα M του δείγματος είναι 1152.78 g . Επομένως το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού είναι $M/700 = 1152.78 \text{ g}/700 \text{ cm}^3 = 1.65 \text{ g/cm}^3$.

Η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα υλικού (σε g) για τη διεξαγωγή της κλασσικής δοκιμής Bond είναι $2 \cdot (700 \text{ cm}^3) \cdot (\text{φ.ε.β. υλικού}) = 2 \cdot 700 \text{ cm}^3 \cdot 1.65 \text{ g/cm}^3 = 2310 \text{ g}$.

Στη συνέχεια, κοσκινίζοντας επαρκές δείγμα από την αρχική τροφοδοσία, γίνεται λήψη δύο δειγμάτων υπερμεγέθους (R_1, R_2) μάζας $R = \left(\frac{2.5}{3.5}\right) \cdot M =$
 $= (2.5/3.5) \cdot 1152.78 = 823.41 \text{ g}$ το καθένα. Ακολούθως γίνεται λήψη δύο δειγμάτων (U_1, U_2) από την αρχική τροφοδοσία, που να ζυγίζουν το καθένα $U = (1/3.5) \cdot M = (1/3.5) \cdot 1152.78 = 329.37 \text{ g}$.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής Bond παρασκευάζονται δύο δείγματα (δείγμα 1 και δείγμα 2) με μάζα $M = R + U = 1152.78 \text{ g}$ το καθένα. Δηλαδή έχουμε:

$$\text{Δείγμα 1} = R_1 + U_1$$

$$\text{Δείγμα 2} = R_2 + U_2$$

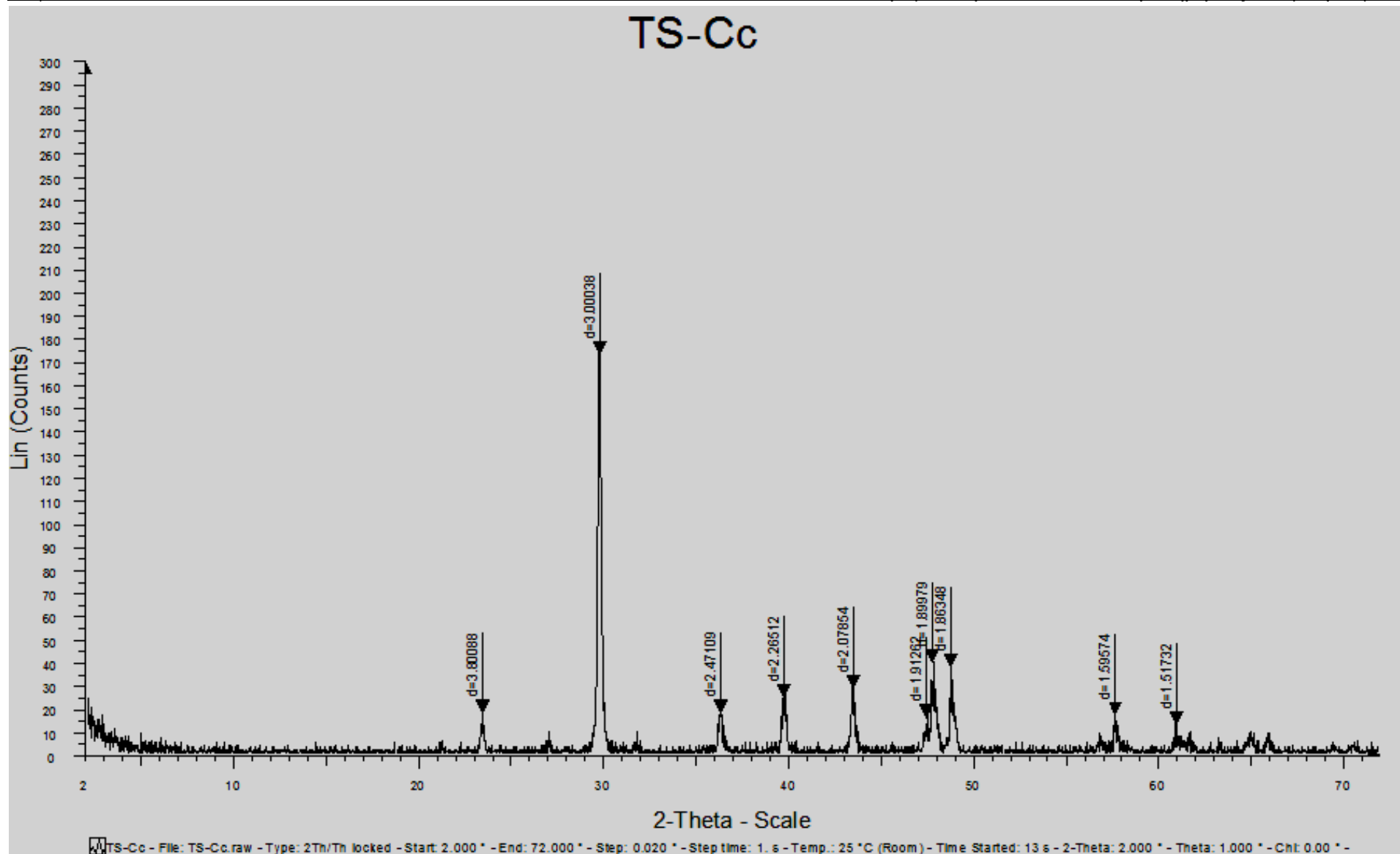
5. Πειραματική διαδικασία – Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της περιθλασιμετρίας ακτίνων – X, της κοκκομετρικής ανάλυσης της αρχικής τροφοδοσίας, των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν και την ανάλυση αυτών με τη βοήθεια φωτογραφιών, διαγραμμάτων και πινάκων.

5.1 Περίθλαση ακτίνων – X (XRD)

Το δείγμα αποτελείται από καθαρό ασβεστίτη (CaCO_3). Για τον προσδιορισμό του ασβεστίτη (Διάγραμμα 1), χρησιμοποιήθηκαν οι ανακλάσεις hkl: (104) στα $d = 3.03 \text{ \AA}$, (113) στα $d = 2.28 \text{ \AA}$, (102) στα $d = 3.84 \text{ \AA}$ κ.λ.π.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων-X του εξετασθέντος δείγματος.

5.2 Κοκκομετρική ανάλυση στο υλικό αρχικής τροφοδοσίας

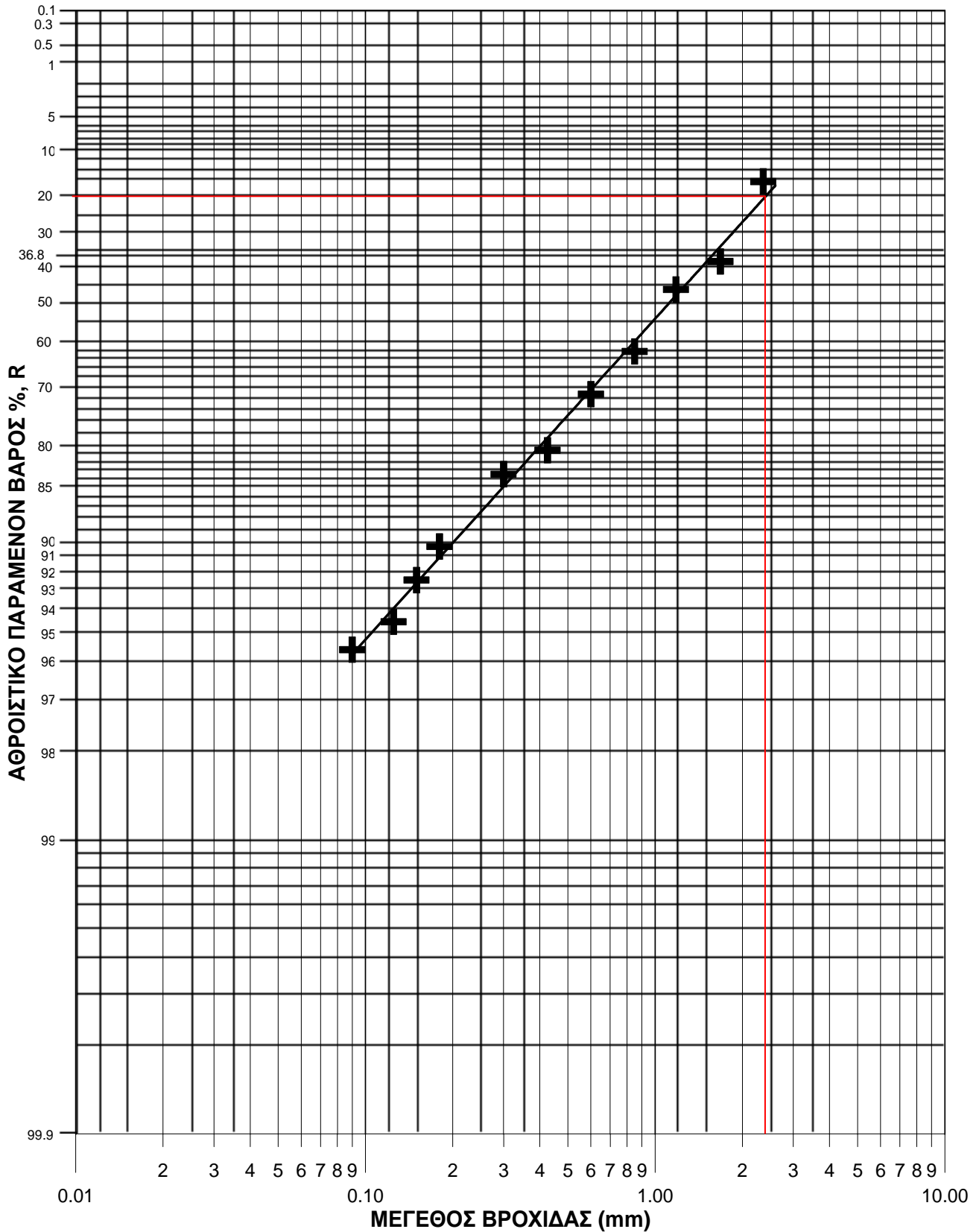
Η κοκκομετρική ανάλυση του υλικού αρχικής τροφοδοσίας έγινε σε δείγμα θραυσμένου υλικού (-3.327 mm) που προέκυψε από δειγματοληψία (δειγματολήπτης Jones). Η κοσκίνιση έγινε στην ειδική εργαστηριακή μηχανή κοσκίνισης με διάρκεια 10 min και τα μεγέθη (ανοίγματα) των κοσκίνων (σε mm) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ακόλουθα: 2.36, 1.68, 1.18, 0.85, 0.6, 0.425, 0.3, 0.18, 0.15, 0.125, 0.09. Υπολογίστηκε το βάρος κάθε κοκκομετρικού κλάσματος και το επί τοις εκατό ποσοστό του ως προς το συνολικό βάρος του δείγματος, το αθροιστικό % παραμένον βάρος σε κάθε επόμενο κόσκινο (δηλαδή το βάρος στο κάθε κόσκινο αν έλειπαν τα προηγούμενά του) και το αθροιστικό % διερχόμενο βάρος από κάθε κόσκινο αφαιρώντας τα επόμενά του.

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης της αρχικής τροφοδοσίας δίνονται στον Πίνακα 2. Από τα δεδομένα του Πίνακα 2, κατασκευάστηκε ειδικού τύπου διάγραμμα (Διάγραμμα Rosin – Rammner) για την απεικόνιση της κοκκομετρικής ανάλυσης του υλικού και τον υπολογισμό του μεγέθους της βροχίδας του κοσκίνου από την οποία περνάει το 80% του υλικού (Διάγραμμα 2).

Από το Διάγραμμα 2 προκύπτει ότι το μέγεθος της βροχίδας του κοσκίνου από την οποία περνάει το 80% του υλικού τροφοδοσίας είναι $F = 2400 \mu\text{m}$.

Πίνακας 2: Κοκκομετρική ανάλυση της αρχικής τροφοδοσίας

Μέγεθος (mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Αθροιστικό Βάρος Παραμένουτος (%)	Αθροιστικό Βάρος Διερχόμενου (%)
-3.327+2.36	184.78	16.52	16.52	
-2.36+1.68	243.78	21.79	38.31	83.48
-1.68+1.18	89.14	7.97	46.27	61.69
-1.18+0.85	179.51	16.05	62.32	53.73
-0.85+0.6	100.68	9.00	71.32	37.68
-0.6+0.425	102.12	9.13	80.45	28.68
-0.425+0.3	34.26	3.06	83.51	19.55
-0.3+0.18	75.97	6.79	90.30	16.49
-0.18+0.15	24.35	2.18	92.47	9.70
-0.15+0.125	22.85	2.04	94.52	7.53
-0.125+0.09	11.82	1.06	95.57	5.48
-0.09	49.52	4.43	100,00	4.43
Σύνολο	1118.78	100,00		



Διάγραμμα 2: Απεικόνιση της κοκκομετρικής ανάλυσης του υλικού αρχικής τροφοδοσίας, σε διάγραμμα R-R για τον υπολογισμό του F.

5.3 Δοκιμές προσδιορισμού του δείκτη Bond

Δοκιμή 1''

Κόσκινο αναφοράς 90 μ m ($P_c = 90 \mu\text{m}$).

Στην πρώτη περίπτωση το κόσκινο αναφοράς (P_c), δηλαδή το μέγεθος προϊόντος στο οποίο αντιστοιχεί ο προσδιοριζόμενος δείκτης Bond, είναι 90 μ m.

Κοσκινίζοντας επαρκές δείγμα από την αρχική τροφοδοσία παρασκευάζονται δύο δείγματα υπερμεγέθους (+90 μ m) $R_1 = 824.82$ g και $R_2 = 821.18$ g. Στη συνέχεια με δειγματοληψία Jones συλλέγονται δύο δείγματα από την αρχική τροφοδοσία $U_1 = 331.10$ g και $U_2 = 327.62$ g. Με ανάμιξη των R_1 , U_1 και R_2 , U_2 , αντιστοίχως προκύπτουν:

Δείγμα 1 = 1155.92 g

Δείγμα 2 = 1148.80 g

Το Δείγμα 1 κοσκινίζεται για τον προσδιορισμό του ποσοστού περιεχόμενου υπομεγέθους (-90 μ m) που αποτελεί το κόσκινο αναφοράς (P_c) σε όλη τη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη έργου. Το υπομέγεθος είχε μάζα 34g και έτσι υπολογίζουμε ότι $R_o = 1155.92 - 34 = 1121.92$ g.

Το Δείγμα 1 τροφοδοτείται στο μύλο Bond του εργαστηρίου και λειοτριβείται για $N = 100$ περιστροφές μύλου. Η ταχύτητα περιστροφής του μύλου είναι $n = 66$ rev/min. Μετά τη συμπλήρωση 100 περιστροφών ($N=100$), ακινητοποιείται ο μύλος, συλλέγεται συλλέγουμε προσεκτικά όλο το δείγμα από μέσα και κατόπιν κοσκινίζεται στο κόσκινο αναφοράς (90 μ m). Το υπομέγεθος του προϊόντος άλεσης ζυγίζεται και προκύπτει 113.96 g. Επομένως το υπερμέγεθος του προϊόντος άλεσης είναι $R = 1155.92 - 113.96 = 1041.96$ g.

Ακολούθως είναι εύκολος ο προσδιορισμός της σταθεράς k , του κλάσματος του υπερμεγέθους στην αρχική τροφοδοσία r_o και του συνολικού αριθμού περιστροφών (N_c) του μύλου για το δεύτερο στάδιο:

$$k = (n/N) \cdot \ln(R_o/R) = (66/100) \cdot (\ln 1121.92 - \ln 1041.96) = 0.048$$

$$r_o = R_o/M = 1121.92/1155.92 = 0.97$$

$$N_c = (n/k) \cdot \ln(1 + 0.4r_o) = (66/0.048) \cdot \ln(1 + 0.4 \cdot 0.97) = 443 \text{ περιστροφές}$$

Άρα το Δείγμα 2 ($M = 1148.80$ g) είναι απαραίτητο να υποστεί λειοτρίβηση για 443 περιστροφές του μύλου.

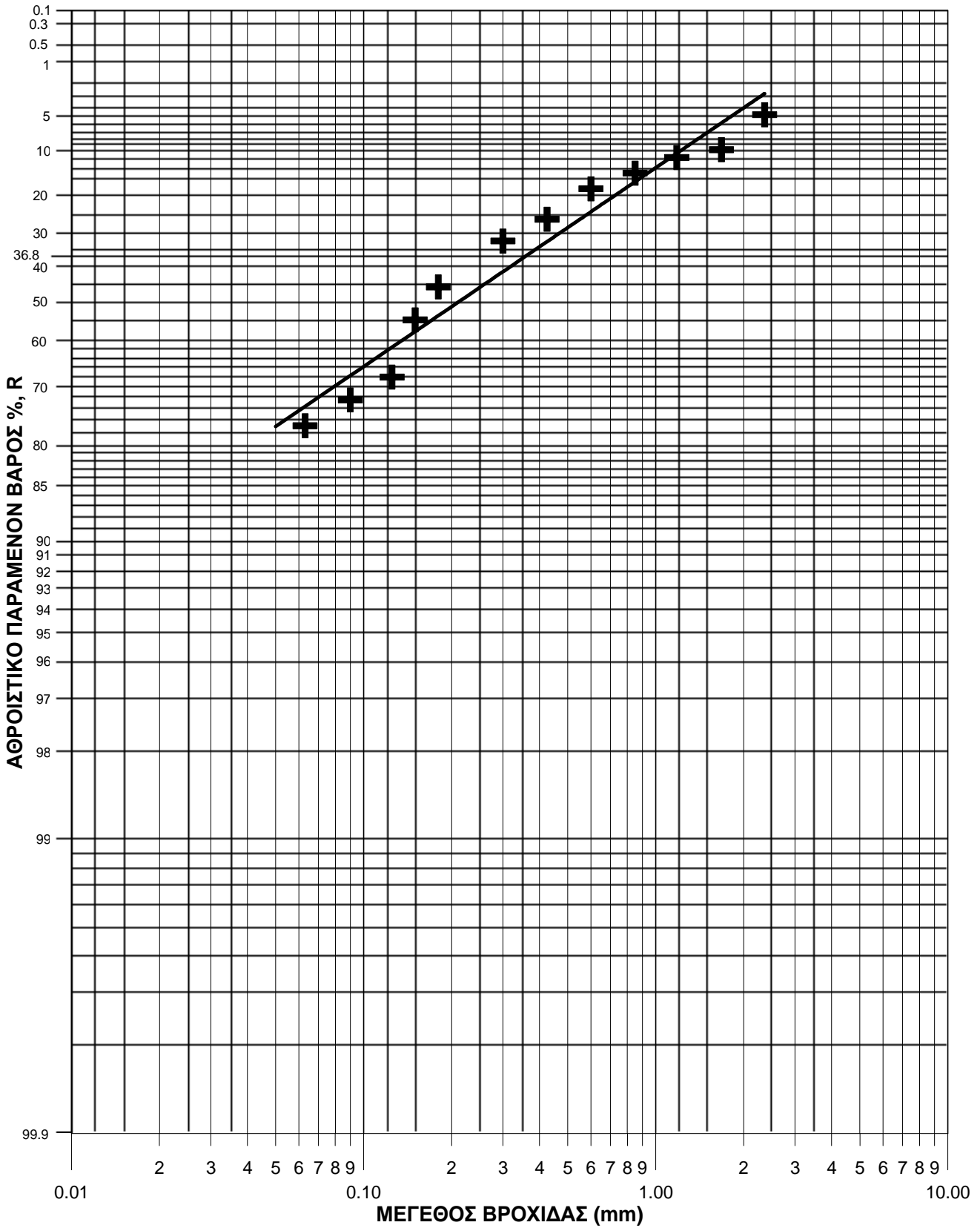
Μετά τη λειοτριβήση γίνεται κοκκομετρική ανάλυση του προϊόντος λειοτριβήσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3 και το Διάγραμμα 3.

Πίνακας 3: Κοκκομετρική ανάλυση του προϊόντος λειοτριβήσης (προϊόν δοκιμής Bond)-
Κόσκινο αναφοράς 90μm.

Μέγεθος (mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%)	Αθροιστικό Βάρος Διερχόμενου (%)
-3.327+2.36	53.70	4.78	4.78	
-2.36+1.68	58.15	5.17	9.95	95.22
-1.68+1.18	16.34	1.45	11.40	90.05
-1.18+0.85	36.64	3.26	14.66	88.60
-0.85+0.6	40.92	3.64	18.30	85.34
-0.6+0.425	90.02	8.01	26.30	81.70
-0.425+0.3	69.14	6.15	32.45	73.70
-0.3+0.18	148.27	13.19	45.64	67.55
-0.18+0.15	100.64	8.95	54.59	54.36
-0.15+0.125	150.56	13.39	67.98	45.41
-0.125+0.09	50.03	4.45	72.43	32.02
-0.09+0.063	50.00	4.45	76.88	27.57
-0,063	260.00	23.12	100.00	23.12
Σύνολο	1124.41	100.00		

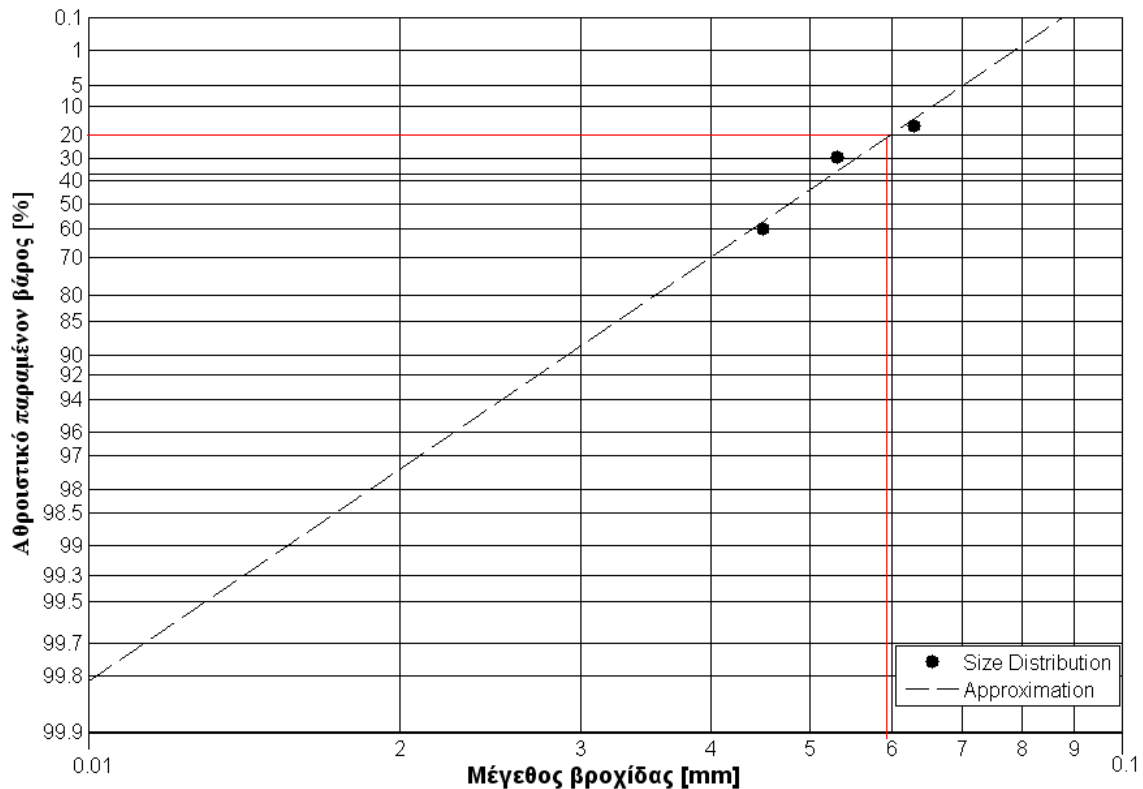
Από τον Πίνακα 3 παρατηρούμε ότι η μάζα του υλικού με κοκκομετρία -0.09 mm είναι $m = 310$ g. Επομένως υπολογίζουμε το παραγόμενο υπομέγεθος σε γραμμάρια ανά περιστροφή του μύλου κατά το δεύτερο στάδιο, G:

$$\begin{aligned}
 G &= (m/N_c) - (1/3.5) \cdot (M/N_c) \cdot (1 - r_o) \\
 &= (310/443) - (1/3.5) \cdot (1148.8/443) \cdot (1 - 0.97) \\
 &= 0.678 \text{ g/rev}
 \end{aligned}$$



Διάγραμμα 3: Απεικόνιση της κοκκομετρικής ανάλυσης του προϊόντος της λειοτριβήσης σε διάγραμμα R-R – Κόσκινο αναφοράς 90μm.

Από κοκκομετρική ανάλυση στο υπομέγεθος (- 0.09 μm), προέκυψε ότι το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του υπομεγέθους, είναι P = 59 μm (Διάγραμμα 4).



Διάγραμμα 4: Κοκκομετρική ανάλυση στο υπομέγεθος (- 0.09 μm) του προϊόντος λειοτριβήσης

Εφαρμόζοντας την εξίσωση για τον προσδιορισμό του δείκτη έργου Bond, έχουμε:

$$W_i = 1.1 \cdot \frac{44.5}{P_c^{0.23} \cdot G^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{P^{0.5}} - \frac{10}{F^{0.5}} \right)}$$

$$W_i = 1.1 \cdot \frac{44.5}{90^{0.23} \cdot 0.678^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{59^{0.5}} - \frac{10}{2400^{0.5}} \right)} = 21.8 \text{ kWh/t}$$

Επομένως ο δείκτης έργου, που εκφράζει την ειδική ενέργεια λειοτριβήσης σε kWh/t για την ελάττωση μεγέθους του υλικού (-3.327 mm) σε υπομέγεθος 90 μm, με κυκλοφορούν φορτίο 250% είναι 21.8 kWh/t.

Δοκιμή 2^η

Κόσκινο αναφοράς 125 μm ($P_c = 125 \mu\text{m}$).

Σε αυτήν την περίπτωση το κόσκινο αναφοράς αλλάζει και αντί για 90 μm είναι 125 μm ($P_c = 125 \mu\text{m}$). Δηλαδή, το μέγεθος προϊόντος στο οποίο αντιστοιχεί ο προσδιοριζόμενος δείκτης Bond, είναι 125 μm .

Ομοίως, κοσκινίζοντας επαρκές δείγμα από την αρχική τροφοδοσία παρασκευάζονται δύο δείγματα υπερμεγέθους (+125 μm) $R_1 = 821.82 \text{ g}$, $R_2 = 824.97 \text{ g}$. Στη συνέχεια με δειγματοληψία Jones συλλέγονται δύο δείγματα από την αρχική τροφοδοσία $U_1 = 329.10 \text{ g}$ $U_2 = 329.8 \text{ g}$ και με ανάμιξη των R_1 , U_1 και R_2 , U_2 , αντιστοίχως προκύπτουν:

Δείγμα 1 = 1150.92 g

Δείγμα 2 = 1154.77 g

Το Δείγμα 1 κοσκινίζεται για τον προσδιορισμό του ποσοστού περιεχόμενου υπομεγέθους (-125 μm), που αποτελεί το κόσκινο αναφοράς (P_c) σε όλη τη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη έργου. Η μάζα του υπομεγέθους είναι 30.41 g και έτσι υπολογίζουμε το υπερμέγεθος $R_o = 1150.92 - 30.41 = 1120.51 \text{ g}$.

Στη συνέχεια το Δείγμα 1 τροφοδοτείται στο μύλο Bond και λειοτριβείται για $N = 100$ περιστροφές μύλου. Η ταχύτητα περιστροφής του μύλου είναι $v = 66 \text{ rev/min}$. Μετά τη συμπλήρωση 100 περιστροφών ($N=100$), ακινητοποιείται ο μύλος, συλλέγεται προσεκτικά όλο το δείγμα από μέσα και κατόπιν κοσκινίζεται στο κόσκινο αναφοράς (125 μm). Το υπομέγεθος του προϊόντος άλεσης ζυγίζεται και προκύπτει 108.63 g. Επομένως το υπερμέγεθος του προϊόντος άλεσης είναι $R = 1150.92 - 108.63 = 1042.29 \text{ g}$.

Ακολούθως είναι εύκολος ο προσδιορισμός της σταθεράς k , του κλάσματος του υπερμεγέθους στην αρχική τροφοδοσία r_o και του συνολικού αριθμού περιστροφών (N_c) του μύλου για το δεύτερο στάδιο:

$$k = (n/N) \cdot \ln(R_o/R) = (66/100) \cdot (\ln 1120.51 - \ln 1042.29) = 0.048$$

$$r_o = R_o/M = 1120.51/1150.92 = 0.97$$

$$N_c = (n/k) \cdot \ln(1 + 0.4r_o) = (66/0.048) \cdot \ln(1 + 0.4 \cdot 0.97) = 455 \text{ περιστροφές}$$

Άρα το δείγμα 2 θα μπει στο μύλο για 455 περιστροφές

Άρα το Δείγμα 2 ($M = 1154.77 \text{ g}$) είναι απαραίτητο να υποστεί λειοτρίβηση για 455 περιστροφές του μύλου.

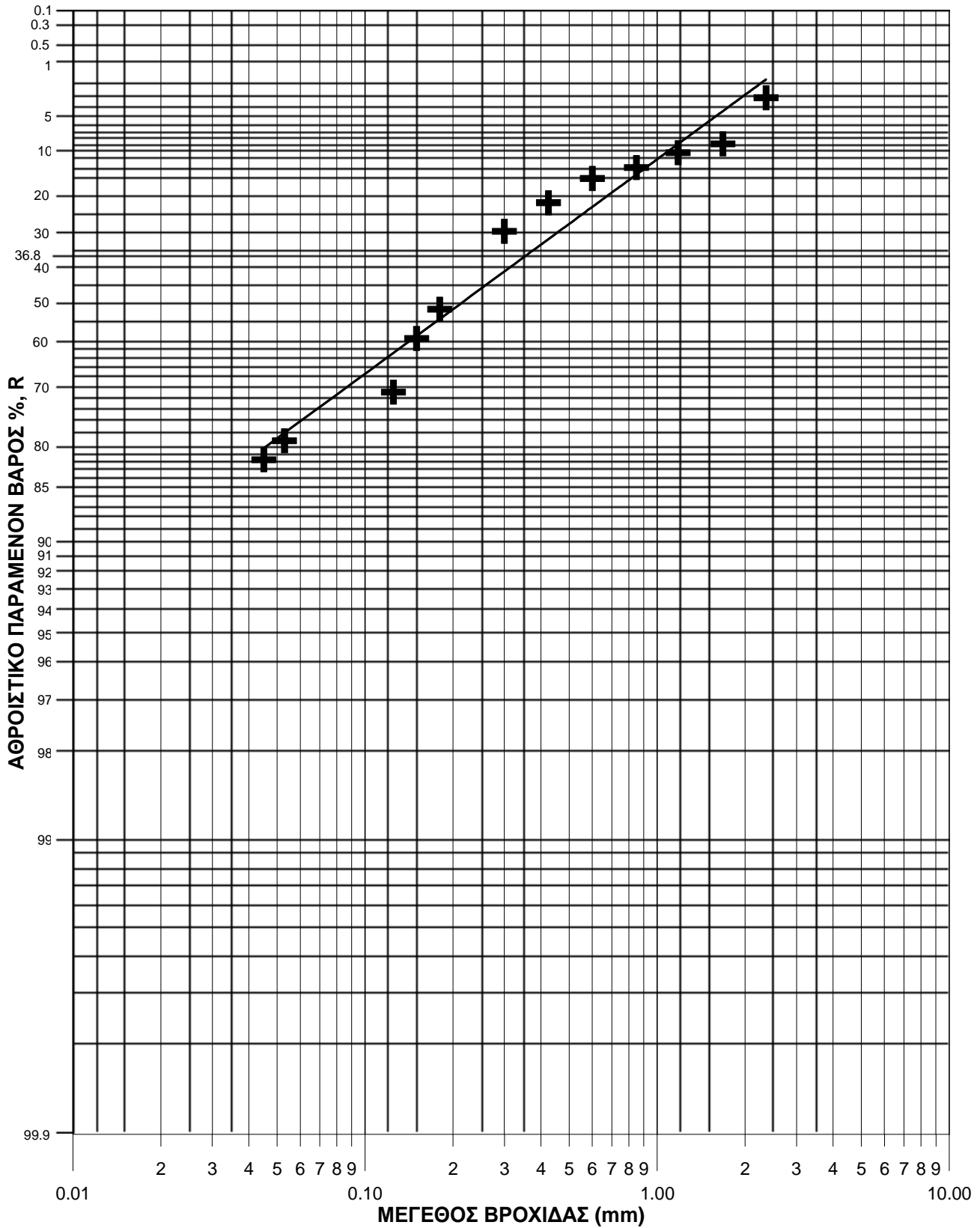
Μετά τη λειοτριβήση γίνεται κοκκομετρική ανάλυση του προϊόντος λειοτριβήσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4 και το Διάγραμμα 5.

Πίνακας 4: Κοκκομετρική ανάλυση του προϊόντος λειοτριβήσης (προϊόν δοκιμής Bond)-
Κόσκινο αναφοράς 125 μm .

Μέγεθος (mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Αθροιστικό Βάρος Παραμένουτος (%)	Αθροιστικό Βάρος Διερχόμενου (%)
-3.327+2.36	35.61	3.09	3.09	
-2.36+1.68	67.00	5.81	8.91	96.91
-1.68+1.18	18.20	1.58	10.48	91.09
-1.18+0.85	33.87	2.94	13.42	89.52
-0.85+0.6	27.84	2.42	15.84	86.58
-0.6+0.425	68.71	5.96	21.80	84.16
-0.425+0.3	90.24	7.83	29.63	78.20
-0.3+0.18	255.04	22.13	51.77	70.37
-0.18+0.15	86.20	7.48	59.25	48.23
-0.15+0.125	134.56	11.68	70.93	40.75
-0.125+0.053	94.63	8.21	79.14	29.07
-0.053+0.045	29.85	2.59	81.73	20.86
-0.045	210.52	18.27	100.00	18.27
Σύνολο	1152,27	100.00		

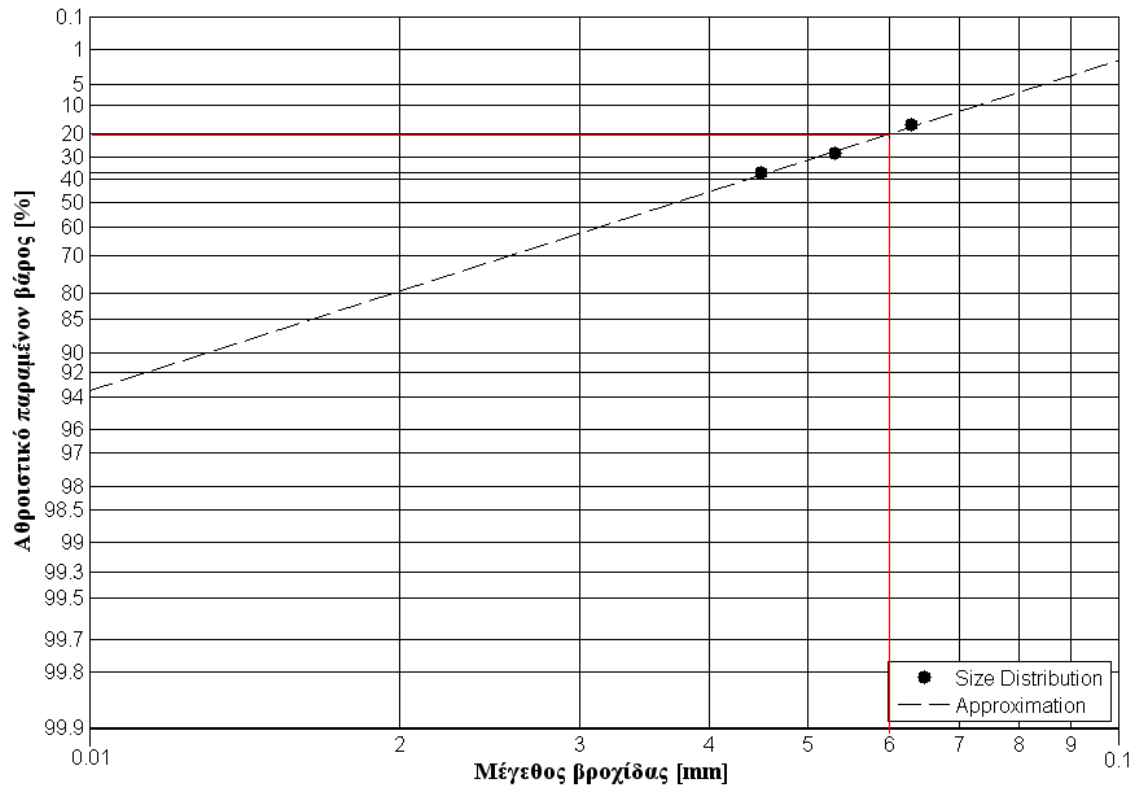
Από τον Πίνακα 4 παρατηρούμε ότι η μάζα του υλικού με κοκκομετρία -0.125 mm είναι $m = 335$ g. Επομένως υπολογίζουμε το παραγόμενο υπομέγεθος σε γραμμάρια ανά περιστροφή του μύλου κατά το δεύτερο στάδιο, G:

$$\begin{aligned}
 G &= (m/N_c) - (1/3.5) \cdot (M/N_c) \cdot (1 - r_o) \\
 &= (335/455) - (1/3.5) \cdot (1154.77/455) \cdot (1 - 0.97) \\
 &= 0.717 \text{ g/rev}
 \end{aligned}$$



Διάγραμμα 5: Απεικόνιση της κοκκομετρικής ανάλυσης του προϊόντος της λειοτριβήσης σε διάγραμμα R-R – Κόσκινο αναφοράς 125 μm.

Από κοκκομετρική ανάλυση στο υπομέγεθος (- 0.125 μm) προέκυψε ότι το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του υπομεγέθους, είναι P = 60 μm (Διάγραμμα 6).



Διάγραμμα 6: Κοκκομετρική ανάλυση στο υπομέγεθος (- 0.125 μm) του προϊόντος λειοτριβήσης

Από την εξίσωση προσδιορισμού του δείκτη έργου έχουμε:

$$W_i = 1.1 \cdot \frac{44.5}{P_c^{0.23} \cdot G^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{P^{0.5}} - \frac{10}{F^{0.5}} \right)} =$$

$$= 1.1 \cdot \frac{44.5}{125^{0.23} \cdot 0.717^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{60^{0.5}} - \frac{10}{2400^{0.5}} \right)} = 19.49 \text{ kWh/t}$$

Επομένως ο δείκτης έργου, που εκφράζει την ειδική ενέργεια λειοτριβήσης σε kWh/t για την ελάττωση μεγέθους του υλικού (-3.327 mm) σε υπομέγεθος 125μm, με κυκλοφορούν φορτίο 250% είναι 19.49 kWh/t

Δοκιμή 3^η

Κόσκινο αναφοράς 150 μm ($P_c = 150 \mu\text{m}$).

Το κόσκινο αναφοράς σε αυτή τη δοκιμή είναι 150 μm ($P_c = 150 \mu\text{m}$). Δηλαδή, το μέγεθος προϊόντος στο οποίο αντιστοιχεί ο προσδιοριζόμενος δείκτης Bond, είναι 150 μm .

Κοσκινίζοντας επαρκές δείγμα από την αρχική τροφοδοσία παρασκευάζονται δύο δείγματα υπερμέγεθους (+150 μm) $R_1 = 824.32 \text{ g}$, $R_2 = 823.87 \text{ g}$. Ακολούθως με δειγματοληψία Jones συλλέγονται δύο δείγματα από την αρχική τροφοδοσία $U_1 = 329.51 \text{ g}$, $U_2 = 329.68 \text{ g}$. Αναμιγνύοντας το R_1 με το U_1 και το R_2 με το U_2 , αντιστοίχως προκύπτουν:

$$\text{Δείγμα 1} = 1153.83 \text{ g}$$

$$\text{Δείγμα 2} = 1153.55 \text{ g}$$

Το Δείγμα 1 κοσκινίζεται για τον προσδιορισμό του ποσοστού περιεχόμενου υπομέγεθους (-150 μm), το οποίο βρέθηκε ίσο με 31.14 g και έτσι υπολογίζουμε ότι $R_o = 1153.83 - 31.14 = 1122.69 \text{ g}$.

Το Δείγμα 1 τροφοδοτείται στο μύλο Bond και λειοτριβείται για $N = 100$ περιστροφές μύλου. Η ταχύτητα περιστροφής του μύλου είναι $v = 66 \text{ rev/min}$. Μετά τη συμπλήρωση 100 περιστροφών ($N=100$), ακινητοποιείται ο μύλος, συλλέγεται προσεκτικά όλο το δείγμα από μέσα και κατόπιν κοσκινίζεται στο κόσκινο αναφοράς (150 μm). Το υπομέγεθος του προϊόντος άλεσης ζυγίζεται και προκύπτει 144.76 g. Επομένως το υπερμέγεθος του προϊόντος άλεσης είναι $R = 1153.83 - 144.76 = 1009.07 \text{ g}$.

Ακολούθως είναι εύκολος ο προσδιορισμός της σταθεράς k , του κλάσματος του υπερμέγεθους στην αρχική τροφοδοσία r_o και του συνολικού αριθμού περιστροφών (N_c) του μύλου για το δεύτερο στάδιο:

$$k = (n/N) \cdot \ln(R_o/R) = (66/100) \cdot (\ln 1122.69 - \ln 1009.07) = 0.070$$

$$r_o = R_o/M = 1122.69/1153.83 = 0.97$$

$$N_c = (n/k) \cdot \ln(1 + 0.4r_o) = (66/0.070) \cdot \ln(1 + 0.4 \cdot 0.97) = 309 \text{ περιστροφές}$$

Άρα το Δείγμα 2 ($M = 1153.55 \text{ g}$) είναι απαραίτητο να υποστεί λειοτρίβηση για 309 περιστροφές του μύλου.

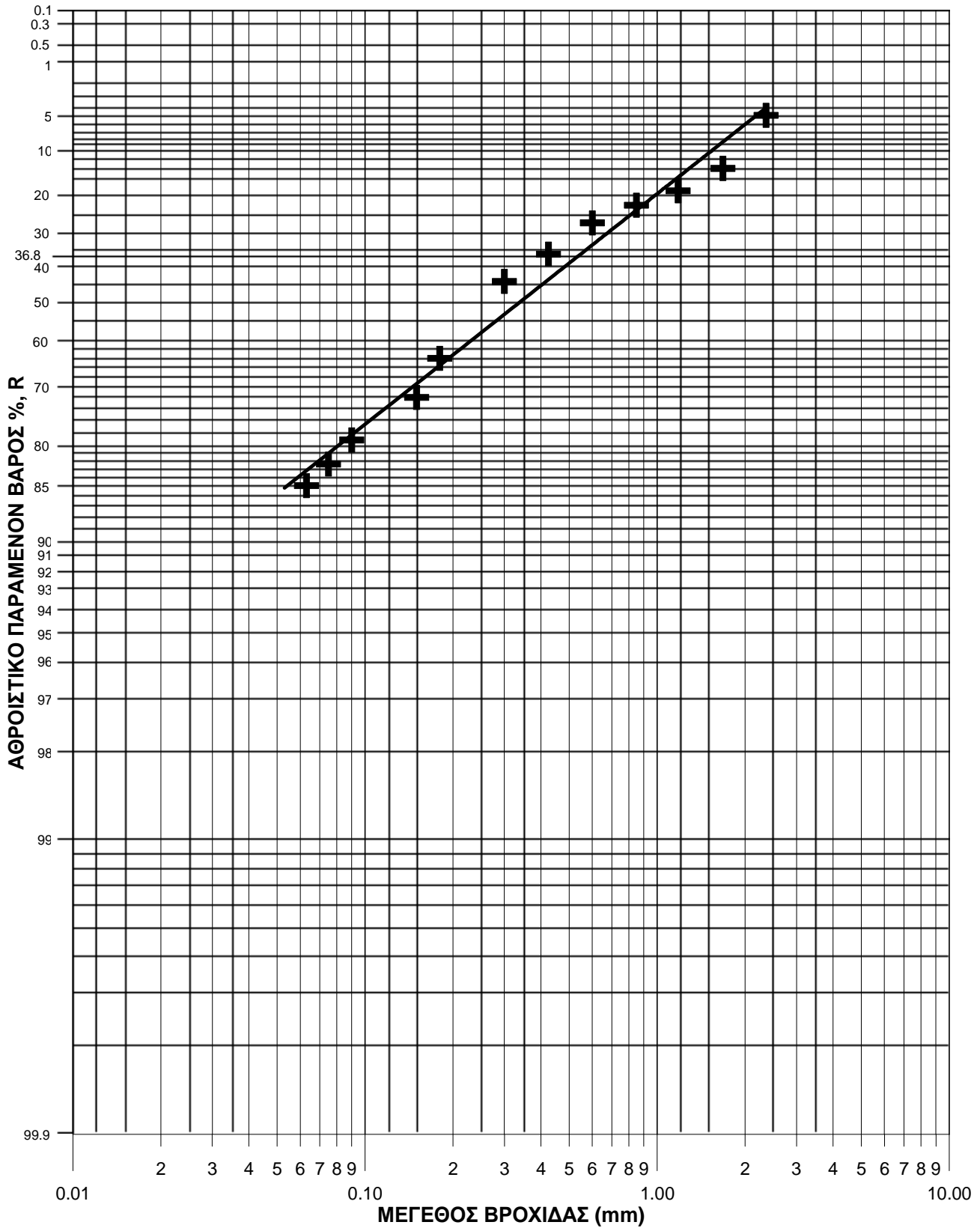
Μετά τη λειοτρίβηση γίνεται κοκκομετρική ανάλυση του προϊόντος λειοτρίβησης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5 και το Διάγραμμα 7.

Πίνακας 5: Κοκκομετρική ανάλυση του προϊόντος λειοτρίβησης (προϊόν δοκιμής Bond) – Κόσκινο αναφοράς 150 μm .

Μέγεθος (mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Αθροιστικό Βάρος Παραμένουτος (%)	Αθροιστικό Βάρος Διερχόμενου (%)
-3.327+2.36	54.86	4.83	4.83	
-2.36+1.68	99.69	8.78	13.61	95.17
-1.68+1.18	58.83	5.18	18.79	86.39
-1.18+0.85	41.72	3.67	22.46	81.21
-0.85+0.6	54.43	4.79	27.26	77.54
-0.6+0.425	101.21	8.91	36.17	72.74
-0.425+0.3	89.80	7.91	44.08	63.83
-0.3+0.18	225.09	19.82	63.90	55.92
-0.18+0.15	91.32	8.04	71.94	36.10
-0.15+0.125	23.39	2.06	74.00	28.06
-0.125+0.09	56.87	5.01	79.01	26.00
-0.09+0.075	37.05	3.26	82.27	20.99
-0.075+0.063	29.15	2.57	84.84	17.73
-0.063	172.18	15.16	100.00	15.16
Σύνολο	1135.59	100.00		

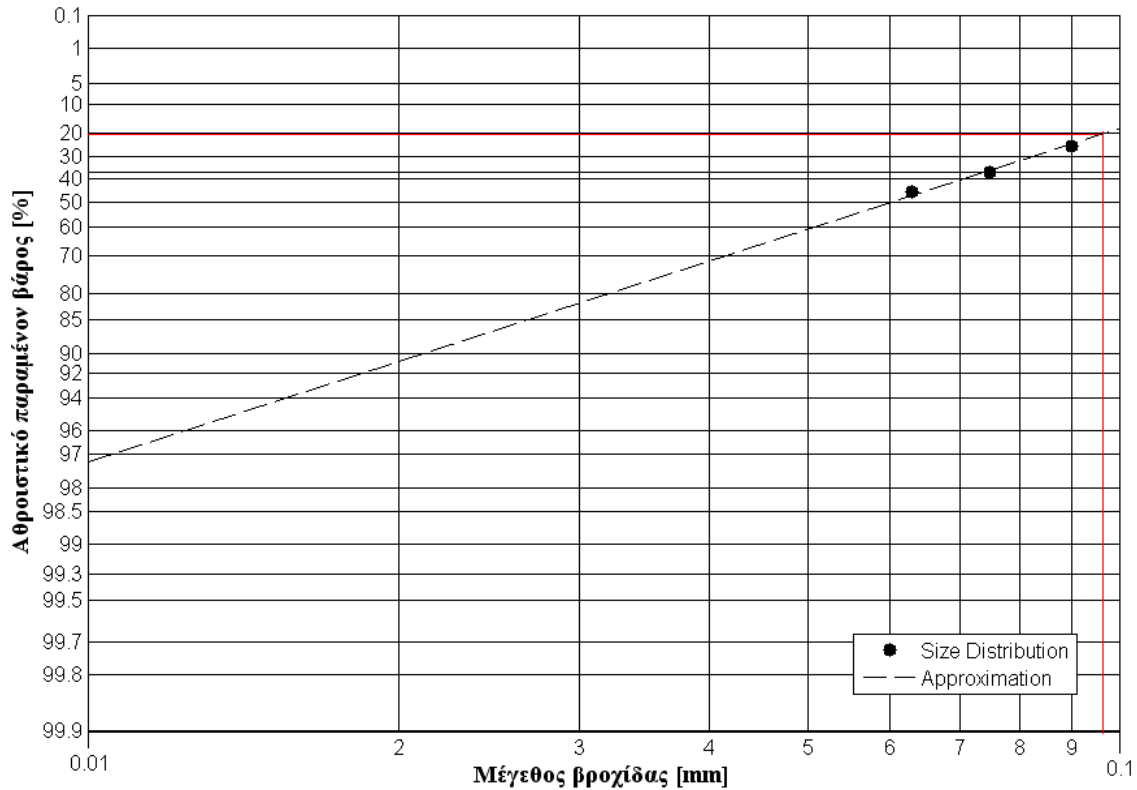
Από τον Πίνακα 5 παρατηρούμε ότι η μάζα του υλικού με κοκκομετρία -0.150 mm είναι $m = 318.64\text{ g}$. Επομένως υπολογίζουμε το παραγόμενο υπομέγεθος σε γραμμάρια ανά περιστροφή του μύλου κατά το δεύτερο στάδιο, G :

$$\begin{aligned}
 G &= (m/N_c) - (1/3.5) \cdot (M/N_c) \cdot (1 - r_o) \\
 &= (318.64/309) - (1/3.5) \cdot (1153.55/309) \cdot (1 - 0.97) \\
 &= 1.002\text{ g/rev}
 \end{aligned}$$



Διάγραμμα 7: Απεικόνιση της κοκκομετρικής ανάλυσης του προϊόντος της λειοτριβήσης σε διάγραμμα R-R – Κόσκινο αναφοράς 150 μm .

Από κοκκομετρική ανάλυση στο υπομέγεθος (- 0.150 μm) προέκυψε ότι το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του υπομεγέθους, είναι P = 96 μm (Διάγραμμα 8).



Διάγραμμα 8: Κοκκομετρική ανάλυση στο υπομέγεθος (- 0.150 μm) του προϊόντος λειοτριβήσης

Από την εξίσωση για το δείκτη έργου έχουμε:

$$W_i = 1.1 \cdot \frac{44.5}{P_c^{0.23} \cdot G^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{P^{0.5}} - \frac{10}{F^{0.5}} \right)} =$$

$$= 1.1 \cdot \frac{44.5}{150^{0.23} \cdot 1.002^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{96^{0.5}} - \frac{10}{2400^{0.5}} \right)} = 18.9 \text{ kWh/t}$$

Επομένως ο δείκτης έργου, που εκφράζει την ειδική ενέργεια λειοτριβήσης σε kWh/t για την ελάττωση μεγέθους του υλικού (-3.327 mm) σε υπομέγεθος 150μm, με κυκλοφορούν φορτίο 250% είναι 18.9 kWh/t

Δοκιμή 4^η

Κόσκινο αναφοράς 180 μm ($P_c = 180 \mu\text{m}$).

Ομοίως, με κόσκινο αναφοράς 180 μm ($P_c = 180 \mu\text{m}$), δηλαδή μέγεθος προϊόντος στο οποίο αντιστοιχεί ο προσδιοριζόμενος δείκτης Bond 180 μm , πραγματοποιείται η τελευταία δοκιμή.

Κοσκινίζοντας επαρκές δείγμα από την αρχική τροφοδοσία παρασκευάζονται δύο δείγματα υπερμέγεθους (+180 μm) $R_1 = 823.95 \text{ g}$, $R_2 = 823.54 \text{ g}$. Στη συνέχεια με δειγματοληψία Jones συλλέγονται δύο δείγματα από την αρχική τροφοδοσία $U_1 = 329.97 \text{ g}$, $U_2 = 330.09 \text{ g}$. Αναμιγνύοντας το R_1 με το U_1 και το R_2 με το U_2 αντιστοίχως προκύπτουν:

Δείγμα 1 = 1153.92 g

Δείγμα 2 = 1153.63 g

Το Δείγμα 1 κοσκινίζεται για τον προσδιορισμό του ποσοστού περιεχόμενου υπομέγεθους (-180 μm), το οποίο βρέθηκε ίσο με 38.74 g και έτσι υπολογίζουμε ότι $R_o = 1153.92 - 38.74 = 1115.18 \text{ g}$.

Το Δείγμα 1 τροφοδοτείται στο μύλο Bond και λειοτριβείται για $N = 100$ περιστροφές μύλου. Η ταχύτητα περιστροφής του μύλου είναι $v = 66 \text{ rev/min}$. Μετά τη συμπλήρωση 100 περιστροφών ($N=100$), ακινητοποιείται ο μύλος, συλλέγεται προσεκτικά όλο το δείγμα από μέσα και κατόπιν κοσκινίζεται στο κόσκινο αναφοράς (180 μm). Το υπομέγεθος του προϊόντος άλεσης ζυγίζεται και προκύπτει 179.39 g. Επομένως το υπερμέγεθος του προϊόντος άλεσης είναι $R = 1153.92 - 179.39 = 974.53 \text{ g}$.

Ακολουθως είναι εύκολος ο προσδιορισμός της σταθεράς k , του κλάσματος του υπερμέγεθους στην αρχική τροφοδοσία r_o και του συνολικού αριθμού περιστροφών (N_c) του μύλου για το δεύτερο στάδιο:

$$k = (n/N) \cdot \ln(R_o/R) = (66/100) \cdot (\ln 1115.18 - \ln 974.53) = 0.089$$

$$r_o = R_o/M = 1115.18/1153.92 = 0.97$$

$$N_c = (n/k) \cdot \ln(1 + 0.4r_o) = (66/0.089) \cdot \ln(1 + 0.4 \cdot 0.97) = 243 \text{ περιστροφές}$$

Άρα το δείγμα 2 θα μπει στο μύλο για 243 περιστροφές

Άρα το Δείγμα 2 ($M = 1153.63 \text{ g}$) είναι απαραίτητο να υποστεί λειοτρίβηση για 243 περιστροφές του μύλου.

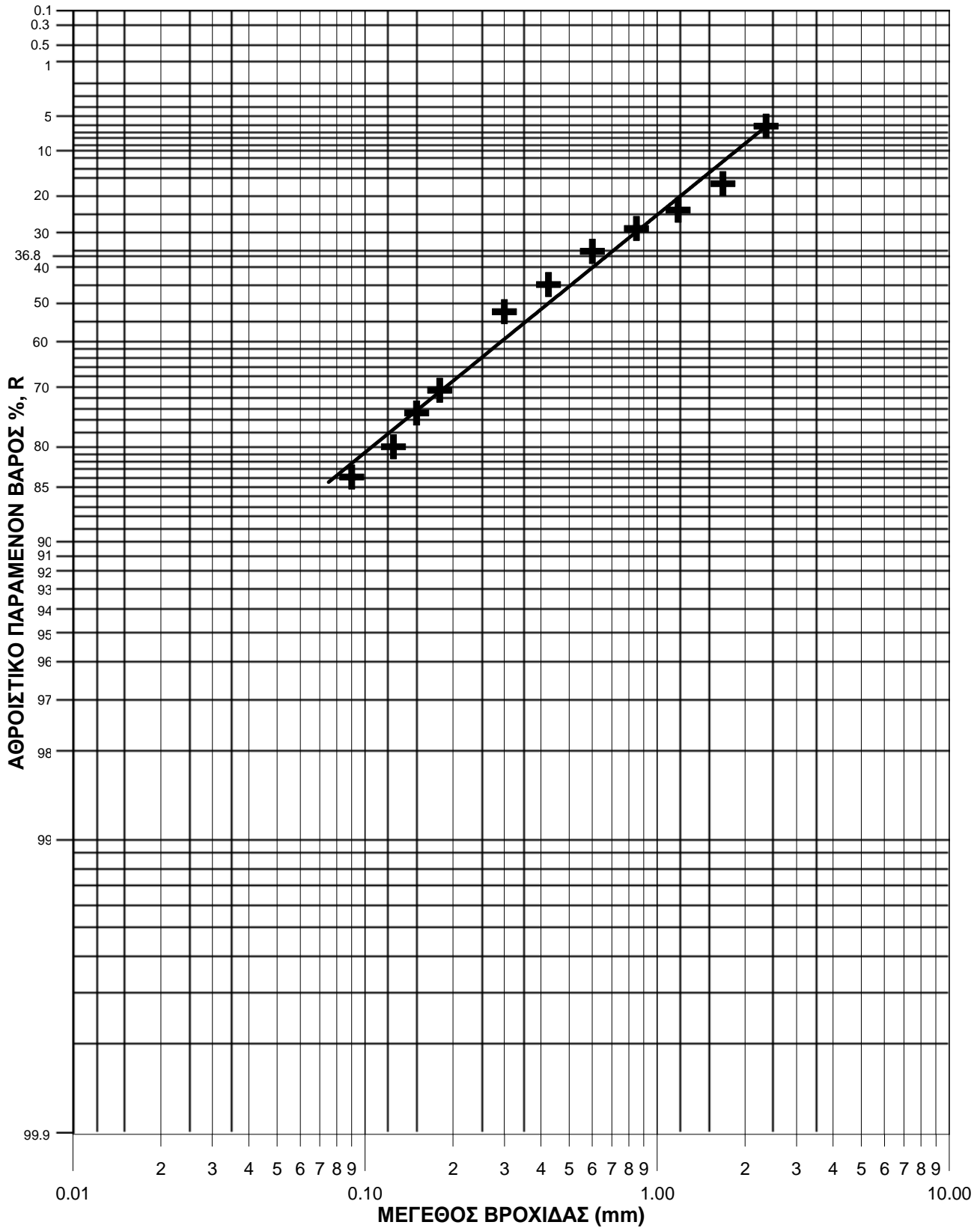
Μετά τη λειοτρίβηση γίνεται κοκκομετρική ανάλυση του προϊόντος λειοτρίβησης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6 και το Διάγραμμα 9.

Πίνακας 6: Κοκκομετρική ανάλυση του προϊόντος λειοτριβήσης (προϊόν δοκιμής Bond) –
Κόσκινο αναφοράς 180 μm

Μέγεθος (mm)	Βάρος (g)	Βάρος (%)	Αθροιστικό Βάρος Παραμένουτος (%)	Αθροιστικό Βάρος Διερχόμενου (%)
-3.327+2.36	70.64	6.19	6.19	
-2.36+1.68	123.69	10.84	17.03	93.81
-1.68+1.18	76.60	6.71	23.75	82.97
-1.18+0.85	58.03	5.09	28.84	76.25
-0.85+0.6	74.78	6.56	35.39	71.16
-0.6+0.425	108.81	9.54	44.93	64.61
-0.425+0.3	85.37	7.48	52.41	55.07
-0.3+0.18	207.06	18.15	70.56	47.59
-0.18+0.15	47.32	4.15	74.71	29.44
-0.15+0.125	60.09	5.27	79.98	25.29
-0.15+0.09	44.22	3.88	83.86	20.02
-0.09	184.16	16.14	100.00	16.14
Σύνολο	1140.77	100.00		

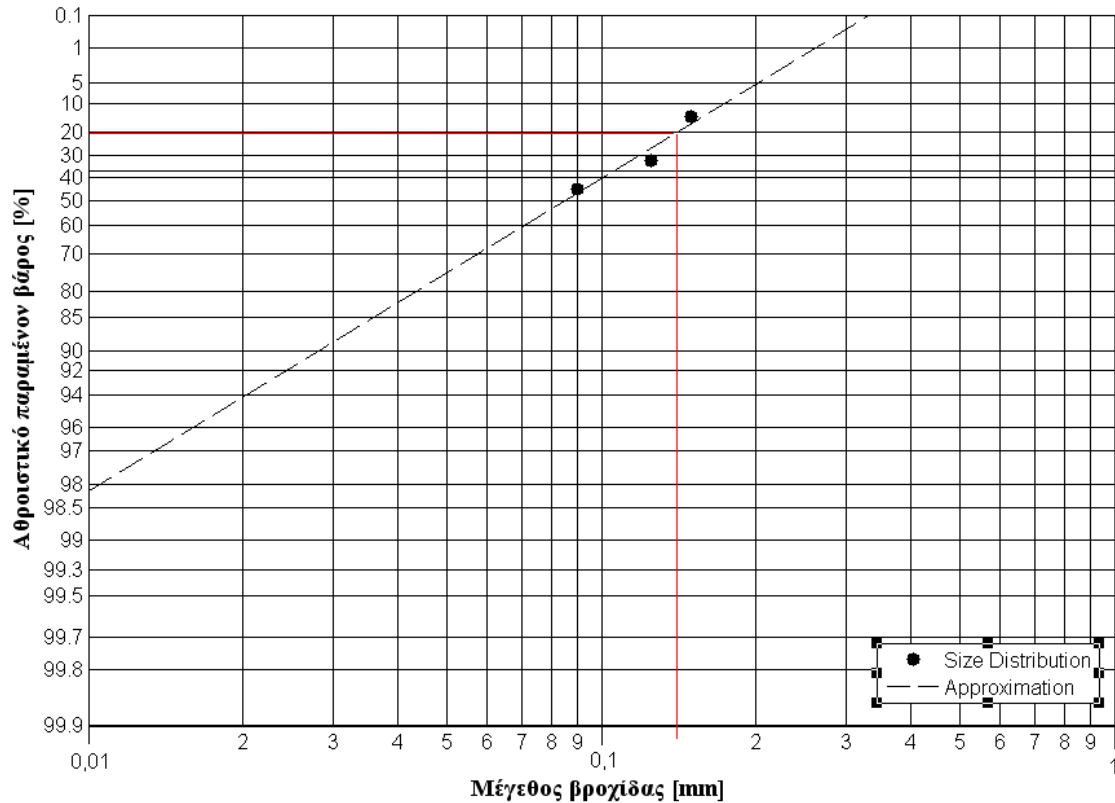
Από τον Πίνακα 6 παρατηρούμε ότι η μάζα του υλικού με κοκκομετρία -0.180 mm είναι $m = 335.79\text{ g}$. Επομένως υπολογίζουμε το παραγόμενο υπομέγεθος σε γραμμάρια ανά περιστροφή του μύλου κατά το δεύτερο στάδιο, G:

$$\begin{aligned}
 G &= (m/N_c) - (1/3.5) \cdot (M/N_c) \cdot (1 - r_o) \\
 &= (335.79/243) - (1/3.5) \cdot (1153.63/243) \cdot (1 - 0.97) \\
 &= 1.336\text{ g/rev}
 \end{aligned}$$



Διάγραμμα 9: Απεικόνιση της κοκκομετρικής ανάλυσης του προϊόντος της λειοτριβήσης σε διάγραμμα R-R – Κόσκινο αναφοράς 180 μm.

Από κοκκομετρική ανάλυση στο υπομέγεθος (-0.180 μm) προέκυψε ότι το μέγεθος της βροχίδας του κόσκινου από την οποία περνάει το 80% του υπομεγέθους, είναι P = 140 μm (Διάγραμμα 10).



Διάγραμμα 10: Κοκκομετρική ανάλυση στο υπομέγεθος (- 0.180 μm) του προϊόντος λειοτριβήσης

Ομοίως έχουμε:

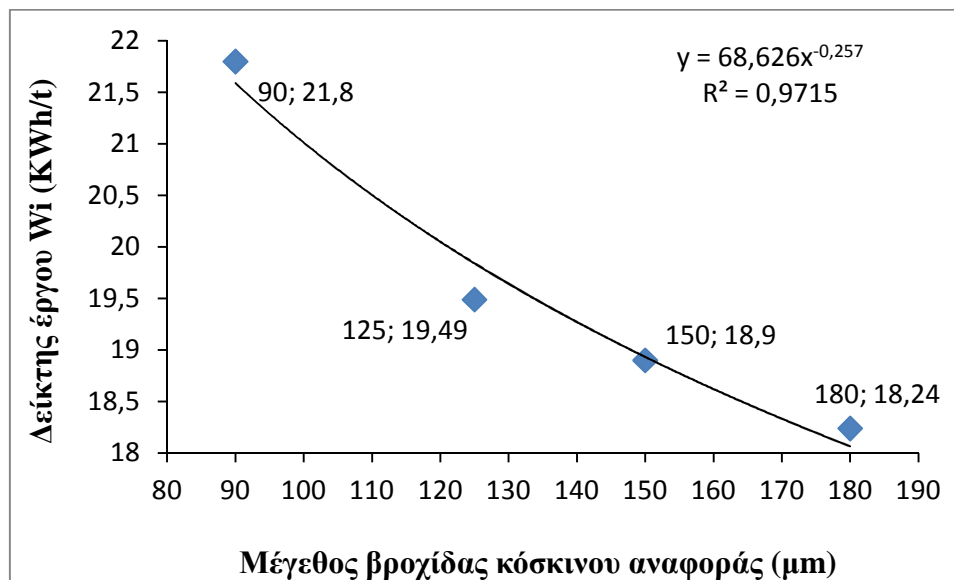
$$W_i = 1.1 \cdot \frac{44.5}{P_c^{0.23} \cdot G^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{P^{0.5}} - \frac{10}{F^{0.5}} \right)} =$$

$$= 1.1 \cdot \frac{44.5}{180^{0.23} \cdot 1.336^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{140^{0.5}} - \frac{10}{2400^{0.5}} \right)} = 18.24 \text{ kWh/t}$$

Επομένως ο δείκτης έργου, που εκφράζει την ειδική ενέργεια λειοτριβήσης σε kWh/t για την ελάττωση μεγέθους του υλικού (-3.327 mm) σε υπομέγεθος 180μm, με κυκλοφορούν φορτίο 250% είναι 18.24 kWh/t

5.4 Συμπεράσματα

Τα παραπάνω αποτελέσματα των δοκιμών Bond συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 11)



Διάγραμμα 11: Δείκτης έργου Bond συναρτήσει του μεγέθους της βροχίδας του κόσκινου αναφοράς

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι ο δείκτης έργου Bond συναρτήσει του μεγέθους της βροχίδας του κόσκινου αναφοράς, περιγράφεται από την εξίσωση: $y = 68.626x^{-0.257}$, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.9715$.

Γενικά, όπως είναι γνωστό, η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση και τη λειοτρίβηση ενός υλικού εξαρτάται από [24]:

- Το μέγεθος των τεμαχίων της τροφοδοσίας
- Το επιθυμητό μέγεθος των τεμαχίων του προϊόντος
- Τη θραυστικότητα του υλικού (grindability)
- Τις διαστάσεις και τις συνθήκες λειτουργίας του μύλου

Στην παρούσα μελέτη τα χαρακτηριστικά του μύλου, το μέγεθος των τεμαχίων της τροφοδοσίας και η θραυστικότητα του υλικού παραμένουν σταθερά. Εκείνο που αλλάζει σε κάθε δοκιμή είναι οι διαστάσεις των τεμαχίων του προϊόντος.

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 11 ο δείκτης έργου, δηλαδή η απαιτούμενη ενέργεια για τη θραύση του υλικού, μειώνεται όσο αυξάνει το μέγεθος του κόσκινου αναφοράς, δηλαδή το μέγεθος του προϊόντος στο οποίο αντιστοιχεί ο υπολογιζόμενος δείκτης Bond. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια της κατάτμησης η μέση τάση

θραύσης (αντοχή) καθώς και η πλαστικότητα των τεμαχίων των ψαθυρών υλικών αυξάνουν καθώς το μέγεθός τους ελαττώνεται. Επομένως η ειδική ενέργεια κατάτμησης είναι φθίνουσα συνάρτηση του μεγέθους των τεμαχίων [15].

Έχει βρεθεί και στο παρελθόν ότι στην περίπτωση που το μέγεθος του προϊόντος στο οποίο αντιστοιχεί ο υπολογιζόμενος δείκτης έργου είναι πολύ μικρό, όπως 53 μm , το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο από το αναμενόμενο. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην ξηρή κοσκίνιση. Η ξηρή κοσκίνιση και ιδιαιτέρως στα πολύ μικρά μεγέθη τεμαχίων όπου η ρευστότητα μειώνεται ραγδαία, επηρεάζει τα αποτελέσματα στον υπολογισμό του δείκτη έργου. Αυτό συμβαίνει διότι οι βροχίδες των κοσκίνων φράσσουν πιο εύκολα και πιο γρήγορα και το παραγόμενο προϊόν είναι φτωχότερο. Έτσι, για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, όταν τα τεμάχια του υλικού είναι πολύ μικρά, η υγρή κοσκίνιση θα ήταν προτιμότερη. Πολλά υλικά κοσκινίζονται ικανοποιητικά με ξηρή κοσκίνιση αλλά σε κάποια πολύ μαλακά, όπως ο δολομίτης, ο ασβεστόλιθος, ο αιματίτης και ειδικά δείγματα που περιέχουν άργιλο, γίνεται υγρή κοσκίνιση [2]. Επομένως ένας ακόμη παράγοντας, στον οποίο πιθανότατα οφείλεται αυτή η διαφορά στις τιμές του υπολογιζόμενου δείκτη, είναι και χρήση της ξηρής κοσκίνισης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι ο συγκεκριμένος ασβεστόλιθος είναι πέτρωμα πολύ ανθεκτικό στη λειοτρίβηση, δηλαδή καταναλώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας για την ελάττωση του μεγέθους του. Παρακάτω δίνονται οι μέσες τιμές δείκτη έργου μερικών γνωστών πετρωμάτων και μεταλλευμάτων.

Πίνακας 7: Μέσες τιμές δείκτη έργου γνωστών πετρωμάτων και μεταλλευμάτων [18, 25, 26]

Υλικό	Δείκτης έργου (W_D)	Υλικό	Δείκτης έργου (W_D)
Βαρίτης	4.70 – 6.90	Γυαλί	14.00
Βασάλτης	17.00 – 22.50	Σκωρία υψικαμίνου	12.16
Κλίνκερ τσιμέντου	15.00	Άστριος	12.00
Άνθρακας	12.50 – 13.00	Γύψος	7.00
Δολομίτης	9.00 – 12.40	Γρανίτης	11.00
Μάρμαρο	4.00 – 12.00	Ψαμμίτης	11.00
Χαλαζίας	15.00	Καρβίδιο πυριτίου	29.00
Ασβεστόλιθος	14.00	Γραφίτης	43.56
Φλύσχης	29.00	Κορούνδιο	30.00 – 35.00

Η προσδιορισθείσα τιμή του δείκτη έργου του συγκεκριμένου πετρώματος φανερώνει ότι πρόκειται για υλικό μεγάλης σκληρότητας. Η τιμή αυτή συγκρινόμενη με τις τιμές των διαφόρων πετρωμάτων και μεταλλευμάτων κατατάσσουν το δείγμα στην κατηγορία του Βασάλτη από άποψη αντοχής στη λειοτρίβηση.

6. Βιβλιογραφία

1. Free, K. S., McCarter, M. K., King, R. P. (2004). Evaluation of a new method for work index estimation using single particle impact tests. SME Annual Meeting. Feb. 23 – 25, Denver, Colorado
2. Tuzun, M. A. (2001). Technical note wet Bond mill test. Min. Eng. 14(3), 369 – 373.
3. Stampoliadis, E. Th. (2002). A contribution to the relationship of energy and particle size in the comminution of brittle particulate materials. Min. Eng. 15, 707 – 713.
4. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_AGGREGATES
5. Τσακαλάκης, Κ. Γ. (2010). Τεχνολογία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος. Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε. Μ. Π., Αθήνα.
6. http://www.sarmaproject.eu/uploads/media/SARMa_Manual_Resource_Efficiency_GR.pdf
7. Τσίμας, Σ., Τσιβιλής, Σ. (2004). Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου. Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Ε. Μ. Π., Αθήνα.
8. <http://www.sbmcn.com/solution/limestone-mining-process.html>
9. <http://www.dei.com.gr/Documents/PERIVALLONgr.pdf>
10. Metso Minerals, “Flue gas desulfurization”, Brochure No. 56 07-02, [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/EEEE4654B8136323C1256C5A002B907E/\\$File/FGD_EN.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/EEEE4654B8136323C1256C5A002B907E/$File/FGD_EN.pdf)
11. Ζευγώλης, Μ. Ν. (2003). Τεχνολογία προστασίας περιβάλλοντος στη βιομηχανία. Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε. Μ. Π., Αθήνα.
12. <http://geology.com/rocks/limestone.shtml>
13. <http://en.wikipedia.org/wiki/Limestone#Uses>
14. <http://www.crushersmill.com/>
15. Σταμπολτζής, Γ. Α. (1994). Μηχανική προπαρασκευής μεταλλευμάτων βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων (υδροαυτοκαθαρισμός – κατάτμηση – ταξινόμηση). Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε. Μ. Π., Αθήνα.
16. Φραγκίσκος, Α. Ζ. (1990). Μελέτη του εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών. Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε. Μ. Π., Αθήνα.
17. http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/fd/zouboulis/ch14_Xarakterismos_sterewn_2_A4.pdf
18. Wills, B. A. (1981). Mineral processing technology – An Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Pergamon press

19. Kawatra, S. K. (2006). Advances in comminution. United States of America: SME.
20. http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/fd/zouboulis/ch15_Elattosi_megethous_sterewn2_A4.pdf
21. Σιμιτζής, Ι. Χ. (2009). Βασικές εργαστηριακές ασκήσεις υλικών. Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε. Μ. Π., Αθήνα.
22. Levin, J. (1989). Observation on the Bond standard grindability test, and a proposal for a standard grindability test for fine materials. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 89 (1), 13-21.
23. Magdalinovic, N. (1989). A procedure for rapid determination of the Bond Work Index. Int. J. Min. Proc., 27, 125-132.
24. CM 2200, Fall 2007. Grinding energy calculations using the Bond equation
25. <http://www.goodquarry.com/article.aspx?id=156&navid=19>
26. www. Doering-sinn.de

Βιογραφικό σημείωμα

Δανάη Τσακίρη
19 Νοεμβρίου 1987
Στάη 6, Νέο Ψυχικό, Αθήνα
E-mail: danaitsakiri@yahoo.gr Τηλ: 6947245931

Εκπαίδευση

- | | |
|--------------------|--|
| 2010-σήμερα | Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
MSc: Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών |
| 2005-2010 | Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, βαθμός διπλώματος 9,08/10 (Άριστα). |
| 2002-2005 | 1ο Ενιαίο Λύκειο Νέου Ψυχικού, Απολυτήριο, Μέσος Όρος 18,7/20 (Άριστα) |
-

Εργασίες - Μελέτες

- | | |
|----------------------|---|
| 09/11 – 02/12 | Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακή Εργασία
«Επίδραση της Κοκκομετρίας Ασβεστολιθικών Αδρανών στον Προσδιορισμό του Δείκτη Έργου Bond» |
| 02/10 – 11/10 | Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία
«Επιφανειακή Κατεργασία με laser Κράματος Αλουμινίου 5754», βαθμός 10 |
| 06/09 – 08/09 | Ελληνικό Κέντρο Ερεύνες Μετάλλων (ΕΛΚΕΜΕ), Εργασία Πρακτικής Άσκησης
«Πειραματικές Δοκιμές Ομογενοποίησης Μπιγιέτας Κράματος Σειράς 6xxx για Παραγωγή Προφίλ Αυτοκινητοβιομηχανίας», βαθμός 9 |
-

Επαγγελματική

Εμπειρία

- | | |
|----------------------|--|
| 06/09 – 08/09 | Ελληνικό Κέντρο Ερεύνες Μετάλλων (ΕΛΚΕΜΕ), Τμήμα Χαρακτηρισμού των Υλικών
Πρακτική Άσκηση
Μελέτη κραμάτων αλουμινίου και ορείχαλκου |
|----------------------|--|
-

Σεμινάρια - Συνέδρια

- | | |
|------------------|---|
| 02/11 | Συμμετοχή στη διημερίδα με τίτλο «Διαχείριση Ποιότητας – Πιστοποίηση» |
| 2009-2010 | Σεμινάρια Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας ΕΜΠ |
| 10/09 | 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Κεραμικών |
-

2002-2003	Συμμετοχή με επιτυχία στο Πιλοτικό Πρόγραμμα «Επιχειρηματικότητα των νέων», το οποίο υλοποιήθηκε από το Παιδαγωγικό Ινστιτούτο σε συνεργασία με τον ΣΕΒ, κατά το Σχολικό Έτος 2002 – 2003.
Πρόσθετες Πληροφορίες	
Ξένες Γλώσσες	Αγγλικά (Proficiency), Γαλλικά (Πολύ καλή γνώση)
Γνώσεις Η/Υ	Microsoft Word 2003 GR-ATES, Microsoft Excel 2003 GR-ATES, Internet applications IE 6.0 και OE 6.0 GR-ATES, Πτυχίο : Key CERT IT Initial
02/12	Συμμετοχή στις εξετάσεις του ΤΕΕ για τη χορήγηση της άδειας ασκήσεως του επαγγέλματος
Επιπλέον Στοιχεία	Κάτοχος διπλώματος οδήγησης Β΄ κατηγορίας Σπουδές στο πιάνο
<u>Συστάσεις διαθέσιμες εάν ζητηθούν</u>	