



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**Διπλωματική εργασία**

**Επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στη λειοτρίβηση βωξίτη**

---

**Καλαρίδης Χρήστος**

Εξεταστική επιτροπή

Ευάγγελος Πετράκης, Επ. Καθηγητής (Επιβλέπων)

Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής

Κων/νος Κομνίτσας, Καθηγητής

Χανιά 2023

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΩΞΙΤΗΣ.....	8
1.1 Βωξίτης.....	8
1.2 Χρήσεις βωξίτη .....	8
1.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες.....	10
1.4 Ορυκτολογική σύσταση.....	10
1.5 Χημική σύσταση βωξίτη.....	11
1.5 Γένεση.....	12
1.6 Κοιτάσματα βωξίτη .....	13
1.7 Βωξιτικά αποθέματα.....	14
1.8 Ελληνικοί βωξίτες .....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	18
2.1 Κατάτμηση.....	18
2.1.1 Δυνάμεις κατάτμησης .....	19
2.1.2 Μηχανές θραύσης.....	19
2.2 Μηχανές λειοτρίβησης.....	21
2.3 Παράμετροι λειοτρίβησης.....	22
2.4 Κινητικά Μοντέλα.....	24
2.4.1. Κινητικό μοντέλο – Μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού.....	24
2.4.2 Ρυθμός θραύσης.....	25
2.4.3 Συνάρτηση Θραύσης.....	26
2.5 Επίδραση του μεγέθους των σφαιρών .....	28
2.5.1 Μέγεθος σφαιρών και ρυθμός θραύσης .....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ.....	33
3.1 Γενικά στοιχεία για τα μικροκύματα .....	33
3.2 Συστήματα μικροκυματικής θέρμανσης .....	34
3.3 Πλεονεκτήματα μικροκυμάτων σε σχέση με την απλή θέρμανση .....	35
3.4 Αλληλεπίδραση υλικών και μικροκυμάτων .....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΥΡΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ .....	37

4.1 .Θερμική επεξεργασία μεταλλεύματος .....	37
4.2 Επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στην ικανότητα λειοτρίβησης των ορυκτών.....	38
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ</i> .....	42
5.1 Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος .....	42
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΩΞΙΤΗ</i> .....	44
6.1 Γεωλογία περιοχής δείγματος .....	44
6.2 Ορυκτολογική ανάλυση δειγμάτων με Περιθλασίμετρο Ακτινών – X (XRD) .....	45
6.3 Χημική ανάλυση (XRF).....	46
6.4 Κοκκομετρική ανάλυση.....	47
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</i> .....	49
7.1 Κοσκίνιση-Θραύση .....	49
7.2 Εργαστηριακός σφαιρόμυλος.....	51
7.3 Φούρνος μικροκυμάτων.....	52
7.4 Συσκευή κοσκίνισης .....	52
7.5 Κοκκομετρικός αναλυτής laser .....	54
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</i> .....	56
8.1 Αθροιστικό διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει μεγέθους.....	56
8.1.1 Τροφοδοσία -3.35 + 1.70 mm.....	56
8.1.2 Τροφοδοσία -0.850 + 0.425 mm.....	59
8.1.3 Τροφοδοσία -0.212 + 0.106 mm.....	62
8.2 Επίδραση του επιπέδου ισχύος των μικροκυμάτων στο μέγεθος του προϊόντος .....	65
8.3 Η επίδραση της θέρμανσης.....	67
8.4 Επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στο μέγεθος $d_{80}$ των προϊόντων λειοτρίβησης.....	69
8.4.1 Τροφοδοσία -3.35 + 1.70 mm .....	69
8.4.2 Τροφοδοσία -0.850 + 0.425 mm.....	70
8.4.3 Τροφοδοσία -0.212 + 0.106 mm.....	71
8.5 Προσδιορισμός ρυθμού θραύσης .....	72
8.5.1 Τροφοδοσία -3.35 + 1.70 mm.....	73
8.5.2 Τροφοδοσία -0.850 + 0.425 mm.....	75
8.5.3 Τροφοδοσία -0.212 + 0.106 mm.....	77
8.6 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας.....	79
8.7 Σχέση μέγιστου ρυθμού θραύσης με μικροκυματική ισχύ.....	81
8.8 Συνάρτηση θραύσης .....	84
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</i> .....	88

<i>BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</i> .....	90
Ελληνική βιβλιογραφία .....	90
Διεθνής βιβλιογραφία .....	91
Ηλεκτρονική βιβλιογραφία .....	95

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την εποπτεία του Επ. Καθηγητή κ. Ε. Πετράκη. Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της λειοτρίβησης βωξίτη από την περιοχή της Φωκίδας σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο με χρήση μικροκυματικής ακτινοβολίας. Μέρος των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας.

Το συγκεκριμένο θέμα επιλέχθηκε διότι ο βωξίτης αποτελεί σημαντικό εξαγωγίμο προϊόν της ελληνικής μεταλλευτικής βιομηχανίας. Επιπλέον χρησιμοποιείται και στην εγχώρια μεταλλουργία για την παραγωγή αλουμίνας και αλουμινίου.

Η διαδικασία μείωσης του μεγέθους των υλικών σε μύλους, ειδικά στο στάδιο της λειοτρίβησης, έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών όλα αυτά τα χρόνια. Αυτό συμβαίνει λόγω της μη αποδοτικότητας της διαδικασίας λειοτρίβησης αλλά και επειδή η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επ. Καθηγητή κύριο Ευάγγελο Πετράκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία και δίνοντάς μου την ευκαιρία να την εκπονήσω υπό την επίβλεψη του.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Κομνίτσα για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, όπως επίσης, και τον Καθηγητή Μιχάλη Γαλετάκη που δέχτηκε να είναι μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Αντώνη Στρατάκη και την κ. Πάολα Ροτόντο για την πολύτιμη βοήθεια τους στις αναλύσεις XRD και XRF.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί τα τελευταία χρόνια με την μελέτη της διαδικασίας της λειοτρίβησης. Είναι γνωστό ότι η λειοτρίβηση με σφαιρόμυλο είναι μια πολύ ενεργοβόρα διεργασία και γι' αυτό τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες μείωσης των ενεργειακών της απαιτήσεων, γιατί μια μικρή μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται οδηγεί σε μείωση του κόστους ανά μονάδα βάρους του υλικού. Η παρούσα διπλωματική εστιάστηκε στη μελέτη της χρήσης της μικροκυματικής ενέργειας στην λειοτρίβηση του βωξίτη.

Αυτή η διπλωματική εργασία μελετά την επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στη λειοτρίβηση του βωξίτη Φωκίδας. Η θέρμανση με μικροκύματα μπορεί να είναι μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση στη συμβατική θέρμανση καθώς συμβάλλει στην αύξηση της ευθραυστότητας του υλικού και στη μείωση της κατανάλωσης της συνολικής ενέργειας.

Για αυτόν τον λόγο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λειοτρίβησης σε συγκεκριμένα κοκκομετρικά κλάσματα βωξίτη με τη χρήση του εργαστηριακού σφαιρόμυλου. Ειδικότερα, το υλικό υποβλήθηκε σε θέρμανση σε φούρνο μικροκυμάτων ισχύος 400 W και 800 W και στην συνέχεια έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν όταν το μέταλλευμα δεν είχε υποβληθεί σε μικροκυματική ακτινοβολία (0 W). Σύμφωνα με την διαδικασία τα κλάσματα τροφοδοσίας που επιλέχθηκαν λειοτριβήθηκαν σε συγκεκριμένους χρόνους (0.5, 2, 4, 16 και 32 min) και τα προϊόντα που παρήχθησαν μελετήθηκαν με τη χρήση των κινητικών μοντέλων λειοτρίβησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το υλικό θραύεται ευκολότερα με την επεξεργασία στα μικροκύματα και συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η ένταση της μικροκυματικής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται και βέλτιστη θραύση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΩΞΙΤΗΣ

### 1.1 Βωξίτης

Το 1844 ο Γάλλος επιστήμονας Dufrenoy χαρακτήρισε το ορυκτό που μελετήθηκε το 1821 από το Γάλλο χημικός Berthier στο χωριό Les Baux, της Νότιας Γαλλίας ως βωξίτη. Η εκμετάλλευση του βωξίτη άρχισε το 1860 στην Auriol (<https://bauxite.world-aluminium.org/mining/process/>). Κατά τον 19ο αιώνα, η παραγωγή αλουμίνας από βωξίτη γινόταν αρχικά με την μέθοδο του Γάλλου μεταλλειολόγου Louis Le Chatelier (1815-1873), η οποία συνίστατο στη θερμική κατεργασία της πρώτης ύλης σε τρία στάδια. Η διεργασία κατέληγε στην καταβύθιση υδροξειδίου του αργιλίου ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) σχετικά χαμηλής καθαρότητας. Στην συνέχεια η παραγωγή του αλουμινίου από το  $\text{Al}(\text{OH})_3$  γινόταν με την μέθοδο Deville στο εργοστάσιο στην Salindres. Αρχικά η αλουμίνα χρησιμοποιούνταν στην χρωματοβιομηχανία αλλά σταδιακά με την ανάπτυξη της μεθόδου Hall-Heroult έγινε η πρώτη ύλη για την ηλεκτρολυτική παρασκευή αλουμινίου. Παράλληλα ο εξορυσσόμενος λευκός βωξίτης προοριζόταν για την παραγωγή αλουμινίου, πυρότουβλων και τσιμέντου ταχείας πήξης, δηλαδή για μη μεταλλουργικές χρήσεις (<http://www.alhellas.com>)

Στην εποχή μας για την παραγωγή άνυδρης αλουμίνας έχει πλέον επικρατήσει παγκοσμίως η μέθοδος Bayer η οποία χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη διάφορες ποιότητες βωξίτη. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τον Αυστριακό χημικό Karl Josef Bayer (1847-1904).

### 1.2 Χρήσεις βωξίτη

Όπως αναφέρθηκε η βασικότερη χρήση του βωξίτη είναι για την παραγωγή αλουμίνας και αλουμινίου. Περίπου το 85% της παγκόσμιας παραγωγής βωξίτη χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλουμίνας που προορίζεται για την παραγωγή αλουμινίου. Άλλο ένα 10% χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλουμίνας, η οποία προορίζεται για παραγωγή χημικών, λειαντικών και πυράντοχων προϊόντων. Χονδρικά, τέσσερις τόνοι βωξίτη χρειάζονται για να παραχθούν δύο τόνοι αλουμίνας, οι οποίοι με την σειρά τους θα δώσουν ένα τόνο αλουμίνιο ([www.aluminiumleader.com](http://www.aluminiumleader.com)).



Ο βωξίτης αποτελεί, επίσης, πρώτη ύλη για την παραγωγή αλουμινούχων τσιμέντων με υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο. Ένας σκληρός βωξίτης, συνήθως διασπορικός, όταν τήκεται σε ειδικές καμίνους μαζί με κωκ και ασβεστόλιθο, μετατρέπεται σε αργιλική τηκτή κονία η οποία αποτελεί τσιμέντο ταχείας πήξεως. Ο βωξίτης της περιοχής Παρνασσού χρησιμοποιείται στην παραγωγή αλουμινούχων τσιμέντων λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε σίδηρο. Τα αλουμινούχα τσιμέντα επιτυγχάνουν υψηλή αντοχή σε αρχικό στάδιο, σε συνδυασμό με πυρίμαχες ιδιότητες και αντοχή στα οξέα. Παρέχουν καλύτερη ανθεκτικότητα σε θεϊκό, έντονα χημικό και λειαντικό περιβάλλον. Χρησιμοποιούνται επίσης σε σκυρόδεμα με πυρίμαχες ιδιότητες όπου συνδυάζουν το πλεονέκτημα χύτευσης σύνθετων σχημάτων σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, με απόδοση σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 1600°C (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-bauxite-alumina.pdf>).

Στα τσιμέντα τύπου Portland ο βωξίτης χρησιμοποιείται ως μία πλούσια πηγή οξειδίου του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) για τη ρύθμιση της τροφοδοσίας και για την παραγωγή clinker. Στα πλεονεκτήματα του βωξίτη της περιοχής της Γκιώνας συγκαταλέγεται η χαμηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο, η υψηλή περιεκτικότητά του σε  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  και η περιεκτικότητά του σε αλκάλια και  $\text{MgO}$  κ.α. (Peys, 2022).

Επίσης χρησιμοποιείται για την παραγωγή ορυκτών ινών. Ο πετροβάμβακας αποτελείται από ίνες προερχόμενες από μίγμα ορυκτών και πετρωμάτων (ηφαιστειογενή πετρώματα, ασβεστόλιθος, δολομίτης και βωξίτης), το οποίο φρύσσεται σε ηλεκτρικό φούρνο. Η συγκόλληση των ινών μεταξύ τους επιτυγχάνεται με την προσθήκη φαινολικής ρητίνης. Στη συνέχεια εμποτίζονται με σιλικόνη για να μειωθεί η υδροαπορροφητικότητα με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμομονωτικής ικανότητας. Ο πετροβάμβακας είναι κατάλληλος για θερμομόνωση, ηχομόνωση και πυροπροστασία στην οικοδομική, στη βιομηχανία, σε πλοία, οχήματα και οικιακές συσκευές. Σε περίπτωση που η περιεκτικότητα της τροφοδοσίας της καμίνου σε  $\text{Al}_2\text{O}_3$  δεν είναι επαρκής προστίθεται βωξίτης. Οι ορυκτές ίνες με υψηλή περιεκτικότητα σε αλουμίνα παρουσιάζουν βελτιωμένη βιοδιαλυτότητα και καλύτερες πυρίμαχες ιδιότητες. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του βωξίτη της ζώνης Παρνασσού - Γκιώνας για την παραγωγή ορυκτών ινών συγκαταλέγονται, η υψηλή αντοχή σε μηχανική καταπόνηση, η ποικιλία της κοκκομετρίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές των πελατών κ.λπ. (Γρίβα, 2012)

Τέλος, άλλες του χρήσεις είναι στην μεταλλουργία σιδήρου, σε καταλύτες πυρόλυσης πετρελαίου και στην επίστρωση οδοστρωμάτων και διαδρόμων αεροδρομίων.

### 1.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες

Ο βωξίτης μπορεί να εντοπιστεί με διάφορα χρώματα στη φύση, γεγονός που οφείλεται στα οξείδια του σιδήρου. Έτσι, όσο πιο πλούσιο είναι το πέτρωμα σε οξείδια του σιδήρου τόσο πιο κόκκινο είναι και το χρώμα του. Πιο συγκεκριμένα, το κόκκινο ή καστανοκόκκινο χρώμα του βωξίτη οφείλεται στην ύπαρξη αιματίτη, ενώ τον κίτρινο χρωματισμό του τον οφείλει στην ύπαρξη γκαιτίτη. Όταν τα ποσοστά οξειδίων του σιδήρου είναι μικρά (2-5%) το χρώμα του είναι σε γκριζους τόνους, ενώ σε περίπτωση που απουσιάζουν το πέτρωμα είναι λευκό (Νικολάου, 1979). Το ειδικό του βάρος κυμαίνεται από 2.7 έως 3.5 και αυτό ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε οξείδια του σιδήρου. Η υφή του βωξίτη είναι στιφρή, ωλιθική ή πισσολιθική. Διαλύεται μόνο σε οξέα ή σε καυστικά αλκάλια υψηλών συγκεντρώσεων ανάλογα με τη σύσταση του. Τέλος, παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες (Μαραβέλιας, 2014).

Η διαλυτότητα του βωξίτη σε οξέα ή αλκάλια ποικίλει ανάλογα με την ορυκτολογική σύνθεση σε σχέση με τα ένυδρα οξείδια του αργιλίου. Είναι ανθεκτικός σε υψηλές θερμοκρασίες και για αυτό το λόγο χαρακτηρίζεται ως πυρίμαχος. Όταν θερμανθεί μέχρι την θερμοκρασία που πλησιάζει το σημείο τήξης του, παίρνει κρυσταλλική μορφή αποκτώντας συγχρόνως υψηλή σκληρότητα που του δίνει και λειαντικές ιδιότητες (Μαραβέλιας, 2014).

### 1.4 Ορυκτολογική σύσταση

Η ορυκτολογική σύσταση των βωξιτών ποικίλλει ανάλογα με τον τόπο και τον τρόπο προέλευσής τους. Αυτό όμως που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η ορυκτολογική φάση στην οποία βρίσκονται τα ορυκτά του αργιλίου και του σιδήρου, γιατί από αυτό καθορίζονται οι συνθήκες κατεργασίας τους με τη μέθοδο Bayer. Στον παρακάτω Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που βρίσκονται τα διάφορα οξείδια στο βωξίτη (Πασπαλιάρης, 1985).

Πίνακας 1.1: Ορυκτολογικές φάσεις βωξιτών

Κύριο	Ορυκτολογική	Χημικός τύπος
-------	--------------	---------------

στοιχείο	φάση	
Al	Γκιψίτης	Al(OH) <sub>3</sub>
	Βαιμίτης	AlO(OH)
	Διάσπορο	AlOOH
	Αλουμίνιο-Γκαιτίτης	Al <sub>2</sub> OOH
	Αλουμίνιο-Αιματίτης	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Fe	Γκαιτίτης	FeOOH
	Αιματίτης	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Ιλμενίτης	FeTiO <sub>3</sub>
	Διάσπορο	FeOOH
Ti	Ανατάσης	TiO <sub>2</sub>
	Ρουτίλιο	TiO <sub>2</sub>
	Ιλμενίτης	FeTiO <sub>3</sub>
Si	Καολινίτης	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>
	Χαλαζίας	SiO <sub>2</sub>
Ca	Ασβεστίτης	CaCO <sub>3</sub>

### 1.5 Χημική σύσταση βωξίτη

Ο βωξίτης είναι ένα μέταλλευμα χωρίς συγκεκριμένη χημική σύσταση, περιέχει όμως σημαντική ποσότητα οξειδίου του αργιλίου Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Είναι ιζηματογενές πέτρωμα. Τα βωξιτικά κοιτάσματα ανήκουν σε 2 κατηγορίες. Τα λατεριτικά (82%) και τα καρστικά (12%). Τα πρώτα δημιουργούνται in situ από τη λατεριτική αποσάθρωση πετρωμάτων πλούσιων σε αργιλοπυριτικά ορυκτά, ενώ τα δεύτερα από τη διάβρωση των λατεριτικών βωξιτών, τη μεταφορά του υλικού και την απόθεσή του ως κλαστικό ίζημα σε παγίδες καρστικών ασβεστολίθων. Στους λατερίτες η κύρια μάζα τους αποτελείται από γκιψίτη και υδραργυλίτη (γ-Al(OH)<sub>3</sub>). Περιέχουν Ti σε ποσοστό που αυξάνεται ανάλογα με το Al, ενώ τα ποσοστά SiO<sub>2</sub>, και των αλκαλικών γαιών είναι πολύ χαμηλά. Τα καρστικά αποτελούνται κατά κύριο λόγο από βαιμίτη γ-Al(OH) ή διάσπορο α-AlO(OH). Η περιεκτικότητα σε Fe είναι πολύ μεγάλη. Η μέση περιεκτικότητα ενός τυπικού κοιτάσματος βωξίτη ανέρχεται σε 35-65% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2-20% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2-10% SiO<sub>2</sub>, 1-3% TiO<sub>2</sub> και τέλος 10% H<sub>2</sub>O. Τα κοιτάσματα βωξίτη που

έχουν οικονομική αξία περιέχουν  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 45\%$  ενώ για να είναι μεταλλουργικά εκμεταλλεύσιμα πρέπει το ποσοστό αυτό να μην είναι μικρότερο του 50%. Χημικά το κύριο συστατικό του είναι τα ένυδρα οξείδια του αργιλίου, ενώ περιέχει και οξείδια σιδήρου, πυριτίου και τιτανίου, ανθρακικό ασβέστιο στην μορφή του ασβεστίτη καθώς και ένα μεγάλο πλήθος από άλλες ενώσεις σε μικρές περιεκτικότητες. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα στοιχεία που περιέχονται στο βωξίτη καθώς και μία συνήθης διακύμανση των αντίστοιχων περιεκτικοτήτων.

**Πίνακας 1.2: Χημική ανάλυση ενός τυπικού βωξίτη**

Χημική Ένωση ή Στοιχείο	Περιεκτικότητα %
Απώλεια Πύρωσης	10-30
$\text{Al}_2\text{O}_3$	40-60
$\text{SiO}_2$	1-15
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2-30
$\text{TiO}_2$	1-5
$\text{CaO}$	0.2-4
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.01-0.25
Ga	~ 0.1
$\text{Mn}_2\text{O}_3$	0.05-0.3
$\text{ZnO}$	0-0.04
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.04-0.3
$\text{V}_2\text{O}_5$	0.01-0.14
Zr,Nb	~0.01

### 1.5 Γένεση

Για την γένεση των βωξιτικών κοιτασμάτων επικρατούν δύο θεωρίες :

Θεωρία της αλλόχθονης γένεσης: Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το βωξιτικό κοίτασμα σχηματίστηκε σε κάποιο άλλο σημείο από αυτό που βρίσκεται σήμερα με τη βοήθεια της λατεριτικής αποσάθρωσης. Στη συνέχεια διαβρώθηκε, μεταφέρθηκε και αποτέθηκε στη σημερινή του θέση με αλλουβιακή μορφή. Από την παραπάνω διαδικασία ο βωξίτης που σχηματίζεται είναι ίζημα λατεριτικό και αλλόχθονο. Τέτοια κοιτάσματα χαρακτηρίζονται ως λατεριτικά (Μουντράκης, 2010).

Θεωρία της αυτόχθονης γένεσης: Με βάση αυτή τη θεωρία, ο βωξίτης προήλθε από την επί τόπου (in situ) αποσάθρωση των ανθρακικών πετρωμάτων και ειδικότερα των ασβεστολίθων. Από την αποσάθρωση αυτή, που είχε ως αποτέλεσμα την διαλυτοποίηση και απομάκρυνση των ανθρακικών ορυκτών, παρέμειναν, ως

υπόλειμμα, τα αδιάλυτα αργιλοπυριτικά ορυκτά. Στη συνέχεια, τα αργιλοπυριτικά αυτά ορυκτά υπέστησαν λατεριτίωση στον τόπο τους με αποτέλεσμα τον σχηματισμό των βωξιτικών κοιτασμάτων. Συνεπώς πρόκειται για έναν αλουβιακό σχηματισμό σε συνθήκες τροπικού κλίματος (Μουντράκης, 2010).

Η επικρατέστερη θεωρία για τα κοιτάσματα στην περιοχή Παρνασσού-Γκιώνας, είναι αυτή της αλλόχθονης γένεσης. Συγκεκριμένα, το βωξιτικό κοίτασμα σχηματίστηκε σε κάποια άλλη τοποθεσία από αυτή που το συναντούμε σήμερα. Η δημιουργία του κοιτάσματος οφείλεται στην λατεριτική αποσάθρωση οφιολίθων και άλλων αργιλοπυριτών πετρωμάτων. Έστερα το υλικό που προήλθε από τη λατεριτίωση διαβρώθηκε, μεταφέρθηκε και αποτέθηκε σε αβαθείς ασβεστολιθικές λεκάνες (που σχηματίστηκαν σε περιόδους του Μεσοζωϊκού και Παλαιογενούς) στην σημερινή του θέση σε αλλουβιακή μορφή. Από τη διαδικασία αυτή προκύπτει ότι ο συγκεκριμένος βωξίτης είναι ίζημα λατεριτικό και αλλόχθονο. Ένα υγροτροπικό κλίμα συνέτεινε στην αποσάθρωση και εξαλλοίωση των μητρικών πετρωμάτων σε οξείδια του αργιλίου και του σιδήρου (Κατωπόδης, 2011).

## 1.6 Κοιτάσματα βωξίτη

Οι βωξίτες απαντούν με τη μορφή τεσσάρων τύπων κοιτασμάτων:

Καλύμματα κοντά ή πάνω στην επιφάνεια της Γης (blanket deposits): Είναι σχεδόν οριζόντια κοιτάσματα που καλύπτονται από μικρό πάχος υπερκείμενων υλικών. Τα κοιτάσματα αυτά μπορεί να εκτείνονται οριζόντια για πολλά χιλιόμετρα, ενώ το πάχος τους κυμαίνεται από 1 έως 20 μέτρα. Τα κοιτάσματα αυτά περιέχουν ένα στρώμα συμπαγούς βωξίτη με άφθονο σίδηρο στα ανώτερα τμήματά τους. Μεγάλα κοιτάσματα απαντούν στην Αυστραλία, τη Γουϊνέα, τη Νότιο Αμερική και την Ινδία (Χρηστίδης, 2012).

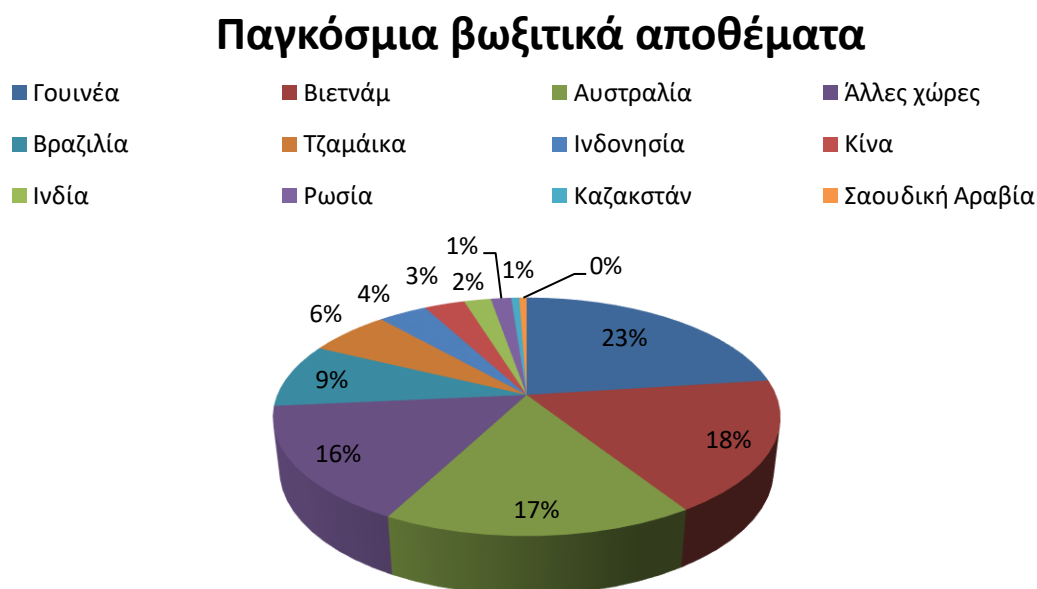
Θύλακες και ακανόνιστα στρώματα (pocket deposits): Βρίσκονται κυρίως σε καρστικά έγκοιλα, και μερικές φορές σε πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα ή σε αργίλους. Το πάχος τους κυμαίνεται από 0.5 έως 30 μέτρα. Μπορεί να είναι μεμονωμένα είτε συνενωμένα σώματα, αφού τα καρστικά έγκοιλα σε πολλές περιπτώσεις συνενώνονται. Η μετάβαση τους προς τα υπερκείμενα πετρώματα είναι απότομη, βρίσκονται στην Τζαμάικα, τις χώρες της Νοτίου Ευρώπης κ.α..

Στρώματα ή φακοί σε ιζηματογενείς ή ηφαιστειοιζηματογενείς ακολουθίες (interlayered deposits): Το χαρακτηριστικό αυτών των κοιτασμάτων, τα οποία κατά τα άλλα μοιάζουν με αυτά της προηγούμενης κατηγορίας, είναι ότι των βωξιτών

υπέρκεινται νεότερα ιζήματα ή ηφαιστειακά πετρώματα. Λόγω του ενταφιασμού είναι συνήθως πιο συμπαγή από τα προηγούμενα, βρίσκονται στις ΗΠΑ, τη Γουιάννα, τη Ρωσία, την Κίνα, την Ιρλανδία, τη Νότιο Ευρώπη και την Τουρκία. Στις χώρες τις Νοτίου Ευρώπης και την Τουρκία τα περιβάλλοντα πετρώματα έχουν ρηγματωθεί και πτυχωθεί, ενώ τα ορυκτά γκιψίτης και βαιμίτης έχουν μετατραπεί μερικώς σε διάσπορο και κατά τα τόπους σε κορούνδιο μεταβάλλοντας την ποιότητα του βωξίτη. Κοιτάσματα που προκύπτουν από διάβρωση άλλων κοιτασμάτων βωξίτη (detrital deposits): Τα κοιτάσματα αυτά προκύπτουν από συσσώρευση βωξιτικού υλικού που διαβρώθηκε από άλλες θέσεις. Τέτοια κοιτάσματα απαντούν στα Αρκάνσας των ΗΠΑ (Χρηστίδης, 2012).

### 1.7 Βωξιτικά αποθέματα

Τα αποδεδειγμένα αποθέματα του είναι 32 δισ. τόνοι τα οποία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1, βρίσκονται στην Γουινέα (23%), Βιετνάμ (18%), Αυστραλία (17%), Βραζιλία (9%), Τζαμάικα (6%). Άλλα σημαντικά αποθέματα βρίσκονται στην Κίνα, την Ινδονησία και την Ελλάδα (<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/bauxite-and-alumina-statistics-and-information>).

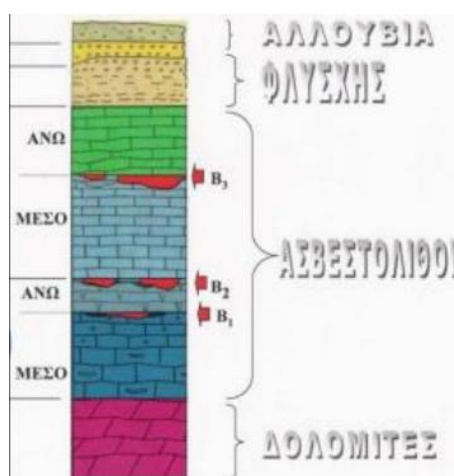


Εικόνα 1.1: Παγκόσμια βωξιτικά αποθέματα

### 1.8 Ελληνικοί βωξίτες

Στην Ελλάδα απαντούν καρστικοί βωξίτες στις ζώνες Παρνασσού-Γκιώνας (Εικόνα 1.3) και Ανατολικής Ελλάδας μέσα σε ασβεστόλιθους. Βωξιτικές εμφανίσεις χωρίς οικονομική σημασία απαντούν στη ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως. Στη ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας διακρίνονται τρεις βωξιτικοί ορίζοντες όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2 (Κατσίκατσος, 1992).

Η εξόρυξη του βωξίτη στη χώρα μας γίνεται κατά κύριο λόγο με υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Τα βέβαια αποθέματα βωξίτη της Ελλάδας ανέρχονται περίπου σε 130 εκατ. τόνους με τα 100 εκατ. από αυτά να βρίσκονται στο Νομό Φωκίδας (orykta.gr). Η ετήσια παραγωγή ξεπερνά τους 1.2 εκατ. τόνους. Οι εξαγωγές Ελληνικού βωξίτη ξεπέρασαν τα 18 εκατ. € το 2021. Στην Ελλάδα τα σημαντικότερα αποθέματα βρίσκονται στη γεωτεκτονική ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας (Γκιώνα – Ελικώνας, Οίτη, Παρνασσός). Η γεωλογική ιδιαιτερότητα του Παρνασσού συνίσταται στα πλούσια κοιτάσματα βωξίτη, τα οποία χωρίζονται σε τρεις διαδοχικούς στρωματογραφικούς ορίζοντες μέσα στους ασβεστόλιθους.



Εικόνα 1.2: Βωξιτικοί ορίζοντες Παρνασσού Γκιώνας (Πηγή: Κούκης, 2009)

Στη ζώνη της Ανατολικής Ελλάδος απαντούν δύο ορίζοντες βωξιτών. Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει τα κοιτάσματα σε Καλλίδρομο, Λοκρίδα, Δομοκό, Ν.Α. Θεσσαλία και Μάνδρα-Ελευσίνα.

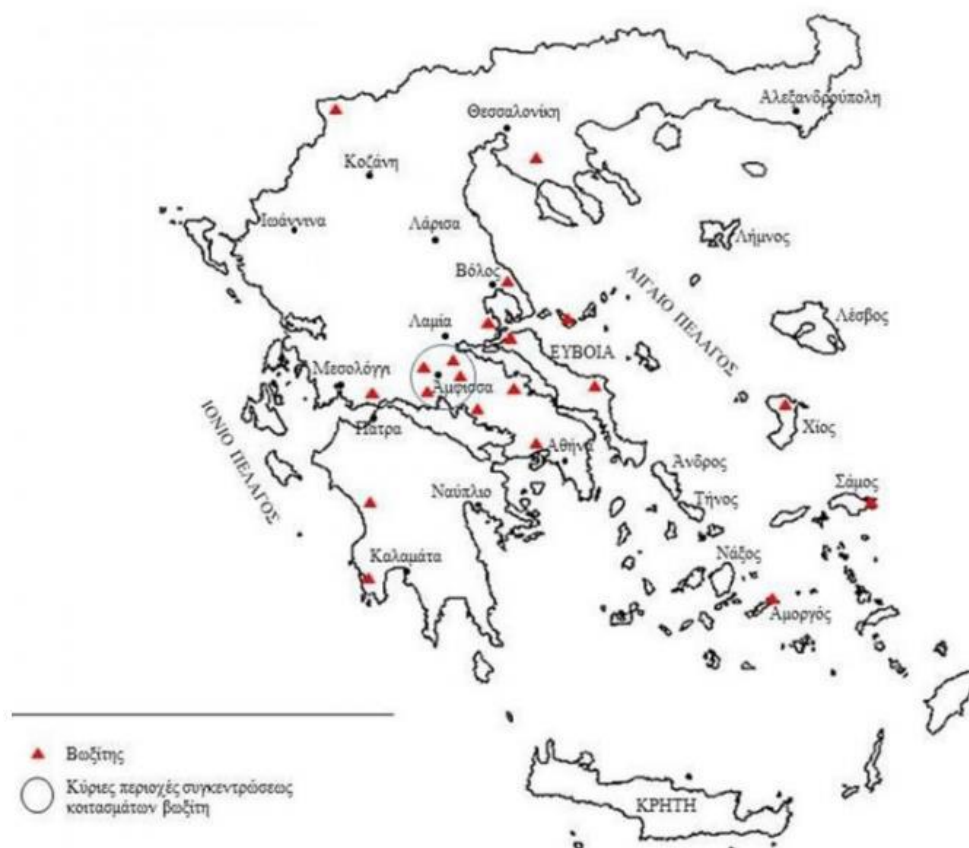
Η Ελλάδα είναι ο μεγαλύτερος βωξιτοπαραγωγός χώρα στην Ε.Ε. και ο βωξίτης είναι από τα σημαντικότερα εξαγωγικά προϊόντα στην χώρα. Οι εταιρίες που

δραστηριοποιούνται στην εξόρυξη βωξίτη στην χώρα μας είναι η Imerys και η Δελφοί Δίστομο Α.Ε.

Μέσω της εξαγοράς της Kerneos (ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2017), η Imerys κατέχει την ΕΛΜΙΝ Βωξίτες που δραστηριοποιείται στην εξόρυξη και εμπορία βωξίτη με ένα μεγάλο αριθμό ιδιόκτητων και μισθωμένων παραχωρήσεων στην κεντρική Ελλάδα. Η Imerys εκμεταλλεύεται τα μεταλλεία της περιοχής του νομού Φωκίδας, εξάγοντας σχεδόν το 40% της παραγωγής της στην Ευρώπη, την Αφρική και την Αμερική. Η παραγωγή της ανέρχεται σε 800 χιλ. τόνους το χρόνο από την οποία το μεγαλύτερο ποσοστό (60%) διατίθεται στην «Αλουμίνιο της Ελλάδος» (ΑτΕ) και το υπόλοιπο 40% εξάγεται για την παραγωγή κυρίως αλουμινούχων τσιμέντων και δευτερευόντως σε χαλβουργίες του εξωτερικού, τσιμεντοβιομηχανίες τυπου Portland κλπ. ([www.ima-europe.eu](http://www.ima-europe.eu)).

Η «Δελφοί Δίστομο ΑΜΕ», θυγατρική της «Αλουμίνιο της Ελλάδος» (ΑτΕ), είναι η δεύτερη μεγαλύτερη εταιρεία παραγωγής βωξίτη στην Ελλάδα. Τα μεταλλεία που εκμεταλλεύεται βρίσκονται κυρίως σε περιοχές των νομών Φωκίδας και Βοιωτίας. Η παραγωγή της ανέρχεται στους 570.000 τόνους βωξίτη ετησίως και διατίθεται στην «ΑτΕ» για την τροφοδοσία του μεταλλουργικού εργοστασίου παραγωγής αλουμίνας και αλουμινίου, στην περιοχή Παραλίας Διστόμου Βοιωτίας.





Εικόνα 1.3: Χάρτης των κύριων περιοχών παρουσίας κοιτασμάτων και εμφανίσεων βωξίτη στον Ελληνικό χώρο. Σε κύκλο η περιοχή Γκιώνας, Οίτης και Παρνασσού, στην οποία υπάρχει εξορυκτική δραστηριότητα. ([www.orykta.gr](http://www.orykta.gr))

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 Κατάτμηση

Κατάτμηση καλείται η διαδικασία της ελάττωσης του μεγέθους των τεμαχίων μεταλλεύματος, ορυκτού ή πετρώματος σε μεγέθη κατάλληλα για τον εμπλουτισμό (αποδέσμευση), την κατευθείαν μεταλλουργική επεξεργασία ή τη βιομηχανική χρήση του υλικού (Σταμπολτζής, 1994). Ο όρος κατάτμηση περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ελάττωσης του μεγέθους των υλικών (θραύση και λειοτρίβηση) ανεξάρτητα από το αρχικό και τελικό μέγεθος των τεμαχίων (Σταμπολιάδης, 2008).

Η ελάττωση του μεγέθους πραγματοποιείται συνήθως σε 2 στάδια. Από μέγεθος 10-2 mm ονομάζεται θραύση, ενώ για πιο λεπτόκοκκα προϊόντα ονομάζεται λειοτρίβηση. (Πίνακας 2.1) (Σταμπολιάδης, 2008).

Πίνακας 2.1: Στάδια κατάτμησης, μεγέθη τεμαχιδίων τροφοδοσίας και προϊόντων

Στάδια	Φάσεις	Μέγεθος τεμαχιδίων mm	
		Τροφοδοσία	Προϊόν
Θραύση	α.Πρωτογενής β.Δευτερογενής	1200-200	300-60
		250-90	80-25
		100-30	30-8
	γ.Τριτογενής	35-5	10-2
Λειοτρίβηση	α.Χονδρομερής	25-2	1-0,5
	β.Λεπτομερής	10-2	0.5-0.074
	γ.Άλεση	10-2	-0.074 ή -0.040

Για την επίτευξη της κατάτμησης είναι απαραίτητο να γίνει εφαρμογή μηχανικών δυνάμεων στα τεμαχίδια οι οποίες πρέπει να υπερβαίνουν τις δυνάμεις συνοχής του υλικού του τεμαχιδίου. Η συμπεριφορά των υλικών ως προς αυτές τις δυνάμεις δεν είναι ίδια. Γενικά ισχύει, ότι όλα τα υλικά παραμορφώνονται με την εφαρμογή μιας εξωτερικής δύναμης μέχρι ένα όριο και όταν η δύναμη σταματήσει να ασκείται, επανέρχονται στην ίδια κατάσταση. Η παραμόρφωση αυτή ονομάζεται ελαστική παραμόρφωση και το όριο που μπορεί να φθάσει σε συνάρτηση με τη δύναμη εξαρτάται από το υλικό. Όταν η δύναμη υπερβεί το όριο της ελαστικής παραμόρφωσης τότε η παραμόρφωση είναι μόνιμη ακόμα και όταν αποτραπεί η δύναμη. Έπειτα, καθώς η δύναμη αυξάνεται, μεγαλώνει η παραμόρφωση και τα περισσότερα υλικά φθάνουν σε ένα σημείο μετά το οποίο προκαλείται θραύση (Σταμπολιάδης, 2008).

### 2.1.1 Δυνάμεις κατάτμησης

- **Θλίψη:** είναι η συνηθέστερη μορφή δύναμης που χρησιμοποιείται στην κατάτμηση και εφαρμόζεται με συμπίεση των σωμάτων μεταξύ δύο επιφανειών. Η πίεση εξασκείται από τη μια επιφάνεια ενώ η άλλη μένει ακίνητη. 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 τεμαχιδίου κινούμενο στην επιφάνεια ή αντιστρόφως, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του τεμαχιδίου. Οι κυριότερες μηχανές κατάτμησης με κρούση είναι οι κρουστικοί περιστροφικοί σπαστήρες και εν μέρει οι σφυρόμυλοι, οι ραβδόμυλοι, οι σφαιρόμυλοι και οι μύλοι αυτογενούς λειοτρίβησης.
- **Τριβή:** είναι η δύναμη κατάτμησης που εφαρμόζεται όταν το υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων και αντίθετα 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 (Σταμπολιάδης, 2008) .

### 2.1.2 Μηχανές θραύσης

- Σιαγονωτός, jaw crusher
- Γυροσκοπικός, gyratory crusher
- Κωνικός, cone crusher
- Φυγοκεντρικός, centrifugal crusher,
- Κυλινδρόμυλος, roller crusher

Στην παρούσα εργασία για την θραύση του υλικού μας χρησιμοποιήσαμε τον σιαγονωτό σπαστήρα και τον κωνικό σπαστήρα.

#### 2.1.2.α Σιαγονωτός σπαστήρας

Αποτελείται από μια ακίνητη επιφάνεια, σχεδόν κατακόρυφη, απέναντι στην οποία βρίσκεται μια δεύτερη κινητή επιφάνεια υπό γωνία. Η κίνηση της δεύτερης επιφάνειας συνθλίβει τα σώματα που βρίσκονται μεταξύ των επιφανειών, οι οποίες ενεργούν ως είδος σιαγόνων. Το άνοιγμα στο πάνω μέρος των σιαγόνων καθορίζει το μέγεθος των τεμαχιδίων της τροφοδοσίας, ενώ το άνοιγμα στο κάτω μέρος καθορίζει το μέγεθος του προϊόντος που δεν είναι σταθερό. Οι σιαγονωτοί σπαστήρες χρησιμοποιούνται στην πρωτογενή και δευτερογενή θραύση (Σταμπολιάδης, 2008).

Ο σπαστήρας σιαγόνων δέχεται τεμάχια με μέγεθος έως 10 cm, ενώ η απόσταση των δύο σιαγόνων στο σημείο εξόδου του υλικού ρυθμίζεται με μοχλό από 16 έως 2 mm. Η θραύση λαμβάνει χώρα με την έκκεντρη κίνηση μιας επιφάνειας η οποία βρίσκεται απέναντι από μια άλλη ακίνητη με αποτέλεσμα την αρπαγή και θλίψη των τεμαχίων (Σταμπολιάδης, 2008).

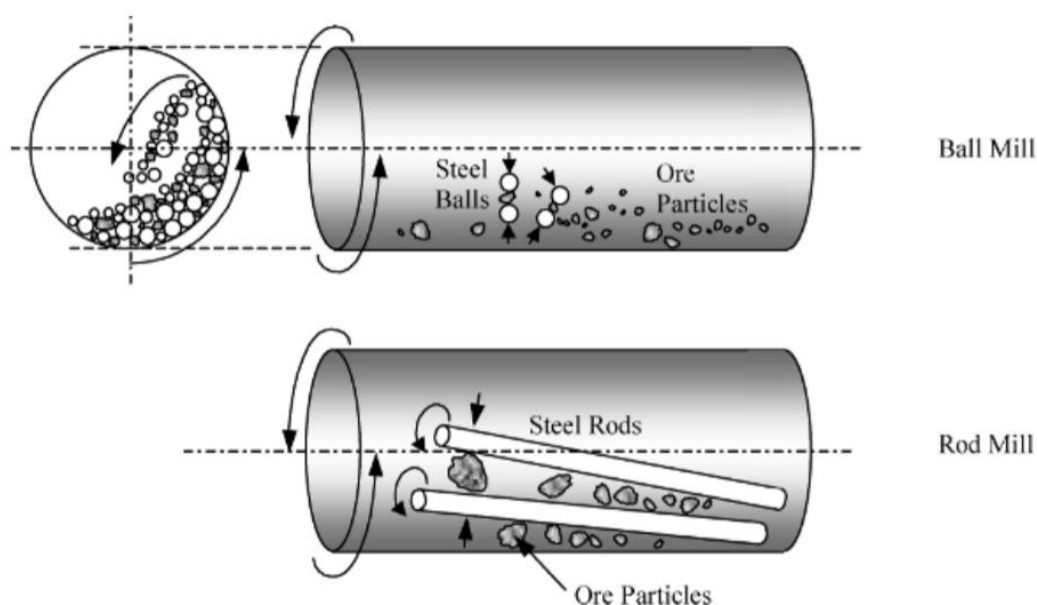
#### 2.1.2.β Κωνικός σπαστήρας

Η λειτουργία των κωνικών θραυστήρων βασίζεται στην περιοδική προσέγγιση και απομάκρυνση μιας κινητής επιφάνειας θραύσης σε μία ακίνητη, μπορεί δηλ. να θεωρηθεί ότι αποτελείται από πολλές και μικρού πλάτους σιαγόνες, ανάμεσα στις οποίες σπάει μέρος του υλικού συνεχώς, εξαιτίας της επαφής του με κάποιο διαφορετικό σημείο του μηχανήματος. Στις μηχανές αυτές μια κωνική κεφαλή περιστρέφεται μέσα σε ένα κέλυφος με τη μορφή χοάνης, που είναι ανοικτό στην κορυφή του. Επομένως, την ακίνητη επιφάνεια στην περίπτωση αυτή αποτελεί ένας αντεστραμμένος κώνος τοποθετημένος εξωτερικά, ενώ την κινητή ένας κατακόρυφος κώνος, τοποθετημένος εσωτερικά. Ο εσωτερικός κώνος (δηλ. η κεφαλή θραύσης) εκτελεί δύο συνδυασμένες κινήσεις, περιστροφική και στρομβική, και είναι συνδεδεμένος με ισχυρό έδρανο στο πάνω ή στο κάτω τμήμα της μηχανής, ενώ η στρομβική κίνηση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κατάλληλου έκκεντρου, που βρίσκεται τοποθετημένο στο κάτω ή στο πάνω τμήμα ενός περιστρεφόμενου άξονα. Ο κωνικός σπαστήρας δέχεται υλικό με μέγεθος μέχρι 12 mm, ενώ το μέγεθος του προϊόντος εξαρτάται από το άνοιγμα εξόδου.

Ο κωνικός σπαστήρας χρησιμοποιείται κυρίως στη δευτερογενή και τριτογενή θραύση (Σταμπολιάδης, 2008).

## 2.2 Μηχανές λειοτρίβησης

Ο ραβδόμυλος και ο σφαιρόμυλος είναι οι κυριότερες μηχανές λειοτρίβησης (Εικόνα 2.1) και στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Λειοτριβούν το μέταλλο (μειώνουν το μέγεθος) μέσω της πτώσης και κύλισης των μέσων λειοτρίβησης που περιέχουν. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό κέλυφος που περιστρέφεται πάνω σε ράουλα. Μέσα στο κέλυφος υπάρχει ένα μόνιμο φορτίο από μεταλλικές ράβδους (ή σφαίρες) που βρίσκεται σε συνεχή κίνηση λόγω της περιστροφής του κελύφους του μύλου. Με την περιστροφική κίνηση του κελύφους οι μεταλλικές ράβδοι (ή σφαίρες) αρχίζουν να ανυψώνονται, ενώ πολλές από αυτές αρχίζουν να κυλινδρουν πάνω στις άλλες. Άλλες ανυψώνονται περισσότερο, μέχρι ενός σημείου από το οποίο πέφτουν ελεύθερα προς τα κάτω και κατακρημνίζονται ακολουθώντας μία παραβολική τροχιά. Η πτώση και το κατακρημνισμό των ράβδων (σφαιρών) λειοτριβεί το μέταλλο που συνυπάρχει μ' αυτές μέσα στο μύλο. Οι κυριότερες δυνάμεις που ασκούνται επί των τεμαχιδίων του μεταλλεύματος είναι οι δυνάμεις κρούσης, από την ελεύθερη πτώση των σφαιρών και τριβής, που δημιουργούνται με την κύλιση των ράβδων (σφαιρών) μεταξύ τους.



Εικόνα 2.1: Μηχανισμός λειοτρίβησης με σφαιρόμυλο και ραβδόμυλο (Gupta et al, 2016)

Οι σφαιρόμυλοι έχουν κύρια χρησιμότητα στην επεξεργασία των ορυκτών και γενικότερα στην εκμετάλλευσή τους, στη μεταλλουργία, στην παραγωγή τσιμέντου,

στη βιομηχανία των ορυκτών, στην φαρμακοβιομηχανία αλλά και στα κεραμικά. Εκτός από την μείωση του μεγέθους χρησιμοποιούνται για ανάμειξη και διαχωρισμό υλικών (Monon et al., 2012).

Η μείωση του μεγέθους είναι μια από τις πιο βασικές λειτουργίες στην βιομηχανία των ορυκτών. Ο βασικός σκοπός της μείωσης του μεγέθους είναι η παραγωγή ικανοποιητικού προϊόντος με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Γνωρίζουμε ωστόσο ότι το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας καταναλώνεται από την ίδια τη μηχανή και ένα μικρό μέρος πηγαίνει για τη μείωση του μεγέθους των υλικών (Petrakis et al., 2016).

### 2.3 Παράμετροι λειοτρίβησης

Οι βασικότερες δυνάμεις που ασκούνται στα τεμαχίδια του μεταλλεύματος κατά την διαδικασία της λειοτρίβησης είναι οι δυνάμεις κρούσης λόγω της ελεύθερης πτώσης των σφαιρών και οι δυνάμεις τριβής λόγω της κύλισης των σφαιρών μεταξύ τους. Η δύναμη που κρατάει τη σφαίρα επί του τυμπάνου είναι η φυγόκεντρος με διεύθυνση που περνάει από το κέντρο του τυμπάνου και της σφαίρας και φορά προς τα έξω. Το υψηλότερο σημείο που μπορεί να φτάσει μια σφαίρα κατά την περιστροφή του μύλου είναι η κορυφή του κελύφους. Όταν η σφαίρα βρίσκεται σε αυτό το σημείο η συχνότητα περιστροφής είναι η  $N_c$  και ονομάζεται κρίσιμη συχνότητα περιστροφής γιατί σε αυτή την συχνότητα (ή και σε μεγαλύτερη) η σφαίρα δεν πέφτει και παραμένει κολλημένη στο κέλυφος, οπότε δεν επέρχεται λειοτρίβηση του υλικού μέσα στο μύλο και δίνεται από τη Σχέση (1):

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

$d$ :διάμετρος κελύφους σε (m)

Αντίθετα όταν έχουμε μικρές συχνότητες περιστροφής δεν έχουμε ελεύθερη πτώση των σφαιρών του μύλου και απλά κυλινδρουν η μία πάνω στην άλλη. Η κίνηση αυτή δεν είναι αποδοτική και δημιουργεί πολλά ψιλά. Συνήθως, οι μύλοι γυρίζουν με συχνότητα 60 – 80% της  $N_c$ .

**Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών  $J$ :** Δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνουν οι σφαίρες σε σχέση με τον όγκο του μύλου. Το  $J$  δίνεται από τη Σχέση (2):

$$J = \left( \frac{\text{μάζα σφαιρών/πυκνότητα}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - \varphi} \right) (\%) \quad (2)$$

$\varphi$ : είναι το πορώδες στρώματος των σφαιρών και του υλικού μέσα στο μύλο. Η συνήθης τιμή για το  $\varphi$  είναι το 0.4 ή 40% και σε εργαστηριακό και σε βιομηχανικό επίπεδο (Austin et al., 1984).

**Συντελεστής πλήρωσης υλικού  $f_c$**  : Μας δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνει το υλικό σε σχέση με τον όγκο του μύλου. Ο συντελεστής  $f_c$  δίνεται από την Σχέση (3):

$$f_c = \left( \frac{\text{μάζα του υλικού/φαινόμενη πυκνότητα}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \quad (3)$$

**Συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό  $U$** : Δείχνει τον βαθμό πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό και είναι συνάρτηση του συντελεστή πλήρωσης υλικού ( $f_c$ ) και του συντελεστή πλήρωσης σφαιρών ( $J$ ). Το  $U$  δίνεται από τη Σχέση (4) (Πετράκης, 2017):

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

**Ισχύς  $P$** : Η ισχύς  $P$  (W) που απορροφάται από ένα μύλο εξαρτάται από τη διάμετρο του μύλου, τη συχνότητα περιστροφής καθώς και τη μάζα της τροφοδοσίας. Η Σχέση (5) που εκφράζει την ισχύ είναι η εξής (Σταμπολτζής, 1990):

$$P = 0,109 \cdot W \cdot N^{1,123} \cdot D^{1,078} \quad (Watt) \quad (5)$$

όπου,

$W$ : βάρος του φορτίου σε kg.

$N$ : συχνότητα περιστροφής του μύλου σε rpm.

$D$ : διάμετρος του μύλου σε m.

**Ενέργεια που καταναλώνεται από τον μύλο**: Είναι ανάλογη με το χρόνο και δίνεται από τη Σχέση (6):

$$E = P \cdot t \quad (kJ) \quad (6)$$

όπου,

$P$ : η ισχύς του σφαιρόμυλου σε kW.

$t$ : ο χρόνος λειοτρίβησης σε s.

Εάν  $M$  (kg) η μάζα του υλικού στο μύλο από την Σχέση (6) προκύπτει η ειδική ενέργεια  $\varepsilon$  (kJ/kg) (Σχέση (7)), η οποία δείχνει την ενέργεια ανά μονάδα μάζας σε kJ/kg:

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

Αν διαιρέσουμε τη Σχέση (7) με το 3.6 η ειδική ενέργεια ( $\varepsilon$ , kJ/kg) μετατρέπεται σε kWh/t

## 2.4 Κινητικά Μοντέλα

### 2.4.1. Κινητικό μοντέλο – Μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει πραγματοποιηθεί σημαντική πρόοδος όσον αφορά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την διαδικασία της λειοτρίβησης σε μύλους χρησιμοποιώντας ένα κινητικό μοντέλο το οποίο βασίζεται σε εκτιμήσεις ισορροπίας του πληθυσμού των τεμαχίων (Πετράκης, 2017). Το μοντέλο ισοζυγίου του πληθυσμού (Population Balance Model – PBM) βασίζεται αρχικά στην κινητική πρώτης τάξης και σε δύο συναρτήσεις, στο ρυθμό θραύσης  $S_i$  και στην συνάρτηση θραύσης  $b_{ij}$ . (Herbst and Fuerstenau, 1980; Austin et al., 1984). Αυτές οι συναρτήσεις καθορίζουν την θεμελιώδη εξίσωση ισορροπίας μεγέθους – μάζας σε πλήρους ανάμιξη λειοτρίβηση σε παρτίδες. Πολλοί ερευνητές έχουν τονίσει τα πλεονεκτήματα αυτής της εξίσωσης (Ipek and Göktepe 2011; Wang et al., 2011; Gupta and Sharma, 2014), ενώ η επέκτασή της από τα εργαστηριακά δεδομένα σε εργαστηριακούς μύλους έχει εξεταστεί σε αρκετές έρευνες (Fuerstenau et al., 2003; Deniz, 2013).

Το μοντέλο ισοζυγίου του πληθυσμού είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση και θεωρεί ότι ο ρυθμός θραύσης είναι σταθερός και δεν μεταβάλλεται με το χρόνο λειοτρίβησης (Austin and Bhatia, 1972; Austin and Bagga, 1981; Nomura et al., 1994). Οι Austin και Bagga (1981) έχουν επίσης δείξει ότι οι παράμετροι της



συνάρτησης θραύσης μπορούν να εκτιμηθούν από την ανάλυση του μεγέθους των προϊόντων που λαμβάνονται μετά από σύντομο χρόνο λειοτρίβησης, χρησιμοποιώντας ως αρχική τροφοδοσία ένα στενό κλάσμα.

Έστω ότι έχουμε ένα υλικό μάζας  $M$  σε έναν μύλο λειοτρίβησης το οποίο έχει χωρισθεί σε  $N+1$  τάξεις μεγέθους, από την 1 ως την  $N+1$ . Κάθε τάξη μεγέθους αποτελείται από ένα ανώτερο μέγεθος  $x_i$  και ένα κατώτερο  $x_{i+1}$  και περιγράφεται από το δείκτη του ανώτερου μεγέθους του. Αν πραγματοποιηθεί λειοτρίβηση για χρόνο  $t$  η τάξη μεγέθους  $i$  έχει μάζα  $m_i(t)$  και η θεμελιώδης εξίσωση ισορροπίας μεγέθους – μάζας εκφράζεται από την Σχέση (8) (Austin and Luckie, 1972; Klimpel and Austin, 1977):

$$\frac{d[m_i(t)M]}{dt} = -S_i m_i(t)M + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j m_j(t)m \quad (8)$$

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

$b_{ij}$ : είναι το κύριο διάλυσμα κατανομής θραύσης.

Δηλαδή το  $b_{ij}$  είναι το κλάσμα του σπασμένου υλικού από μέγεθος  $j$  που εμφανίζεται με μέγεθος  $i$ , πριν γίνει εκ νέου θραύση των τεμαχιδίων. Οι τιμές του  $b_{ij}$  έχουν προσδιοριστεί πειραματικά σε αθροιστική μορφή (Austin et al., 1984).

#### 2.4.2 Ρυθμός θραύσης

Ένας μύλος λειοτρίβησης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αντιδραστήρας όπου τα αντιδρώντα είναι κόκκοι ορισμένου μεγέθους και τα προϊόντα κόκκοι μικρότερου μεγέθους. Έτσι, αν είναι γνωστός ο ρυθμός θραύσης που παράγει το μέγεθος αυτό όταν θραύεται, μπορεί να υπολογιστεί η κοκκομετρική κατανομή που θα υπάρχει στο μύλο σε κάθε χρονική στιγμή. Ως μέγεθος εννοούμε ένα στενό κλάσμα κόκκων που προκύπτει με κοσκίνιση και περιέχεται μεταξύ δυο συνεχόμενων κοσκίνων. Το κλάσμα αυτό των κόκκων ονομάζεται τάξη μεγέθους  $i$  και περιέχει κόκκους διαμέτρου μεταξύ του ανοίγματος οπών  $x_i$  του επάνω κόσκινου και του ανοίγματος οπών  $x_{i+1}$  του αμέσως κάτω απ' αυτό κόσκινου. Εάν εισαχθεί υλικό τάξης μεγέθους  $i = 1$  στο μύλο και λειοτριβηθεί το υλικό για χρονικό διάστημα  $t$ , τότε είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο ρυθμός θραύσης της τάξης μεγέθους αυτής. Αν  $M$  είναι η μάζα του υλικού στο μύλο και  $m_i(t)$  είναι το κλάσμα των κόκκων της τάξης μεγέθους  $i = 1$

μετά από χρόνο  $t$ , έχει βρεθεί ότι ο ρυθμός θραύσης της τάξης μεγέθους 1 είναι ανάλογος της ποσότητας  $m_1(t)$  που έχει το μέγεθος αυτό. Αυτό, μας το δείχνει η ακόλουθη Σχέση (9) (Austin and Luckie, 1972; Klimpel and Austin, 1997; Deniz, 2013):

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

Η μάζα του υλικού δεν μεταβάλλεται μέσα στον μύλο, οπότε η Σχέση (9) παίρνει την ακόλουθη μορφή (10):

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

Όπου;

$S_i$ : ο ρυθμός θραύσης σε  $\text{min}^{-1}$ .

$i$ : ακέραιος αριθμός.

Επίσης, αν το  $S_i$  είναι ανεξάρτητο του χρόνου, με ολοκλήρωση της Σχέσης (10) προκύπτει η Σχέση (11):

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

Τέλος, λογαριθμίζοντας την πάνω σχέση προκύπτει η Σχέση 12:

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

Από την Σχέση (12) γίνεται αντιληπτό ότι σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα του βάρους που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους  $i$ ,  $m_i(t)$ , σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης  $t$ , η κλίση της ευθείας είναι ο ρυθμός θραύσης ( $S_i$ ) της τάξης μεγέθους  $i$ .

#### 2.4.3 Συνάρτηση Θραύσης

Η κατανομή των μεγεθών των τεμαχίων που έχουν παραχθεί μετά από τη θραύση, περιγράφεται με βάση τη συνάρτηση θραύσης. Έτσι η σχετική κατανομή του κάθε κλασματικού μεγέθους γίνεται αντιληπτή ως μια πλήρης περιγραφή του προϊόντος (Katubilwa, 2008). Για αυτό το λόγο η συνάρτηση θραύσης για ένα τεμάχιο της τάξης

μεγέθους  $j$  που έσπασε και παρέμεινε στη τάξη μεγέθους  $i$  περιγράφεται από τη Σχέση (13):

$$b_{i,j} = \frac{\text{μάζα μεγέθους } j \text{ που έσπασε και παρέμεινε στην τάξη μεγέθους } i}{\text{μάζα του υλικού μεγέθους } j \text{ που έσπασε}} \quad (13)$$

Ένας καταλληλότερος τύπος για να περιγραφεί η συνάρτηση θραύσης είναι η αθροιστική συνάρτηση θραύσης που ορίζεται από την Σχέση (14) (Austin et al. 1984):

$$B_{i,j} = \sum_{k=n}^i b_{k,j} \quad (14)$$

Όπου,  $b_{i,j}=B_{i,j}-B_{i+1,j}$

Οι Austin και Bagga (1981), έχουν δείξει ότι για μικρό χρονικό διάστημα λειοτρίβησης οι τιμές του  $B_{i,j}$  μπορούν να υπολογιστούν από την ανάλυση του μεγέθους των προϊόντων χρησιμοποιώντας ως αρχική τροφοδοσία μια στενή τάξη μεγέθους τεμαχιδίων  $j$ . Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως μέθοδος BII. Για να το δείξουν αυτό, χρησιμοποίησαν την ακόλουθη σχέση:

$$B_{i,j} = \frac{\log[(1 - P_i(0))/(1 - P_i(t))]}{\log[(1 - P_{j+1}(0))/(1 - P_{j+1}(t))]} \quad (15)$$

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

Η παραπάνω εξίσωση προϋποθέτει ότι μια μικρή μάζα σωματιδίων θα ξανά υποστεί θραύση. Εμπειρικά έχει παρατηρηθεί ότι τα σωστά αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν ο χρόνος της θραύσης έχει επιλεγεί για να δώσει μια ποσότητα από 20% έως 30% θραυσμένου υλικού κάτω από το μέγεθος  $j$  (Austin et al., 1984).

Η αθροιστική συνάρτηση θραύσης  $B_{i,j}$  μπορεί επίσης να εκφραστεί από την ακόλουθη εμπειρική εξίσωση (Σχέση (16)) η οποία περιγράφεται από το άθροισμα δύο ευθειών σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα και είναι η ακόλουθη:

$$B_{i,j} = \Phi_j \left( \frac{x_{i-j}}{x_j} \right)^{\gamma} + (1 - \Phi_j) \left( \frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^{\beta} \quad (16)$$

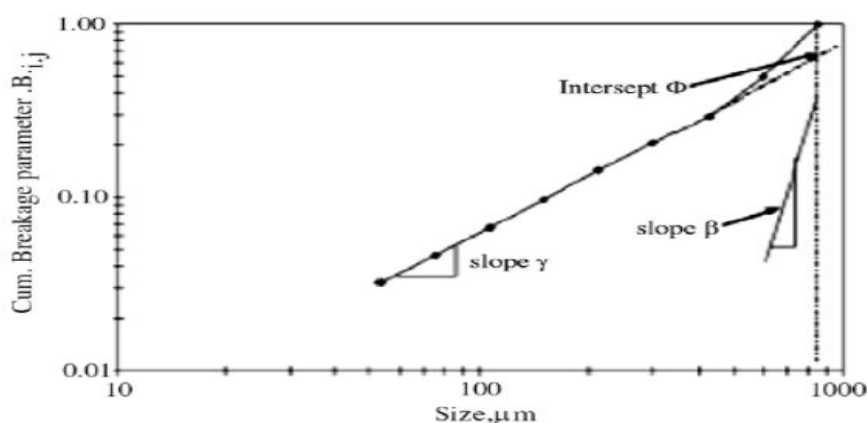
$x_j$  : μέγεθος της τάξης  $j$

$\gamma$  : κλίση του κατώτερου τμήματος ευθείας της καμπύλης

$\beta$  : κλίση του ανώτερου τμήματος ευθείας της καμπύλης

$\Phi_j$  : το σημείο τομής της κατώτερης ευθείας στο μέγιστο μέγεθος

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2 το  $\gamma$  επίσης χαρακτηρίζει την σχετική μάζα των λεπτών προϊόντων μετά τη λειοτρίβηση και για αυτό το λόγο σχετίζεται με την απόδοση της λειοτρίβησης. Γενικά οι παράμετροι θραύσης  $\Phi_j$ ,  $\gamma$  (τιμές από 0.5 έως 1.5) και  $\beta$  (τιμές από 2.5 έως 5) εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού. Έτσι οι παράμετροι της αθροιστικής συνάρτησης θραύσης οι οποίοι προσδιορίζονται από εργαστηριακά πειράματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε μεγαλύτερης κλίμακας μύλους.



Εικόνα 2.2: Αθροιστική συνάρτηση θραύσης σε σχέση με το μέγεθος (Πηγή: Samanli et al., 2010).

## 2.5 Επίδραση του μεγέθους των σφαιρών

Έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές ότι οι καταλληλότερες σφαίρες για τα μεγάλα τεμαχίδια είναι οι μεγάλες, ενώ οι μικρές σφαίρες είναι αποτελεσματικότερες στην λειοτρίβηση μικρών τεμαχιδίων. Τα σκληρότερα και χονδρόκοκα τεμαχίδια καταναλώνουν πολύ ενέργεια και απαιτούν μεγάλα μέσα λειοτρίβησης, ενώ τα λεπτά απαιτούν μεγαλύτερη επιφάνεια λειοτρίβησης και μικρότερα μέσα (Napier – Munn et al., 1996). Αντικείμενο έρευνας αποτελεί η επιτυχής θραύση και αποδοτικότητα, βρίσκοντας το σωστό μέγεθος των σφαιρών για κάθε τάξη μεγέθους.

Το μέγιστο μέγεθος τροφοδοσίας ( $X_m$ ) ενός υλικού σε συνάρτηση με τη διάμετρο της σφαίρας ( $d$ ) δίνεται από την παρακάτω Σχέση (17). Ως  $X_m$  ορίζεται το μέγεθος εκείνο

για το οποίο ο ρυθμός θραύσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή (Deniz 2003; Kotake et al. 2004).

$$X_m = k \cdot d^A \quad (17)$$

$k, A$ : σταθερές

$d$ : διάμετρος σφαίρας

Η αντίστοιχη μέγιστη τιμή του ρυθμού θραύσης ( $S_m$ ) σε συνάρτηση με το μέγεθος της σφαίρας ( $d$ ) δίνεται από τη Σχέση (18):

$$S_m = k' \cdot d^B \quad (18)$$

$k', B$ : σταθερές

$d$ : διάμετρος σφαίρας

Από την Σχέση (18) αποδεικνύεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της σφαίρας τόσο θα αυξάνεται και ο μέγιστος ρυθμός θραύσης. Οι Kotake et al. (2004) μετά από σειρά δοκιμών σε διάφορα υλικά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές του εκθέτη  $k'$  ανάλογα με το υλικό.

### 2.5.1 Μέγεθος σφαιρών και ρυθμός θραύσης

Η διάμετρος των σφαιρών εκτός από το μέγεθος των τεμαχιδίων που παράγονται μετά τη λειοτριβήση επηρεάζει και το ρυθμό θραύσης ( $S_i$ ). Ο Griffith θεωρεί ότι όσο εξελίσσεται η λειοτριβήση είναι δύσκολο να λειοτριβηθούν πολύ λεπτά τεμάχια για δεδομένο μέγεθος σφαιρών μέσα στο μύλο (Austin et al., 1984). Αυτό δείχνει ότι καθώς το μέγεθος των τεμαχίων αυξάνεται, αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης. Υπάρχει όμως ένα σημείο όπου το μέγεθος των τεμαχίων είναι πολύ μεγάλο ώστε να υποστεί θραύση. Σε αυτό το σημείο ο ρυθμός θραύσης παρουσιάζει μέγιστο και από εκεί και έπειτα αρχίζει να μειώνεται και να τείνει στο μηδέν (Katubilwa, 2008).

Τα αποτελέσματα διαφόρων εργαστηριακών δοκιμών (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 τη δείχνει η Σχέση (19):

$$S_i = a_T x_i^a \cdot Q_i = a_T x_i^a \cdot \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{x_i}{\mu} \right)^A} \right) \quad (19)$$

Όπου:

$x_i$  : μέγεθος της τάξης μεγέθους  $i$  σε mm.

$a_T$  και  $\mu$ : παράμετροι που εξαρτώνται από τις συνθήκες της λειοτρίβησης.

$a$  και  $A$ : παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό.

$Q_i$ : συντελεστής διόρθωσης

Η τιμή του  $a$  είναι ένας θετικός αριθμός, συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.5-1.5, είναι χαρακτηριστική του υλικού και ανεξάρτητη της ταχύτητα περιστροφής, του φορτίου των σφαιρών, του μεγέθους των σφαιρών και γενικότερα των συνθηκών του μύλου.

Στο συντελεστή διόρθωσης  $Q_i$ , το  $A$  είναι ένας θετικός αριθμός και υποδηλώνει πόσο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός θραύσης μετά από τη μέγιστη τιμή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $A$ , τόσο πιο γρήγορα μειώνονται οι τιμές του  $S_i$ . Τέλος, το  $A$  αποτελεί και αυτό μια χαρακτηριστική παράμετρο του υλικού.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στη προηγούμενη σχέση στα μεγαλύτερα μεγέθη τροφοδοσίας το  $Q_i$  παίρνει τιμές μικρότερες του 1 και η λειοτρίβηση δεν είναι ομοιόμορφη διότι τα τεμαχίδια είναι πολύ μεγάλα και τα συγκεκριμένα μέσα λειοτρίβησης, δηλ. οι σφαίρες, δεν είναι ικανές να θραύσουν αποδοτικά τα τεμαχίδια αυτά. Αντίθετα, στα λεπτότερα μεγέθη, το  $Q_i$  ισούται με 1 (ομαλή λειοτρίβηση) και η Σχέση (19) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$S_i = a_T x_i^a \quad (20)$$

Γεωμετρικά η Σχέση (20) απεικονίζεται σε λογαριθμικό χαρτί με μία ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση είναι το  $a$ . Όταν το μέγεθος  $x_i=1\text{mm}$ , τότε  $S_i=a_T$ . Δηλαδή η παράμετρος  $a_T$  είναι ο ρυθμός θραύσης του υλικού για μέγεθος 1 mm.

Η εξίσωση που συνδέει την τιμή του μέγιστου μεγέθους  $X_m$ , στο οποίο ο ρυθμός θραύσης είναι μέγιστος για ένα συγκεκριμένο υλικό, με την τιμή του  $\mu$  δίνεται από την παρακάτω Σχέση (21):

$$X_m = \mu \left( \frac{\alpha}{\Lambda - \alpha} \right)^{1/\Lambda}, \text{ με } \Lambda > \alpha \quad (21)$$

Παρατηρείται ότι στην παραπάνω σχέση το  $X_m$  είναι ανάλογο του  $\mu$ , αφού θεωρείται ότι οι παράμετροι  $\alpha$  και το  $\Lambda$  εξαρτώνται από το υλικό.

Για να εκφραστεί η σχέση του ρυθμού θραύσης με τη διάμετρο μιας σφαίρας οι Austin et al. (1976) πρότειναν δύο εξισώσεις οι οποίες είναι:

$$\alpha_T = \alpha_0 \left( \frac{d_0}{d} \right)^\xi \quad (22)$$

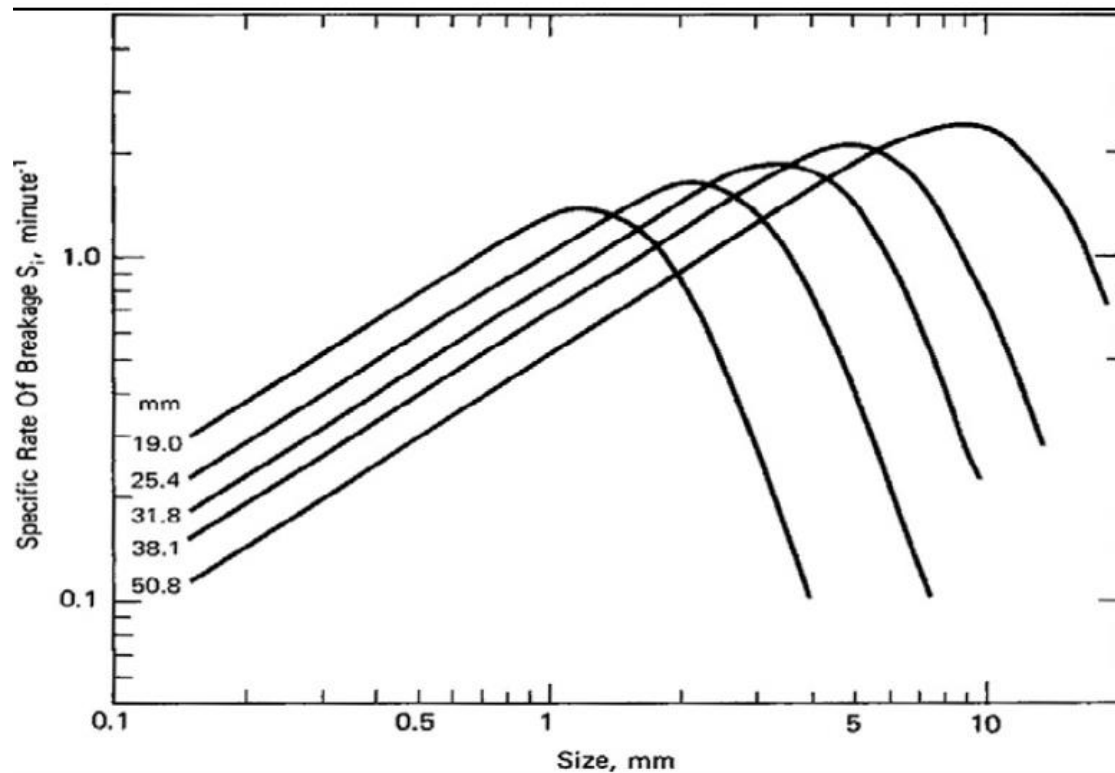
$$\mu = \mu_0 \left( \frac{d_0}{d} \right)^n \quad (23)$$

Όπου:

$\alpha_0, \mu_0$ : παράμετροι της θραύσης για διάμετρο σφαίρας  $d_0$  που χρησιμοποιείται σε εργαστηριακές δοκιμές.

$\alpha, \mu$ : οι προβλεπόμενες παράμετροι θραύσης για διάμετρο σφαίρας  $d$ .

$\xi, n$ : σταθεροί εκθετικοί παράμετροι της σφαίρας διαμέτρου  $d$  που αντιστοιχούν στις παραμέτρους  $\alpha, \mu$ .



Εικόνα 2.3: Ρυθμός θραύσης σε συνάρτηση με το μέγεθος για διάφορες διαμέτρους σφαιρών (Austin et al., 1984)

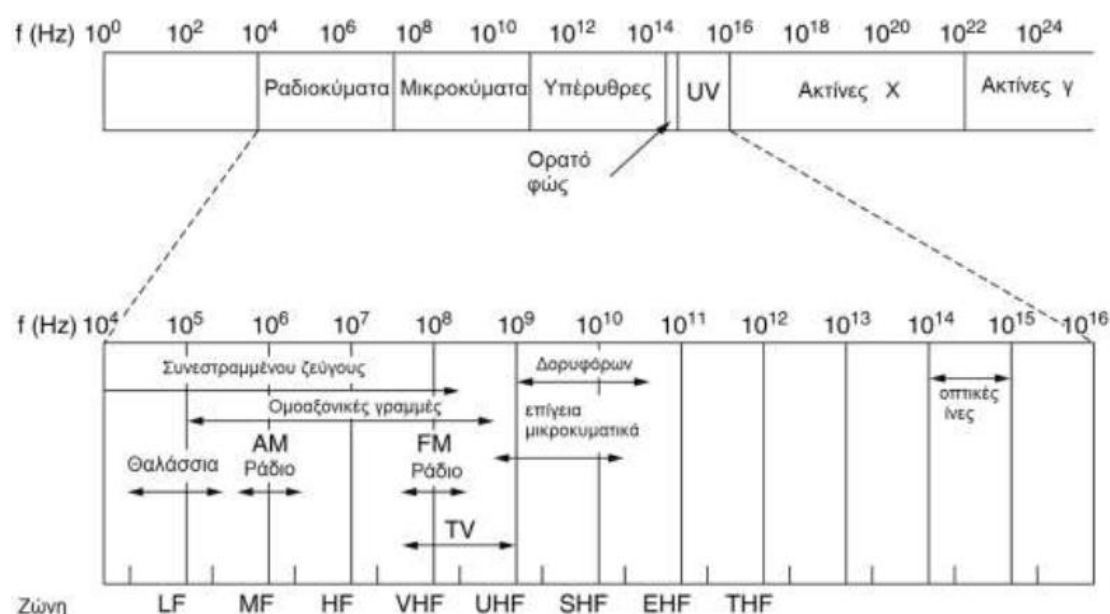
Στην Εικόνα (2.3) παρουσιάζεται ο ρυθμός θραύσης ( $S_i$ ) σε συνάρτηση με το μέγεθος τροφοδοσίας για διάφορες διαμέτρους σφαιρών. Παρατηρείται ότι για τις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών καθώς αυξάνεται το μέγεθος της τροφοδοσίας αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης. Υπάρχει όμως ένα σημείο όπου το μέγεθος των τεμαχίων είναι πολύ μεγάλο ώστε να υποστεί λειοτρίβηση. Σε αυτό το σημείο ο ρυθμός θραύσης παρουσιάζει μέγιστο και από εκεί και έπειτα αρχίζει να μειώνεται και να τείνει στο μηδέν (Katubilwa, 2008). Επίσης, παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των σφαιρών τόσο μεγαλύτερα είναι τα  $X_m$  και  $S_m$ , ενώ η παράμετρος  $\alpha$  (κλίση ευθειών) παραμένει σταθερή.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ

### 3.1 Γενικά στοιχεία για τα μικροκύματα

Τα μικροκύματα είναι οι ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις με συχνότητα ταλάντωσης μεγαλύτερης των 300 MHz (μήκος κύματος 1 m) και μικρότερης των 300 GHz (μήκος κύματος 1 mm). Καταλαμβάνουν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μεταξύ της υπέρυθρης ακτινοβολίας ( $\lambda < 1 \text{ mm}$ ) και των ραδιοκυμάτων ( $\lambda > 1 \text{ m}$ ) (Εικόνα 3.1) και εμφανίζουν παρόμοιες ιδιότητες με αυτές του ορατού φωτός, όπως: ανάκλαση, απορρόφηση, πόλωση, περίθλαση και σκέδαση (Cheung et al., 1985).



Εικόνα 3.1: Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Σαμούχος, 2013)

Τα θεμέλια της σύγχρονης ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας διατυπώθηκαν το 1873 από τον James Clerk Maxwell, ο οποίος υπέθεσε τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και την ιδέα ότι το φως ήταν μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Η διατύπωση του Maxwell εκδόθηκε στη σύγχρονη μορφή του από τον Oliver Heaviside κατά την περίοδο από το 1885 έως το 1887, ο οποίος αφαίρεσε πολλές από τις μαθηματικές πολυπλοκότητες της θεωρίας του Maxwell. Ο Heinrich Rudolf Hertz Γερμανός καθηγητής φυσικής και πειραματιστής που κατάλαβε τη θεωρία που δημοσιεύτηκε από τον Maxwell, πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων κατά την περίοδο 1887-1891 που επικύρωσαν τη θεωρία του Maxwell για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (Pozar, 2012).

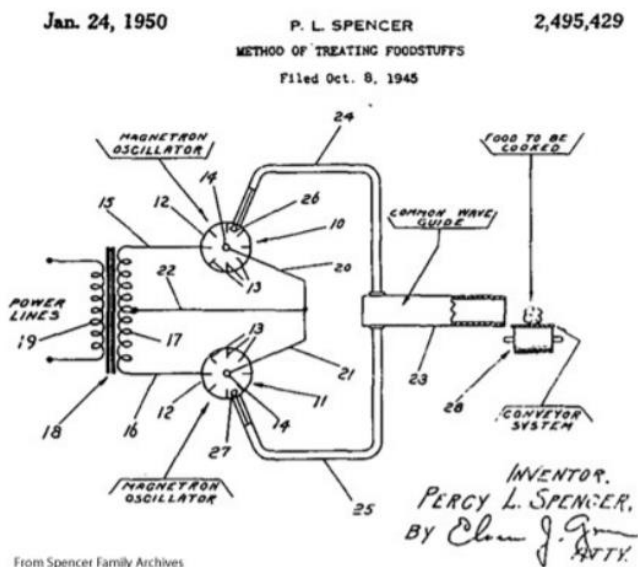
Το 1888 ο Hertz δημιουργεί την πρώτη ακτινοβολία μικροκυμάτων με συχνότητες έως 500 MHz από ταλαντωτικές εκκενώσεις σπινθήρων.

Η αρχή για την εξέλιξη της μικροκυματικής τεχνολογίας ήταν η ανακάλυψη της λυχνίας μαγνητρόνης (magnetron) το 1940 από τους J. Randall και H. Boot στο πανεπιστήμιο του Birmingham. Η μαγνητρόνη έδωσε τη δυνατότητα για τη χρήση μικροκυμάτων σε συστήματα ραντάρ, τηλεπικοινωνίες και δορυφόρους (Σαμούχος, 2014).

Το 1946 κατά τη διάρκεια πειραμάτων για την κατασκευή ενός ραντάρ, ο P. Spencer διαπίστωσε αναπάντεχα τις θερμικές ιδιότητες των μικροκυμάτων, όταν ένα τρόφιμο το οποίο είχε στην τσέπη του τήχθηκε. Εκτός από την ευρέως γνωστή πρακτική της θέρμανσης των τροφίμων η οποία ξεκίνησε την δεκαετία του 1960, ένα πλήθος εφαρμογών αξιοποιούν την ιδιότητα πολλών υλικών να απορροφούν μικροκυματική ακτινοβολία και να τη μετατρέπουν σε θερμική ενέργεια. Ο , λόγω της εντοπισμένης και ογκομετρικής θέρμανσης που προκαλούν (Σαμούχος, 2014).

### 3.2 Συστήματα μικροκυματικής θέρμανσης

Η συσκευή μικροκυμάτων παράγει ταλαντώσεις μικρού μήκους κύματος. Τα βασικά μέρη της συσκευής όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2 είναι η πηγή της ταλάντωσης ή magnetron, ένας οδηγός μικροκυμάτων και το τοίχωμα, ο κλωβός δηλαδή που τα περιβάλλει. Τα μικροκύματα δημιουργούνται από το magnetron και οδηγούνται μέσα στη συσκευή με τη βοήθεια ενός κυματοηηγού. Μέσα στον κλωβό ανακλώνται συνεχώς μέχρι να απορροφηθούν από τη μάζα κάποιου υλικού. Στις συσκευές μικροκυμάτων οικιακής χρήσης, τα μικροκύματα έχουν συχνότητα 2450 μεγακύκλους ανά δευτερόλεπτο και μήκος κύματος που φτάνει τα 12 cm (Γιαννικάκης, 1997).



Εικόνα 3.2: Σχέδιο για τον πρώτο φούρνο μικροκυμάτων (Spencer, 1950)

### 3.3 Πλεονεκτήματα μικροκυμάτων σε σχέση με την απλή θέρμανση

Η θέρμανση με μικροκύματα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη συμβατική θέρμανση, όπως ( Haque, 1999):

- θέρμανση χωρίς επαφή,
- μεταφορά ενέργειας και όχι μεταφορά θερμότητας,
- ταχεία θέρμανση
- υλική επιλεκτική θέρμανση
- ογκομετρική θέρμανση
- γρήγορη εκκίνηση και διακοπή
- η θέρμανση ξεκινά από το εσωτερικό του υλικού του σώματος
- υψηλό επίπεδο ασφάλειας και αυτοματισμού

### 3.4 Αλληλεπίδραση υλικών και μικροκυμάτων

Κατά το χρόνο που ένα υλικό είναι εκτεθειμένο στη διεισδυτική ακτινοβολία των μικροκυμάτων, ένα μέρος της ενέργειας χάνεται ανεπιστρεπτί. Αυτό το ποσό της ενέργειας που χάνεται μετατρέπεται σε θερμότητα στο εσωτερικό του υλικού. Αυτή η θέρμανση του εσωτερικού του υλικού ανεβάζει τη θερμοκρασία του υλικού με τέτοιο

τρόπο που οι εσωτερικές περιοχές είναι πιο θερμές από την επιφάνεια, επειδή η επιφάνεια χάνει θερμότητα προς το γύρω περιβάλλον που είναι ψυχρότερο. Αυτό είναι το αντίστροφο της συμβατικής θέρμανσης, όπου η θερμότητα από μια εξωτερική πηγή παρέχεται στην εξωτερική επιφάνεια και στη συνέχεια διαχέεται στις ψυχρότερες εσωτερικές περιοχές (Θεοδωρόπουλος, 2005).

Η θέρμανση με μικροκύματα χρησιμοποιεί την ικανότητα ορισμένων υλικών να απορροφούν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στη φασματική περιοχή μικροκυμάτων και να τη μετατρέπουν σε θερμότητα (Znamenackon et al., 2005). Τα υλικά μπορούν να είναι διαπερατά στα μικροκύματα (όπως πυρίτιο), που σημαίνει ότι περνούν τα μικροκύματα μέσω του υλικού, ανακλαστικά (π.χ., μέταλλα) ή να απορροφούν μικροκύματα (όπως τρόφιμα). Όταν η ενέργεια των μικροκυμάτων απορροφάται, πολικά μόρια και ιόντα στο υλικό περιστρέφονται ή συγκρούονται βάσει του εναλλασσόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και παράγεται θερμότητα. Η θέρμανση με μικροκύματα είναι θεμελιωδώς διαφορετική από τη συμβατική θέρμανση. Πρώτον, τα μικροκύματα διεισδύουν μέσα στο υλικό και παράγουν θέρμανση στο εσωτερικό του υλικού, σε αντίθεση με τη συμβατική θέρμανση, όπου θερμαίνεται πρώτα η εξωτερική επιφάνεια και στη συνέχεια η θερμότητα διαχέεται στο εσωτερικό του υλικού. Ως αποτέλεσμα της ογκομετρικής αυτής θέρμανσης, η κλίση και η κατεύθυνση μεταφοράς της θερμότητας είναι αντίθετες από αυτές που συναντώνται σε συμβατικά θερμαινόμενα υλικά. Η ενέργεια των μικροκυμάτων παράγεται από ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση μετατροπής 50% για 2450 MHz και 85% για 915 MHz (Kumar et al., 2010).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ

### ΠΥΡΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ

#### 4.1 .Θερμική επεξεργασία μεταλλεύματος.

Κατά την διάρκεια του τελευταίου αιώνα, ένας μεγάλος αριθμός ερευνών έχουν πραγματοποιηθεί με θέμα την διαδικασία της λειοτρίβησης. Οι περισσότεροι ερευνητές ασχολήθηκαν με την βελτίωση της αποδοτικότητας της διαδικασίας αυτής και η θέρμανση του υλικού είχε εξέχοντα ρόλο στην βελτίωση της αποτελεσματικότητας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η θερμική κατεργασία βελτιώνει την αποδέσμευση του ορυκτού δημιουργώντας ενδοκρυσταλλική διάβρωση αντί για διακρυσταλλική.

Η θερμική επεξεργασία του μεταλλεύματος για να επιφέρει θερμική θραύση, και επομένως μείωση της αντοχής του δεν είναι σε καμία περίπτωση μια νέα ιδέα. Ο Έλληνας ιστορικός του πρώτου αιώνα π.Χ., Διόδωρος Σικελός, κατέγραψε στο Bibliotheca Historica την αρχαία πρακτική της πυρκαγιάς, επαληθεύοντας το έργο ενός άλλου Έλληνα ιστορικού, του Αγαθαρκίδη, ο οποίος είχε επισκεφτεί τα ορυχεία χρυσού στην Αίγυπτο γύρω στον δεύτερο αιώνα π.Χ. (Meyer, 1997). Ο Oldfather, το 1967, παρέχει μια μετάφραση της αφήγησης του Διόδωρου: «Η χρυσοφόρος γη, που είναι η πιο σκληρή, καίγεται πρώτα με μια καυτή φωτιά, και όταν τη θρυμματίσουν συνεχίζουν να τη δουλεύουν με το χέρι και ο μαλακός βράχος που μπορούμε να τον επεξεργαστούμε πλέον συνθλίβεται με ένα σφυρί».

Η πρακτική της πυρκαγιάς γινόταν με το άναμμα μιας μεγάλης πυρκαγιάς στην επιφάνεια του βράχου που έπρεπε να εξορυχθεί. Καθώς ο βράχος θερμαινόταν ανομοιόμορφα, πραγματοποιούνταν θραύση εσωτερικά, εξασθενώντας τον βράχο σε μεγάλο βαθμό. Μόλις έσβηνε η φωτιά, η επιφάνεια του βράχου βρεχόταν με νερό, για την περαιτέρω αποδυνάμωσή του ή και για να επιτραπεί στους μεταλλωρύχους να συνεχίσουν την εργασία (The Tech, 1886). Χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία, ήταν δυνατό να αποδυναμωθεί η επιφάνεια του βράχου σε βάθος περίπου περίπου 30 cm τη φορά, και μετά εξορυσσόταν το μαλακό πλέον μέταλλευμα. Έπειτα πραγματοποιούσαν πάλι την ίδια διαδικασία (Cowen, 1999).

Το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα πολύ ερευνητές μελέτησαν την οικονομική πλευρά της συμβατικής θέρμανσης των μεταλλευμάτων. Από το 1962 ήταν γνωστό ότι η επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στην αντοχή των μεταλλευμάτων ποικίλει ανάλογα με την ορυκτολογική σύσταση και ότι ο φθορίτης και ο βαρύτης επηρεάζονται από αυτή. Άλλες μελέτες έδειξαν ότι η διαδικασία της θερμικής επεξεργασίας ήταν δαπανηρή σε σύγκριση με την παραδοσιακή λειοτρίβηση, συγκεκριμένα οι Wills et al. (1987) υπολόγισαν ότι το κόστος της λειοτρίβησης με θερμική επεξεργασία είναι 6 φορές μεγαλύτερο από αυτό της παραδοσιακής λειοτρίβησης.

Η θερμική επεξεργασία ορυκτών είναι μια διαδικασία με υψηλή κατανάλωση ενέργειας και ιδιαίτερα κοστοβόρα. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές αναζήτησαν άλλους τρόπους πιο αποτελεσματικούς.

Αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη θέρμανση με μικροκύματα στην επεξεργασία ορυκτών έχει εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια και έχει διερευνηθεί ένας αριθμός πιθανών εφαρμογών σχετικά με την επεξεργασία ορυκτών με μικροκύματα. Αυτά περιλαμβάνουν λειοτρίβηση μεταλλεύματος, καρβοθερμική αναγωγή οξειδίων μετάλλων, εκχύλιση ορυκτών με τη βοήθεια μικροκυμάτων, ψήσιμο και τήξη συμπυκνώματος σουλφιδίου, προεπεξεργασία πυρίμαχου συμπυκνώματος χρυσού, αναγέννηση αναλωμένου άνθρακα και διαχείριση αποβλήτων (Kingman et al., 1998, Barani et al., 2011).

Στην παρούσα διπλωματική θα μελετηθεί μόνο η ικανότητα λειοτρίβησης των ορυκτών και συγκεκριμένα του βωξίτη με την χρήση μικροκυμάτων.

## **4.2 Επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στην ικανότητα λειοτρίβησης των ορυκτών**

Ίσως η πιο σημαντική εργασία πάνω στα μικροκύματα ήταν αυτή των Chen et al. (1984) που ερεύνησαν την αντίδραση 40 ορυκτών στην έκθεση σε μικροκύματα σε έναν εφαρμοσμένο κυματοδηγό, ο οποίος επέτρεψε την εισαγωγή των ορυκτών δειγμάτων σε μια περιοχή γνωστού υψηλού ηλεκτρικού πεδίου. Αν και εκείνη τη στιγμή, ήταν ήδη γνωστό ότι τα μικροκύματα θα θερμάνουν επιλεκτικά ορισμένα ορυκτά, αυτή η εργασία έδειξε περαιτέρω ότι η θέρμανση με μικροκύματα εξαρτάται από τη σύσταση του ορυκτού και επομένως οι στοιχειώδεις υποκαταστάσεις θα

επηρέαζαν τη συμπεριφορά ενός ορυκτού σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Ένα παράδειγμα αυτού σημειώθηκε με τον σφαιρίτη, όπου όταν είχε υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο θερμαινόταν ικανοποιητικά μετά από μια περίοδο αργής θέρμανσης σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά όταν είχε χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο δεν θερμαινόταν εύκολα. Από τον μεγάλο αριθμό ορυκτών που δοκιμάστηκαν, σημειώθηκε ότι τα περισσότερα πυριτικά, ανθρακικά και θειικά και ορισμένα οξειδία και σουλφίδια δεν επηρεάζονται από την μικροκυματική ακτινοβολία, ενώ τα περισσότερα σουλφίδια, αρσενίδια, σουλφοάλατα και σουλφαρσενίδια και ορισμένα οξειδία θερμαίνονται όταν μπουν σε φούρνο μικροκυμάτων (Barani, 2012).

Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, οι ερευνητές ταξινόμησαν τα υπό μελέτη ορυκτά σε δύο κατηγορίες:

- α) στα ορυκτά τα οποία δεν θερμαίνονται με την επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας, των οποίων η δομή πρακτικά παραμένει αναλλοίωτη και
- β) στα ορυκτά που θερμαίνονται και στα οποία η δομή είτε παραμένει σταθερή, είτε τα ορυκτά διασπώνται ή αντιδρούν σχηματίζοντας νέα προϊόντα.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι τα περισσότερα πυριτικά, ανθρακικά, θειικά, ορισμένα οξειδία και σουλφίδια ανήκουν στην πρώτη ομάδα ορυκτών δηλαδή δεν παρατηρούνται αλλαγές στη μορφολογία τους κατά τη διάρκεια της θέρμανσης. Ο γιαιοσίτης ή ιεροσίτης, ορισμένα οξειδία μετάλλων όπως ο αιματίτης, ο μαγνητίτης και ο κασιρίτης θερμαίνονται εύκολα και ανήκουν στη δεύτερη ομάδα στα ορυκτά που θερμαίνονται και στα οποία η δομή είτε παραμένει σταθερή, είτε τα ορυκτά διασπώνται ή αντιδρούν σχηματίζοντας νέα προϊόντα. Τα περισσότερα σουλφίδια, σουλφοάλατα και αρσενίδια ανήκουν επίσης στην δεύτερη κατηγορία.

Οι Walkiewicz et al. (1988, 1991) απόδειξαν ότι η ταχεία θέρμανση του μεταλλεύματος με την χρήση μικροκυματικής ενέργειας προκαλεί θερμική καταπόνηση (τάση). Αυτή η καταπόνηση προκαλεί μικρορωγμές κατά μήκος των ορίων των κόκκων των ορυκτών, αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ένα τέτοιο δείγμα μεταλλεύματος να γίνεται πιο επιδεκτικό στην λειοτρίβηση. Σύμφωνα με αυτούς τους ερευνητές, η λειοτρίβηση (θρυμματισμός) καταναλώνει το 50-70 % της ενέργειας που χρησιμοποιείται στις εργασίες επεξεργασίας ορυκτών. Και πάλι, η ενεργειακή απόδοση μιας συμβατικής λειτουργίας λειοτρίβησης είναι περίπου 1%. Τέλος απέδειξαν ότι η προθέρμανση ενός σιδηρομεταλλεύματος με μικροκύματα βελτίωσε

την απόδοση της λειοτριβήσης από 1 έως 23,9 %. Ωστόσο, αυτή η βελτίωση δεν ήταν αρκετή για να αντισταθμίσει την κατανάλωση ενέργειας της προθέρμανσης στα μικροκύματα. Διαπίστωσαν επίσης ότι τα πυριτικά (χαλαζίας, αλβίτης, ορθόκλαστο, ζirkόνιο κλπ.) και ανθρακικά ορυκτά ( $\text{CaCO}_3$ ) παρουσιάζουν αδυναμία θέρμανσης. Τα οξείδια και τα σουλφίδια παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στη θερμική συμπεριφορά τους. Κάποια θερμαίνονται σε θερμοκρασίες άνω των  $1000^\circ\text{C}$  (μαγνητίτης, πυρίτης), ενώ κάποια άλλα συμπεριφέρονται ως μονωτές (χρωμίτης, κινναβαρίτης).

Οι Mc Gill et al. (1988) εξέτασαν την επίδραση της μικροκυματικής ισχύος στη θερμική συμπεριφορά ενός αριθμού χημικών ενώσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα σουλφίδια των μετάλλων θερμαίνονται αποτελεσματικά και η αύξηση της μικροκυματικής ισχύος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας ή την αύξηση του ρυθμού θέρμανσης. Η αύξηση της ισχύος προκαλεί την αύξηση του ρυθμού θέρμανσης κάποιων οξειδίων ( $\text{CuO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ενώ σε κάποια άλλα έχει μικρή επίδραση ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Τέλος, ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας δεν θερμαίνονται.

Οι Tavares και King (1996) ερεύνησαν δείγματα σιδήρου, τακονίτη και τιτανίου με χρήση χαμηλής ισχύος μεταξύ 0 και 1.2 kW, συγκρίνοντας τις αντοχές του μη επεξεργασμένου μεταλλεύματος με αυτές των μεταλλευμάτων που έχουν υποστεί επεξεργασία τόσο συμβατικής θέρμανσης όσο και με φούρνους μικροκυμάτων. Παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι θερμικές επεξεργασίες επηρέασαν το μεταλλεύμα ευνοϊκά τόσο όσον αφορά τη μείωση της ενέργειας θραύσης όσο και την αύξηση της ευθραυστότητας, ωστόσο, υπήρχε πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων για την συμβατική θέρμανση και την θέρμανση με μικροκύματα, με εξαίρεση τη μεγαλύτερη μείωση σε ενέργεια θραύσης του σιδηρομεταλλεύματος και την καλύτερη θραύση στο τιτάνιο με την χρήση μικροκυμάτων.

Οι Yixin και Chunpeng (1996) συσχέτισαν τους ρυθμούς θέρμανσης ορυκτών με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υλικά με μικρή αγωγιμότητα ( $\leq 10^{-8} \Omega^{-1}/\text{m}$ ) απορροφούν μικρό ποσό μικροκυματικής ισχύος και δεν θερμαίνονται. Υλικά με μεγάλη αγωγιμότητα ( $\geq 10^{-6} \Omega^{-1}/\text{m}$ ) δεν θερμαίνονται εξαιτίας του μικρού βάθους επηρεασμού (ανάκλαση ακτινοβολίας). Αντίθετα, υλικά με ενδιάμεσες τιμές αγωγιμότητας ( $10^{-8}$ - $10^{-6} \Omega^{-1}/\text{m}$ ) έχουν μεγάλο βάθος επηρεασμού και ταυτόχρονα απορροφούν σημαντικό ποσό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Οι Wang και Forssberg, 2000, πραγματοποίησαν δοκιμές σε τρία μεταλλεύματα, στον ασβεστόλιθο στον δολομίτη και στον χαλαζία, για να διερευνήσουν την επίδραση της θέρμανσης με μικροκύματα στη λειοτρίβησή τους με σφαιρόμυλο, χωρίς την παρουσία νερού. Κάθε μετάλλευμα διαχωρίστηκε σε τρία κλάσματα,  $-9.75+5.75$  mm,  $-4.7+1.6$  mm και  $-1.6$  mm και κάθε ένα από αυτά υποβλήθηκε σε δοκιμές λειοτρίβησης. Παρατηρήθηκε ότι σε δύο από τα μεταλλεύματα το μέγεθος του υλικού που υποβάλλεται σε θερμική προεπεξεργασία είχε σημαντική επίδραση που επηρέαζε την συμπεριφορά τους κατά τη λειοτρίβηση. Συγκεκριμένα, οι δοκιμές στο χαλαζία και στον ασβεστόλιθο έδειξαν ότι η προεπεξεργασία με μικροκύματα ήταν αποτελεσματική μόνο για το μέγεθος  $-9.5+4.75$  mm του υλικού. Κάτω από τα  $4.75$  mm, παρατηρήθηκε ελάχιστη ή και καθόλου βελτίωση που οφείλεται στην αγωγή μεταφορά θερμότητας που παίζει πιο σημαντικό ρόλο στην απώλεια θερμότητας στα μικρότερα τεμάχια. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του χρόνου εκπομπής αύξησε την ευθραυστότητα αυτών των δύο υλικών. Στον δολομίτη υπήρξε μικρή έως και καθόλου επίδραση με την χρήση μικροκυμάτων κατά την διαδικασία της ξηρής λειοτρίβησης.

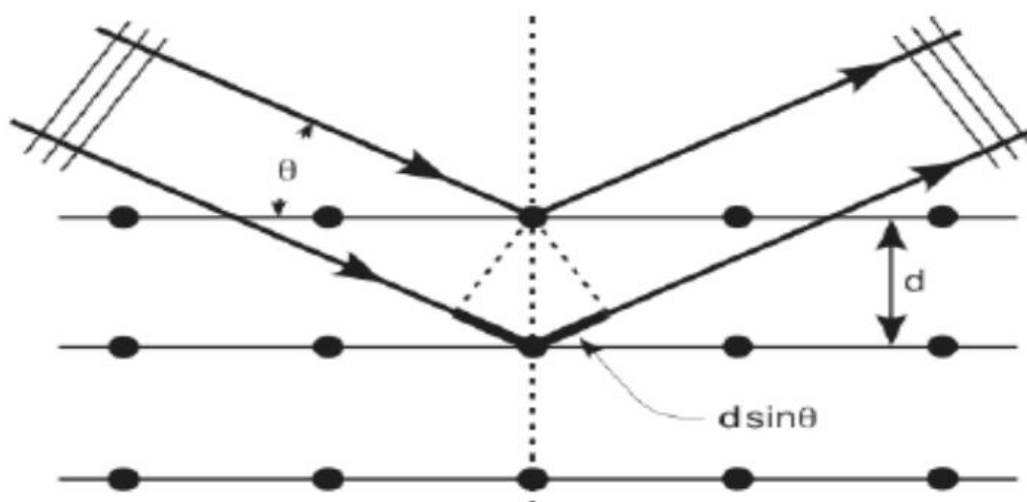
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

#### 5.1 Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος

Η ανάλυση γεωλογικών δειγμάτων με περιθλασιομετρία ακτίνων-X (X-Ray Diffraction, XRD) είναι μια κλασική μέθοδος ανάλυσης, που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της κρυσταλλικής δομής ενός ορυκτού ή/ και για τον προσδιορισμό των κύριων ορυκτολογικών φάσεων ενός πετρώματος (ποιοτική και ποσοτική ανάλυση). Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης δεν χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ορυκτολογικών φάσεων που συμμετέχουν με μικρό ποσοστό (Κανελλόπουλος, 2017).

Η μέθοδος στηρίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων X γνωστού μήκους κύματος ( $\lambda$ ) πάνω στα πλεγματικά επίπεδα των εξεταζόμενων δειγμάτων και στην συνέχεια στον προσδιορισμό των εσωτερικών διαστημάτων  $d$  των επιπέδων του κρυσταλλικού πλέγματος (Εικόνα 5.1), που είναι μοναδικά για κάθε ένα προσδιοριζόμενο ορυκτό (Τσακίρη, 2012).



Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της περίθλασης των ακτίνων-X, σύμφωνα με τον νόμο του Bragg

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης των ακτίνων-X πάνω στα πλεγματικά επίπεδα του ορυκτού και συνοψίζεται στο νόμο του Bragg (Σχέση 24):

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta) \quad (24)$$

Όπου:

$\lambda$ : το προσπίπτων μήκος κύματος,

$n$ : ακέραιος αριθμός που παριστάνει την τάξη της ανάκλασης,

$d$ : η απόσταση μεταξύ δυο παράλληλων διαδοχικών πλεγματικών επιπέδων του κρυσταλλικού πλέγματος,

$\theta$ : η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας δέσμης των πλεγματικών επιπέδων.

Ο νόμος του Bragg, διατυπώνει πως η παραπάνω σχέση ισχύει για προσπίπτουσα ακτινοβολία  $X$  μήκους κύματος  $\lambda$ , που σχηματίζει γωνία  $\theta$  με τα πλεγματικά επίπεδα του κρυστάλλου τα οποία ισαπέχουν με απόσταση  $d$ , ενώ  $n$  είναι ακέραιος αριθμός που παριστάνει την τάξη της ανάκλασης (Κωστάκης, 1999).

Στην περιθλασιμετρία ακτινών-  $X$ , το ζητούμενο μέγεθος είναι το  $d$ , γνωστό μέγεθος το  $\lambda$  και το μετρούμενο μέγεθος το  $2\theta$ .

Η ορυκτολογική ανάλυση του δείγματος έγινε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση περιθλασίμετρου ακτινών -  $X$  (XRD) τύπου D8 - Advance της εταιρείας Bruker AXS. Για την ανάλυση του δείγματος, χρησιμοποιήθηκε λυχνία χαλκού με φίλτρο νικελίου. Οι συνθήκες μέτρησης ήταν για την τάση λυχνίας  $U=35$  kV και της έντασης του ρεύματος  $I=35$  mA.

Το δείγμα που πρόκειται να αναλυθεί βρίσκεται υπό μορφή κόνεως μέσα στην κοιλότητα ενός μεταλλικού ή πλαστικού πλακιδίου. Το βάθος της κοιλότητας αυτής είναι περίπου 1 mm και έχει έκταση μερικών  $\text{cm}^2$ , ώστε να μπορεί σε αυτό να φιλοξενηθεί μάζα ίση με 1 g, η οποία κατανέμεται στο δειγματοφορέα με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζει επίπεδη επιφάνεια (Κωστάκης, 2005).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΩΞΙΤΗ

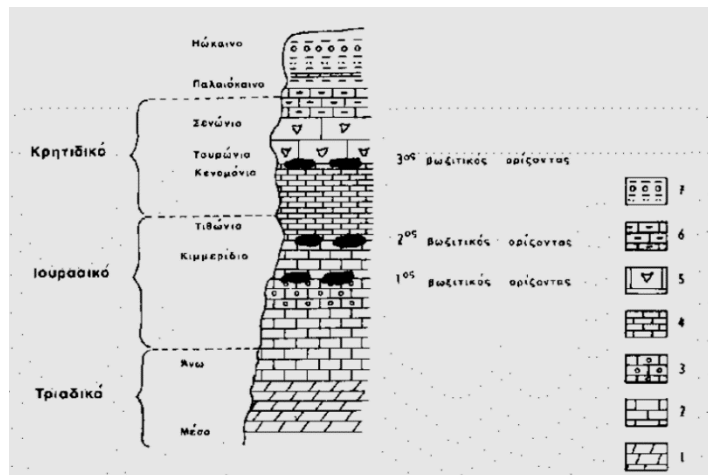
### 6.1 Γεωλογία περιοχής δείγματος

Η προέλευση του υλικού που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από την ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας.

Η ονομασία της ζώνης οφείλεται στα αντίστοιχα βουνά Παρνασσό και Γκιώνα της Στερεάς Ελλάδας που συγκροτούν κύρια τη ζώνη όπως καθορίστηκε αρχικά από τον Renz (1940).

Η ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας θεωρήθηκε στο δυαδικό Αλπικό σύστημα εναλλασσομένων αυλακών και υβωμάτων ως σχηματισμοί που αποτέθηκαν σε ένα ύβωμα τοπικά παρεμβαλλόμενο μεταξύ της κατωφέρειας της Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών (Υποπελαγονικής ζώνης) και της αύλακας της Πίνδου. Δεν εκτείνεται σε όλο το μήκος της επαφής των ζωνών Υποπελαγονικής και Πίνδου αλλά περιορίζεται μόνον στην Κεντρική Στερεά Ελλάδα (Μανούτσογλου, 2013).

Στρωματογραφικά εξεταζόμενη αποτελείται από νηρητικούς ασβεστόλιθους και δολομιτωμένους ασβεστόλιθους που αρχίζουν από το Ανώτερο Τριαδικό έως το Ανώτερο Κρητιδικό (Σενώνιο). Η ανθρακική αυτή ιζηματογένεση δεν ήταν συνεχής, αλλά έχει διακοπεί τρεις φορές συνοδευόμενη από διάβρωση και απόθεση βωξιτών. Ο πρώτος βωξιτικός ορίζοντας έχει δημιουργηθεί μεταξύ Δογγερίου και Μαλμίου, ο δεύτερος στο τέλος του Ιουρασικού και ο τρίτος μεταξύ του Κατωτέρου και του Ανωτέρου Κρητιδικού όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.1 (Μανούτσογλου, 2013).

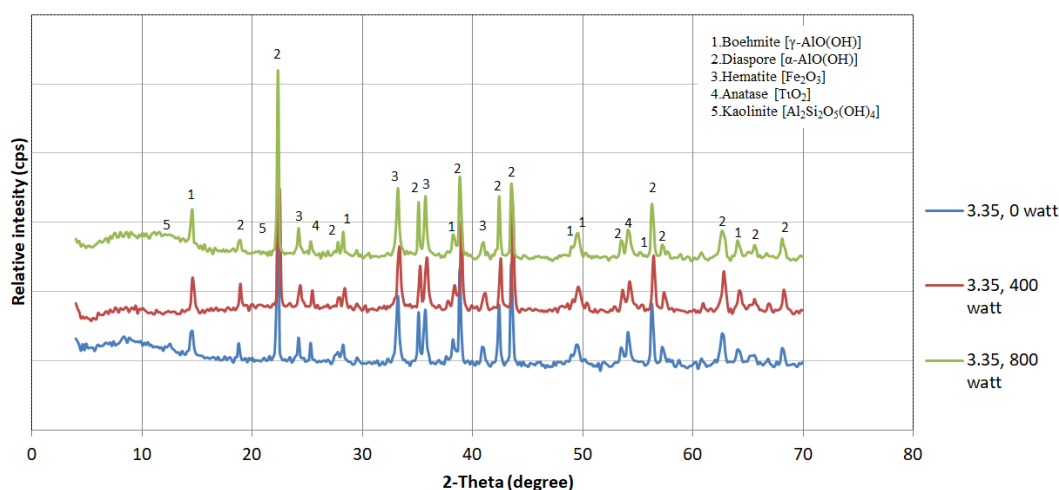


Εικόνα 6.1: Σχηματική στρωματογραφική στήλη της ζώνης Παρνασσού - Γκιώνας

Τα κοιτάσματα βωξίτη της Ελλάδας είναι δευτερογενή κοιτάσματα. Προήλθαν από την αποσάθρωση πρωτογενών κοιτασμάτων (λατεριτικών μανδυνών), τα οποία είχαν αναπτυχθεί πάνω στους οφιολίθους της Υποπελαγονικής Ενότητας. Τα υπό λατεριτίωση πετρώματα ήταν κυρίως τα βασικά μέλη των οφιολιθικών συμπλεγμάτων (βασάλτες, γάββροι και διαβάσεις) με συμμετοχή και των υπερμαφικών πετρωμάτων των οφιολιθικών συμπλεγμάτων όπως υποδηλώνει η σημαντική περιεκτικότητα σε Ni (νικέλιο) και Cr (χρώμιο). Το υλικό που προέκυψε από την καταστροφή των πρωτογενών κοιτασμάτων μεταφέρθηκε σε αβαθές θαλάσσιο περιβάλλον και αποτέθηκε μέσα σε ασβεστολιθικά καρστ δίνοντας έτσι τους καρστικού τύπου βωξίτες. Ο ιστός του μεταλλεύματος είναι πισσολιθικού ή συμπαγούς τύπου. Το πισσολιθικού τύπου μετάλλευμα αποτελείται από κλασσικούς κόκκους (πισσόλιθοι) πλουσίους σε αιματίτη και από τη θεμελιώση μάζα η οποία είναι πλούσια σε διάσπορο ή/ και βαιμίτη (Γρίβα, 2012).

## 6.2 Ορυκτολογική ανάλυση δειγμάτων με Περιθλασίμετρο Ακτινών – X (XRD)

Η ορυκτολογική εξέταση των δειγμάτων έγινε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση περιθλασίμετρου ακτινών – X (XRD).



**Διάγραμμα 6.1:** Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικών φάσεων για το κλάσμα -3.35+1.70 mm για 0 W, 400 W, 800 W

Από την ορυκτολογική ανάλυση του Διαγράμματος 6.1 προκύπτει ότι οι κύριες φάσεις που εμφανίζονται είναι το διάσπορο  $[\alpha\text{-AlO(OH)}]$ , ο βαιμίτης  $[\gamma\text{-AlO(OH)}]$  και ο αιματίτης  $[\text{Fe}_2\text{O}_3]$ . Σε μικρότερες περιεκτικότητες εμφανίζονται ο ανατάσης  $[\text{TiO}_2]$  και ο καολινίτης  $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ .

### 6.3 Χημική ανάλυση (XRF)

Οι χημικές αναλύσεις του βωξίτη πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης και έγινε σε αντιπροσωπευτικά δείγματα με την χρήση της μεθόδου XRF.

Η χημική ανάλυση του υλικού, μας δίνει την περιεκτικότητα του σε κύρια στοιχεία σε μορφή οξειδίων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στον πίνακα (6.1) που ακολουθεί:

**Πίνακας 6.1:** Χημική ανάλυση του λατερίτη σε όλα τα επίπεδα ισχύος και με προεργασία σε συμβατικό εργαστηριακό φούρνο στους 200°C

Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	Ισχύς (W)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{TiO}_2$ (%)	LOI* (%)
-3.35 (αρχικό)	0	56.85	22.97	2.26	4.03	13.00
-3.35+1.70	0	56.00	23.34	1.93	3.93	13.20
-3.35+1.70	400	56.61	23.10	2.42	4.05	12.80
-3.35+1.70	800	57.05	22.35	2.40	3.95	12.70

-3.35+1.70 (16 min)	800	55.40	24.11	2.39	4.11	12.90
-3.35+1.70 (200°C)	800	51.69	26.39	3.31	4.13	12.60

∗: loss on ignition (απώλεια πύρωσης)

#### 6.4 Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική ανάλυση, προσδιορίζει τη διαβάθμιση των κόκκων του υλικού σε σχέση με το μέγεθός τους και το ποσοστό συμμετοχής κάθε μεγέθους κόκκων.

Για την κοκκομετρική ανάλυση του βωξίτη έγινε χρήση αντιπροσωπευτικής ποσότητας αρχικού δείγματος η οποία προήλθε από την τεταρτοδιαίρεσή του. Έπειτα με διαδοχική θραύση σε σιαγονωτό σπαστήρα έφτασε σε μεγέθους - 3,35 mm. Στη συνέχεια το δείγμα κοσκινίστηκε εν υγρώ στο κόσκινο 0.106 mm. Κατά την διαδικασία αυτή, το υλικό που παρέμεινε στο κόσκινο (κλάσμα +0.106) ξηράθηκε σε φούρνο και μετά κοσκινίστηκε εν ξηρώ με την μηχανή κοσκίνισης για την μέτρηση της κοκκομετρικής κατανομής. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν 6 κοκκομετρικά κλάσματα όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2. Από το βάρος που παρέμεινε σε κάθε κόσκινο δημιουργήθηκε η καμπύλη του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος του κοσκίνου (Διάγραμμα 6.2). Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι το μέγεθος  $d_{80}$  του αρχικού μεταλλεύματος είναι 2.9 mm.

Πίνακας 6.2: Βάρη κοκκομετρικών κλασμάτων αρχικού δείγματος

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	παραμένον υλικό (g)	παραμένον υλικό (%)	αθροιστικό διερχόμενο βάρος (%)
3.35	0	0	100
1.7	275.9	80.4	19.6
0.85	49.8	14.5	5.1
0.425	10	2.9	2.2
0.212	2.4	0.7	1.5
0.106	1.5	0.4	1.1
-0.106	3.7	1.1	
Σύνολο	343.3	100	



Διάγραμμα 6.2: Καμπύλη κοκκομετρικής ανάλυσης αρχικού δείγματος



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

### **7.1 Κοσκίνιση-Θραύση**

Για τη θραύση του μεταλλεύματος χρησιμοποιήθηκαν ένας σιαγονωτός σπαστήρας τύπου Fritsch pulverisette 1 (Εικόνα 7.1) και ένας κωνικός σπαστήρας τύπου Serour (Εικόνα 7.2). Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο σπαστήρας διαθέτει 5 θέσεις όπου κάθε θέση έχει διαφορετικό άνοιγμα αποκένωσης (η θέση 5 να έχει το μεγαλύτερο και η θέση 1 το μικρότερο άνοιγμα).

Το μετάλλευμα θραύτηκε σε δύο στάδια. Αρχικά στη θέση 5 που αντιστοιχεί σε μέσο άνοιγμα αποκένωσης 15-9 mm. Στη συνέχεια, το προϊόν που προέκυψε τοποθετήθηκε σε κόσκινο με διάμετρο οπών 3.35 mm. Μετά την κοσκίνιση το παραμένον υλικό οδηγήθηκε ξανά στον σπαστήρα στην θέση 1 με μέσο άνοιγμα αποκένωσης 3-1 mm. Στην συνέχεια επαναλήφθηκε η προηγούμενη διαδικασία με σκοπό όλο το μετάλλευμα να έχει μέγεθος μικρότερο από 3.35 mm. Μετά τις ανακυκλώσεις, το εναπομείναν μετάλλευμα με μέγεθος τεμαχιδίων μεγαλύτερο από 3.35 mm οδηγήθηκε σε κωνικό σπαστήρα προκαθορισμένου ανοίγματος και η διαδικασία της κοσκίνισης σε κόσκινο μεγέθους 3.35 mm συνεχίστηκε μέχρι όλο το μετάλλευμα να έχει τελικό μέγεθος <3.35 mm.



**Εικόνα 7.1: Εργαστηριακός Σιαγονωτός σπαστήρας.**



Εικόνα 7.2: Εργαστηριακός κωνικός σπαστήρας.

Στη συνέχεια, έγινε υγρή κοσκίνιση στα 106  $\mu\text{m}$ . Το κλάσμα +106  $\mu\text{m}$  τοποθετήθηκε στο φούρνο για ξήρανση στους 105°C για ένα 24ωρο, ενώ το κλάσμα -106  $\mu\text{m}$  φυλάχθηκε. Το υλικό μετά την ξήρανση (κλάσμα + 106  $\mu\text{m}$ ) κοσκινίστηκε εν ξηρώ, για τη λήψη 6 στενών κοκκομετρικών κλασμάτων με λόγο 2. Τα κλάσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- - 3.35 + 1.7mm
- - 1.7 + 0.85mm
- - 0.85 + 0.425mm
- - 0.425 + 0.212mm
- - 0.212 + 0.106mm
- - 0.106mm

Στην συνέχεια με ενοποίηση των προηγούμενων κλασμάτων, δημιουργήθηκαν 3 συγκεκριμένα κοκκομετρικά κλάσματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές λειοτρίβησης:

- - 3.35 + 1.7mm

- -  $0.85 + 0.425\text{mm}$
- -  $0.212 + 0.106\text{mm}$

## 7.2 Εργαστηριακός σφαιρόμυλος

Για τις δοκιμές λειοτρίβησης του μεταλλεύματος χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός σφαιρόμυλος ασυνεχούς λειτουργίας τύπου Sepor (Batch ball mill) (Εικόνα 7.3). Ο συγκεκριμένος σφαιρόμυλος με την βοήθεια ενός συστήματος περιστρεφόμενων ράουλων περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Τα χαρακτηριστικά του σφαιρόμυλου φαίνονται στον Πίνακα 7.1.



Εικόνα 7.3: Εργαστηριακός σφαιρόμυλος τύπου Sepor

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά εργαστηριακού σφαιρόμυλου

Εσωτερική διάμετρος, D (cm)	20.4
Εσωτερικό Μήκος, L (cm)	16.6
Όγκος μύλου, V (cm <sup>3</sup> )	5.423
Συχνότητα Περιστροφής N (rpm)	66
Κρίσιμη Συχνότητα Περιστροφής, N <sub>c</sub> (rpm)	93.7

Κάθε ένα από τα στενά κοκκομετρικά κλάσματα που δημιουργήθηκαν λειοτριβήθηκαν στον εργαστηριακό σφαιρόμυλο για διαφορετικούς χρόνους. Οι χρόνοι που επιλέχθηκαν για τη λειοτρίβηση ήταν 0.5, 2 και 4 min για τα κλάσματα -  $0.850+0.425\text{ mm}$  και  $-0.212+0.106\text{ mm}$ , ενώ το κλάσμα  $-3.35+1.70\text{ mm}$  λειοτριβήθηκε και σε μεγαλύτερους χρόνους (0.5, 2, 4, 16 και 32 min). Οι διάμετροι των σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 25.4 mm, 12.7 mm και 6.5 mm. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές δοκιμών για κάθε ένα από τα κλάσματα τα οποία είχαν υποβληθεί σε μικροκυματική ακτινοβολία διαφορετικού επίπεδου ισχύος (0, 400 και 800 W).

### 7.3 Φούρνος μικροκυμάτων

Για την θέρμανση του υλικού σε μικροκύματα χρησιμοποιήθηκε οικιακός φούρνος μικροκυμάτων Sharp με 5 επίπεδα ισχύος και μέγιστη ισχύ τα 800 W (Εικόνα 7.4).



Εικόνα 7.4: Φούρνος μικροκυμάτων Sharp

Όπως ήδη αναφέρθηκε μετά τη δημιουργία των στενών κοκκομετρικών κλασμάτων, κάθε κλάσμα συγκεκριμένου βάρους εισέρχεται στον φούρνο μικροκυμάτων για χρόνο παραμονής 3 min όπου μελετήθηκε η επίδραση της ισχύος. Η ισχύς που χρησιμοποιήθηκε ήταν 400W και 800W και οι κατανομές των προϊόντων λειοτρίβησης συγκρίθηκαν με εκείνες όταν το μετάλλευμα δεν είχε υποβληθεί σε μικροκυματική ακτινοβολία (επίπεδο ισχύος 0W). Εξετάστηκε επίσης, η επίδραση του χρόνου παραμονής. Πιο συγκεκριμένα, το κλάσμα  $-3.35+1.70$  mm εξετάστηκε για χρόνο παραμονής του στο φούρνο μικροκυμάτων για 20 min, σε επίπεδο ισχύος 800W.

Στη συνέχεια, η κατανομή των προϊόντων συγκρίθηκε με την κατανομή του αντίστοιχου επιπέδου ισχύος για χρόνο παραμονής 3min και με αυτή χωρίς έκθεση σε ακτινοβολία μικροκυμάτων (0 W).

### 7.4 Συσκευή κοσκίνισης

Για την μέτρηση της κοκκομετρικής κατανομής του αρχικού υλικού και των προϊόντων λειοτρίβησης χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός δονητής κοσκίνων τύπου RETSCH VE1000.

Αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη:

- Ένα σύστημα χρονομέτρησης το οποίο επιτρέπει κοσκίνιση από 1 – 99 λεπτοδιακοπτόμενης ή συνεχής λειτουργίας.

- Ένα σύστημα δόνησης το οποίο παρέχει δυνατότητα ρύθμισης του εύρους δόνησης από 0–3 mm.
- Ένα σύνολο εξαρτημάτων τα οποία συγκρατούν τα κόσκινα το ένα κάτω από το άλλο.



**Εικόνα Error! Use the Home tab to apply 0 to the text that you want to appear here.5: Συσκευή Κοσκίνισης RETSCH VE 1000**

Η κοσκίνιση των προϊόντων λειοτρίβησης έγινε χρησιμοποιώντας τυποποιημένα κόσκινα ASTM E11 διαμέτρου Φ200 mm και βάθους 50 mm, ενώ το εύρος δόνησης της μηχανής που επιλέχτηκε ήταν 0.6 mm (Εικόνα 7.5).

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

- Για το κλάσμα -3.35+1.70 mm:  
1.70, 0.850, 0.425, 0.212, 0.106 mm
- Για το κλάσμα -0.850+0.425 mm:  
0.425 , 0.212 , 0.106 mm
- Για το κλάσμα -0.212+0.106 mm:  
0.106 , 0.075 , 0.053 mm

Μετά το πέρας της κοσκίνισης, το υλικό το οποίο είχε παραμείνει στο κάθε κόσκινο μεταφερόταν στη ζυγαριά για τη μέτρηση του βάρους του. Το άθροισμα τους συγκρίνονταν με το βάρος του αρχικού δείγματος, το οποίο δεν έπρεπε να διαφέρει σημαντικά (απόκλιση μικρότερη από 1%).

### 7.5 Κοκκομετρικός αναλυτής laser

Για να προσδιορίσουμε την κατανομή μεγέθους των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε ο κοκκομετρικός αναλυτής Master sizer S της Malvern, ο οποίος είναι ένα σύστημα Laser Ηλίου-Νέον και έχει ισχύ 2 mW (Εικόνα 7.6). 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. Όσο μεγαλύτερο το μέγεθος, τόσο μικρότερη η γωνία και αντίστροφα.

Οι βασικές μονάδες από τις οποίες αποτελείται ο αναλυτής είναι:

- a) Οπτική μονάδα μέτρησης
- b) Μονάδα αιώρησης του δείγματος
- c) Σύστημα υπολογιστή
- d) Λειτουργικό πρόγραμμα της Malvern



Εικόνα 7.6: Κοκκομετρικός αναλυτής Master sizer S τύπου Malvern (πηγή: Πετράκης, 2004).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 8.1 Αθροιστικό διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει μεγέθους

Για τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής κατανομής των τριών κλασμάτων τροφοδοσίας,  $(-3.35 + 1.7\text{mm})$ ,  $(-0.850 + 0.425\text{mm})$ ,  $(-0.212 + 0.106\text{mm})$  χρησιμοποιήθηκε το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος του κοσκίνου.

Παρακάτω παραθέτονται οι πίνακες και τα σχετικά διαγράμματα της αθροιστικής κατανομής σε σχέση με το μέγεθος των κοσκίνων για κάθε υλικό τροφοδοσίας σε όλους τους χρόνους λειοτρίβησης και για όλα τα επίπεδα ισχύος (0W, 400W, 800W).

#### 8.1.1 Τροφοδοσία $-3.35 + 1.70 \text{ mm}$

Στο κλάσμα  $-3.35+1.70 \text{ mm}$  εκτός από τους χρόνους 0.5, 2, 4, min έγινε περαιτέρω μελέτη της επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας ισχύος 0, 400 και 800 W για χρόνους λειοτρίβησης 16 και 32 min.

Πίνακας 8.1: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος  $-3.35 + 1.7\text{mm}$  για 0 W

0 W										
Μέγεθος mm	% Βάρος					% Αθρ. διερχόμενο βάρος				
	0.5 min	2 min	4 min	16 min	32 min	0.5 min	2 min	4 min	16 min	32 min
3.35	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100
1.7	78.2	67.7	59.7	26.6	13.7	21.8	32.3	40.3	73.4	86.32
0.85	13.3	17.4	17.3	12.9	4.8	8.6	14.9	23.0	60.6	81.55
0.425	2.1	3.3	3.8	3.4	1.4	6.5	11.7	19.3	57.2	80.18
0.212	1.1	1.7	2.0	1.9	0.9	5.4	9.9	17.2	55.2	79.25
0.106	0.9	1.6	2.1	2.3	1.1	4.5	8.3	15.1	52.9	78.11
-106	4.5	8.3	15.1	52.9	78.1					
Σύνολο	100	100	100	100	100					



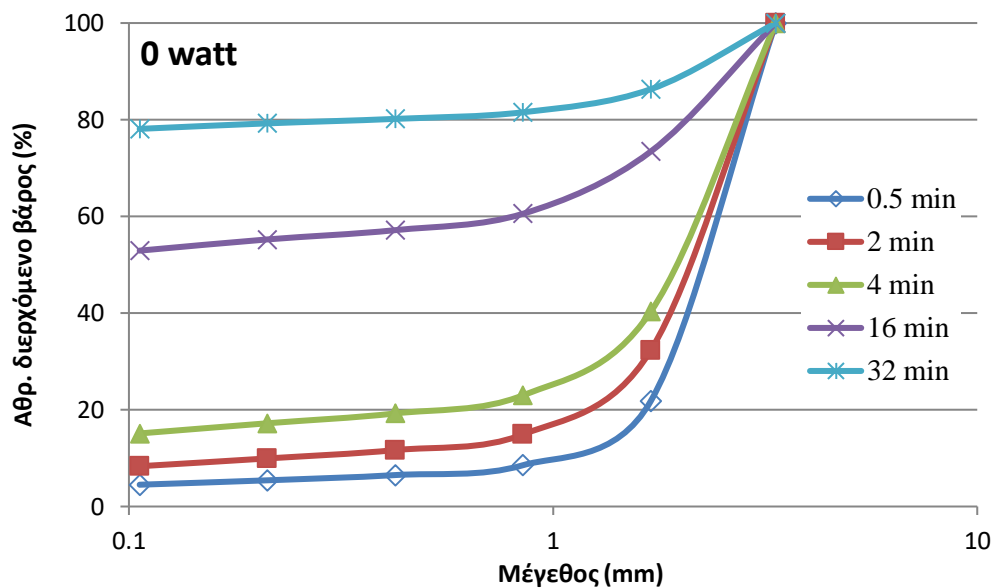
Πίνακας 8.2: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -3.35 +1.7mm για 400 W

400 W										
Μέγεθος mm	% Βάρος					% Αθρ. διερχόμενο βάρος				
	0.5 min	2 min	4 min	16 min	32 min	0.5 min	2 min	4 min	16 min	32 min
3.35	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100
1.7	79.2	67.0	58.9	25.0	11.9	20.8	33.0	41.1	75.0	88.1
0.85	13.1	19.3	15.8	12.9	5.7	7.8	13.7	25.3	62.1	82.4
0.425	2.0	2.6	4.1	2.8	2.3	5.7	11.1	21.3	59.3	80.1
0.212	1.2	1.4	2.4	1.6	2.1	4.5	9.7	18.9	57.7	78.0
0.106	0.9	1.4	2.5	2.5	2.3	3.6	8.3	16.4	55.2	75.7
-0.106	3.6	8.4	16.4	55.2	75.7					
Σύνολο	100	100	100	100	100					

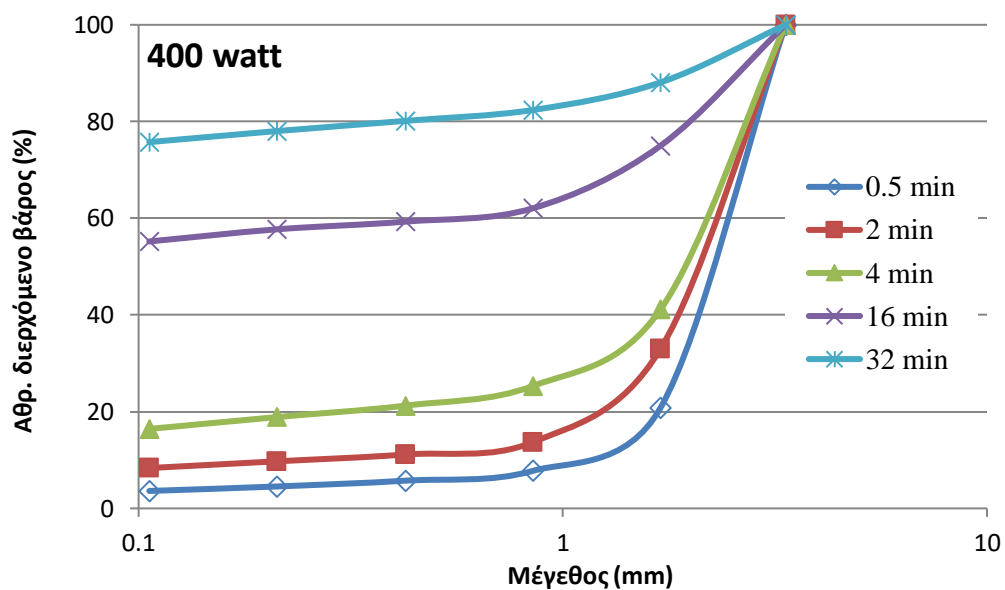
Πίνακας 8.3: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -3.35 +1.7mm για 800 W

800 W										
Μέγεθος mm	% Βάρος					% Αθρ. διερχόμενο βάρος				
	0.5 min	2 min	4 min	16 min	32 min	0.5 min	2 min	4 min	16 min	32 min
3.35	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100
1.7	78.7	65.9	56.8	23.5	10.1	21.3	34.1	43.2	76.5	89.9
0.85	11.8	18.5	15.7	10.5	4.8	9.5	15.6	27.5	66.0	85.1
0.425	2.1	4.0	4.8	2.8	1.2	7.5	11.6	22.7	63.1	83.9
0.212	1.2	2.0	2.5	1.5	1.2	6.3	9.6	20.2	61.6	82.8
0.106	0.9	1.8	3.5	1.8	1.4	5.4	7.8	16.8	59.9	81.4
-0.106	5.4	7.8	16.8	59.9	81.3					
Σύνολο	100	100	100	100	100					

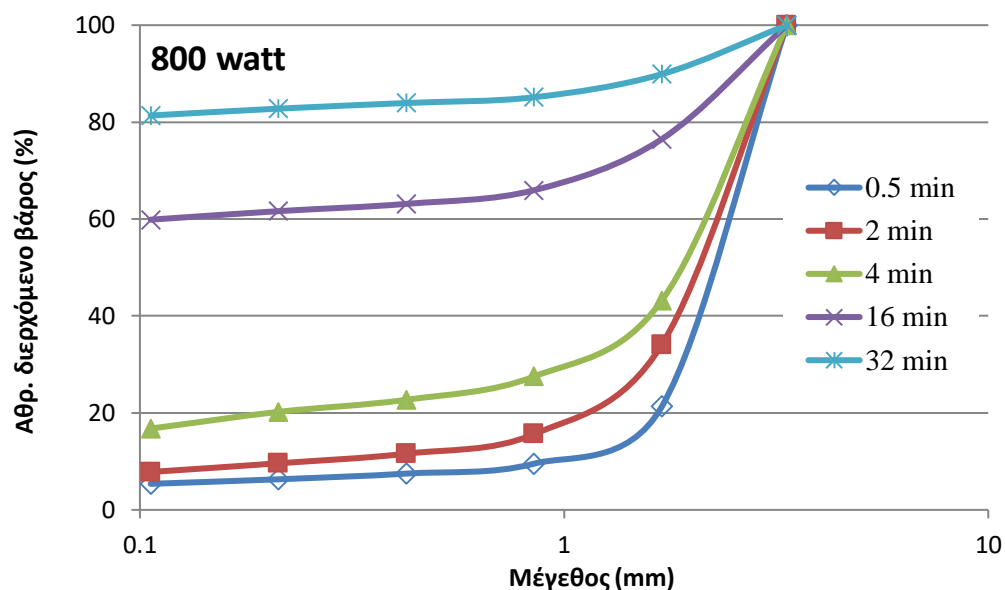
Από του πίνακες (8.1) – (8.3) προκύπτουν τα Διαγράμματα 8.1–8.3 του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος, για κάθε μικροκυματική ισχύ και για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 8.1: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής βάρους (%) του κλάσματος - 3.35 + 1.7 mm σε διάφορους χρόνους λειοτριβήσης για ισχύ 0 W



Διάγραμμα 8.2: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής βάρους (%) του κλάσματος - 3.35 + 1.7 mm σε διάφορους χρόνους λειοτριβήσης για ισχύ 400 W



Διάγραμμα 8.3: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής βάρους (%) του κλάσματος - 3.35 + 1.7 mm σε διάφορους χρόνους λειοτρίβησης για ισχύ 800 W

Από τα προηγούμενα Διαγράμματα 8.1-8.3 διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο το μέγεθος μικραίνει γιατί οι καμπύλες μετατοπίζονται προς τα αριστερά δηλαδή προς τα λεπτότερα κλάσματα. Πιο συγκεκριμένα για το μέγεθος 1.7mm, παρατηρείται αύξηση στο διερχόμενο βάρος από 18.5-21.9% όταν ο χρόνος αυξάνεται από 0.5 σε 4 min, ενώ για το μέγεθος 0.106 mm η αντίστοιχη αύξηση είναι από 10.6-12.8%.

#### 8.1.2 Τροφοδοσία -0.850 + 0.425 mm

Στην συνέχεια στους Πίνακες 8.4-8.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κοκκομετρικού κλάσματος -0.850 + 0.425 mm για όλους τους χρόνους λειοτρίβησης και για όλα τα επίπεδα ισχύος.

Πίνακας 8.4: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -0.850+0.412 mm για 0 W

0 W						
Μέγεθος mm	% Βάρος			% Αθρ. διερχόμενο βάρος		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5 min	2 min	4 min

0.85	0	0	0	100	100	100
0.425	65.9	41.1	21.5	34.1	58.9	78.5
0.212	19.8	25.9	27.0	14.3	33.0	51.6
0.106	4.7	12.1	17.5	9.6	20.9	34.1
-0.106	9.6	20.9	34.1			
Σύνολο	100	100	100			

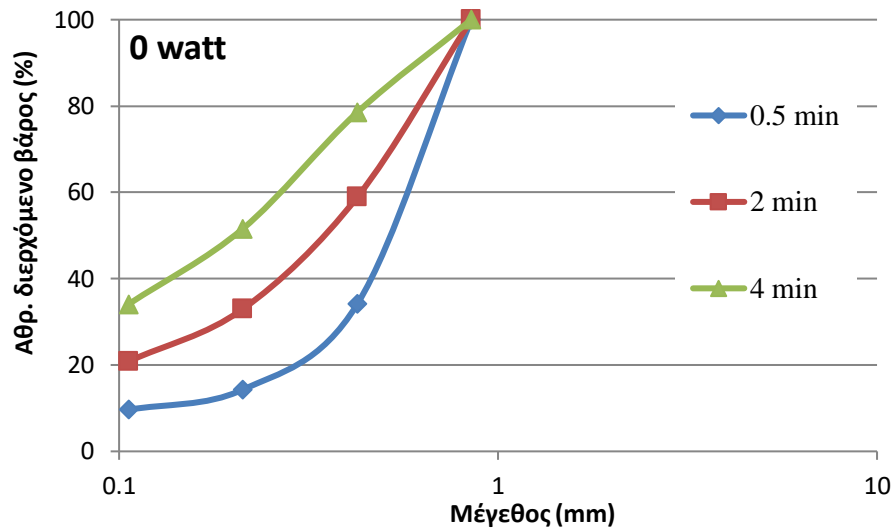
**Πίνακας 8.5: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -0.850+0.412 mm για 400 W**

400 W						
Μέγεθος mm	% Βάρος			% Αθρ. διερχόμενο βάρος		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5min	2 min	4 min
0.85	0	0	0	100	100	100
0.425	63.8	39.2	19.7	36.2	60.8	80.3
0.212	17.3	27.0	26.1	18.9	33.8	54.2
0.106	6.3	11.0	18.4	12.6	22.7	35.8
-0.106	12.6	22.7	35.8			
Σύνολο	100	100	100			

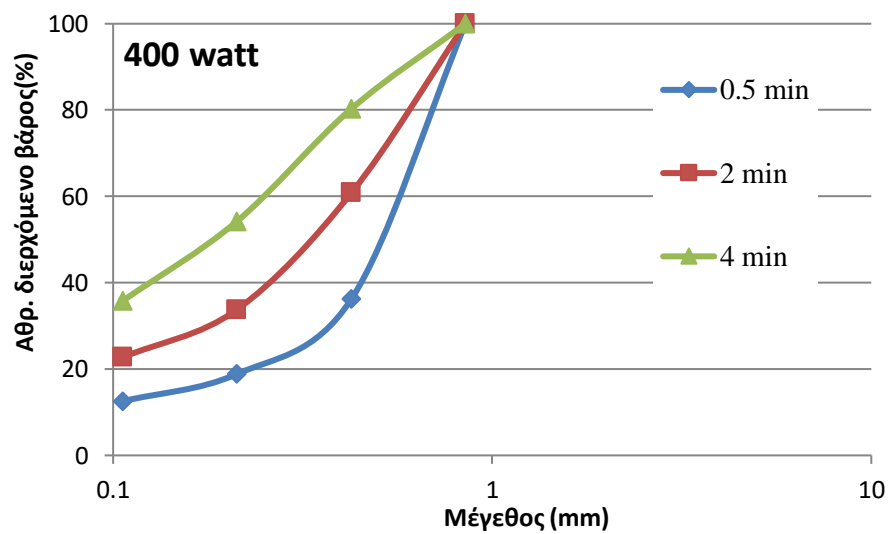
**Πίνακας 8.6: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -0.850+0.412 mm για 800 W**

800 W						
Μέγεθος mm	% Βάρος			% Αθρ. διερχόμενο βάρος		
	0.5 min	2 min	4 min	0,5 min	2 min	4 min
0.85	0	0	0	100	100	100
0.425	62.8	37.1	18.8	37.2	62.9	82.2
0.212	15.9	28.0	33.1	21.3	34.9	57.5
0.106	6.9	11.3	15.6	14.4	23.6	43.0
-0.106	14.4	23.6	32.5			
Σύνολο	100	100	100			

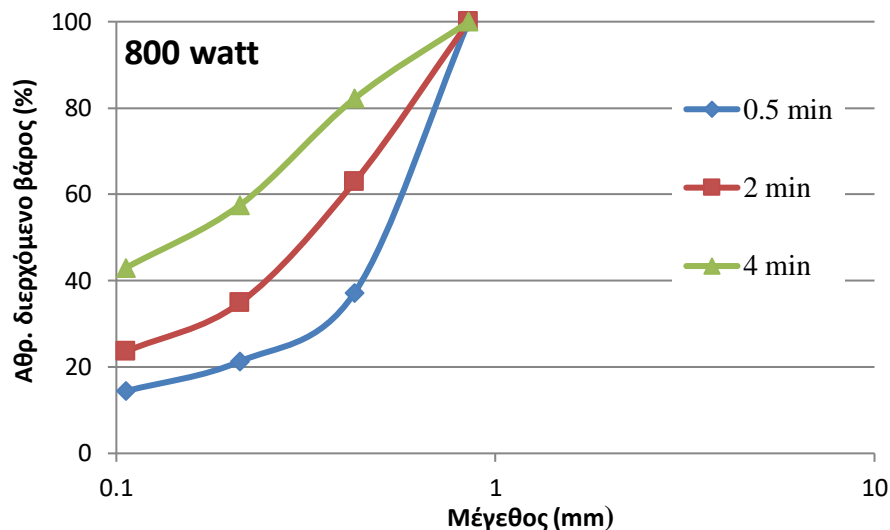
Από τους Πίνακες 8.4-8.6 προκύπτουν τα Διαγράμματα 8.4-8.6 του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος, ανά μικροκυματική ισχύ και για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 8.4: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (-0.850 + 0.412 mm ) σε διάφορους χρόνους στα 0 W



Διάγραμμα 8.5: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (-0.850 +0.412 mm ) σε διάφορους χρόνους στα 400 W



Διάγραμμα 8.6: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (-0.850 +0.412 mm ) σε διάφορους χρόνους στα 800 W

Από τα προηγούμενα Διαγράμματα 8.4-8.6 διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο το μέγεθος μειώνεται γιατί οι καμπύλες μετατοπίζονται προς τα αριστερά δηλαδή προς τα λεπτότερα κλάσματα. Για το μέγεθος 0.850 mm, παρατηρείται αύξηση στο διερχόμενο βάρος από 44.1-45%, όταν ο χρόνος αυξάνεται από 0.5 min σε 4 min, ενώ για το μέγεθος 0.106 mm η αντίστοιχη αύξηση είναι από 23.2-28.6%.

### 8.1.3 Τροφοδοσία -0.212 + 0.106 mm

Τέλος, στους Πίνακες 8.7-8.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κοκκομετρικού κλάσματος -0.212 0.106 mm για όλους τους χρόνους και για όλα τα επίπεδα ισχύος.

Πίνακας 8.7: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -0.212+106 mm για 0 W

0 W						
Μέγεθος mm	% Βάρος			% Αθρ. διερχόμενο βάρος		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5 min	2 min	4 min
0.212	0	0	0	100	100	100
0.106	53.1	38.3	31.9	46.9	61.7	68.1
0.075	12.6	9.8	13.6	34.3	51.9	54.5
0.053	9.2	11.6	10.6	25.1	40.3	43.9
-0.053	25.1	40.3	43.9			
Σύνολο	100	100	100			

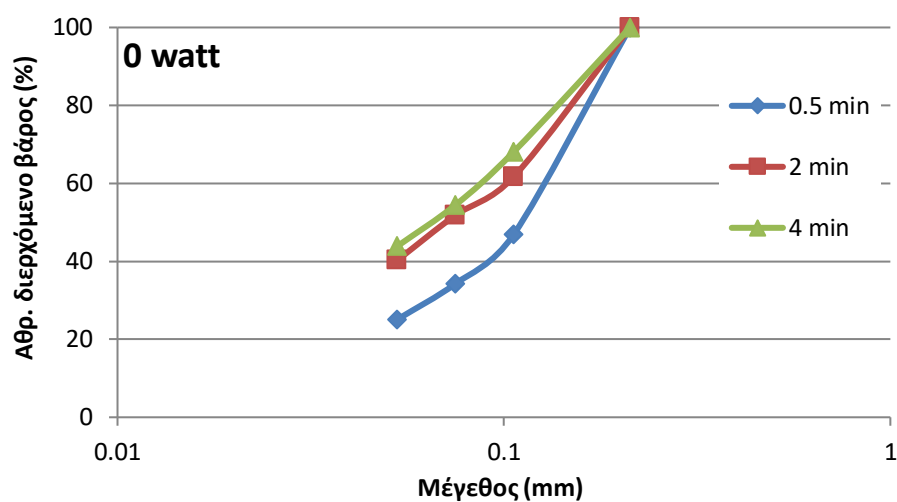
**Πίνακας 8.8: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -0.212+106 mm για 400 W**

400 W						
Μέγεθος mm	% Βάρος			% Αθρ. διερχόμενο βάρος		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5 min	2 min	4 min
0.212	0	0	0	100	100	100
0.106	48.5	35.8	27.5	51.5	64.2	72.5
0.075	10.9	12.7	14.3	40.6	51.5	58.2
0.053	9.2	8.3	10.4	31.4	43.2	47.8
-0.053	31.4	43.2	47.8			
Σύνολο	100	100	100			

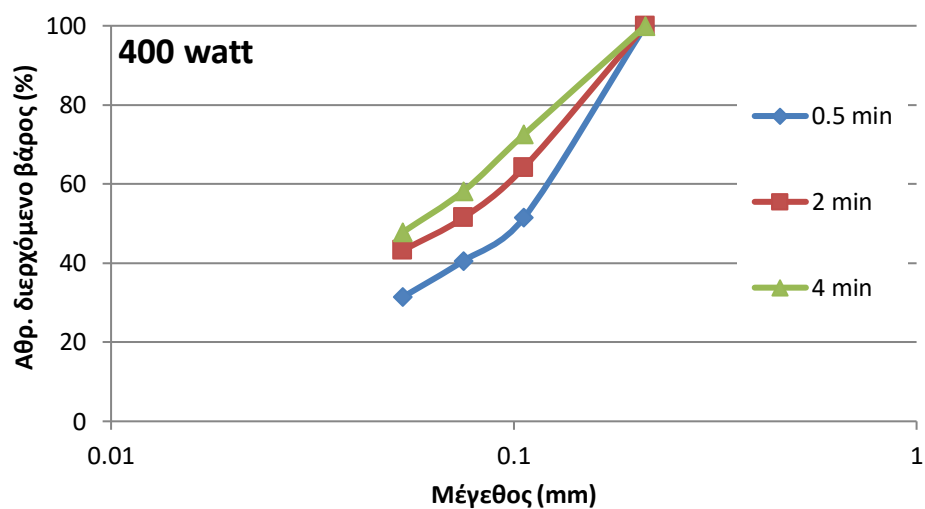
**Πίνακας 8.9: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -0.212+106 mm για 800 W**

800 W						
Μέγεθος mm	% Βάρος			% Αθρ. διερχόμενο βάρος		
	0.5 min	2 min	4 min	0.5 min	2 min	4 min
0.212	0	0	0	100	100	100
0.106	47.3	34.7	25.3	52.7	65.3	74.7
0.075	8.9	10.8	11.4	43.8	54.5	63.3
0.053	9.3	10.2	11.2	34.5	44.3	52.1
-0.053	34.5	44.3	52.1			
Σύνολο	100	100	100			

Από τους Πίνακα 8.7-8.9 προκύπτουν τα διαγράμματα 8.7-8.9 του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του κοσκίνου, για μέγεθος τροφοδοσίας -0.212+0.106 mm, ανά μικροκυματική ισχύ και για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.

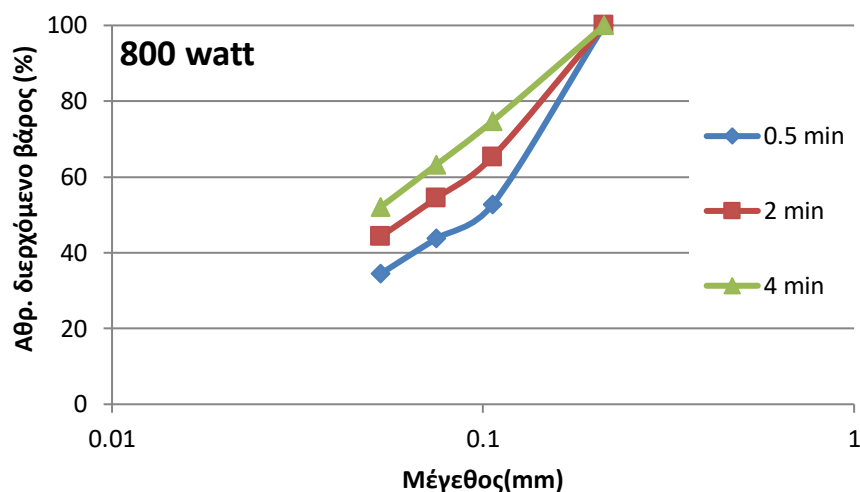


Διάγραμμα 8.7: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (-0.212 +0.106 mm) σε διάφορους χρόνους στα 0 W



Διάγραμμα 8.8: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (-0.212 +0.106 mm) σε διάφορους χρόνους στα 400 W



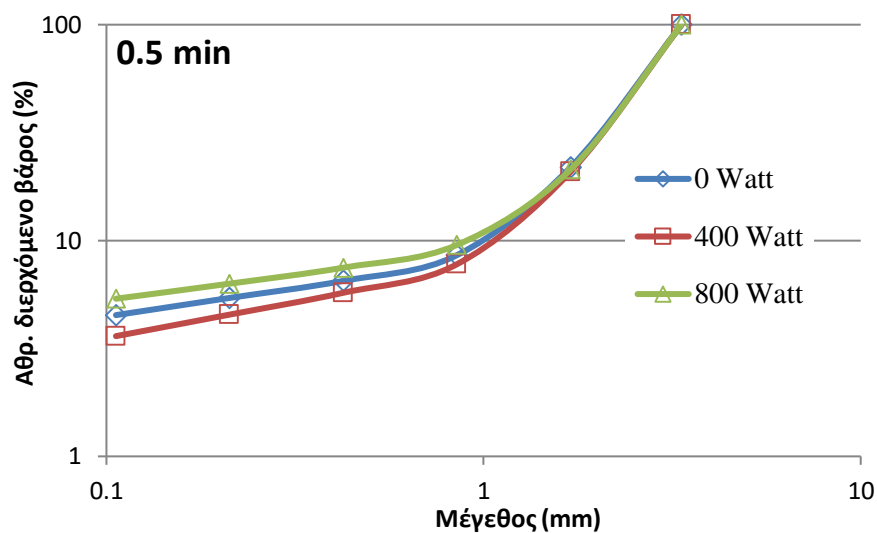


Διάγραμμα 8.9: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (-0.212 +0.106 mm) σε διάφορους χρόνους στα 800 W

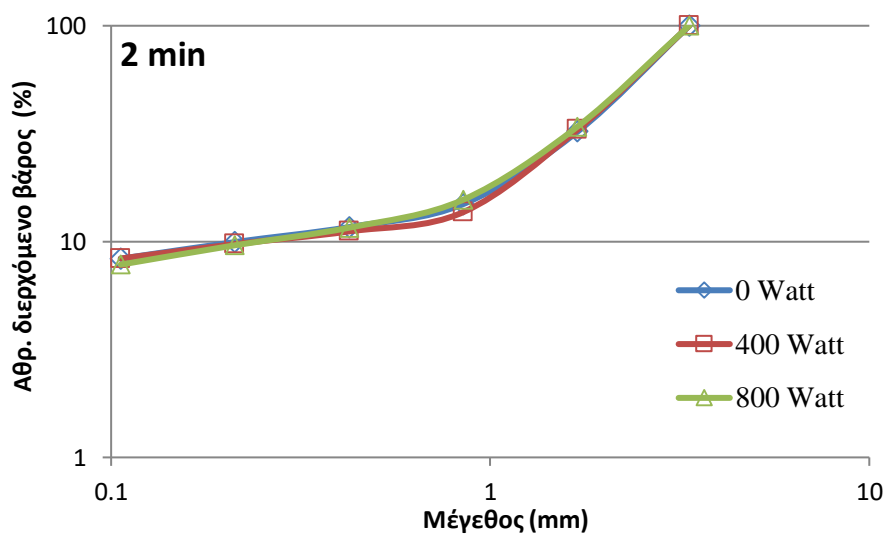
Από τα Διαγράμματα 8.7 - 8.9 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος οπότε και οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα κλάσματα.. Συγκρίνοντας το αθροιστικώς διερχόμενο από το κόσκινο 0.106mm, για χρόνους 0.5 min και 4 min παρατηρείται αύξηση με το χρόνο στο διερχόμενο βάρος από 17.6-21.2%, ενώ για μέγεθος 0.053 mm η αντίστοιχη αύξηση είναι από 17.6-18.8 %.

## 8.2 Επίδραση του επιπέδου ισχύος των μικροκυμάτων στο μέγεθος του προϊόντος

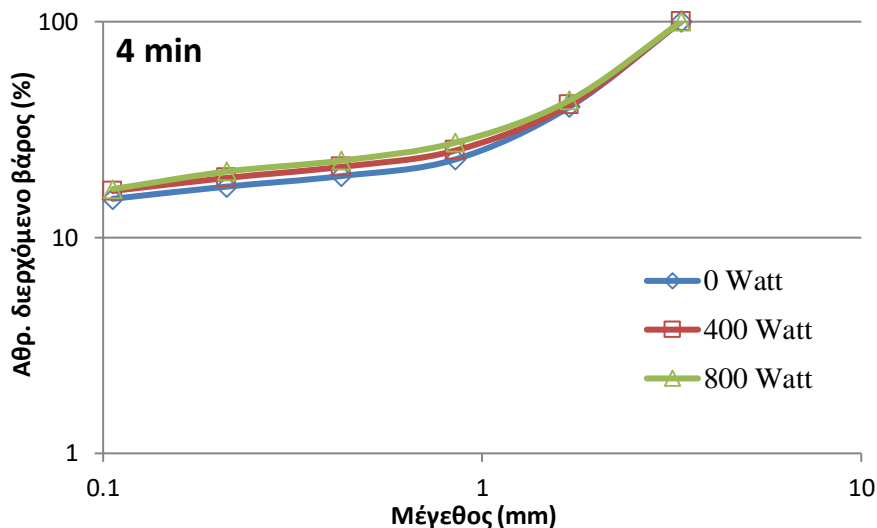
Στην συνέχεια παραθέτονται τα διαγράμματα της αθροιστικής κατανομής βάρους % σε σχέση με το μέγεθος των προϊόντων για κάθε χρόνο λειοτρίβησης και για διαφορετικό επίπεδο μικροκυματικής ισχύος.



Διάγραμμα 8.10: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής βάρους (%) του κλάσματος -3.35+1.70 mm για 0.5 min χρόνο λειοτριβήσης σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος (0, 400 και 800 W)



Διάγραμμα 8.11: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής βάρους (%) του κλάσματος -3.35+1.70 mm για 2 min χρόνο λειοτριβήσης σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος (0, 400 και 800 W)



Διάγραμμα 8.12: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής βάρους (%) του κλάσματος -3.35+1.70 mm για 4 min χρόνο λειοτρίβησης σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος (0, 400 και 800 W)

Από τα Διαγράμματα 8.10-8.12 προκύπτει μια σημαντική διαφοροποίηση των αθροιστικών κατανομών βάρους % στα διάφορα επίπεδα ισχύος που επιλέχθηκαν (0 W, 400 και 800 W) και για χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min . Οι αθροιστικές καμπύλες μετατοπίζονται στα μικρότερα κλάσματα (αριστερά) με την αύξηση του επιπέδου ισχύος. Πιο συγκεκριμένα για το μέγεθος -0.106 mm από 0 σε 400 W, παρατηρείται αύξηση στο διερχόμενο βάρος κατά 0.9%. Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και για το χρόνο λειοτρίβησης 4 min αλλά με μικρότερη διαφοροποίηση. Επίσης, ότι για χρόνο 2 min η επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι ασήμαντη.

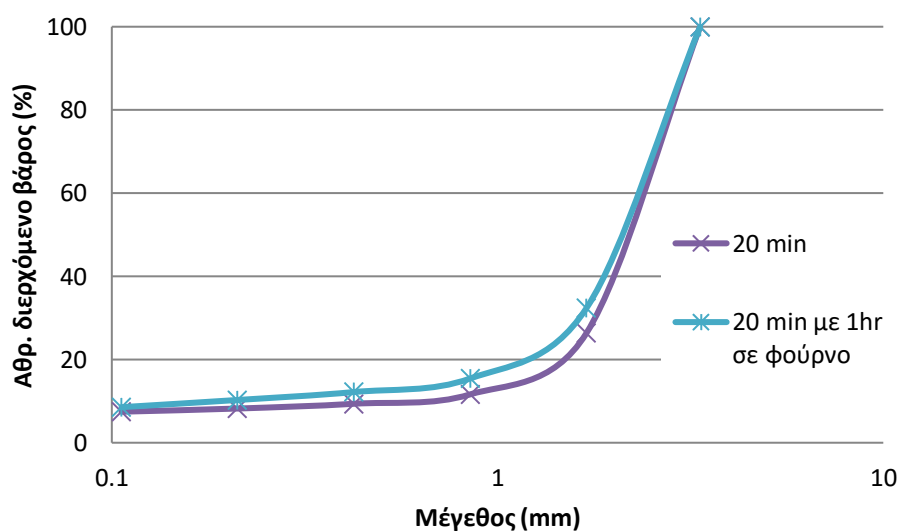
### 8.3 Η επίδραση της θέρμανσης

Στο κοκκομετρικό κλάσμα -3.35+1.70 mm εξετάστηκε η επίδραση της θέρμανσης του υλικού πριν την υποβολή του σε μικροκυματική ακτινοβολία. Για το σκοπό αυτό συγκεκριμένη ποσότητα βωξίτη μεγέθους -3.35+1.70 mm λειοτριβήθηκε στο μύλο για 0.5 min και το προϊόν υποβλήθηκε σε θέρμανση σε εργαστηριακό φούρνο στους 200 °C για 60 min. Μετά τη θέρμανση το υλικό υποβλήθηκε σε μικροκυματική ακτινοβολία επιπέδου ισχύος 800 W για χρόνο παραμονής 20 min. Τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα δύο υλικά (θέρμανση στους 200 °C και ως έχει) παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.10.

Πίνακας 8.10: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρους (%) του κλάσματος -3.35+1.70 mm για 0.5 min λειοτρίβησης στα 800 W με χρήση εργαστηριακού φούρνου και χωρίς

Μέγεθος mm	20 min (ως έχει)		20 min, 200°C	
	%Βάρος	% Αθρ. διερχόμενο βάρος	% Βάρος	% Αθρ. διερχόμενο βάρος
3.35	0.0	100	0.0	100
1.7	73.6	26.4	67.6	32.4
0.85	14.7	11.6	16.9	15.5
0.425	2.3	9.4	3.3	12.2
0.212	1.1	8.2	1.9	10.3
0.106	0.8	7.5	1.7	8.6
-0.106	7.5		8.6	0.0
	100		100	

Από τον Πίνακα 8.10 προκύπτει το Διάγραμμα 8.13 στο οποίο απεικονίζεται το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος σε σχέση με το μέγεθος του κοσκίνου για τα δύο υλικά.



Διάγραμμα 8.13: Αθροιστική κατανομή του διερχόμενου βάρους % του κλάσματος -3.35+1.70 mm στα 800 W με χρήση εργαστηριακού φούρνου και χωρίς

Από το Διάγραμμα 8.13 παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφορά όταν έγινε στο δείγμα προεργασία (ξήρανση στους 200 °C) με χρήση εργαστηριακού φούρνου, καθώς φαίνεται ότι η αθροιστική καμπύλη μετατοπίζεται αριστερά προς τα λεπτότερα κλάσματα. Συγκεκριμένα για το κλάσμα -0.850 mm παρατηρείται μέγιστη διαφοροποίηση του αθροιστικώς διερχομένου κατά 6%.

#### 8.4 Επίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στο μέγεθος $d_{80}$ των προϊόντων λειοτρίβησης

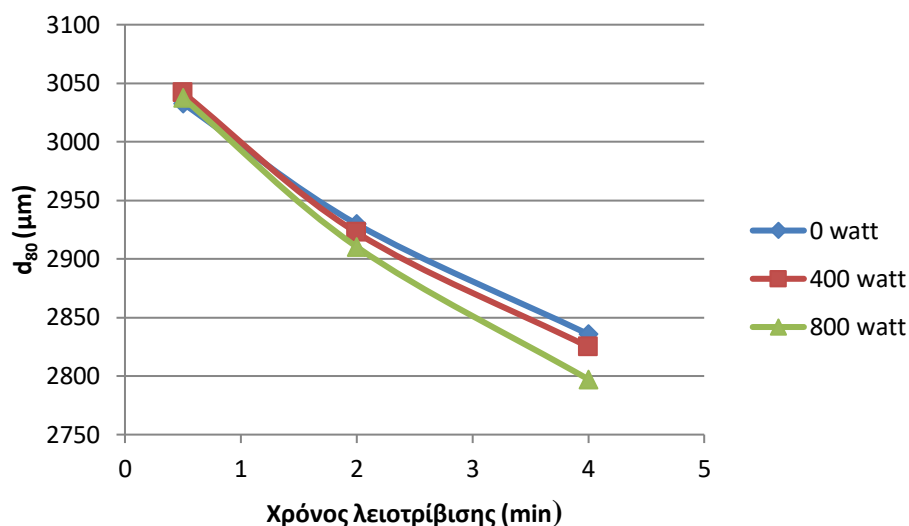
Για τα κοκκομετρικά κλάσματα (-3.35 + 1.7mm), (-0.850 + 0.425mm), (-0.212 + 0.106mm) υπολογίστηκαν οι τιμές του χαρακτηριστικού μεγέθους  $d_{80}$  με την βοήθεια μίας συνάρτησης στο Microsoft Excel και σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα του  $d_{80}$  σε συνάρτηση με τον χρόνο, για όλα τα κλάσματα.

##### 8.4.1 Τροφοδοσία -3.35 + 1.70 mm

Στον Πίνακα 8.11 παραθέτονται οι τιμές του  $d_{80}$  (μm) για το κλάσμα -3.35+1.70 mm και στο Διάγραμμα 8.14 παριστάνονται τα μεγέθη  $d_{80}$  (μm) συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης.

Πίνακας 8.11: Οι τιμές του  $d_{80}$  για το κλάσμα -3.35+1.70 mm

Χρόνος min	$d_{80}$ (μm)		
	0 watt	400 watt	800 watt
0.5	3032.9	3042.0	3037.5
2	2929.8	2922.5	2910.3
4	2835.7	2825.0	2797.2
16	2051.7	1979.4	1903.9
32	371.7	406.6	374.0



**Διάγραμμα 8.14:** Το  $d_{80}$  της τροφοδοσίας μεγέθους  $-3.35+1.70$  mm για 0, 2, 4 min για 0,400 και 800 W.

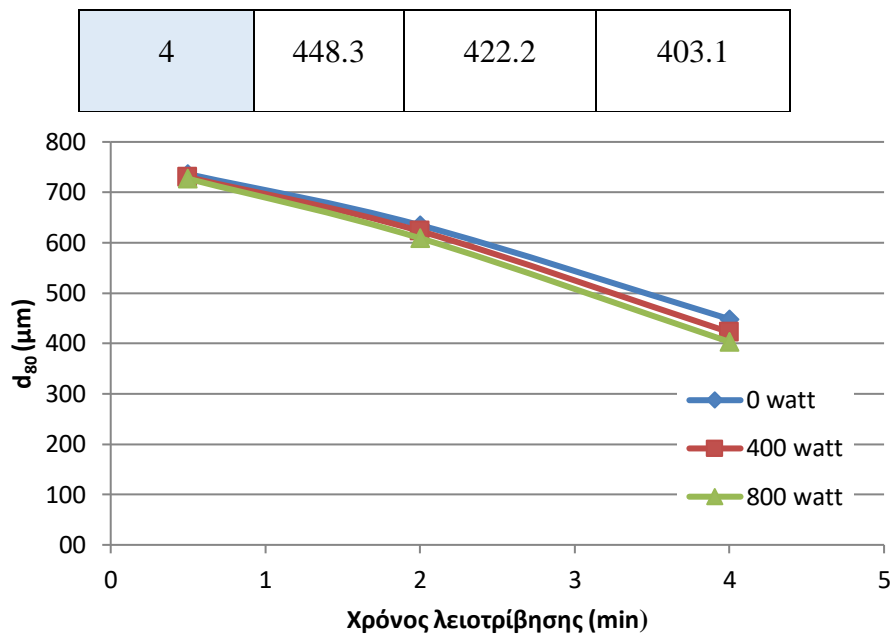
Από το Διάγραμμα 8.14 για το κλάσμα  $-3.35+1.70$  mm φαίνεται σημαντική μείωση του  $d_{80}$  τόσο από 0 στα 400 W όσο και από τα 400 στα 800 W για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβισης. Η διαφορά τους αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο χρόνος λειοτρίβισης. Για χρόνο λειοτρίβισης 2 min, το  $d_{80}$  μειώνεται κατά 0.66 % από ισχύ 0 W σε 800 W, ενώ για χρόνο 4 min η αντίστοιχη μείωση ισούται με 1.36 %.

#### 8.4.2 Τροφοδοσία $-0.850 + 0.425$ mm

Στον Πίνακα 8.12 παραθέτονται οι μετρήσεις του μεγέθους  $d_{80}$  (μm) για το κλάσμα  $-0.850 + 0.425$  mm και στο Διάγραμμα 8.15 παριστάνεται το  $d_{80}$  (μm) συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβισης.

**Πίνακας 8.12:** Οι τιμές του  $d_{80}$  για το κλάσμα κλάσματος  $-0.850 + 0.425$  mm

Χρόνος min	$d_{80}$ (μm)		
	0 watt	400 watt	800 watt
0.5	736.2	730.0	726.9
2	634.7	622.9	608.9



**Διάγραμμα 8.15:** Το  $d_{80}$  της τροφοδοσίας μεγέθους κλάσματος  $-0.850 + 0.425$  mm για 0, 400 και 800 W

Στο Διάγραμμα 8.15 παρατηρείται ότι υπάρχει μια διαφοροποίηση στις τιμές  $d_{80}$ . Διακρίνεται ότι από 0 στα 400 W και από 400 στα 800 W οι τιμές μειώνονται για τον ίδιο χρόνο λειοτρίβησης. Η διαφορά τους αυτή φαίνεται να αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο χρόνος λειοτρίβησης, αποκτώντας μέγιστη τιμή στα 4 min και ελάχιστη στο 0.5 min. Για παράδειγμα για χρόνο 4 min και ισχύ 800 W παρατηρείται μείωση του  $d_{80}$  κατά 11.1 % σε σχέση με την ισχύ 0 W. Ενώ για χρόνο 0.5 min η αντίστοιχη μείωση είναι 2.2 %.

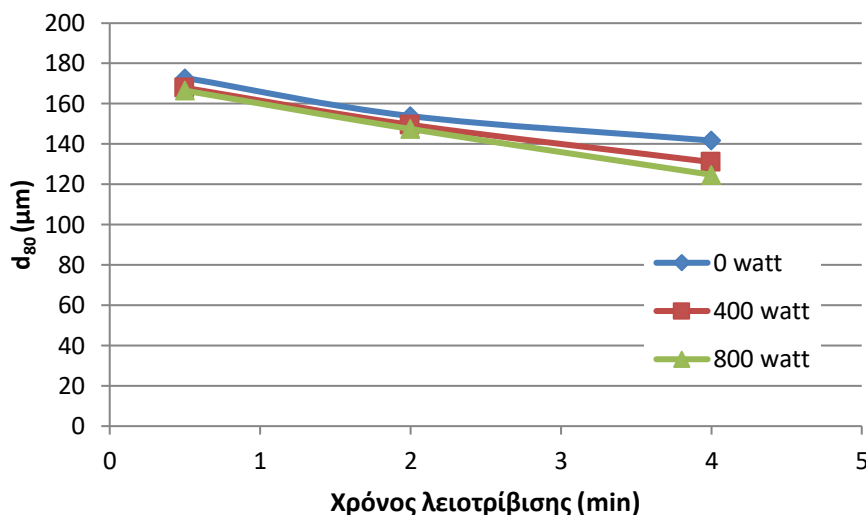
#### 8.4.3 Τροφοδοσία $-0.212 + 0.106$ mm

Στον Πίνακα 8.13 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του  $d_{80}$  (μm) για το κλάσματος  $-0.212 + 0.106$  mm και στο Διάγραμμα 8.16 παριστάνεται το  $d_{80}$  (μm) συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης.

**Πίνακας 8.13:** Οι τιμές του  $d_{80}$  για το κλάσμα κλάσματος  $-0.212 + 0.106$  mm

Χρόνος min	$d_{80}$ (μm)		
	0 watt	400 watt	800 watt
0.5	172.8	167.9	166.5

2	153.9	149.5	147.5
4	141.7	131.0	124.8



Διάγραμμα 8.16: Το d<sub>80</sub> της τροφοδοσίας μεγέθους κλάσματος  $-0.212 + 0.106 \text{ mm}$  για 0, 400 και 800 W

Το Διάγραμμα 8.16 επιβεβαιώνει την παρατήρηση που έγινε στα προηγούμενα διαγράμματα (8.14 & 8.15) και εδώ παρατηρείται μια μικρή μείωση από τα 0 στα 400 W όπως και από τα 400 στα 800 W η οποία είναι εντονότερη όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβισης, για παράδειγμα για χρόνο 4 min και ισχύ 800 W παρατηρείται μείωση του d<sub>80</sub> κατά 12 % σε σχέση με την ισχύ 0 W. Για το χρόνο 0.5 min η αντίστοιχη μείωση είναι 4.5 %.

### 8.5 Προσδιορισμός ρυθμού θραύσης

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ημιλογαριθμικά διαγράμματα όπου δίνουν τη σχέση του βάρους (%) που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους με το χρόνο λειοτρίβισης. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί στη θεωρία ο ρυθμός θραύσης μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητος του χρόνου και δίνεται από τη κλίση της ευθείας που προκύπτει για κάθε μικροκυματική ισχύ. Έτσι, από τη γραμμή τάσης μπορούμε να υπολογίσουμε τον ρυθμό θραύσης.

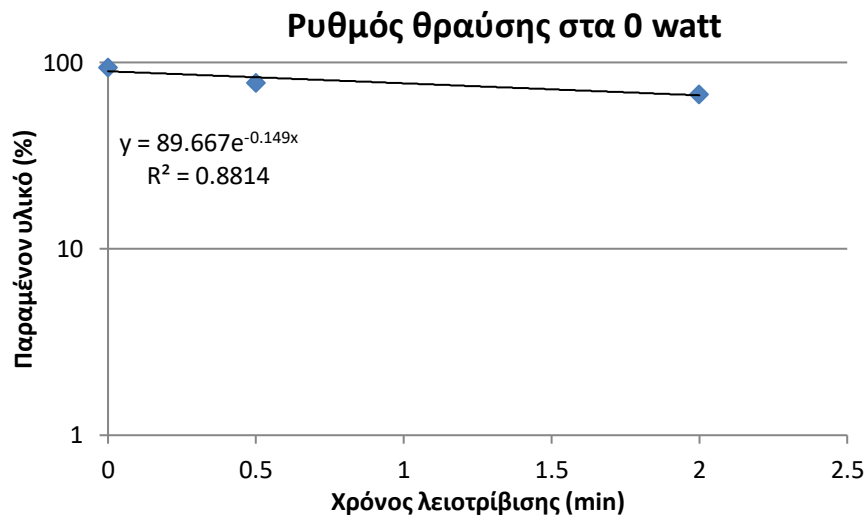


### 8.5.1 Τροφοδοσία -3.35 + 1.70 mm

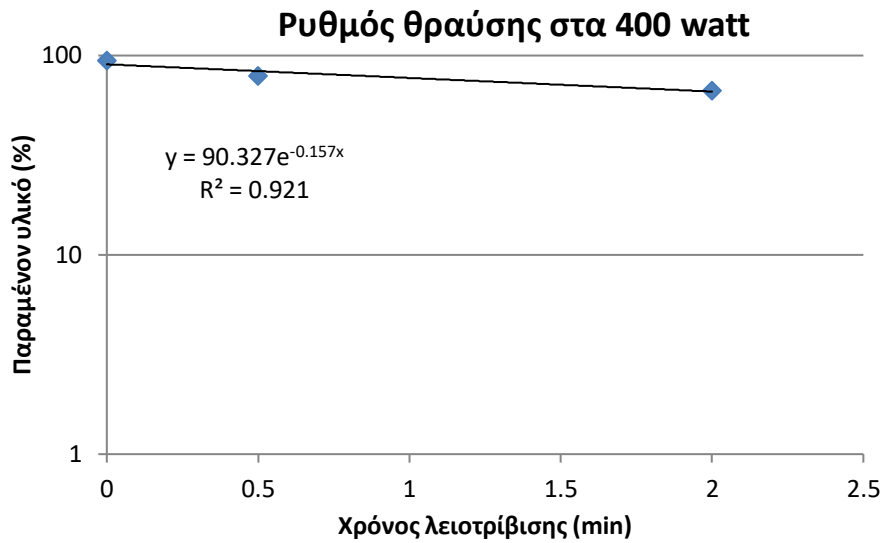
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 8.14 και τα Διαγράμματα 8.17-8.19 του βάρους (%) που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους τροφοδοσίας συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης και για τα τρία επίπεδα ισχύος.

Πίνακας 8.14: Βάρος (%) υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους -3.35+1.7 mm σε σχέση με το χρόνο για κάθε ισχύ

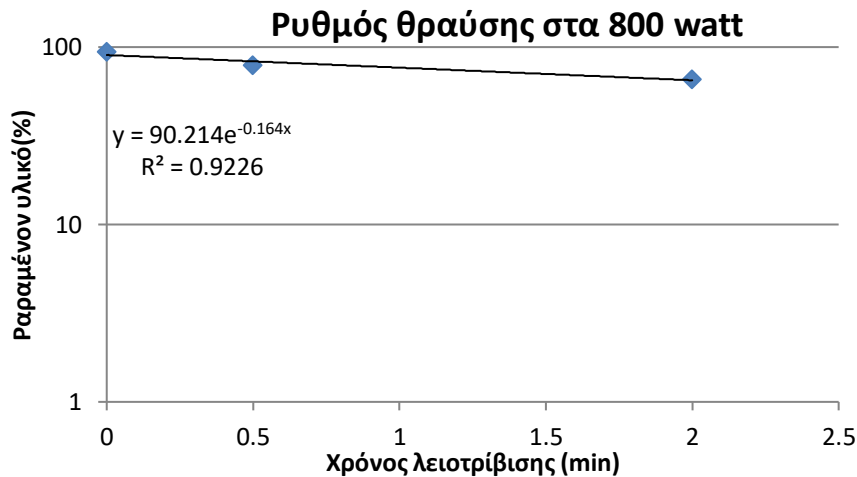
Χρόνος min	% Παραμένον βάρος		
	0 W	400 W	800 W
0	94.0	94.0	94.0
0.5	78.2	79.2	78.7
2	67.7	67.0	65.9



Διάγραμμα 8.17 Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.7 mm για ισχύ 0 W



Διάγραμμα 8.18: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.7 mm για ισχύ 400 W



Διάγραμμα 8.19: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας -3.35+1.7 mm για ισχύ 800 W

Από τα διαγράμματα 8.17-8.19 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η μικροκυμματική ισχύς αυξάνεται η κλίση των ευθειών άρα και ο ρυθμός θραύσης. Το ίδιο παρατηρείται και στα υπόλοιπα διαγράμματα.

Οι ρυθμοί θραύσης του κλάσματος -3.35+1.70 mm που προκύπτουν από τα διαγράμματα φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 8.15.

Πίνακας 8.15: Ρυθμοί θραύσης του κλάσματος -3.35+1.70 mm για διαφορετικό επίπεδο ισχύος

Ισχύς (W)	$S_i$ (min <sup>-1</sup> )
0	0.149
400	0.157
800	0.164

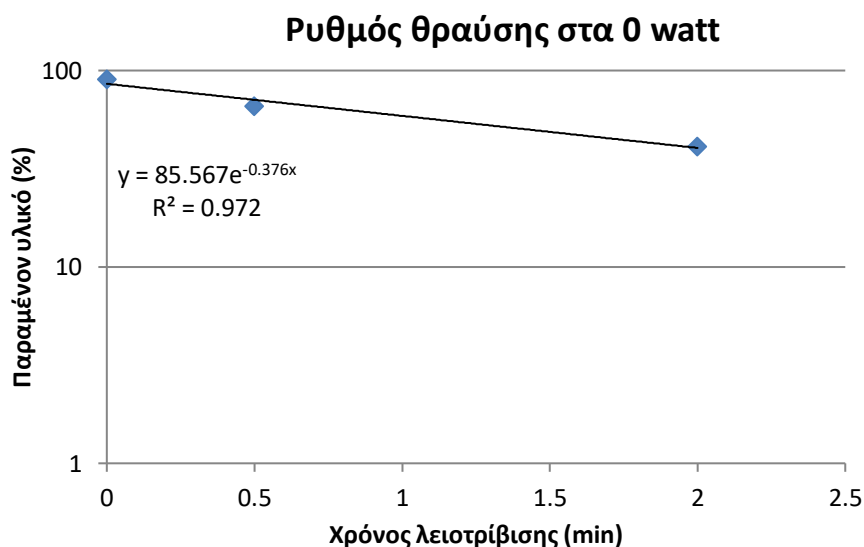
Από τον Πίνακα 8.15 προκύπτει ότι για μέγεθος τροφοδοσίας  $-3.35+1.70$  mm από τα 0 στα 400W ο ρυθμός θραύσης μεταβάλλεται από  $0.149 \text{ min}^{-1}$  σε  $0.157 \text{ min}^{-1}$  δηλαδή παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 5,4 %, όπως επίσης και από τα 400 στα 800W από  $0.157 \text{ min}^{-1}$  σε  $0.164 \text{ min}^{-1}$ , δηλαδή αύξηση 4.5%.

### 8.5.2 Τροφοδοσία $-0.850 + 0.425$ mm

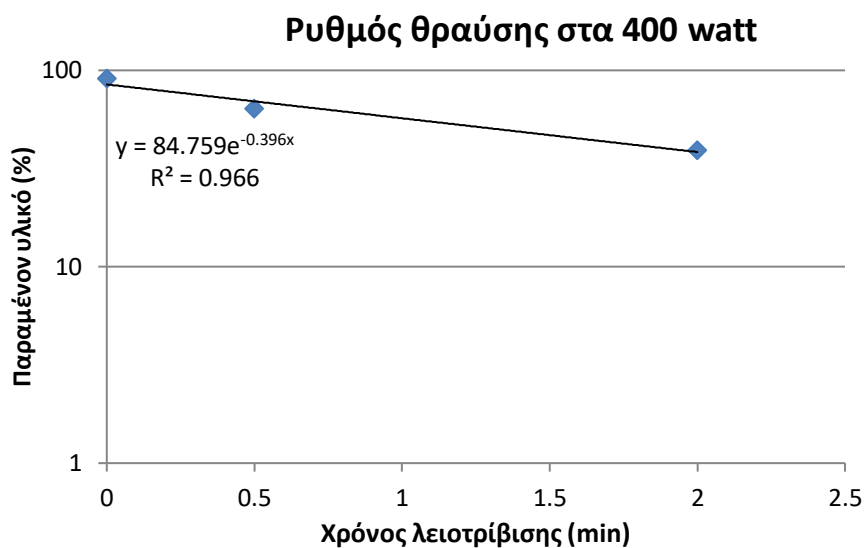
Στη συνέχεια παρατίθενται ο Πίνακας 8.16 και τα Διαγράμματα 8.20-8.22 του βάρους (%) του υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους τροφοδοσίας σε συνάρτηση με τον χρόνο λειοτρίβησης και για τα τρία επίπεδα ισχύος.

Πίνακας 8.16 : Βάρος (%) υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους  $-0.850+0.425$  mm σε σχέση με το χρόνο για κάθε ισχύ

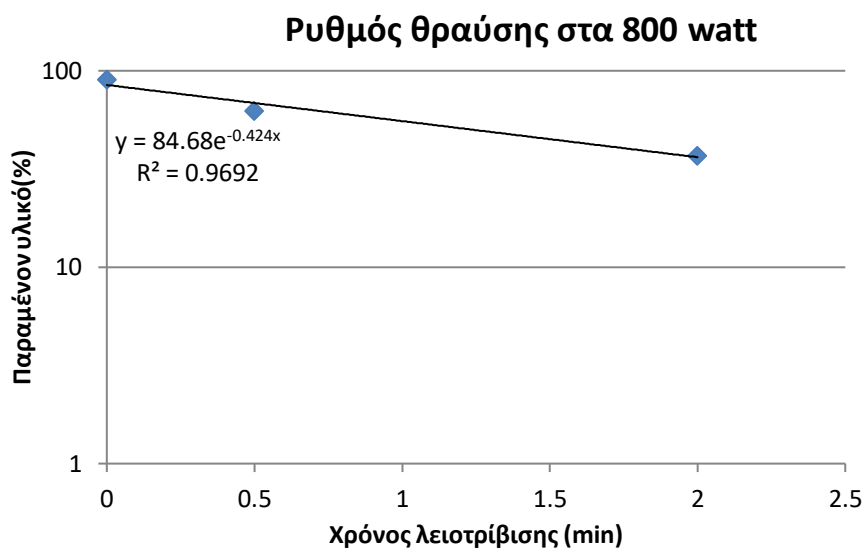
Χρόνος min	% Παραμένον βάρος		
	0 W	400 W	800 W
0	90.4	90.4	90.4
0.5	65.9	63.8	62.8
2	41.1	39.2	37.1



Διάγραμμα 8.20: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας  $-0.850+0.425$  mm για ισχύ 0 W



Διάγραμμα 8.21: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm για ισχύ 400 W



Διάγραμμα 8.22: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm για ισχύ 800 W

Οι ρυθμοί θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας -0.850+0.425 mm που προκύπτουν από τα διαγράμματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 8.17.

Πίνακας 8.17: Ρυθμοί θραύσης του κλάσματος - 0.850+1.70 mm για διαφορετικό επίπεδο ισχύος

Ισχύς (W)	$S_i$ ( $\text{min}^{-1}$ )
0	0.376

400	0.396
800	0.424

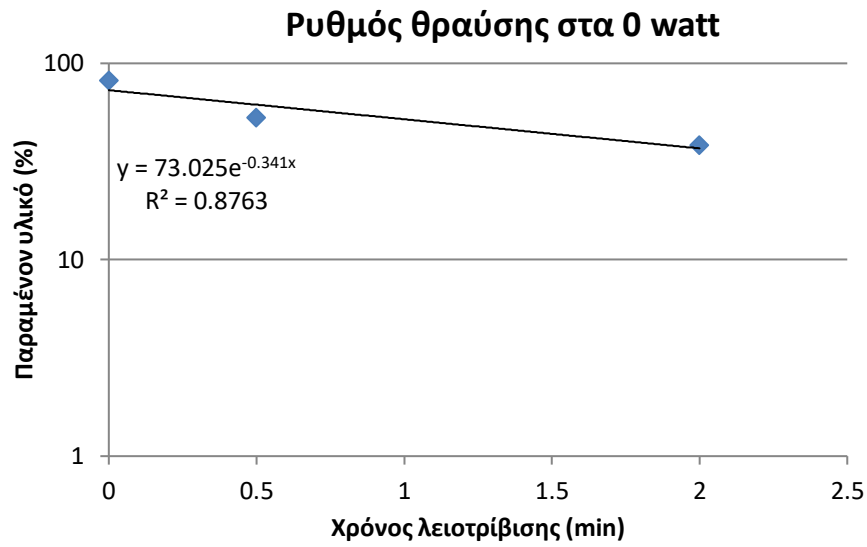
Όπως προαναφέραμε από την κλίση της ευθείας των Διαγραμμάτων 8.20-8.23 μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός θραύσης ( $S_i$ ). Παρατηρείται ότι για το κλάσμα -0.850+0.425 mm αύξηση του ρυθμού θραύσης καθώς αυξάνεται το επίπεδο ισχύος. Συγκεκριμένα από τα 0 στα 400W ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται από  $0.376 \text{ min}^{-1}$  σε  $0.396 \text{ min}^{-1}$  (αύξηση 5.3%) όπως επίσης και από τα 400 στα 800W από  $0.396 \text{ min}^{-1}$  σε  $0.424 \text{ min}^{-1}$  (αύξηση 7.1%).

### 8.5.3 Τροφοδοσία -0.212 + 0.106 mm

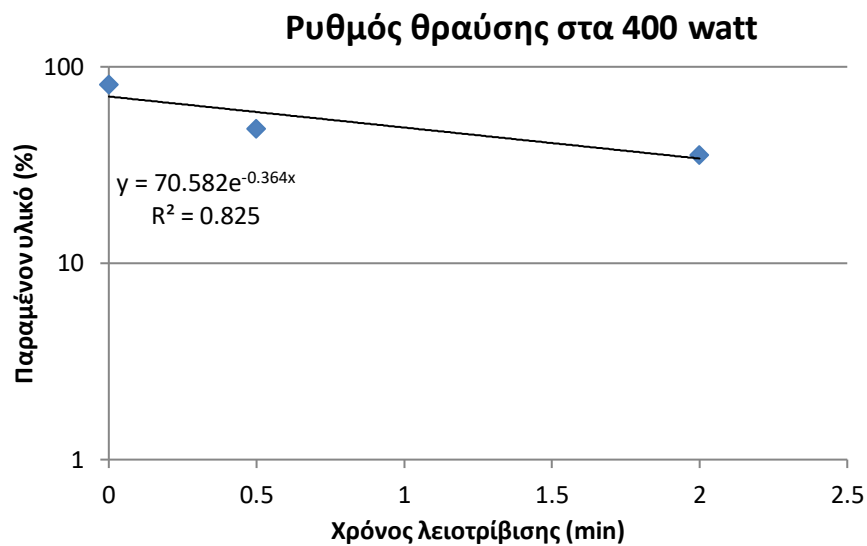
Τέλος παρατίθενται ο Πίνακας 8.18 και τα Διαγράμματα 8.23-8.25 του βάρους (%) του υλικού που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με τον χρόνο λειοτρίβησης και για τα τρία κλάσματα.

**Πίνακας 8.18 :** Βάρος (%) υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους -0.212+0.106 mm σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικά επίπεδα ισχύος.

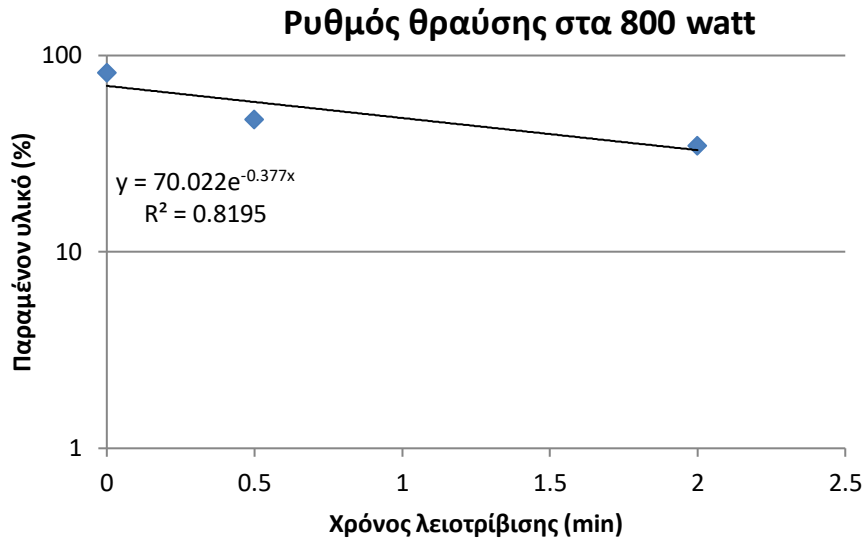
Χρόνος min	% Παραμένον βάρος		
	0 W	400 W	800 W
0	81.6	81.6	81.6
0.5	53.1	48.5	47.3
2	38.3	35.8	34.7



Διάγραμμα 8.23: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας -0.212+0.106 mm για ισχύ 0 W



Διάγραμμα 8.24: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας -0.212+0.106 mm για ισχύ 400 W



Διάγραμμα 8.25: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος τροφοδοσίας  $-0.212+0.106$  mm για ισχύ 800 W

Οι ρυθμοί θραύσης του κλάσματος  $-0.212+0.106$  mm που προκύπτουν από τα διαγράμματα φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 8.19.

Πίνακας 8.19: Ρυθμοί θραύσης του κλάσματος  $-0.212 + 0.106$  mm για διαφορετικό επίπεδο ισχύος.

Ισχύς (W)	$S_i$ ( $\text{min}^{-1}$ )
0	0.341
400	0.364
800	0.377

Από το παραπάνω Πίνακα 8.19 φαίνεται ότι για την τάξη μεγέθους  $(-0.212+0.106)$  mm όσο αυξάνεται το επίπεδο ισχύος, αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης ( $S_i$ ). Από τα 0 στα 400W ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται από  $0.341 \text{ min}^{-1}$  σε  $0.364 \text{ min}^{-1}$  (6.7%) όπως επίσης και από τα 400 στα 800W από  $0.364 \text{ min}^{-1}$  σε  $0.377 \text{ min}^{-1}$  (3.6%).

### 8.6 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας

Εφαρμόζοντας την εντολή solver του Microsoft Excel έγινε η επίλυση του μοντέλου κατά Austin et al. (1984) μέσω της Σχέσης (19) της θεωρίας. Στόχος της επίλυσης ήταν να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους  $\alpha_t$ ,  $\alpha$ ,  $\mu$  και  $\lambda$  ώστε να ελαχιστοποιείτε το σφάλμα ανάμεσα στις πειραματικές μετρήσεις και τις μετρήσεις του μοντέλου. Οι παράμετροι  $\alpha$ ,  $\lambda$  εξαρτώνται από το υλικό για αυτό προσπαθήσαμε να κρατήσουμε σταθερές τις τιμές τους, μεταβάλλοντας το  $\mu$  και  $\alpha_t$  παράμετροι που εξαρτώνται από τις συνθήκες λειοτρίβισης και μεταβάλλονται για 0, 400, 800 W.

Πίνακας 8.20: Οι ειδικοί ρυθμοί θραύσης πειραμάτων και μοντέλου για 0 W

0 W			
Ανώτερο Μέγεθος (mm)	Πειραματικό $S_i$	Μοντέλο $S_i$	Διαφορά τετραγώνων
3.35	0.15	0.15	0.00
0.850	0.38	0.38	0.00
0.212	0.34	0.34	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.00

Πίνακας 8.21: Οι ειδικοί ρυθμοί θραύσης πειραμάτων και μοντέλου για 400 W

400 W			
Ανώτερο Μέγεθος (mm)	Πειραματικό $S_i$	Μοντέλο $S_i$	Διαφορά τετραγώνων
3.35	0.16	0.16	0.00
0.850	0.40	0.40	0.00
0.212	0.36	0.36	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.00

Πίνακας 8.22: Οι ειδικοί ρυθμοί θραύσης πειραμάτων και μοντέλου για 800 W

800 W			
Ανώτερο Μέγεθος (mm)	Πειραματικό $S_i$	Μοντέλο $S_i$	Διαφορά τετραγώνων
3.35	0.164	0.164	0.00
0.850	0.424	0.42	0.00
0.212	0.377	0.38	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.00

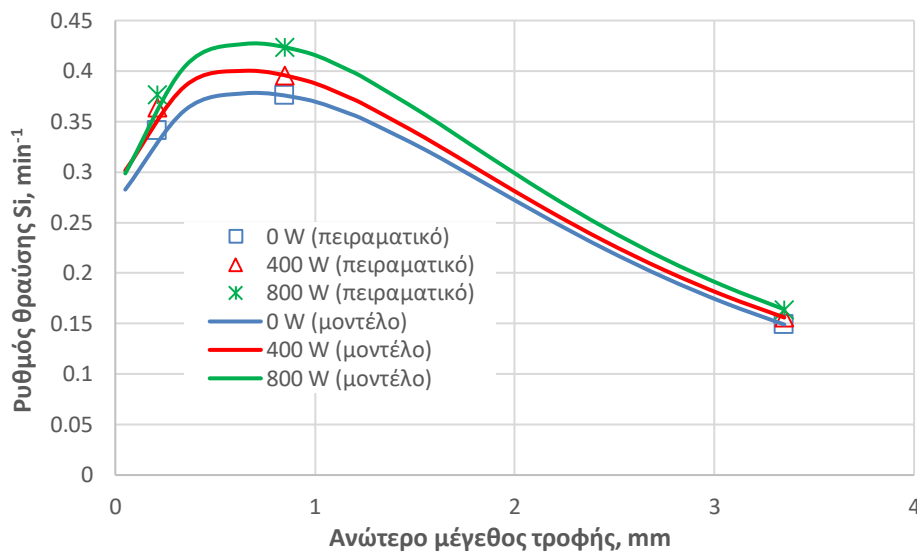
Στον Πίνακα (8.23) παραθέτονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραμέτρων για κάθε ισχύ (0, 400 και 800 W) που προέκυψαν από την επίλυση με βάση τους Πίνακες 8.20-8.22.



Πίνακας 8.23: Παράμετροι μοντέλου για 0, 400 και 800 W

$W$	$\alpha_T$	$\alpha$	$\mu$	$\Lambda$
0	0.42	0.13	2.34	2.33
400	0.45	0.13	2.26	2.23
800	0.49	0.16	2.17	2.23

Από τους πίνακες 8.20 – 8.22 προκύπτει το Διάγραμμα 8.26 στο οποίο παριστάνονται οι τιμές του ρυθμού θραύσης σε συνάρτηση με το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας για ισχύ 0, 400 και 800 W.



Διάγραμμα 8.26: Σύγκριση ειδικών ρυθμών θραύσης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του μοντέλου ως προς το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας για κάθε μικροκυματική ισχύ

Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 8.26 όσο αυξάνεται το μέγεθος της τροφοδοσίας αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης μέχρι να αποκτήσει μια μέγιστη τιμή ( $S_m$ ), όπου αντιστοιχεί σε μέγεθος τροφοδοσίας  $X_m$ . Στην συνέχεια ο ρυθμός θραύσης σταδιακά μειώνεται. Παρατηρούμε επίσης ότι, για το ίδιο μέγεθος τροφοδοσίας όσο αυξάνεται η μικροκυματική ισχύς αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης.

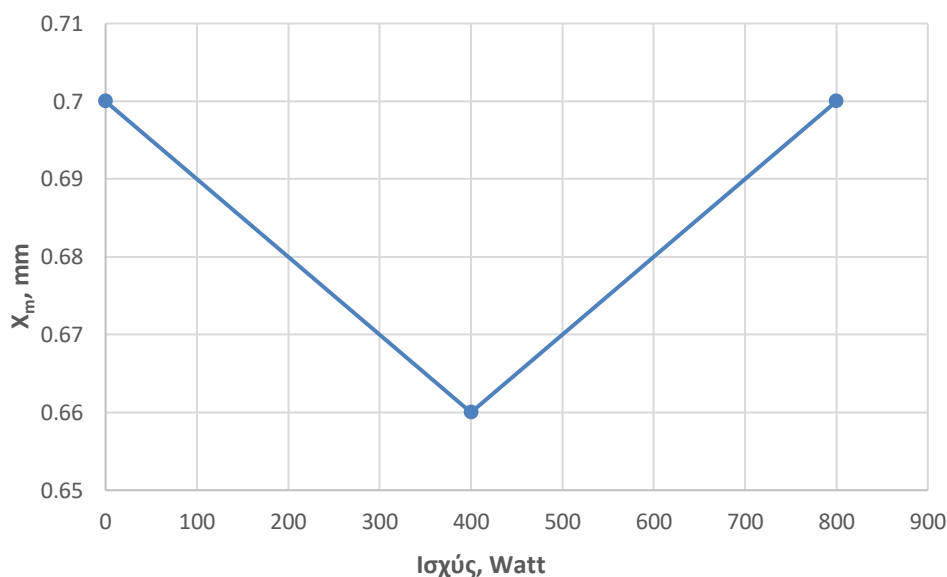
### 8.7 Σχέση μέγιστου ρυθμού θραύσης με μικροκυματική ισχύ

Όπως αναφέρθηκε στη θεωρία και φάνηκε και από το Διάγραμμα 8.26, για κάθε επίπεδο ισχύος κάθε τιμή του μέγιστου ρυθμού θραύσης ( $S_m$ ) αντιστοιχεί σε ένα μέγιστο μέγεθος ( $X_m$ ). Παρακάτω δίνονται οι τιμές των  $S_m$  και  $X_m$  για κάθε μικροκυματική ισχύ.

Πίνακας 8.24: Μέγιστο μέγεθος ( $X_m$ ) για κάθε μικροκυματική ισχύ

Ισχύς (W)	$X_m$ (mm)
0	0.70
400	0.66
800	0.70

Η σχέση του μέγιστου μεγέθους τροφοδοσίας συναρτήσει των επιπέδων μικροκυματικής ισχύος, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 8.24, φαίνεται στο Διάγραμμα 8.27.



Διάγραμμα 8.27: Μέγιστο μέγεθος  $X_m$  σε συνάρτηση με την μικροκυματική ισχύ

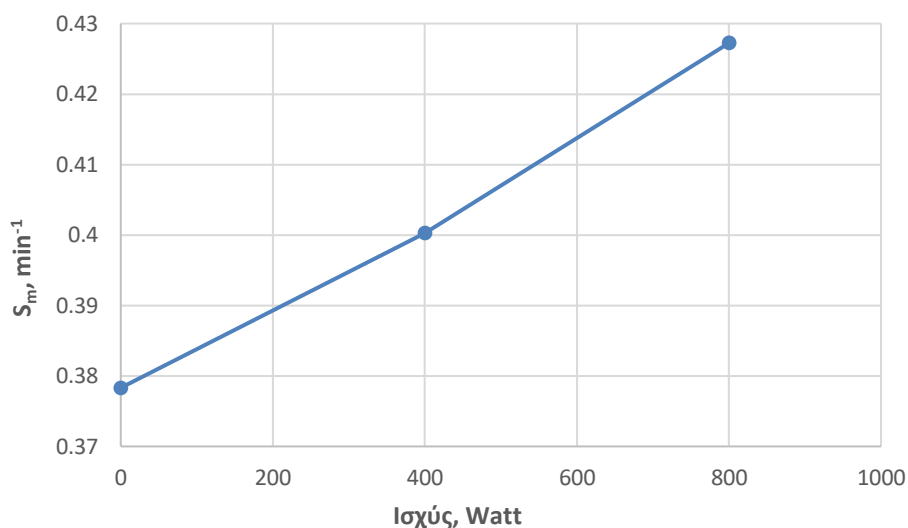
Από το Διάγραμμα 8.27 παρατηρείται ότι όταν η ισχύς μεταβάλλεται από 0 σε 400 W το μέγιστο μέγεθος  $X_m$  μειώνεται, ενώ από 400 σε 800 W το  $X_m$  παρουσιάζει αύξηση και φτάνει στην ίδια τιμή (0.7 mm) με εκείνη των 0 W.

Στο Διάγραμμα 8.28 απεικονίζεται η σχέση του μέγιστου ρυθμού θραύσης με την ισχύ των μικροκυμάτων, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 8.25.

Πίνακας 8.25: Μέγιστος ρυθμός θραύσης σε σχέση με την ισχύ των μικροκυμάτων

Ισχύς (W)	$S_m$ (min <sup>-1</sup> )
-----------	----------------------------

0	0.378
400	0.400
800	0.427



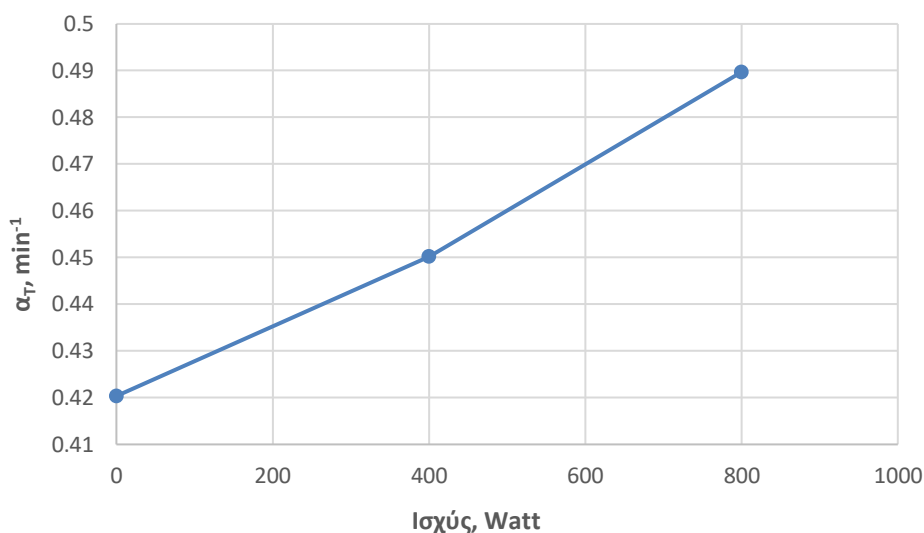
**Διάγραμμα 8.28:** Μέγιστου ρυθμός θραύσης σε σχέση με την μικροκυματική ισχύ

Από το Διάγραμμα 8.28 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η μικροκυματική ισχύς αυξάνεται και ο μέγιστος ειδικός ρυθμός θραύσης. Συγκεκριμένα από τα 0 στα 400W ο μέγιστος ρυθμός θραύσης αυξάνει από  $0.378 \text{ min}^{-1}$  σε  $0.400 \text{ min}^{-1}$ , όπως επίσης και από τα 400 στα 800W από  $0.400 \text{ min}^{-1}$  σε  $0.427 \text{ min}^{-1}$ .

Στο Διάγραμμα 8.29 απεικονίζεται η σχέση της παραμέτρου  $\alpha_t$  σε σχέση με την ισχύ των μικροκυμάτων, σύμφωνα με τον Πίνακα 8.26. Το  $\alpha_t$  είναι ο ρυθμός θραύσης όταν το μέγεθος τροφοδοσίας ( $X_i$ ) ισούται με 1 mm.

**Πίνακας 8.26:** Παράμετρος  $\alpha_t$  σε συνάρτηση με την μικροκυματική ισχύ

Ισχύς (W)	$\alpha_t$ ( $\text{min}^{-1}$ )
0	0.420
400	0.450
800	0.490



Διάγραμμα 8.29: Παράμετρος  $\alpha_T$  σε συνάρτηση με την μικροκυματική ισχύ

Φαίνεται ότι με την αύξηση της ισχύος σημειώνεται σημαντική αύξηση του  $\alpha_T$  τόσο από τα 0 στα 400 W όσο και από τα 400 στα 800 W. Επίσης, παρατηρείται ότι η αύξηση από τα 400 στα 800 W είναι ελαφρώς μεγαλύτερη.

### 8.8 Συνάρτηση θραύσης

Με την βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel και μέσω του εργαλείου solver έγινε η επίλυση του μοντέλου σύμφωνα με τη μέθοδο BII και τις Σχέσεις (15) & (16) από την θεωρία. Η μέθοδος BII χρησιμοποιείται για λειοτρίβηση μικρής διάρκειας και σε ένα στενό κοκκομετρικό κλάσμα. Στόχος της επίλυσης είναι να υπολογιστούν οι βέλτιστες τιμές που ελαχιστοποιούν το σφάλμα (διαφορά τετραγώνων). Στον Πίνακα (8.27) παραθέτονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση για το κλάσμα τροφοδοσίας  $-3.35+1.7$  που δεν υποβλήθηκε σε μικροκυματική ακτινοβολία, ενώ στους Πίνακες 8.28 & 8.29 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα επίπεδα μικροκυματικής ισχύος 400 και 800 W, αντίστοιχα.

Πίνακας 8.27: Πειραματικές μετρήσεις και εκτιμήσεις μοντέλου για 0W

0 W			
Σχετικό	Πειραματικό	Μοντέλο	Διαφορά τετραγώνων

μέγεθος	$B_{i,j \text{ exp}}$	$B_{i,j \text{ meas}}$	$(B_{i,j \text{ exp}} - B_{i,j \text{ meas}})^2$
1.00	1.00	1.00	0.00
0.51	0.49	0.48	0.00
0.25	0.36	0.37	0.00
0.13	0.30	0.30	0.00
0.06	0.25	0.25	0.00
Σύνολο			0.00

Πίνακας 8.28: Πειραματικές μετρήσεις και εκτιμήσεις μοντέλου για 400W

400 W			
Σχετικό μέγεθος	Πειραματικό $B_{i,j \text{ exp}}$	Μοντέλο $B_{i,j \text{ meas}}$	Διαφορά τετραγώνων $(B_{i,j \text{ exp}} - B_{i,j \text{ meas}})^2$
1.00	1.00	1.00	0.00
0.51	0.47	0.47	0.00
0.25	0.34	0.34	0.00
0.13	0.27	0.27	0.00
0.06	0.21	0.21	0.00
Σύνολο			0.00

Πίνακας 8.29: Πειραματικές μετρήσεις και εκτιμήσεις μοντέλου για 800W

800 W			
Σχετικό μέγεθος	Πειραματικό $B_{i,j \text{ exp}}$	Μοντέλο $B_{i,j \text{ meas}}$	Διαφορά τετραγώνων $(B_{i,j \text{ exp}} - B_{i,j \text{ meas}})^2$
1.00	1.00	1.00	0.00
0.51	0.56	0.56	0.00
0.25	0.44	0.44	0.00
0.13	0.37	0.37	0.00
0.06	0.31	0.31	0.00
Σύνολο			0.00

Η παράμετρος  $\gamma$  υποδηλώνει την παραγωγή ψιλών κλασμάτων, όσο μικρότερη είναι τόσο περισσότερα ψιλά παράγονται. Οι παράμετροι  $\varphi$  και  $\beta$  υποδηλώνουν την θραύση

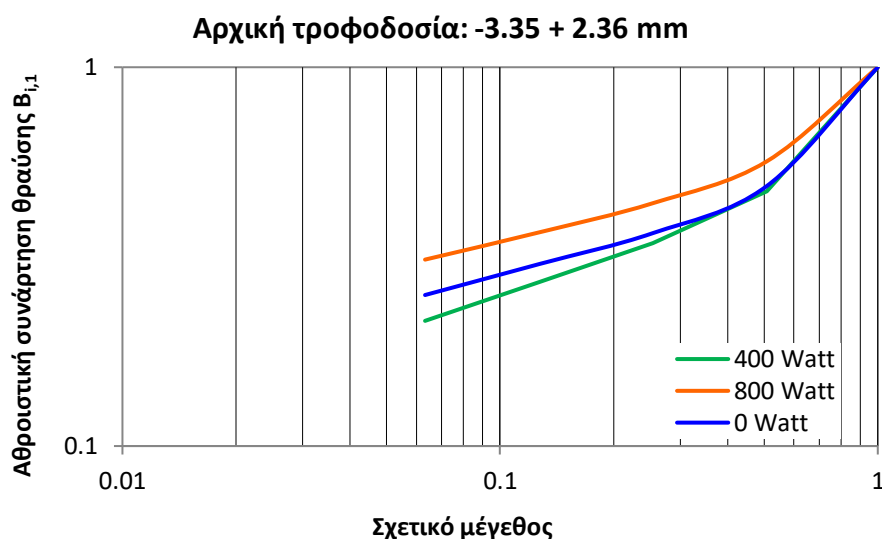
στα χοντρά κλάσματα, δηλαδή αυτά κοντά στο μέγεθος της τροφοδοσίας. Όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι παράμετροι τόσο περισσότερο θραύονται τα χοντρά κλάσματα και παράγονται ψιλά.

Στον Πίνακα 8.30 παραθέτονται οι τιμές των παραμέτρων

**Πίνακας 8.30 : Παράμετροι  $\phi$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  για 0 , 400 και 800 W.**

Ισχύς (W)	$\phi$	$\gamma$	$\beta$
0	0.51	0.26	3.22
400	0.54	0.33	3.53
800	0.59	0.23	2.86

Στο Διάγραμμα 8.30 απεικονίζεται η αθροιστική συνάρτηση θραύσης  $B_{i,j}$  σε συνάρτηση με το σχετικό μέγεθος.



**Διάγραμμα 8.30: Αθροιστική συνάρτηση θραύσης σε σχέση με το σχετικό μέγεθος για κάθε επίπεδο ισχύος**

Από το Διάγραμμα 8.30 παρατηρείται μια σημαντική διαφορά στις τιμές  $B_{i,j}$  μεταξύ των 0 και 800 W καθώς η καμπύλη των 800 W εμφανίζεται πιο αριστερά, στα

λεπτότερα κλάσματα. Η παράμετρος  $\varphi$  είναι υψηλότερη στα 800 W όπου έχει ως αποτέλεσμα σε αυτό το επίπεδο ισχύος η θραύση των χονδρών τεμαχίων να είναι μεγαλύτερη. Τέλος, η παράμετρος  $\gamma$  έχει την υψηλότερη τιμή στα 400 W που σημαίνει ότι σε αυτή την ισχύ έχουμε την μικρότερη παραγωγή ψιλών τεμαχίων μετά την λειοτρίβηση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να μελετηθεί η λειοτρίβηση βωξίτη, της ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας, σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο, με χρήση μικροκυματικής ακτινοβολίας (0, 400 και 800 W).

Αρχικά μέσω του διαγράμματος του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του κοσκίνου, κρατώντας σταθερή την ισχύ, παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο περισσότερα ψιλά προϊόντα παράγονται. Η αύξηση των ψιλών (δηλ. -0.106 mm) για τα κλάσματα -3.35+1.7 mm, -0.850+0.412 και -0.053 mm για το κλάσμα -0.212 0.106 mm ήταν από 10.6-28.6%.

Επίσης κάνοντας χρήση του ίδιου διαγράμματος αλλά αυτή την φορά κρατώντας σταθερό τον χρόνο λειοτρίβησης προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η ισχύς τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Για χρόνο λειοτρίβησης 0.5 min για το κλάσμα -0.106 mm το αθροιστικό διερχόμενο από τα 0 W στα 400 W αυξάνεται κατά 0.9%.

Από τα διαγράμματα μεγέθους  $d_{80}$  (μm) σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης για κάθε επίπεδο ισχύος προέκυψε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο μειώνεται το μέγεθος του υλικού. Το  $d_{80}$  από τα 0.5 min στα 4 min λειοτρίβησης μειώνεται από 2-16.5%. Επιπροσθέτως φάνηκε ότι το επίπεδο ισχύος 800 W είναι αποδοτικότερο σε όλα τα κλάσματα της αρχικής τροφοδοσίας και ότι η μεγαλύτερη διαφορά φάνηκε στο χονδρότερο κλάσμα -3.35+1.7 mm.

Έπειτα, από τα διαγράμματα του βάρους (%) που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης υπολογίστηκε η τιμή του ρυθμού θραύσης  $S_i$  ( $\text{min}^{-1}$ ) για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα και για κάθε μικροκυματική ισχύ. Παρατηρήθηκε αύξηση του ρυθμού θραύσης  $S_i$  καθώς αυξάνεται το επίπεδο ισχύος. Από 0 W στα 400 W η αύξηση είναι από 5.3-6.7% ενώ η αντίστοιχη αύξηση από 0 W στα 800 W είναι 10-12.8 %. Στην συνέχεια, η σχέση του ρυθμού θραύσης για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, μέσω της γραφικής παράστασής του, έδειξε ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος του υλικού αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης ως ένα σημείο (μέγιστη τιμή) και από εκεί και πέρα αρχίζει να μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί τα μέσα λειοτρίβησης δεν μπορούν να λειοτριβήσουν αποδοτικά το υλικό από ένα μέγεθος και μετά.



Από την συνάρτηση θραύσης προσδιορίστηκαν οι παράμετροι  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ . Όπως γνωρίζουμε από την θεωρία οι παράμετροι  $\varphi$  και  $\beta$  προσδιορίζουν τη θραύση στα κλάσματα κοντά στο μέγεθος της τροφοδοσίας, ενώ το  $\gamma$  δείχνει την παραγωγή των ψιλών (όσο μικρότερο είναι τόσο περισσότερα ψιλά παράγονται). Για τον βωξίτη μικρότερη παραγωγή ψιλών διαπιστώνεται στα 400 W ( $\gamma = 0.33$ ).

Επομένως, με βάση όλα τα προηγούμενα παρατηρείται πως ο βωξίτης Παρνασσού – Γκιώνας θραύεται ευκολότερα με την επεξεργασία στα μικροκύματα και συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η ένταση της μικροκυματικής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται και βέλτιστη θραύση.

Επιπροσθέτως στο κοκκομετρικό κλάσμα  $-3.35+1.70$  mm εξετάστηκε και η επίδραση της θέρμανσης του υλικού στους 200 °C για 60 min πριν την υποβολή του σε μικροκυματική ακτινοβολία επιπέδου ισχύος 800 W. Παρατηρείται βελτίωση στο αθροιστικώς διερχόμενο, όταν έγινε στο δείγμα πρόσθετη συμβατική θερμική επεξεργασία με χρήση εργαστηριακού φούρνου. Στο κλάσμα  $-0.850$  mm παρατηρείται μέγιστη διαφοροποίηση του αθροιστικώς διερχομένου κατά 6%.

Μια πρόταση που θα μπορούσε να γίνει για μελλοντική έρευνα είναι να μελετηθεί η θέρμανση σε διάφορες θερμοκρασίες του υλικού πριν την ακτινοβολία και να γίνει σύγκριση με τη συμβατική θερμική επεξεργασία, σε φούρνους υψηλών θερμοκρασιών, καθώς επίσης και μελέτη κατανάλωσης ισχύος στις δύο αυτές περιπτώσεις.

Τέλος αντικείμενο μελλοντικής έρευνας θα μπορούσε να είναι και η συμπεριφορά αντίστοιχων δειγμάτων σε μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος της ακτινοβολίας και τα αποτελέσματα αυτά να συγκριθούν με τα αντίστοιχα της παρούσας εργασίας.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

- Γιαννικάκης Σ. 1997. Φυσικοχημικές ιδιότητες ακρυλικής ρητίνης πολυμερισμένη με μικροκύματα. Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Γρίβα Ε. 2012. Βωξίτης Παρνασσού, Θησαυρός ή Πληγή για το Νομό Φωκίδας. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Θεοδωρόπουλος Δ. 2005. Διερεύνηση παρασκευής κεραμικών υλικών σε φούρνο μικροκυμάτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κανελλόπουλος Χ. 2017. Περιθλασιομετρία ακτίνων Χ, Οδηγός εκτέλεσης και αποτίμησης ακτινοδιαγραμμάτων με χρήση του λογισμικού EVA της Bruker. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
- Καρμάλη Β. 2015. Βελτιστοποίηση λειοτρίβησης χαλαζίτη σε σφαιρόμυλο. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κατσικάτσος Γ. 1992. Γεωλογία της Ελλάδος. Πανεπιστήμιο Πάτρας.
- Κατωπόδης Δ. 2011. Σχεδιασμός Υπόγειας Εκμετάλλευσης Βωξιτικού Κοιτάσματος Κοκκινόλιθου Φωκίδας. Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κομνίτσας Κ. 2012. Μεταλλουργικές διεργασίες. Σημειώσεις του μαθήματος. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κωστάκης Γ. 2005. Γενική Ορυκτολογία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κωστάκης Γ. 1999. Εισαγωγή στην Αξιολόγηση Βιομηχανικών Ορυκτών, Σημειώσεις παραδόσεων. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μανούτσογλου Ε. 2013. Σημειώσεις του μαθήματος Εισαγωγή στην γεωλογία Ελλάδος. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μαραβέλιας Α. 2014. Σχεδιασμός υπόγειας εκμετάλλευσης βωξιτικού κοιτάσματος «Σιδηρόπορτο». Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Μουντράκης Δ. 2010. Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας. Εκδόσεις University Studio Press. Θεσσαλονίκη.
- Παπαδοπούλου Α. 2007. Παραγωγή και εφαρμογές εμπορικών τύπων βωξίτη Κλεισούρας και μαγνησίτη Γερακινής. Διατριβή ειδίκευσης. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
- Πασπαλιάρης Ι. 1985. Συμβολή στη βελτιστοποίηση της εκχύλισης. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Πετράκης Ε. 2004. Σχέση ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την λειοτρίβηση ψαθυρών υλικών. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πετράκης Ε. 2017. Μοντελοποίηση της σχέσης ενέργειας – διαστασιακών ιδιοτήτων των προϊόντων κατάτμησης σε σφαιρόμυλο. Διδακτορική διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Σαμούχος Μ. 2013. Ανθρακοθερμική Αναγωγή Καθαρών Οξειδίων μετάλλων και μεταλλευμάτων με χρήση μικροκυματικής ακτινοβολίας. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σοφιανός Γ, Ζέρβας Φ. 2016. Διάταξη θραυστήρα μαρμάρου και ζύγισης προϊόντων. Διπλωματική εργασία. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας.
- Σταμπολιάδης Η. 2008. Μηχανική των τεμαχιδίων. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Σταμπολτζής Γ. 1994. Μηχανική προπαρασκευή μεταλλευμάτων βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων (υδροαυτοκαθαρισμός – κατάτμηση – ταξινόμηση). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σταμπολτζής Γ. 1990. Υπολογισμός καθαρής ισχύος εργαστηριακών ραβδόμυλων. Μεταλλειολογικά και Μεταλλουργικά Χρονικά 76:47-55.
- Τσακίρη Δ. 2012. Επίδραση της κοκκομετρίας ασβεστολιθικών αδρανών στον προσδιορισμό του δείκτη έργου Bond. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Χρηστίδης Γ. 2012. Σημειώσεις του μαθήματος Κοιτασματολογία II.

#### Διεθνής βιβλιογραφία

- Austin LG, Bhatia VK. 1972. Experimental methods for grinding studies in laboratory mills. 261 – 266.
- Austin LG, Shojl K, Luckie PT. 1976. The Effect of Ball Size on Mill Performance. Powder Technology 14:71 – 79.

- Austin LG, Klimpel RR, Luckie PT. 1984. Process engineering of size reduction: ball milling. New York, NY: SME –AIME.
- Austin LG, Luckie PT. 1972. Methods for determination of breakage distribution parameters. Powder Technol.5:215–222.
- Austin LG, Bagga P. 1981. An analysis of fine dry grinding in ball mills. Powder Technol. 28:83–90.
- Barani K, Koleini SMJ. 2012. Effect of sample Geometry and Placement on Iron Ore Processing by Microwave. ICKEM II. Singapore.
- Barani K, Koleini SMJ, Rezaei B. 2011. Magnetic properties of an iron ore sample after microwave heating. Sep. Purif. Technol. 76 (3): 331–336.
- Chen TT, Dutrizac JE, Haque KE, Wyslouzil W, Kashyap S. 1984. The relative transparency of minerals to microwave radiation. CMQ. 23 1:349–351.
- Cheung WS, Levien FH. 1985. Microwaves made simple: Principles and applications. Artech House. Inc. Boston. MA.
- Chunpeng L, Yousheng X, Yixin H. 1990. Application of microwave radiation to extractive metallurgy. Chin. J. Met. Science Technology 62:121–124. 231,349–351.
- Deniz V. 2013. Effect of mill speed on kinetic breakage four different particulate pumices. Particulate Science and Technology. 31:101–108.
- Fuerstenau D, Kapur P, De. A. 2003. Modelling Breakage Kinetics in Various Dry Comminution Systems. KONA Powder and Particle Journal 21:121-132.
- Gupta A, Yan DS. 2016. Mineral Processing Design and Operations. An Introduction. 1st ed. Amsterdam.
- Gupta V, Sharma S. 2014. Analysis of ball mill grinding operation using mill power specific kinetic parameters. Advanced Powder Technology 25:625–634.
- Haque KE. 1999. Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review. International journal of mineral processing. 57:1-24.
- Herbst JA, Fuerstenau DW. 1980. Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models. International Journal of Mineral Processing. 7:1–31.
- Ipek H, Göktepe F. 2011. Determination of grindability characteristics of zeolite. Physicochem Probl Miner Process. 47:183–192.

- Katubilwa FM. 2008. Effect of ball size distribution on milling parameters. Master of Science Dissertation. University of the Witwatersrand. Johannesburg.
- Katubilwa FM, Moys MH. 2009. Effect of ball size distribution on milling rate. *Miner. Eng.* 22:1283–1288.
- Kingman SW, Rowson NA. 1998, Microwave treatment of minerals—a review. *Miner. Eng.* 11:1081–1087.
- Klimpel RR, Austin LG. 1977. The back-calculation of specific rates of breakage and non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding data. *Int. J. Miner. Process.* 4:7–32.
- Kolehini SM, Barani K, Razaee B. 2012. The Effect of Microwave Treatment on Dry Grinding Kinetics of Iron Ore, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 33:3:159-169.
- Kotake N, Daibo K, Yamamoto T, Kanda Y. 2004. Experimental investigation on a grinding rate constant of solid materials by a ball mill—effect of ball diameter and feed size. *Powder Technology* 143– 144:196– 203.
- Kumar P, Sahoo BK, Kar DD, Chakraborty S, Meikap BC. 2010. Iron ore grindability improvement by microwave pre-treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 16. 805–812.
- Mc Gill SL, Walkiewicz JW, Smyres GA. 1988. The effect of power level on microwave heating of selected chemicals and minerals. In: Sutton, WH. et al. (Eds.). *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Reno, NV, M . 4.6, Vol. 124.*
- Meyer C, Umm F. 1997. Insights into Ancient Egyptian Mining. *JOM*. 49(3):64-68.
- Monov V, Sokolov B, Stoenchev S. 2012. Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control. *Cybernetics and Information Technologies* 12. Sofia.
- Napier–Munn TJ, Morrell S, Morrison RD, Kojovic T. 1996. Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC). University of Queensland. Brisbane. Queensland. Australia.
- Nomura S, Tanaka T, Callcott T. 1994. The effect of mill power on the selection function for tumbling and vibration ball mills. *Powder Technology* 81:101-109.
- Oldfather CH. 1967. *Diodorus of Sicily*. Cambridge. Harvard U. Press.
- 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.
- Peys A, Hertel T, Snellings R. 2022. Co-Calcination of Bauxite Residue With Kaolinite in Pursuit of a Robust and High-Quality Supplementary Cementitious Material.
- Pozar D. 2012. *Microwave Engineering*. Forth Edition. University of Massachusetts.
- Samanli S, Cuhadaroglu D, Ipek H, Ucbas Y. 2010. The investigation of grinding kinetics of power plant solid fossil fuel in ball mill. *Fuel* 89 (3):703 – 707.
- Spencer P. 1950. Method of treating foodstuffs. US patent 2495429, issued January 24.
- Tavares LM, King RP. 1996. Effect of Microwave-Induced Damage on Single-Particle Comminution of Ores. *SME Annual Meeting*, Phoenix, Arizona.
- The Tech Vol. V. Massachusetts Institute of Technology. Boston. 12:179-180.
- Walkiewicz JW, Clark AE, McGill SL. 1991. Microwave-assisted grinding. *IEEE Transactions on Industry Applications* 27 (2): 239.
- Walkiewicz JW, Kazonich G, McGill SL. 1988. Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds. *Minerals and Metallurgical Processing* 5 1:39–42.
- Wang Y, Forssberg E. 2000. Microwave Assisted Comminution and Liberation of Minerals. *Mineral Processing on the Verge of the 21st Century*. Özbayoğlu et al. (eds.), Balkema. Rotterdam.
- Wills BA, Napier – Munn TJ. 2006. *Mineral Processing Technology*. Elsevier Science & Technology Books.
- Wills BA, Parker RH, Binns DG. 1987. Thermally Assisted Liberation of Cassiterite. *Minerals and Metallurgical Processing* pp 94-96.
- Yixin H, Chunpeng L. 1996. Heating rate of minerals and compounds in microwave field. *Transactions of NFsoc*, 6 (1):35-40.

- Znamenackov I, Lovàs M, Mockovciakova A, Jakabsky S, Briancin J. 2005. Modification of magnetic properties of siderite ore by microwave energy. Sep. Purification Technology. 43 (2):169–174.

### Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- <https://bauxite.world-aluminium.org/mining/process/>
- <https://ima-europe.eu/content/imerys-industrial-minerals-greece-sa>
- <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-bauxite-alumina.pdf>
- <http://www.alhellas.com>
- <https://www.aluminiumleader.com/>
- <https://www.capital.gr/epixeiriseis/3244948/poia-einai-i-imerys-pou-ependuei-ston-elliniko-orukto-plouto>
- <http://www.geology.ucdavis.edu/~cowen/~GEL11>.
- <http://www.iabrasive.com/articles/australian-bauxite-aluminum-and-beyond>
- <https://www.intermek.gr>
- [www.orykta.gr](http://www.orykta.gr)
- <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/bauxite-and-alumina-statistics-and-information>