



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ

ΚΙΝΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΣΕ ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΤΣΟΥΚΑΛΟΥ ΑΜΑΛΙΑ*

Εξεταστική επιτροπή:

Κομνίτσας Κωνσταντίνος, Καθηγητής (Επιβλέπων)  
Γαλετάκης Μιχαήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής  
Αλεβίζος Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

## Πίνακας περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	III
<i>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</i> .....	III
<i>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</i> .....	IV
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
1.1 Αντικείμενο Εργασίας .....	1
1.2 Μάρμαρο .....	1
1.3 Χρήσεις Μαρμάρου .....	1
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b> .....	2
2.1 Κατάτμηση.....	2
2.2 Μηχανές κατάτμησης.....	3
2.2.1 Μηχανές θραύσης .....	3
2.2.2 Μηχανές λειοτρίβησης.....	4
2.2.3 Παράμετροι λειοτρίβησης .....	6
2.3 Κινητικά μοντέλα .....	8
2.3.1 Συνάρτηση επιλογής ή Ειδικός ρυθμός θραύσης .....	9
2.3.2 Συνάρτηση θραύσης.....	10
2.3.3 Μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού (Population balance model, PBM) .....	12
2.4 Επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών στο μέγεθος των τεμαχίων .....	12
2.5 Ειδικός ρυθμός θραύσης σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών .....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ</b> .....	16
3.1 Προέλευση δείγματος .....	16
3.2 Ορυκτολογική ανάλυση δειγμάτων με Περιθλασίμετρο Ακτινών – X (XRD) .....	16
3.3 Παρατήρηση λεπτής και στιλπνής τομής μαρμάρου .....	17
3.4 Χημική ανάλυση με XRF .....	18
3.4 Μέθοδος προσδιορισμού πυκνότητας και πορώδους.....	19
3.5 Περιγραφή εξοπλισμού.....	20

3.5.1 Εργαστηριακός Σπαστήρας με σιαγόνες .....	20
3.5.2 Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος.....	20
3.5.3 Συσκευή κοσκίνησης.....	22
<b>3.6 Πειραματική διαδικασία.....</b>	<b>23</b>
3.6.1 Θραύση του υλικού .....	23
3.6.2 Λειοτρίβηση του υλικού.....	23
3.6.3 Κοσκίνιση του υλικού .....	25
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>26</b>
4.1 Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους προϊόντος .....	26
4.2 Επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών στο μέγεθος του προϊόντος.....	38
4.3 Μέγεθος προϊόντος σε συνάρτηση με τη ειδική ενέργεια.....	44
4.4 Υπολογισμός ειδικού ρυθμού θραύσης .....	48
4.5 Ειδικός ρυθμός θραύσης σε σχέση με το μέγεθος της τροφοδοσίας.....	53
4.6 Σχέση μέγιστου ειδικού ρυθμού θραύσης με τη διάμετρο των σφαιρών .....	56
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>61</b>
 <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>63</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Κομνίτσα. Το θέμα της είναι το *Κινητικό μοντέλο λειοτρίβησης μαρμάρου σε σφαιρόμυλο*.

Η επιλογή του θέματος έγινε διότι εδώ και πολλά χρόνια αρκετοί ερευνητές μελετούν τη διαδικασία της λειοτρίβησης η οποία χαρακτηρίζεται ως μη αποδοτική. Το πεδίο ερευνών εστιάζει στις παραμέτρους τις οποίες επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα που δέχθηκε να μου αναθέσει το παρόν θέμα. Τον αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μιχαήλ Γαλετάκη και τον επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Αλεβίζο όπου δέχθηκαν να αξιολογήσουν τη διπλωματική εργασία ως μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Βαγγέλη Πετράκη για την πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένεια μου για τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη της διαδικασίας της λειοτρίβησης απασχολεί εδώ και χρόνια πολλούς ερευνητές. Είναι μια διαδικασία που χρειάζεται υψηλή κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα βάρους του υλικού που λειοτριβείται. Η έρευνα εστιάζεται γύρω από τις συνθήκες λειοτρίβησης οι οποίες επικρατούν στις μηχανές λειοτρίβησης. Στόχος των ερευνών είναι να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες, ώστε να καταστήσουν τη διαδικασία αποδοτική. Για αυτό το λόγο διεξάγονται πειράματα σε εργαστηριακό επίπεδο αλλάζοντας κάθε φορά τις επικρατούσες συνθήκες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε εφαρμογή κινητικού μοντέλου στη λειοτρίβηση μαρμάρου σε σφαιρόμυλο. Για την εκτέλεση των πειραμάτων δημιουργήθηκαν 4 στενά κοκκομετρικά κλάσματα με λόγο  $\sqrt{2}$  τα οποία λειοτριβήθηκαν το κάθε ένα για 4 διαφορετικούς χρόνους και με τρεις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών.

Από τα διαγράμματα του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος και για κάθε διάμετρο σφαιρών προέκυψε ότι με τη χρήση σφαιρών μεγάλης διαμέτρου λειοτριβούνται περισσότερο χονδρότερα κλάσματα. Η χρήση σφαιρών μικρότερης διαμέτρου έδωσε το αντίθετο αποτέλεσμα. Επίσης, από τα ίδια διαγράμματα υπολογίστηκε το μέγεθος  $D_{80}$  το οποίο είναι το άνοιγμα της βροχίδας κοσκίνου από το οποίο διέρχεται το 80% του υλικού. Έπειτα έγιναν διαγράμματα του μεγέθους  $D_{80}$  σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια, για κάθε διάμετρο σφαίρας. Από τα διαγράμματα αυτά προέκυψε ότι για την ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας και για χονδρά κοκκομετρικά κλάσματα τροφοδοσίας, όταν χρησιμοποιούνται σφαίρες μεγάλης διαμέτρου, το μέγεθος  $D_{80}$  είναι μικρότερο σε σχέση με το μέγεθος  $D_{80}$  που προκύπτει όταν χρησιμοποιούνται σφαίρες μικρής διαμέτρου. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η τροφοδοσία αποτελείται από λεπτά κοκκομετρικά κλάσματα. Για τη μελέτη του ειδικού ρυθμού θραύσης σε σχέση με το μέγεθος της σφαίρας, για κάθε κλάσμα τροφοδοσίας, έγιναν διαγράμματα του παραμένοντος βάρους (%) σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης. Από τα διαγράμματα αυτά υπολογίστηκε ο ειδικός ρυθμός θραύσης από τη κλίση των ευθειών που προέκυπταν.

Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού όπου δίνει τη σχέση μεταξύ ειδικού ρυθμού θραύσης και μεγέθους τροφοδοσίας. Μέσω του προγράμματος solver του excel έγινε προσπάθεια να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που θα ελαχιστοποιούν το σφάλμα ανάμεσα στις πειραματικές μετρήσεις με στις μετρήσεις του μοντέλου.

Τέλος, από το διάγραμμα ειδικού ρυθμού θραύσης σε σχέση με το μέγεθος τροφοδοσίας προέκυψε ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος, αυξάνεται και ο ειδικός ρυθμός θραύσης. Έπειτα φθάνει σε μία μέγιστη τιμή όπου αντιστοιχεί και σε ένα μέγιστο μέγεθος και από εκεί και πέρα αρχίζει να μειώνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι τα μέσα λειοτρίβησης δεν μπορούν να λειοτριβήσουν αποδοτικά το υλικό από ένα μέγεθος και έπειτα.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Πολλές έρευνες εδώ και χρόνια έχουν γίνει με σκοπό τη μελέτη της διαδικασίας της λειοτρίβησης, καθώς αποτελεί μια διαδικασία η οποία χρειάζεται αρκετή ενέργεια για την πραγματοποίησή της, η οποία όμως δεν είναι αποδοτική. Η προσομοίωση της διαδικασίας της λειοτρίβησης μέσω κινητικών μοντέλων μπορεί να βοηθήσει στην διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων όσον αφορά τις παραμέτρους που καταστούν την διαδικασία αποδοτική.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή του κινητικού μοντέλου λειοτρίβησης μαρμάρου σε σφαιρόμυλο. Η μελέτη έγινε μέσω του μοντέλου ισοζυγίου πληθυσμού. Ποιό συγκεκριμένα μελετήθηκε ο ειδικός ρυθμός θραύσης (Si) για διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του μαρμάρου και πως αυτός επηρεάζεται από διάφορα μεγέθη μέσων λειοτρίβησης (σφαίρες). Επίσης μελετήθηκε η απόδοση της ενέργειας που καταναλωνόταν κατά τη λειοτρίβηση και πως αυτή επηρεάζεται από το μέγεθος της τροφοδοσίας και το μέγεθος των σφαιρών.

## 1.2 Μάρμαρο

Το μάρμαρο είναι πέτρωμα περιοχικής μεταμόρφωσης ανθρακικών ιζηματογενών πετρωμάτων (ασβεστόλιθων, δολομιτών). Αποτελείται αποκλειστικά από ανθρακικά ορυκτά (ασβεστίτη, δολομίτη). Σε μικρές αναλογίες απαντά με προσμίξεις πυριτικές ή αργλικές, π.χ. χαλαζία, μαρμαρυγία, επίδοτο, τρεμολίτη, χλωρίτη, σερπεντίνη, γραφίτη κ.α. (Θεοδωρίκας, 2010).

Το χρώμα των μαρμάρων ποικίλει από λευκό, κίτρινο, κόκκινο, μαύρο, πράσινο, με ραβδώσεις, σκιές κλπ. Οι διάφοροι χρωματισμοί στη μάζα οφείλονται στις διάφορες προσμίξεις (Μισοπολινός, 1990).

## 1.3 Χρήσεις Μαρμάρου

Το μάρμαρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επενδύσεις εσωτερικών χώρων, δαπεδοστρώσεις, χώρους υγιεινής, τζάκια, σκάλες, έπιπλα, θερμαντικές μονάδες, λιθοστρώσεις – πλακοστρώσεις, επενδύσεις εξωτερικών χώρων ([www.e-marmara.gr](http://www.e-marmara.gr)).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Κατάτμηση

**Κατάτμηση** ορίζεται η μείωση του μεγέθους των τεμαχίων πετρωμάτων ή ορυκτών, ώστε να μπορούν να υποβληθούν σε περαιτέρω επεξεργασίες όπως σε εμπλουτισμό, σε μεταλλουργικές διεργασίες ή απευθείας στη βιομηχανία. Χωρίζεται σε δύο στάδια τα οποία είναι η θραύση και η λειοτρίβηση.

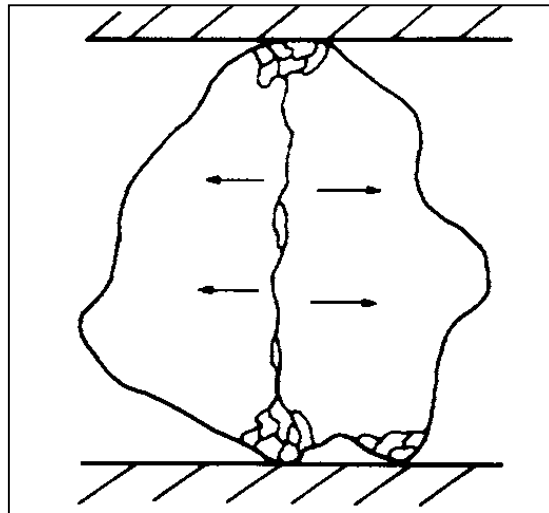
Η θραύση χωρίζεται σε τρεις φάσεις την Πρωτογενή, Δευτερογενή και Τριτογενή. Η τροφοδοσία της θραύσης ξεκινά από τεμάχια μεγέθους ενός μέτρου μέχρι και 5mm, ενώ η τροφοδοσία της λειοτρίβησης από τεμάχια μεγέθους από 25mm έως και 2mm.

Για την επίτευξη της κατάτμησης είναι απαραίτητο να γίνει εφαρμογή μηχανικών δυνάμεων στα τεμάχια οι οποίες πρέπει να υπερβαίνουν τις δυνάμεις συνοχής του υλικού του τεμαχίου. 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).

Οι κυριότερες δυνάμεις που εφαρμόζονται είναι:

**Η θλίψη:** η οποία εφαρμόζεται μέσω της συμπίεσης του τεμαχίου σε δύο άκαμπτες επιφάνειες, από τις οποίες συνήθως η μία είναι ακίνητη και η πίεση ασκείται από την άλλη κινητή επιφάνεια (Σταμπολιάδης, 2008). Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της θλίψης είναι η δημιουργία δύο προϊόντων τα οποία διαφέρουν ως προς το μέγεθος (εικόνα (1.1)). Το ένα προϊόν αποτελείται από μεγάλα τεμάχια και είναι αποτέλεσμα εφελκυστικής αστοχίας και το δεύτερο αποτελείται από μικρά τεμάχια και είναι αποτέλεσμα θλιπτικής αστοχίας στα όρια εφαρμογής της δύναμης (Wills, 2005).





*Εικόνα 1.1: Επίδραση της δύναμης της θλίψης πάνω σε ένα τεμάχιο (Wills, 2005).*

**Η κρούση:** η οποία εφαρμόζεται όταν υπάρχει ταχεία πρόσκρουση του τεμαχίου σε κινούμενη επιφάνεια ή το αντίστροφο (Σταμπολιάδης, 2008). Το αποτέλεσμα είναι η εφελκυστική αστοχία του τεμαχίου και η παραγωγή προϊόντων μεγέθους και σχήματος κοντά στο αρχικό τεμάχιο (Kelly and Spottiswood, 1982).

**Η τριβή:** η οποία εφαρμόζεται όταν το τεμάχιο βρίσκεται ανάμεσα σε δύο παράλληλες επιφάνειες οι οποίες κινούνται αντίθετα (Σταμπολιάδης, 2008). Το αποτέλεσμα είναι πολλά μικρά κομμάτια να αποσπώνται από την επιφάνεια του τεμαχίου αφήνοντας το εσωτερικό σώμα άθικτο.

## 2.2 Μηχανές κατάτμησης

Με τις μηχανές κατάτμησης επιτυγχάνεται η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων. Χωρίζονται σε μηχανές θραύσης και μηχανές λειοτρίβησης.

### 2.2.1 Μηχανές θραύσης

Οι μηχανές θραύσης χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος της τροφοδοσίας που μπορούν να θραύσουν. Οι διάφοροι τύποι μηχανών θραύσης διαφέρουν ως προς τη δομή και λειτουργία τους και αναφέρονται παρακάτω:

Σιαγονωτοί σπαστήρες

Γυροσκοπικοί σπαστήρες

Κωνικοί σπαστήρες

Σπαστήρες γυροσκοπικού δίσκου

Σφυρόμυλοι

Κρουστικοί σπαστήρες  
Κυλινδρόμυλοι  
Φυγοκεντρικοί σπαστήρες

Οι *σιαγονωτοί σπαστήρες* είναι από τις απλούστερες ίσως μηχανές θραύσης. Αποτελούνται 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 ευρίσκονται μεταξύ των δύο επιφανειών, οι οποίες ενεργούν σαν είδος σιαγόνων. Το άνοιγμα στο πάνω μέρος των σιαγόνων καθορίζει το μέγεθος των τεμαχίων της τροφοδοσίας, ενώ το άνοιγμα στο κάτω μέρος καθορίζει το μέγεθος του προϊόντος που δεν είναι σταθερό. Οι σιαγονωτοί σπαστήρες χρησιμοποιούνται στην πρωτογενή και δευτερογενή θραύση (Σταμπολιάδης, 2008).

### 2.2.2 Μηχανές λειοτρίβησης

Οι μηχανές λειοτρίβησης χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος της τροφοδοσίας που μπορούν να δεχθούν και ανάλογα με τα μέσα λειοτρίβησης που χρησιμοποιούν, που μπορεί να είναι μεταλλικές σφαίρες ή μεταλλικές ράβδοι, ενώ υπάρχουν και μηχανές στις οποίες τα μέσα λειοτρίβησης είναι μεγαλύτερα τεμάχια του ίδιου του υλικού που λειοτριβείται. Οι μηχανές διαφέρουν ως προς τη δομή και τη λειτουργία τους. Επίσης ανάλογα με το υλικό η λειοτρίβηση μπορεί να γίνεται είτε με υγρή είτε με ξηρή τροφοδοσία.

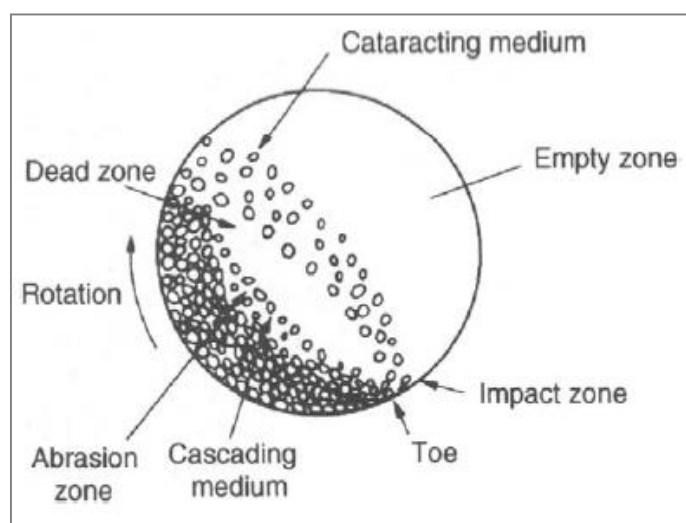
Παρακάτω αναφέρονται οι διάφοροι τύποι των μηχανών λειοτρίβησης:

Ραβδόμυλοι  
Σφαιρόμυλοι  
Κωνικοί σφαιρόμυλοι  
Μύλοι αυτογενούς λειοτρίβησης  
Μύλοι κροκάλων  
Περιστρεφόμενοι σπαστήρες γαιανθράκων  
Δονούμενοι μύλοι

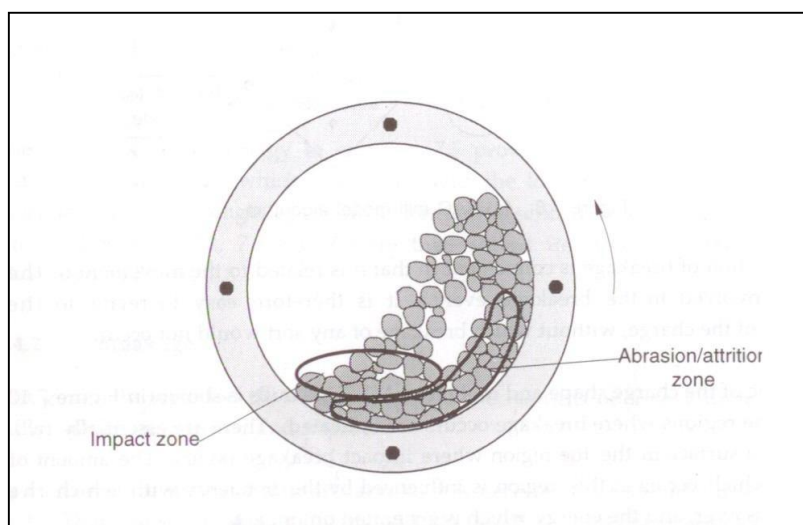
Οι κυριότερες μηχανές λειοτρίβησης είναι οι ραβδόμυλοι και οι σφαιρόμυλοι, οι οποίοι στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Λειοτριβούν το μετάλλευμα μέσω της πτώσεως και της κυλίσεως των μέσων λειοτρίβησης που περιέχουν. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό κέλυφος που στηρίζεται στα δύο του άκρα και περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του. Μέσα στο κέλυφος υπάρχει ένα μόνιμο φορτίο από μεταλλικές σφαίρες ή ράβδους ή κροκάλους. Με την κίνηση του κελύφους οι μεταλλικές σφαίρες ή τα άλλα μέσα λειοτρίβησης ανυψώνονται μέχρι που πολλές από αυτές αρχίζουν να κυλινδρουν πάνω στις άλλες. Άλλες πάλι ανυψώνονται περισσότερο μέχρι ενός σημείου από το οποίο πέφτουν ελεύθερα προς τα κάτω και κατακρημνίζονται ακολουθώντας παραβολική τροχιά. Η πτώση και το κατρακύλισμα

των σφαιρών λειοτριβεί το μέταλλευμα που συνυπάρχει με αυτές μέσα στον μύλο (Σταμπολιάδης, 2008).

Η αποτελεσματικότητα της λειοτρίβησης εξαρτάται από τη συμπεριφορά των μέσων λειοτρίβησης μέσα στον μύλο. Χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να βγουν από την καλύτερη κατανόηση αυτής της συμπεριφοράς. Επειδή είναι δύσκολη η παρακολούθηση των μέσων λειοτρίβησης ξεχωριστά, λόγω της τυχαίας κίνησής τους, δημιουργούνται 3 ζώνες λειοτρίβησης που βασίζονται στους μηχανισμούς της λειοτρίβησης (Francois, 2008). Οι ζώνες αυτές είναι η ζώνη της κρούσης (impact zone), η ζώνη της τριβής (abrasion zone) και η ζώνη όπου οι σφαίρες βρίσκονται σε ελεύθερη πτώση (empty zone) και δεν έρχονται σε επαφή με τα τεμάχια ώστε να προκληθεί λειοτρίβηση (εικόνες (2.2) – (2.3)) .



*Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας της λειοτρίβησης εντός μύλου λειοτρίβησης (Wills and Napier – Munn, 2006)*



*Εικόνα 2.3: Ζώνη κρούσης και Ζώνη τριβής στο εσωτερικό του μύλου. (Napier – Munn et al. 1996)*

Οι δυνάμεις που ασκούνται στα τεμάχια κατά τη λειοτρίβηση είναι οι δυνάμεις της τριβής που δημιουργούνται με την κύλιση των σφαιρών μεταξύ τους και της κρούσης που δημιουργούνται από την ελεύθερη πτώση των σφαιρών. Οι Austin et al.(1984) υποστηρίζουν ότι για τη μείωση του μεγέθους των μεγαλύτερων τεμαχίων ευθύνεται η δύναμη της κρούσης, ενώ για τη μείωση του μεγέθους των λεπτότερων τεμαχίων ευθύνεται η τριβή. Μεταξύ αυτών των ορίων, στη λειοτρίβηση γίνεται εφαρμογή του συνδυασμού των δυνάμεων της κρούσης και της τριβής (Francois, 2008).

### 2.2.3 Παράμετροι λειοτρίβησης

Κατά την διαδικασία της λειοτρίβησης υπάρχουν κάποιοι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να γίνει σωστά η διαδικασία. Αυτοί οι παράμετροι εξαρτώνται από το υλικό, από τα μέσα λειοτρίβησης, από τα χαρακτηριστικά του μύλου και την συχνότητα περιστροφής του και από την πλήρωση των κενών των σφαιρών με υλικό.

- Κρίσιμη συχνότητα περιστροφής  $N_c$

Η ανύψωση μιας σφαίρας, παρασυρόμενης από την περιστροφική κίνηση του κελύφους του μύλου, εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής. Η δύναμη που κρατάει τη σφαίρα επί του τυμπάνου είναι η φυγόκεντρος. Το υψηλότερο σημείο στο οποίο μπορεί να φθάσει μια σφαίρα κατά την περιστροφή του μύλου είναι η κορυφή του κελύφους. Σε αυτή την περίπτωση η συχνότητα περιστροφής είναι η  $N_c$  και ονομάζεται **κρίσιμη συχνότητα περιστροφής** διότι όταν το κέλυφος περιστρέφεται με συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση με αυτή, τότε η σφαίρα δεν πέφτει και παραμένει συνεχώς κολλημένη στο κέλυφος, οπότε δε γίνεται λειοτρίβηση στον μύλο. Η  $N_c$  υπολογίζεται από τη σχέση (1) (Σταμπολιάδης, 2008):

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \text{ rpm} \quad (1)$$

όπου  $D$  η εσωτερική διάμετρος του μύλου (m).

Συνήθως οι μύλοι γυρίζουν με συχνότητα 60% - 80% της  $N_c$ .

- Συντελεστής πλήρωσης υλικού  $f_c$

Ο συντελεστής πλήρωσης του υλικού μας δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνει το υλικό σε σχέση με τον όγκο του μύλου. Ο  $f_c$  δίνεται από τη σχέση (2):

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

όπου  $\varphi$  είναι το πορώδες στρώματος των σφαιρών και του υλικού μέσα στο μύλο, το οποίο διαφέρει ελάχιστα ανάλογα με το μέγεθος σφαιρών, την πλήρωση σε υλικό κλπ. 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 σφαιρών J

Ο συντελεστής πλήρωσης σφαιρών J μας δείχνει τον όγκο που καταλαμβάνουν οι σφαίρες σε σχέση με τον όγκο του μύλου. Ο J δίνεται από τη σχέση (3):

$$J = \left( \frac{\frac{\text{μάζα σφαιρών}}{\text{πυκνότητα σφαιρών}}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \cdot \frac{1}{1 - \varphi} \quad (\%) \quad (3)$$

- Συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό U

Ο συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό μας δείχνει το κατά πόσο έχουν πληρωθεί τα κενά ανάμεσα στις σφαίρες με υλικό και είναι συνάρτηση των  $f_c$  και J. Ο U δίνεται από τη σχέση (4):

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

- Ισχύς P

Η ισχύς P (W) που απορροφάται από ένα μύλο εξαρτάται από τη διάμετρο του μύλου, τη συχνότητα περιστροφής και τη μάζα της τροφοδοσίας. Δίνεται από τη παρακάτω σχέση (Σταμπολτζής, 1990) (5):

$$P = 0.109 \cdot M \cdot N^{1.124} \cdot D^{1.078} \quad (5)$$

όπου M είναι η μάζα της τροφοδοσίας σε kg, N η συχνότητα περιστροφής σε rpm και D η διάμετρος του μύλου σε m.

- Ειδική ενέργεια  $\varepsilon$

Η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων αποτελεί μια εξαιρετικά ενεργοβόρα διεργασία. Το μέγεθος που μετράται κατά τη λειοτρίβηση, είναι η ενέργεια ανά μονάδα βάρους ή όγκου (ειδική ενέργεια) που απαιτείται ώστε από ένα αρχικό υλικό να επιτύχουμε το επιθυμητό μέγεθος. Για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων καταναλώνεται το 3-4% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως και η κατανάλωση φθάνει μέχρι το 70% της συνολικής ενέργειας που απαιτείται σε μια βιομηχανία επεξεργασίας ορυκτών. Από την ενέργεια που παράγουν οι μηχανές θραύσης και λειοτρίβησης μόνο ένα μικρό ποσοστό διατίθεται για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων, ενώ η περισσότερη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα.

Έτσι είναι απαραίτητο να γίνονται προσπάθειες πρόβλεψης ή μείωσης της απαιτούμενης ειδικής ενέργειας, ώστε να γίνει σωστός προγραμματισμός της λειοτρίβησης και ορθολογικός σχεδιασμός της όλης εγκατάστασης επεξεργασίας του μεταλλεύματος με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα βάρους υλικού (Κομνίτσας, 2015).

Η ενέργεια  $E$  (kJ) που απαιτείται για την κατάτμηση μεταλλεύματος ή πετρώματος δίνεται από τη σχέση (6):

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

όπου  $P$  η ισχύς σε kW και  $t$  ο χρόνος σε sec.

Ένα διαιρέσουμε τη σχέση (6) με τη μάζα  $M$  του υλικού προκύπτει η ειδική ενέργεια  $\varepsilon$  από τη σχέση (7) σε kJ/kg :

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

όπου  $P$  η ισχύς σε kW,  $t$  ο χρόνος λειοτρίβησης σε sec και  $M$  η μάζα του υλικού σε κιλά (kg).

Η διαίρεση της σχέσης (7) με το 3,6 θα δώσει την ειδική ενέργεια σε kWh/t.

## 2.3 Κινητικά μοντέλα

Για τη μελέτη και την κατανόηση της μηχανικής επεξεργασίας μεταλλευμάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές προσομοίωσης. Μια τέτοια τεχνική είναι αυτή των κινητικών μοντέλων όπου προσομοιώνουν τις διαδικασίες θραύσης των υλικών. Γενικά η μοντελοποίηση είναι μια μη δαπανηρή μέθοδος η οποία επιτρέπει την αντιμετώπιση πολύπλοκων προβλημάτων (King, 2001).

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με το μοντέλο ισοζύγιου πληθυσμού (PBM) το οποίο αποτελεί την έκφραση της ισορροπίας μάζας-μεγέθους στο εσωτερικού του μύλου και λαμβάνει υπόψη του δύο συναρτήσεις: τη συνάρτηση επιλογής (selection function) ή ειδικό ρυθμό θραύσης (specific rate of breakage) και τη συνάρτηση θραύσης (breakage function).

### 2.3.1 Συνάρτηση επιλογής ή Ειδικός ρυθμός θραύσης

Στη λειοτρίβηση το υλικό της τροφοδοσίας αποτελείται από ένα μέγεθος τεμαχίων. Το προϊόν που παράγεται μετά τη λειοτρίβηση είναι τεμάχια μικρότερου μεγέθους. Αν γνωρίζουμε το ρυθμό θραύσης, που παράγει το συγκεκριμένο μέγεθος, θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε και την κοκκομετρική κατανομή των μεγεθών των τεμαχίων που θα υπάρχουν κάθε χρονική στιγμή μέσα στον μύλο.

Το μέγεθος ορίζεται ως ένα στενό κοκκομετρικό κλάσμα που προκύπτει από κοσκίνιση και παραμένει ανάμεσα σε δύο συνεχόμενα κόσκινα. Το στενό αυτό κοκκομετρικό κλάσμα το ονομάζουμε τάξη μεγέθους  $i$ . Η διάμετρος των τεμαχίων σε αυτή την τάξη  $i$ , είναι μικρότερη του ανοίγματος των οπών του επάνω κοσκίνου, το οποίο είναι  $x_i$ , και μεγαλύτερη του ανοίγματος των οπών του κάτω κοσκίνου, το οποίο είναι  $x_{i+1}$ .

Ένα υποθέσουμε ότι η τροφοδοσία σε ένα μύλο είναι της τάξης μεγέθους  $i$  και λειοτριβηθεί για χρόνο  $t$  τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τον ειδικό ρυθμό θραύσης της τάξης  $i$ . Έστω  $m_i(t)$  η μάζα του κλάσματος της τάξης μεγέθους  $i$  μετά από λειοτρίβηση σε χρόνο  $t$ . Ο ειδικός ρυθμός θραύσης της τάξης αυτής θα είναι ανάλογος της ποσότητας  $m_i(t)$  που έχει το μέγεθος αυτό. Η σχέση αυτή δίνεται από την εξίσωση πρώτου βαθμού (σχέση (8)) (Austin et al., 1984):

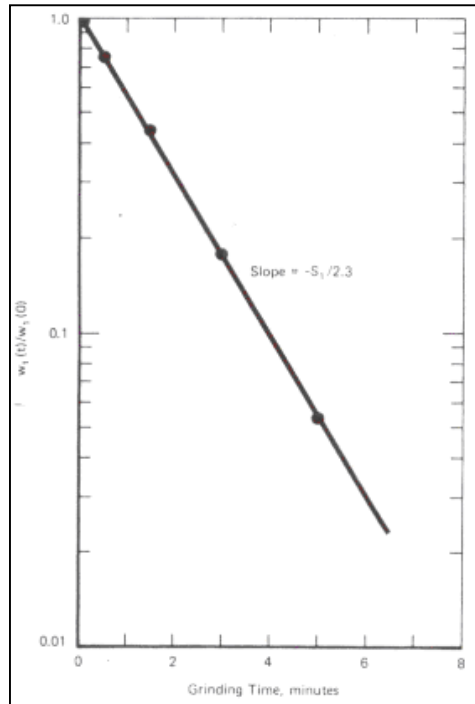
$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i m_i(t) \quad (8)$$

όπου  $m_i(t)$  είναι η μάζα του κλάσματος της τάξης  $i$ ,  $S_i$  είναι ο ειδικός ρυθμός θραύσης του υλικού της τάξης μεγέθους  $i$  σε  $\text{min}^{-1}$ .

Υποθέτοντας ότι ο ειδικός ρυθμός θραύσης δεν αλλάζει με το χρόνο, ολοκληρώνοντας την εξίσωση πρώτου βαθμού (σχέση (8)) προκύπτει η σχέση (9):

$$\log(m_i(t)) - \log(m_i(0)) = \frac{-S_i \cdot t}{2.3} \quad (9)$$

Στην εικόνα (2.4) απεικονίζεται η σχέση (9) σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα που δείχνει την σχέση της μάζας που έχει παραμείνει στη τάξη μεγέθους  $i$  σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης. Όπως φαίνεται η κλίση της ευθείας δίνει τον ειδικό ρυθμό θραύσης ( $S_i$ ) για το μέγεθος  $i$ .



Εικόνα 2.4: Σχέση μάζας που έχει παραμείνει στη τάξη μεγέθους  $i$  σε συνάρτηση με το χρόνο (Austin et al., 1984)

### 2.3.2 Συνάρτηση θραύσης

Η κατανομή των μεγεθών των τεμαχίων που παράγονται μετά από τη θραύση, περιγράφονται με βάση τη συνάρτηση θραύσης. Έτσι η σχετική κατανομή του κάθε κλασματικού μεγέθους γίνεται αντιληπτή ως μια πλήρης περιγραφή του προϊόντος (Francois, 2008). Γι 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 (10):

$$b_{i,j} = \frac{\text{μάζα του υλικού μεγέθους } j \text{ που έσπασε και παρέμεινε στο μέγεθος } i}{\text{μάζα του υλικού μεγέθους } j \text{ που έσπασε}} \quad (10)$$

Ένας καταλληλότερος τύπος για να περιγραφεί η συνάρτηση θραύσης είναι η αθροιστική συνάρτηση θραύσης που δίνεται τη σχέση (11) (Austin et al. 1984):

$$B_{i,j} = \sum_{k=n}^i b_{k,j} \quad (11)$$

όπου  $n \geq i \geq j$  και  $b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j}$



Η αθροιστική συνάρτηση θραύσης μπορεί επίσης να δοθεί από την ακόλουθη εμπειρική εξίσωση (σχέση (12)), η οποία είναι το άθροισμα δύο ευθειών σε λογαριθμικό διάγραμμα (Austin L.G. and Luckie P.T., 1972):

$$B_{i,j} = \Phi_j \left( \frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\gamma + (1 - \Phi_j) \left( \frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\beta \quad (12)$$

όπου

$x_j$  : μέγεθος της τάξης  $j$

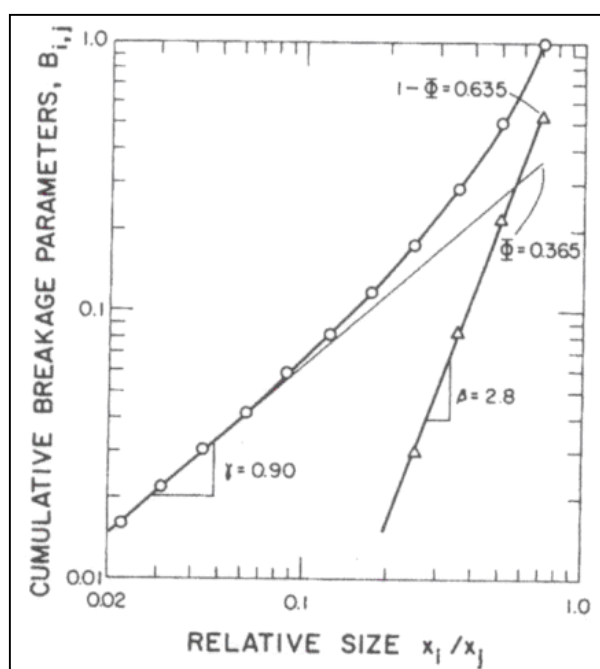
$\gamma$  : κλίση του κατώτερου τμήματος ευθείας της καμπύλης

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

$\Phi_j$  : είναι το σημείο του διαχωρισμού των 2 ευθειών

Το  $\beta$  μπορεί να πάρει τιμές από 2.5 έως 5 και το  $\gamma$  από 0.5 έως 1.5 (Francois, 2008). Το  $\gamma$  επίσης χαρακτηρίζει την σχετική μάζα των λεπτών τεμαχίων που παράγονται μετά τη λειοτρίβηση και για αυτό το λόγο σχετίζεται με την απόδοση της διαδικασίας της λειοτρίβησης. Γενικά, οι παράμετροι  $\gamma$ ,  $\beta$ , και  $\Phi_j$  εξαρτώνται από το υλικό. Έτσι οι παράμετροι της αθροιστικής συνάρτησης θραύσης οι οποίοι προσδιορίζονται από εργαστηριακά πειράματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε μεγαλύτερης κλίμακας μύλους (Petrakis et al, 2016).

Παρακάτω στην εικόνα (2.5) δίνεται το γράφημα της αθροιστικής συνάρτησης θραύσης σε σχέση με το μέγεθος των τεμαχίων.



Εικόνα 2.5: Αθροιστική συνάρτηση θραύσης σε σχέση με μέγεθος (Austin et al., 1984)

### 2.3.3 Μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού (Population balance model, PBM)

Το μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού έχει αναπτυχθεί για να περιγράψει τη λειτουργία των μηχανών λειοτρίβησης όπου η μείωση του μεγέθους επιτυγχάνεται μέσω επαναλαμβανόμενων ενεργειών θραύσης. Η μοντελοποίηση αυτής της διαδικασίας απαιτεί λεπτομερή γνώση της ίδιας της λειοτρίβησης. Έτσι θα μπορούν να συσχετίζονται οι λειτουργικές μεταβλητές, τα χαρακτηριστικά του μύλου, το μέγεθος τροφοδοσίας και το προϊόν του μύλου.

Το προϊόν της λειοτρίβησης αποτελείται από ένα ευρύ φάσμα μεγεθών τεμαχίων από τα οποία κάποια είναι χονδρότερα και απαιτούν περαιτέρω λειοτρίβηση. Η πιθανότητα να θραυτούν ξανά επηρεάζεται από το σχεδιασμό της μηχανής και το μέγεθος των τεμαχίων (Francois, 2008).

Σύμφωνα με το μοντέλο ο ρυθμός της παραγωγής του μεγέθους  $i$  ισούται με το άθροισμα του ρυθμού εμφάνισης του μεγέθους  $i$  που έχει παραχθεί από ένα μεγαλύτερο μέγεθος  $j$  που υπέστηκε θραύση, μείον το ρυθμό εξαφάνισης του μεγέθους  $i$  λόγω θραύσης (Austin and Bhatia, 1971) και δίνεται από τη σχέση (13):

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} S_j m_j(t) \quad (13)$$

## 2.4 Επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών στο μέγεθος των τεμαχίων

Από πειραματικές διαδικασίες έχει αποδειχθεί ότι οι μικρής διαμέτρου σφαίρες είναι περισσότερο αποδοτικές σε μικρότερα τεμάχια, ενώ οι μεγαλύτερης διαμέτρου σε χονδρότερα (Napier – Munn et al., 1996). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια σχέση μεταξύ της διαμέτρου  $d$  των μέσων λειοτρίβησης και του μέγιστου μεγέθους  $x_m$  των τεμαχίων. Η σχέση αυτή αποτυπώνεται παρακάτω (σχέση (14α)):

$$x_m = k \cdot d^A \quad (14a)$$

όπου  $k$ ,  $A$  σταθερές και  $d$  η διάμετρος σφαίρας.

Για κάθε μέγιστο μέγεθος  $x_m$  υπάρχει και ένας μέγιστος ειδικός ρυθμός θραύσης  $S_m$  όπου δίνεται από τη σχέση (14β):

$$S_m = k' \cdot d^B \quad (14\beta)$$

όπου  $k'$ ,  $B$  σταθερές και  $d$  η διάμετρος σφαίρας.

Υπάρχουν διαφορετικές απόψεις για τις τιμές που μπορεί να πάρει η παράμετρος  $k$ . Οι Austin et al (1976) θεωρούν ότι η  $k$  είναι σταθερά με τιμές από  $10^{-3}$  έως  $0.7 \cdot 10^{-3}$  καθώς πάμε από μαλακά σε σκληρά υλικά. Οι Napier – Munn et al (1996) δίνουν τη τιμή του  $k$  ίση με  $0.44 \cdot 10^{-3}$ .

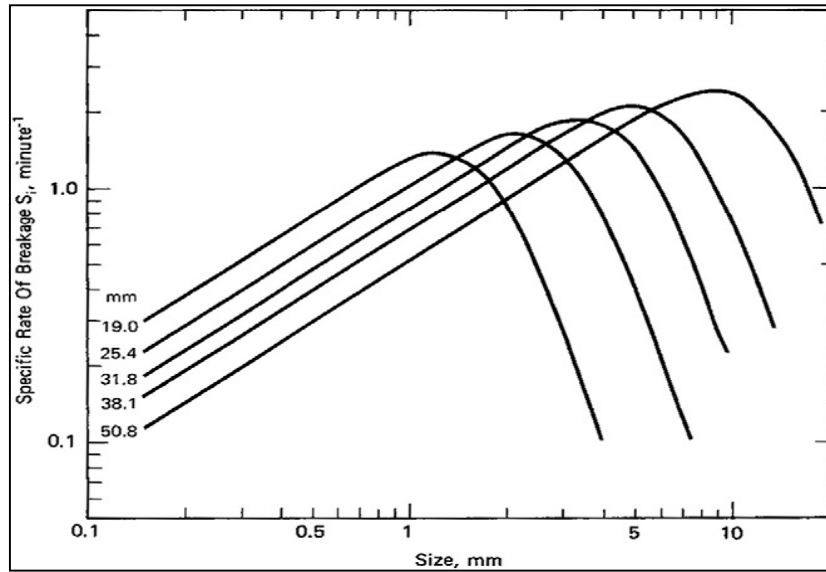
Η τιμή του εκθέτη  $A$  από διάφορες μελέτες σε διάφορα υλικά έχει βρεθεί τις περισσότερες φορές να ισούται με 2. Αυτό όμως δεν ισχύει για όλα τα υλικά. Για παράδειγμα οι Kotake et al. (2004) μετά από έρευνα κατέληξαν ότι για το χαλαζία η τιμή του  $A$  είναι 0.60, για τον ασβεστόλιθο 0.51, ενώ για τον τάλκη η τιμή είναι 0.48.

Οι Kotake et al. (2004) μετά από πειράματα σε διάφορα υλικά κατέληξαν ότι οι τιμές του  $k'$  και του  $B$ , διαφέρουν ανάλογα το υλικό. Για παράδειγμα έδειξαν ότι για τιμή του  $k'$  ίση με 0.015 για το χαλαζία, το  $B$  είναι ίσο με 1.21. Επίσης, έδειξαν ότι όταν χρησιμοποιήθηκαν σφαίρες διαμέτρου  $d \leq 20\text{mm}$  σε λειοτρίβηση γύψου και ασβεστόλιθου οι τιμές  $k'$  που δόθηκαν ήταν αντίστοιχα 0.027 και 0.0092 ενώ οι  $B$  ήταν 1.06 και 1.42.

## 2.5 Ειδικός ρυθμός θραύσης σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών

Η διάμετρος των σφαιρών εκτός από το μέγεθος των τεμαχίων που παράγονται μετά τη λειοτρίβηση επηρεάζει και τον ειδικό ρυθμό θραύσης. Ο Griffith θεωρεί ότι για ίδιο μέγεθος σφαιρών μέσα στο μύλο πολύ λεπτά τεμάχια είναι δύσκολο να λειοτριβηθούν (Austin et al., 1984). Αυτό υποδηλώνει ότι καθώς το μέγεθος των τεμαχίων αυξάνεται, αυξάνει και ο ειδικός ρυθμός θραύσης. Υπάρχει όμως ένα σημείο όπου το μέγεθος των τεμαχίων είναι πολύ μεγάλο ώστε να υποστεί θραύση. Σε αυτό το σημείο ο ειδικός ρυθμός θραύσης παρουσιάζει μέγιστο και από εκεί και έπειτα αρχίζει να μειώνεται και να τείνει στο 0 (Francois, 2008).

Στην εικόνα (2.6) μπορούμε να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του ειδικού ρυθμού θραύσης ( $S_i$ ) για συγκεκριμένη διάμετρο σφαιρών.



Εικόνα 2.6: Ειδικός ρυθμός θραύσης σε σχέση με το μέγεθος των τεμαχίων για διάφορες διαμέτρους σφαιρών (Austin et al., 1984)

Από το διάγραμμα αυτό (εικόνα (2.6)), παρατηρούμε, για παράδειγμα για τις σφαίρες των 19.0 mm, ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος των τεμαχίων αυξάνει και ο ειδικός ρυθμός θραύσης. Όμως στο μέγεθος των τεμαχίων της τάξης μεγέθους του 1mm ο ειδικός ρυθμός θραύσης παρουσιάζει μέγιστο ( $x_m$ ) και από εκεί και έπειτα για συνεχόμενη αύξηση του μεγέθους των τεμαχίων αρχίζει να μειώνεται.

Ο ειδικός ρυθμός θραύσης μπορεί να εκφραστεί από τη παρακάτω σχέση (15):

$$S_i = a_T \cdot x_i^\alpha \cdot Q_{(x_i)} \quad (15)$$

όπου  $x_i$ : ανώτερο μέγεθος της τάξης μεγέθους  $i$  σε mm,  $\alpha$ : παράμετρος που εξαρτάται από το υλικό και κυμαίνεται μεταξύ του 0.5 και του 1.5,  $a_T$ : παράμετρος που εξαρτάται από τις συνθήκες λειοτρίβησης και  $Q_{(x_i)}$ : συντελεστής διόρθωσης.

Το μέγεθος της θραύσης για μια συγκεκριμένη διάμετρο σφαίρας (Austin and Brame, 1983) δίνεται από το συντελεστή (σχέση (16)):

$$Q_{(x_i)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu}\right)^\Lambda} \quad (16)$$

όπου  $\mu$  παράμετρος που εξαρτάται τις συνθήκες λειοτρίβησης και  $\Lambda$  παράμετρος που εξαρτάται από το υλικό .

Η παραπάνω σχέση (16) ισχύει για υλικά που λειοτριβούνται με σταθερή ταχύτητα και την ίδια διάμετρο σφαιρών. Όταν επικρατούν αυτές οι συνθήκες λειοτρίβησης οι παράμετροι  $a_T$  και  $\mu$  είναι σταθερές και δεν εξαρτώνται από το μέγεθος των σωματιδίων (Austin et al., 1984)

Το  $\Lambda$  είναι θετικός αριθμός και δείχνει πόσο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός θραύσης καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τεμαχίων. Όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνει το  $\Lambda$  τόσο πιο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός θραύσης.

Για πολύ λεπτά τεμάχια ο συντελεστής  $Q_{(x_i)}$  τείνει στο 1 και έτσι η σχέση (15) γίνεται :

$$S_i = a_T \cdot x_i^\alpha \quad (17)$$

Γεωμετρικά η σχέση (17) απεικονίζεται σε λογαριθμικό χαρτί με μία ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση είναι το  $\alpha$ . Όταν το μέγεθος  $x_i=1\text{mm}$ , τότε  $S_i = a_T$ . Δηλαδή ο  $a_T$  είναι ο ρυθμός θραύσης του υλικού για μέγεθος 1mm.

Η εξίσωση που σχετίζει την τιμή του μέγιστου μεγέθους  $x_m$ , στο οποίο ο ειδικός ρυθμός θραύσης είναι μέγιστος για ένα συγκεκριμένο υλικό, με την τιμή του  $\mu$  είναι η παρακάτω (σχέση (18)):

$$\mu = x_m \cdot \left(\frac{\Lambda}{\alpha} - 1\right)^{\frac{1}{\Lambda}}, \Lambda > \alpha \quad (18)$$

Λόγω του ότι  $\Lambda$ ,  $\alpha$  είναι σταθερές, το μέγεθος  $x_m$  και η σταθερά  $\mu$  έχουν αναλογική σχέση που σημαίνει ότι το  $\mu$  εξαρτάται από τη διάμετρο των σφαιρών.

Οι Austin et al. (1976) προτείνουν δύο εξισώσεις που εκφράζουν την εξάρτηση του ειδικού ρυθμού θραύσης από τη διάμετρο μιας σφαίρας. Οι δύο εξισώσεις δίνονται παρακάτω (σχέσεις (19) – (20)):

$$a_T = a_0 \left(\frac{d_0}{d}\right)^\xi \quad (19)$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{d}{d_0}\right)^\eta \quad (20)$$

όπου

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

$\alpha, \mu$ : παράμετροι με σταθερή τιμή για τη διάμετρο σφαίρας  $d$

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

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**

### **3.1 Προέλευση δείγματος**

Το μάρμαρο που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική μελέτη προέρχεται από το χωριό Χορδάκι που βρίσκεται βόρεια του νομού Χανίων.

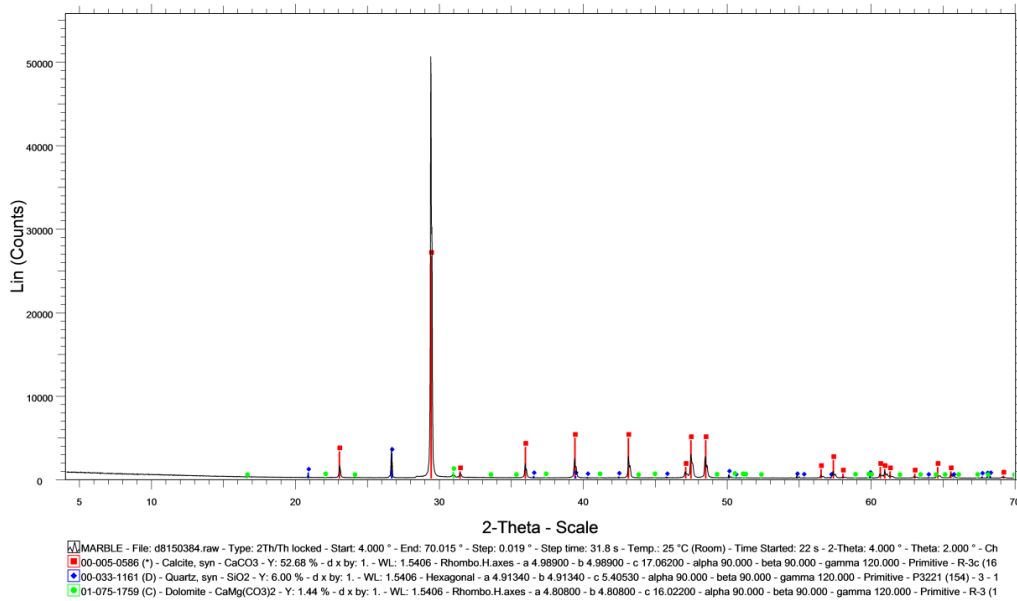
Η γεωλογία της Κρήτης χαρακτηρίζεται από αλληπάλληλα επωθημένα τεκτονικά καλύμματα των Ελληνίδων ζωνών, με γενική κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο. Γενικά η Κρήτη συγκροτείται από ένα αυτόχθονο (ή σχετικά αυτόχθονο) σύστημα που είναι η ενότητα των Πλακωδών Ασβεστολίθων (Plattenkalk), η οποία θεωρείται ότι ανήκει στην Ιόνιο ζώνη. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει κυρίως τυπικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους με κερατολιθικές ενστρώσεις και κονδύλους, αλλά επίσης και μαζώδεις ασβεστόλιθους, δολομίτες, ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή και φυλλιτικές παρεμβολές (Μουντράκης 2010).

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

Η ορυκτολογική ανάλυση του δείγματος πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση περιθλασίμετρου ακτινών – X (XRD). Ο τύπος του είναι D8 – Advance της εταιρείας Bruker AXS. Για την ανάλυση του δείγματος με κωδικό VP15, χρησιμοποιήθηκε λυχνία χαλκού με φίλτρο νικελίου. Οι συνθήκες μέτρησης ήταν για την τάση λυχνίας  $U=35\text{kV}$  και της έντασης του ρεύματος  $I=35\text{mA}$ .

Από την ποιοτική ανάλυση που προέκυψε (εικόνα (3.1)) βλέπουμε ότι το δείγμα (V15) του μαρμάρου περιέχει ασβεστίτη, χαλαζία και δολομίτη.

## MARBLE

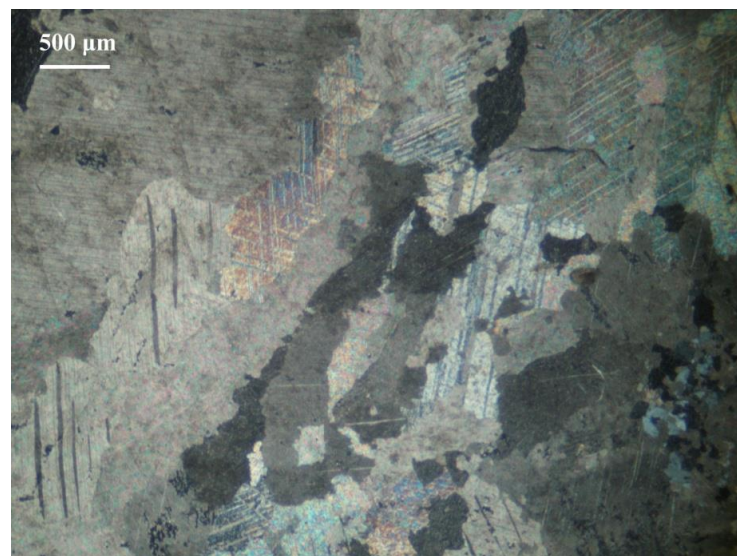


*Εικόνα 3.1: Αποτελέσματα XRD για το δείγμα μαρμάρου*

### 3.3 Παρατήρηση λεπτής και στιλπνής τομής μαρμάρου

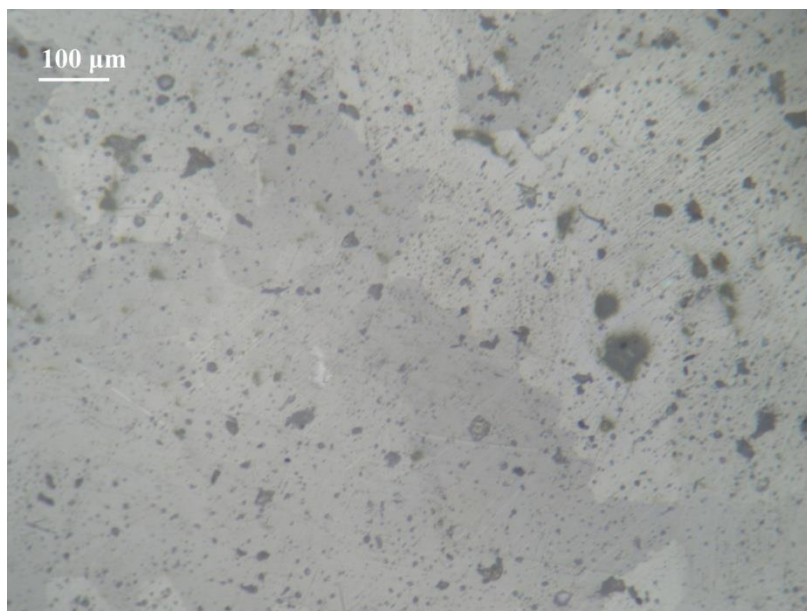
Οι παρατηρήσεις λεπτών και στιλπνών τομών του δείγματος (VP15) έγιναν με χρήση μικροσκοπίου διερχόμενου και ανακλώμενου φωτός.

Στην παρακάτω εικόνα (3.2) βλέπουμε τη λεπτή τομή, όπου φαίνονται οι πολυσυνθετικές διδυμίες του ασβεστίτη και στην άκρη διακρίνονται μικροί κόκκοι χαλαζία.



*Εικόνα 3.2: Λεπτή τομή μαρμάρου (δείγμα VP15), διερχόμενο φως, X Nicols*

Στην επόμενη εικόνα (3.3) παρατηρούμε τη στιλπνή τομή μαρμάρου. Βλέπουμε τη συμπαγή μάζα μαρμάρου όπου μέσα της διακρίνεται το πορώδες του υλικού. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε και τα όρια των κόκκων του ασβεστίτη.



*Εικόνα 3.3: Στιλπνή τομή μαρμάρου (δείγμα VP15), ανακλώμενο φως, // Nicols*

### 3.4 Χημική ανάλυση με XRF

Οι χημικές αναλύσεις του δείγματος (VP15) πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι αναλύσεις έγιναν με τη βοήθεια αυτοματοποιημένου φασματοσκοπίου ακτίνων –X φθορισμού τύπου Brucker S2. Οι συνθήκες μέτρησης ήταν  $U=15$  kV, Al φίλτρο (500  $\mu\text{m}$ ) για τα βαριά στοιχεία και  $U=20$  kV για τα ελαφρά στοιχεία,  $I=100$  mA και λυχνία Pd.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στον πίνακα (3.1) που ακολουθεί:

*Πίνακας 3.1: Χημική ανάλυση μαρμάρου ( δείγμα VP15)*

Δείγμα	$Fe_2O_3$	$MnO$	$CaO$	$K_2O$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$MgO$	$Na_2O$	$TiO_2$	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Μάρμαρο	0,0	0,0	53,6	0,0	1,2	1,4	0,0	0,3	0,0	43,5



### 3.4 Μέθοδος προσδιορισμού πυκνότητας και πορώδους

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας και του πορώδους του μαρμάρου έγινε με τη μέθοδο του Αρχιμήδη σύμφωνα με τη DIN EN 993-1 στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια για τον προσδιορισμό της πυκνότητας και του πορώδους, τα οποία κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης, σε κυλινδρικό σχήμα.

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε διάταξη αποτελούμενη από:

- Ζυγό ακριβείας 0.01g
- Αντλία και κενού
- Γυάλινο ξηραντήρα

Η πειραματική διαδικασία είχε ως εξής:

- Τα ξηρά δοκίμια ζυγίστηκαν στη ζυγαριά ακριβείας για προσδιορισμό της μάζας ( $m_1$ )
- Τοποθετήθηκαν στον ξηραντήρα όπου εφαρμόστηκε κενό για 20min
- Έπειτα ο ξηραντήρας πληρώθηκε με νερό έως ότου καλυφθεί όλο το ύψος των δοκιμίων και παρέμειναν εκεί για 24 ώρες
- Στη συνέχεια έγινε προσδιορισμός της μάζας των εμβαπτισμένων δοκιμίων με ζύγιση τους εντός δοχείου με νερό ( $m_2$ ) και κατόπιν απομάκρυνση των εμβαπτισμένων δοκιμίων από το νερό και ζύγιση τους στον αέρα ( $m_3$ )

Το φαινόμενο πορώδες ( $\pi\alpha$  (%)) υπολογίζεται με βάση τη σχέση (21):

$$\pi\alpha = \left[ \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \right] \cdot 100 \quad (21)$$

και η πυκνότητα ( $\rho_b$  (gr/cm<sup>3</sup>)) με τη σχέση (22):

$$\rho_b = \left[ \frac{m_1}{m_3 - m_2} \right] \cdot \rho_{liq} \quad (22)$$

όπου  $m_1$  η μάζα ξηρών δοκιμίων,  $m_2$  η μάζα των εμβαπτισμένων δοκιμίων σε ζυγαριά εντός δοχείου με νερό,  $m_3$  η εμβαπτισμένη μάζα σε ζυγαριά εκτός νερού,  $\rho_{liq}$  η πυκνότητα υγρού (νερό) σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (3.2) :

*Πίνακας 3.2: Πυκνότητα και πορώδες των δοκιμίων μαρμάρου*

Δοκίμια μαρμάρου	πα (%)	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )
1 <sup>ο</sup>	1,89	2,67
2 <sup>ο</sup>	0,12	2,69

### 3.5 Περιγραφή εξοπλισμού

#### 3.5.1 Εργαστηριακός Σπαστήρας με σιαγόνες

Για τη θραύση του υλικού (μάρμαρο) χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός σπαστήρας με σιαγόνες όπου υπάρχει στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο συγκεκριμένος σπαστήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου FRITSCH pulverisette 1 και διαθέτει πέντε θέσεις που αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα αποκένωσης (εικόνες (3.5) – (3.6)).



*Εικόνες 3.5 - 3.6 : Εργαστηριακός σπαστήρας με σιαγόνες*

#### 3.5.2 Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός σφαιρόμυλος (εικόνες (3.7) – (3.8)). Αποτελείται από κυλινδρικό κέλυφος με άνοιγμα

στο πάνω μέρος για να εισέρχεται η τροφοδοσία και στηρίζεται πάνω σε ράουλα ώστε να υπάρχει περιστροφική κίνηση.



*Εικόνες 3.7 – 3.8: Εργαστηριακός σφαιρόμυλος*

Τα χαρακτηριστικά του σφαιρόμυλου δίνονται παρακάτω (πίνακας (3.3)):

Ο όγκος του μύλου  $V$  (cm<sup>3</sup>) υπολογίστηκε από τη σχέση (23):

$$V = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \cdot L \quad (23)$$

Η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής  $N_c$  (rpm) υπολογίστηκε από τη σχέση (24):

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (24)$$

Η συχνότητα περιστροφής  $N$  (rpm) ισούται με το 70% $N_c$ .

*Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά εργαστηριακού σφαιρόμυλου*

Εσωτερική Διάμετρος μύλου $D$ (cm)	20.4 cm
Εσωτερικό Μήκος μύλου $L$ (cm)	16.6 cm
Όγκος μύλου $V$ (cm <sup>3</sup> )	5422.9 cm <sup>3</sup>
Συχνότητα περιστροφής $N$ (rpm)	66 rpm
Κρίσιμη συχνότητα περιστροφής $N_c$ (rpm)	93.79 rpm

### 3.5.3 Συσκευή κοσκίνησης

Για το διαχωρισμό των κοκκομετρικών κλασμάτων (τροφοδοσίας και προϊόντων) μετά τη λειοτριβήση και τη συλλογή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός δονητής κοσκίνων που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (3.9). Είναι τύπου RETSCH VE 1000 της εταιρείας RETSCH.



*Εικόνα 3.9: Εργαστηριακός δονητής κοσκίνων*

Αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Σύστημα χρονομέτρησης το οποίο επιτρέπει κοσκίνιση από 1 έως 99 λεπτά
- διακοπτόμενης ή συνεχούς λειτουργίας.
- Σύστημα δόνησης το οποίο παρέχει δυνατότητα ρύθμισης του εύρους δόνησης από 0 έως 3 mm.
- Σύνολο εξαρτημάτων τα οποία συγκρατούν τα κόσκινα το ένα κάτω από το άλλο.

## 3.6 Πειραματική διαδικασία

### 3.6.1 Θραύση του υλικού

Η θραύση του μαρμάρου για την παρασκευή των δειγμάτων έγινε στον εργαστηριακό σπαστήρα, ο οποίος έχει 5 ανοίγματα τα οποία καθορίζουν και το μέγεθος των τεμαχίων του υλικού. Για τα συγκεκριμένα πειράματα η θραύση άρχισε από το άνοιγμα 3. Έπειτα έγινε κοσκίνιση στο κόσκινο 3.35mm και το διερχόμενο υλικό κρατήθηκε για την επόμενη επεξεργασία ενώ το παραμένον θραύστηκε ξανά αλλά σε μικρότερο άνοιγμα. Η διαδικασία αυτή συνεχίστηκε μέχρι όλο το δείγμα να περνάει από το κόσκινο 3.35mm. Στη συνέχεια έγινε υγρή κοσκίνιση του δείγματος στο κόσκινο 150μm ώστε να απομακρυνθούν τα πολύ μικρά τεμάχια. Το +150μm τοποθετήθηκε στο φούρνο για απομάκρυνση της υγρασίας, στους 100°C για ένα 24ώρο, ενώ το διερχόμενο φυλάχτηκε.

Αφού έγινε η ξήρανση του υλικού, έγινε ξηρή κοσκίνιση για τη δημιουργία των 4 κοκκομετρικών κλασμάτων με λόγο  $\sqrt{2}$ .

Τα κλάσματα που δημιουργήθηκαν είναι τα:

-3.35 +2.36 mm

-1.7 +1.18 mm

-0.850 +0.600 mm

-0.425 +0.300 mm

### 3.6.2 Λειοτρίβηση του υλικού

Από τα 4 στενά κοκκομετρικά κλάσματα που δημιουργήθηκαν συγκεντρώθηκαν περίπου 5kg υλικού από το κάθε ένα.

Η λειοτρίβηση κάθε κοκκομετρικού κλάσματος έγινε στον εργαστηριακό σφαιρόμυλο για τέσσερις χρόνους 0.5, 1, 2 και 4 min και για 3 διαμέτρους σφαιρών 12.7mm, 25.4mm και 40mm.

Εφόσον τροφοδοτούνταν ο μύλος με υλικό και σφαίρες γινόταν η επιλογή του χρόνου λειοτρίβησης ξεκινώντας από τα 0.5 min. Όταν τελείωνε ο χρόνος γινόταν συλλογή του λειοτριβημένου υλικού με πολύ καλό καθαρισμό του μύλου και των σφαιρών. Η διαδικασία επαναλαμβανόταν με νέα τροφοδοσία κάθε φορά και για τους υπόλοιπους χρόνους μέχρι την τελική συλλογή των τεσσάρων δειγμάτων από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα.

Τέλος, το κάθε δείγμα ζυγίζοταν ώστε να γίνει ταυτοποίηση του βάρους του τελικού προϊόντος με το βάρος του υλικού της τροφοδοσίας

Οι παράμετροι της λειοτρίβησης για το συγκεκριμένο υλικό δίνονται παρακάτω (πίνακας (3.4)):

*Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά υλικού (μάρμαρο)*

Πυκνότητα υλικού (gr/cm <sup>3</sup> )	2.7
Συντελεστής πλήρωσης υλικού στον μύλο f <sub>c</sub> (%)	4
Συντελεστής πλήρωσης των κενών με υλικό U	0.5
Πορώδες φ (%)	40

Ο υπολογισμός της μάζας του υλικού της τροφοδοσίας στον σφαιρόμυλο έγινε από την παρακάτω σχέση (25):

$$M_{\text{υλικού}} = f_c \cdot \text{πυκνότητα υλικού} \cdot \text{όγκος μύλου} \cdot 0.6 \quad (25)$$

όπου προέκυψε  $M_{\text{υλικού}} = 351.5\text{g}$

Οι παράμετροι λειοτρίβησης για τις σφαίρες δίνονται παρακάτω (πίνακας (3.5)):

*Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά σφαιρών*

Διάμετρος σφαιρών d (mm)	40, 25.4, 12.7
Πυκνότητα σφαιρών (g/cm <sup>3</sup> )	7.84
Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών J (%)	20
Πορώδες φ (%)	40

Η μάζα των σφαιρών υπολογίστηκε από τη σχέση (3) λύνοντας ως προς m<sub>b</sub> όπου και προέκυψε η σχέση (26):

$$m_b = J \cdot \text{πυκνότητα σφαιρών} \cdot \text{όγκος μύλου} \cdot 0.6 \quad (26)$$

όπου προέκυψε  $m_b = 5108.5\text{g}$

Τα αποτελέσματα για τις τρεις διαμέτρους δίνονται στον πίνακα (3.6):

*Πίνακας 3.6: Μάζα και αριθμός σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε διάμετρο*

Διάμετρος d (mm)	40	25.4	12.7
Μάζα σφαιρών (g)	5000	5139	5108
Αριθμός σφαιρών	20	77	605

### **3.6.3 Κοσκίνιση του υλικού**

#### **3.6.3.1 Υγρή κοσκίνιση**

Τα τέσσερα δείγματα από κάθε κλάσμα κοσκινίζονταν εν υγρό στο κόσκινο των 38  $\mu\text{m}$ . Το +38  $\mu\text{m}$  έμπαινε στο ξηραντήριο για μια ημέρα ενώ το -38  $\mu\text{m}$  συλλεγόταν σε δοχεία όπου αφηνόταν για 24 ώρες ώστε το υλικό να κατακαθίσει στον πάτο του δοχείου και έπειτα να γίνει διήθηση για συλλογή του υπόλοιπου δείγματος.

Διήθηση: Τα δείγματα διηθούνταν με την εφαρμογή κενού σε διηθητικά φίλτρα και έπειτα γινόταν ξήρανση για απομάκρυνση της υγρασίας. Το βάρος τους προστίθονταν στο βάρος των -38  $\mu\text{m}$  της ξηρής κοσκίνησης.

#### **3.6.3.2 Ξηρή κοσκίνιση**

Για την υλοποίηση της ξηρής κοσκίνησης χρησιμοποιήθηκαν 2 σειρές κοσκίνων όπου η πρώτη περιελάμβανε τα κόσκινα: 3.35mm, 2.36mm, 1.7mm, 1.18mm, 0.850mm, 0.600mm, 0.425mm, 0.300mm και η δεύτερη τα κόσκινα: 0.212mm, 0.150mm, 0.106mm, 0.075mm, 0.050mm, 0.038mm κλπ.

Κάθε δείγμα ξεχωριστά τροφοδοτούσε τα κόσκινα. Αρχικά γινόταν κοσκίνιση στη πρώτη σειρά κοσκίνων. Η κοσκίνιση διαρκούσε 15min με συχνότητα δόνησης 0.8. Έπειτα γινόταν καθαρισμός των κοσκίνων και μέτρηση του βάρους του παραμένου υλικού σε ζυγαριά ακριβείας. Το υλικό που περνούσε από το τελευταίο κόσκινο της πρώτης σειράς (0.300mm) τροφοδοτούνταν στη δεύτερη σειρά κοσκίνων, όπου επαναλαμβανόταν η ίδια διαδικασία.

Το τελικό βάρος του κλάσματος -0.038mm είναι το άθροισμα του βάρους του -0.038mm της ξηρής κοσκίνησης συν το άθροισμα του βάρους της υγρής κοσκίνησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.1 Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους προϊόντος

Για τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής κατανομής των τεσσάρων υλικών τροφοδοσίας,  $(-3.35 + 2.36 \text{ mm})$ ,  $(-1.7 + 1.18\text{mm})$ ,  $(-0.850 + 0.600\text{mm})$ ,  $(-0.425 + 0.300\text{mm})$  , χρησιμοποιήθηκε το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) σε συνάρτηση με το μέγεθος του προϊόντος.

Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα σε πίνακες και διαγράμματα για το κάθε κοκκομετρικό κλάσμα ξεχωριστά.

- Κλάσμα μεγέθους  $-3.35 + 2.36\text{mm}$

Πίνακας 4.1: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος  $-3.35 + 2.36\text{mm}$  για  $d=40\text{mm}$

40 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
3350	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2360	43,61	19,50	3,32	0,03	56,39	80,50	96,68	99,97
1700	21,55	20,30	8,11	0,26	34,84	60,20	88,57	99,71
1180	12,80	18,15	14,92	1,72	22,03	42,04	73,65	97,99
850	5,26	9,12	12,30	4,54	16,78	32,92	61,35	93,45
600	3,63	6,88	11,72	9,57	13,15	26,04	49,63	83,87
425	2,29	4,59	8,40	10,89	10,86	21,45	41,23	72,98
300	1,86	3,64	6,87	10,61	9,00	17,81	34,36	62,37
212	1,37	2,75	5,04	8,46	7,63	15,06	29,33	53,91
150	1,43	2,87	5,39	9,62	6,20	12,19	23,94	44,29
106	1,20	2,41	4,68	7,88	5,00	9,78	19,26	36,41
75	1,11	2,35	4,33	7,77	3,89	7,43	14,92	28,64
53	1,00	1,92	3,40	6,49	2,89	5,51	11,53	22,15
38	0,74	1,41	2,93	4,87	2,14	4,10	8,60	17,28
-38	2,14	4,10	8,60	17,28				
<b>Σύνολο</b>	100,00	100,00	100,00	100,00				



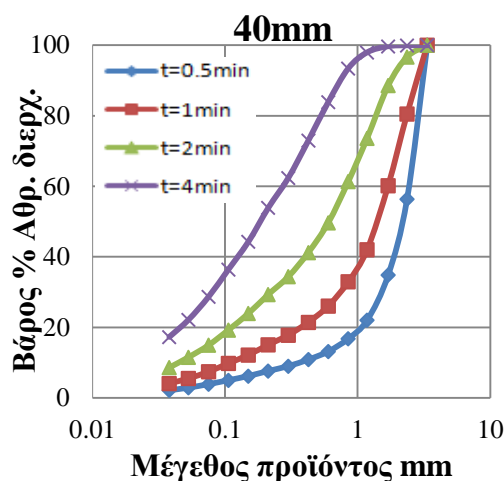
Πίνακας 4.2: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -3.35 +2.36mm για d=25.4mm

25.4 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
3350	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2360	47,13	23,78	4,93	0,09	52,87	76,22	95,07	99,91
1700	20,41	19,77	7,97	0,09	32,47	56,45	87,10	99,82
1180	12,00	16,25	12,30	0,38	20,46	40,20	74,80	99,44
850	4,72	7,88	9,81	2,66	15,75	32,32	64,99	96,78
600	3,32	6,22	10,32	6,14	12,43	26,10	54,67	90,64
425	2,03	4,15	8,03	8,51	10,40	21,95	46,65	82,12
300	1,60	3,44	7,05	10,09	8,80	18,51	39,59	72,03
212	1,26	2,64	5,49	8,21	7,55	15,87	34,10	63,82
150	1,34	2,92	6,07	10,56	6,20	12,95	28,03	53,26
106	1,11	2,44	5,27	9,15	5,09	10,52	22,77	44,12
75	1,11	2,35	4,92	9,15	3,97	8,17	17,85	34,97
53	1,00	1,95	4,12	7,27	2,97	6,22	13,72	27,69
38	0,80	1,58	3,55	6,80	2,17	4,64	10,18	20,89
-38	2,17	4,64	10,18	20,89				
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00				

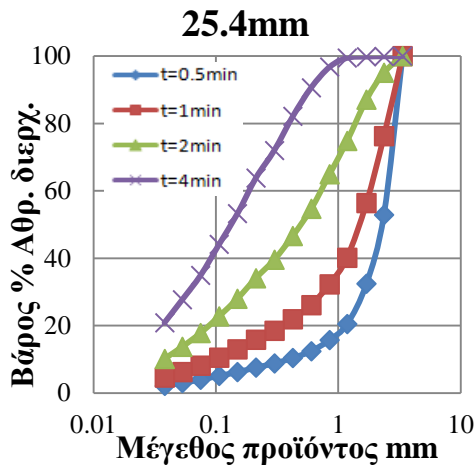
Πίνακας 4.3: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -3.35 +2.36mm για d=12.7mm

12.7mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
3350	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2360	69,06	54,49	35,88	15,01	30,94	45,51	64,12	84,99
1700	16,28	19,61	20,00	11,85	14,65	25,90	44,12	73,14
1180	5,56	6,26	10,13	9,98	9,09	19,64	33,99	63,16
850	0,35	3,35	4,55	5,69	8,74	16,29	29,44	57,46
600	1,51	2,33	3,58	5,23	7,22	13,96	25,87	52,23
425	0,99	1,60	2,58	4,29	6,23	12,35	23,29	47,94
300	0,79	1,49	2,49	4,34	5,45	10,87	20,80	43,60
212	0,64	1,17	2,15	3,69	4,81	9,70	18,66	39,91
150	0,67	1,31	2,52	5,07	4,14	8,39	16,14	34,84
106	0,64	1,31	2,35	4,73	3,50	7,08	13,79	30,11
75	0,64	1,37	2,63	5,07	2,85	5,71	11,16	25,04
53	0,61	1,22	2,35	4,73	2,24	4,49	8,81	20,32
38	0,55	1,14	1,80	4,61	1,69	3,35	7,01	15,71
-38	1,69	3,35	7,01	15,71				
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00				

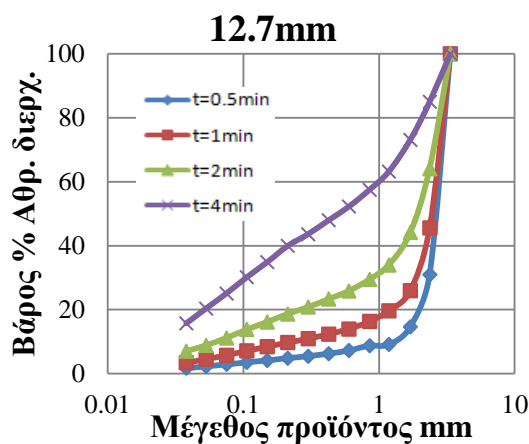
Από του πίνακες (4.1) – (4.3) προκύπτουν τα διαγράμματα (4.1) – (4.3) του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος, του μεγέθους τροφοδοσίας  $-3.35 + 2.36 \text{ mm}$ , ανά διάμετρο σφαιρών και για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 4.1



Διάγραμμα 4.2



Διάγραμμα 4.3

*Διαγράμματα 4.1-4.3: Αθροιστικώς διερχόμενα βάρη (%) σε σχέση με τα μεγέθη προϊόντων (mm), του κλάσματος  $-3.35 + 2.36 \text{ mm}$  ανά διάμετρο σφαιρών*

Από τα διαγράμματα (4.1) – (4.3) παρατηρούμε ότι για το χονδρότερο κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας ( $-3.35 + 2.36 \text{ mm}$ ) καθώς αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος προϊόντος μετακινούνται προς τα αριστερά, δηλαδή προς τα λεπτότερα

μεγέθη. Η ελάττωση του μεγέθους είναι εντονότερη όταν γίνεται χρήση σφαιρών διαμέτρου 25.4 mm και 40mm, ενώ είναι πολύ μικρότερη με χρήση σφαιρών 12.7mm.

- Κλάσμα μεγέθους -1.7 +1.18mm

*Πίνακας 4.4: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -1.7 +1.18mm για d=40mm*

40 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
1700	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1180	59,86	36,79	12,23	0,96	40,14	63,21	87,77	99,04
850	13,18	16,87	14,07	3,42	26,96	46,34	73,70	95,63
600	10,36	12,53	15,45	9,13	16,60	33,80	58,24	86,50
425	4,44	7,50	11,19	11,38	12,15	26,30	47,05	75,12
300	1,28	5,58	9,12	11,67	10,87	20,72	37,93	63,44
212	2,08	3,79	6,52	8,95	8,80	16,93	31,41	54,49
150	1,91	3,74	6,63	10,00	6,89	13,19	24,78	44,50
106	1,45	2,85	5,03	8,02	5,44	10,35	19,75	36,48
75	1,34	2,62	4,57	7,79	4,10	7,73	15,17	28,69
53	1,02	2,01	3,77	6,74	3,07	5,72	11,40	21,95
38	0,88	1,58	3,32	5,35	2,19	4,14	8,08	16,60
-38	2,19	4,14	8,08	16,60				
<b>Σύνολο</b>	100,00	100,00	100,00	100,00				

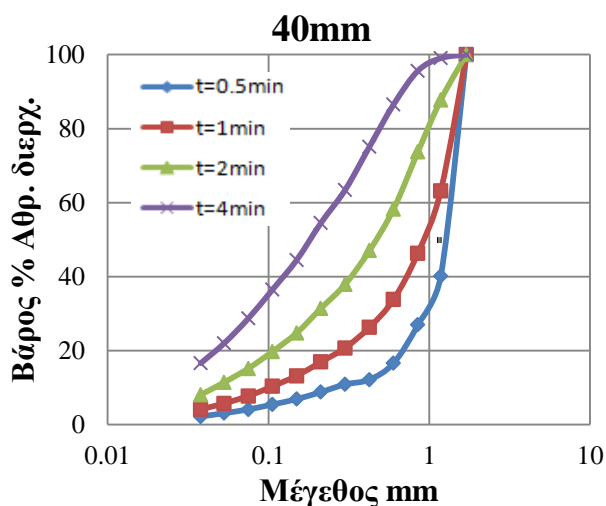
Πίνακας 4.5: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -1.7 +1.18mm για d=25.4mm

25.4 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
1700	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1180	53,18	27,22	6,30	0,20	46,82	72,78	93,70	99,80
850	15,81	18,00	10,14	0,93	31,01	54,78	83,56	98,86
600	9,71	14,61	14,50	4,20	21,31	40,18	69,06	94,66
425	5,07	9,07	12,37	8,22	16,24	31,10	56,69	86,44
300	3,44	6,70	10,52	10,87	12,80	24,41	46,17	75,57
212	2,29	4,39	7,27	8,51	10,51	20,02	38,90	67,06
150	2,26	4,62	7,96	11,26	8,25	15,39	30,94	55,80
106	1,78	3,35	6,23	9,66	6,47	12,04	24,71	46,14
75	1,58	3,01	5,65	9,20	4,90	9,03	19,06	36,95
53	1,29	2,31	4,38	7,59	3,61	6,72	14,67	29,36
38	0,92	1,16	3,81	7,13	2,69	5,56	10,86	22,23
-38	2,69	5,56	10,86	22,23				
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00				

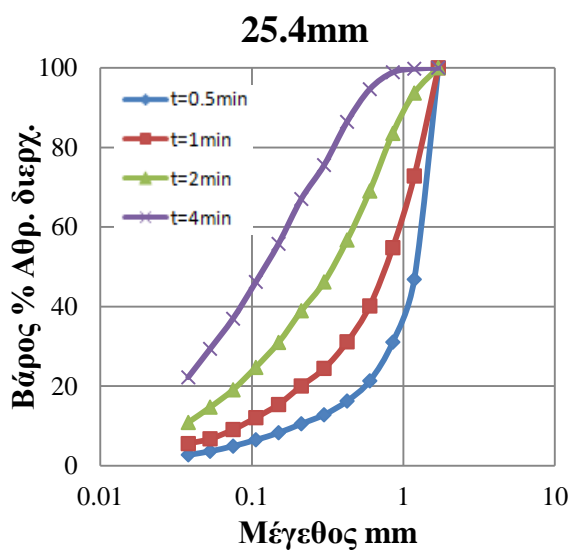
Πίνακας 4.6: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -1.7 +1.18mm για d=12.7mm

12.7 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
1700	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1180	61,11	40,33	19,05	3,29	38,89	59,67	80,95	96,71
850	15,28	18,57	15,76	6,38	23,62	41,10	65,19	90,34
600	7,54	11,41	13,59	9,22	16,08	29,69	51,60	81,12
425	3,83	6,45	9,34	9,58	12,25	23,24	42,27	71,54
300	2,60	4,70	7,60	9,86	9,65	18,54	34,66	61,68
212	1,71	3,18	5,34	8,05	7,94	15,36	29,32	53,63
150	1,71	3,21	5,69	9,77	6,23	12,15	23,63	43,86
106	1,26	2,52	4,76	8,48	4,97	9,63	18,87	35,38
75	1,14	2,29	4,07	7,62	3,83	7,34	14,80	27,76
53	0,91	1,72	3,37	6,12	2,91	5,62	11,43	21,65
38	0,77	1,43	2,79	5,26	2,14	4,18	8,64	16,39
-38	2,14	4,18	8,64	16,39				
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00				

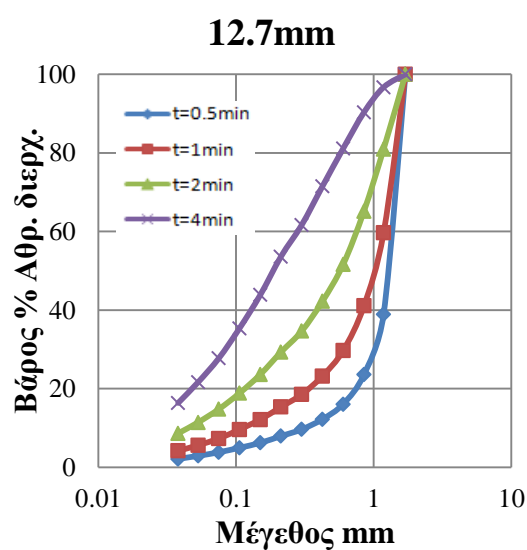
Από του πίνακες (4.4) – (4.6) προκύπτουν τα διαγράμματα (4.4) – (4.6) του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος του αμέσως λεπτότερου μεγέθους τροφοδοσίας  $-1.7 +1.18$  mm, ανά διάμετρο σφαιρών και για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.



Διάγραμμα 4.4



Διάγραμμα 4.5



Διάγραμμα 4.6

*Διαγράμματα 4.4 – 4.6: Αθροιστικώς διερχόμενα βάρη (%) σε σχέση με τα μεγέθη προϊόντων (mm), του κλάσματος  $-1.7 +1.18$  mm ανά διάμετρο σφαιρών*

Από τα διαγράμματα (4.4) – (4.6) για το αμέσως λεπτότερο κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας  $-1.7 +1.18$ mm, παρατηρείται ότι με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης, οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το

μέγεθος προϊόντος για διάμετρο σφαίρας 12.7mm, μετατοπίζονται σε ακόμα λεπτότερα μεγέθη σε σχέση με το κλάσμα τροφοδοσίας  $-3.35 +2.36\text{mm}$ .

- Κλάσμα μεγέθους  $-0.850 +0.600\text{mm}$

Πίνακας 4.7: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος  $-0.850 +0.600\text{mm}$  για  $d=40\text{mm}$

40 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0,5 min	1min	2min	4min	0,5min	1min	2min	4min
850	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
600	70,07	52,28	29,31	8,16	29,93	47,72	70,69	91,84
425	11,18	15,17	17,62	13,08	18,75	32,55	53,07	78,76
300	5,43	8,66	12,10	13,23	13,32	23,89	40,98	65,53
212	3,14	5,22	7,83	10,01	10,18	18,67	33,15	55,53
150	2,72	4,65	7,60	10,70	7,46	14,02	25,55	44,83
106	1,80	3,21	5,76	8,63	5,66	10,81	19,79	36,21
75	1,57	2,81	4,61	7,94	4,09	8,00	15,19	28,27
53	1,17	2,06	3,80	6,44	2,92	5,94	11,39	21,83
38	0,83	1,89	3,22	5,52	2,09	4,04	8,16	16,31
-38	2,09	4,04	8,16	16,31				
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00				

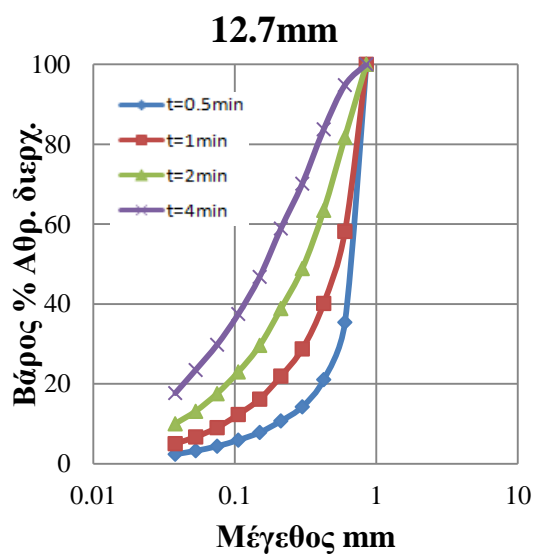
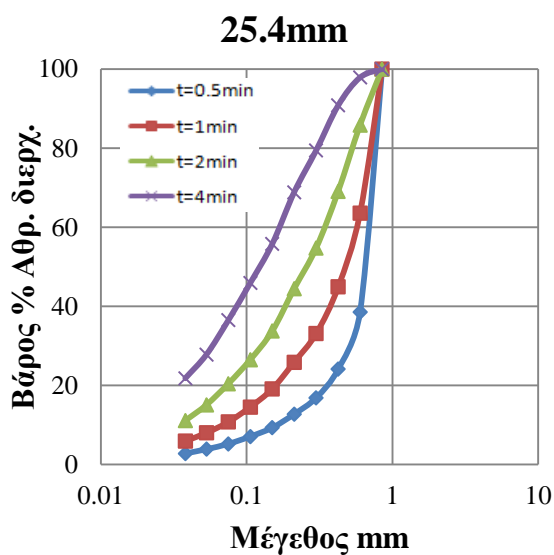
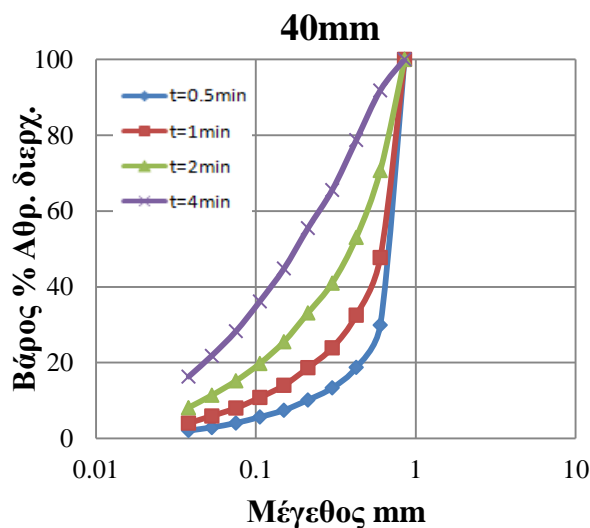
Πίνακας 4.8: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος  $-0.850 +0.600\text{mm}$  για  $d=25.4\text{mm}$

25.4 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0,5 min	1min	2min	4min	0,5min	1min	2min	4min
850	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
600	61,48	36,47	14,17	2,14	38,52	63,53	85,83	97,86
425	14,38	18,62	16,74	7,06	24,13	44,91	69,09	90,80
300	7,26	11,81	14,35	11,39	16,87	33,10	54,74	79,41
212	4,12	7,22	10,26	10,55	12,75	25,89	44,48	68,86
150	3,43	6,76	10,73	13,08	9,32	19,12	33,75	55,78
106	2,23	4,58	7,23	9,86	7,09	14,54	26,52	45,92
75	1,86	3,78	6,06	9,41	5,23	10,76	20,45	36,51
53	1,34	2,75	5,36	8,72	3,89	8,01	15,09	27,79
38	1,09	2,06	3,96	5,96	2,80	5,95	11,12	21,83
-38	2,80	5,95	11,12	21,83				
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00				

Πίνακας 4.9: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος -0.850 +0.600mm για d=12.7mm

12.7 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
850	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
600	64,62	41,85	18,23	5,20	35,38	58,15	81,77	94,80
425	14,32	17,97	18,29	11,07	21,06	40,18	63,48	83,73
300	6,77	11,43	14,63	13,61	14,29	28,76	48,84	70,11
212	3,57	6,80	9,96	11,18	10,72	21,96	38,89	58,93
150	2,86	5,74	9,26	12,11	7,86	16,22	29,62	46,81
106	1,91	3,87	6,60	9,32	5,94	12,35	23,02	37,49
75	1,54	3,28	5,44	7,69	4,40	9,07	17,58	29,81
53	1,14	2,34	4,40	6,29	3,26	6,72	13,18	23,52
38	0,86	1,64	3,13	5,82	2,40	5,09	10,06	17,69
-38	2,40	5,09	10,06	17,69				
<b>Σύνολο</b>	100,00	100,00	100,00	100,00				

Από του πίνακες (4.7) – (4.9) προκύπτουν τα διαγράμματα (4.7) – (4.9) του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος του λεπτού μεγέθους τροφοδοσίας -0.850 +0.600 mm, ανά διάμετρο σφαιρών και για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.



Διαγράμματα 4.7 – 4.9: Αθροιστικώς διερχόμενα βάρη (%) σε σχέση με τα μεγέθη προϊόντων (mm), του κλάσματος  $-0.850 +0.600$  mm ανά διάμετρο σφαιρών

Από τα διαγράμματα (4.7) – (4.9) για το λεπτό κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας  $-0.850 +0.600$  mm παρατηρείται, ότι με αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης, οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος, για διάμετρο σφαιρών 25.4 mm και 12.7mm μετατοπίζονται σε ακόμη πιο λεπτά κλάσματα.



- Κλάσμα μεγέθους  $-0.425 +0.300\text{mm}$

Πίνακας 4.10: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος  $-0.425 +0.300\text{mm}$  για  $d=40\text{mm}$

40 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
425	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
300	77,91	64,25	45,64	23,75	22,09	35,75	54,36	76,25
212	8,32	11,70	15,42	15,76	13,77	24,05	38,94	60,48
150	4,76	7,46	10,90	13,68	9,01	16,60	28,05	46,81
106	2,70	4,47	6,95	9,27	6,31	12,12	21,09	37,53
75	1,78	3,44	5,68	8,58	4,53	8,68	15,41	28,96
53	1,32	2,52	4,17	6,95	3,21	6,16	11,24	22,00
38	0,98	1,84	3,01	5,33	2,24	4,32	8,23	16,67
-38	2,24	4,32	8,23	16,67				
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00				

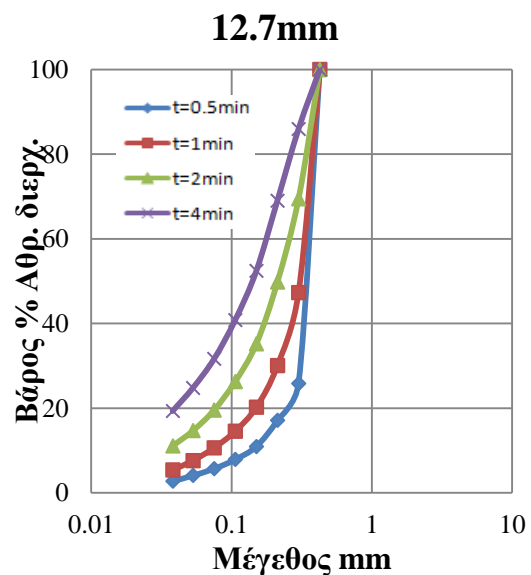
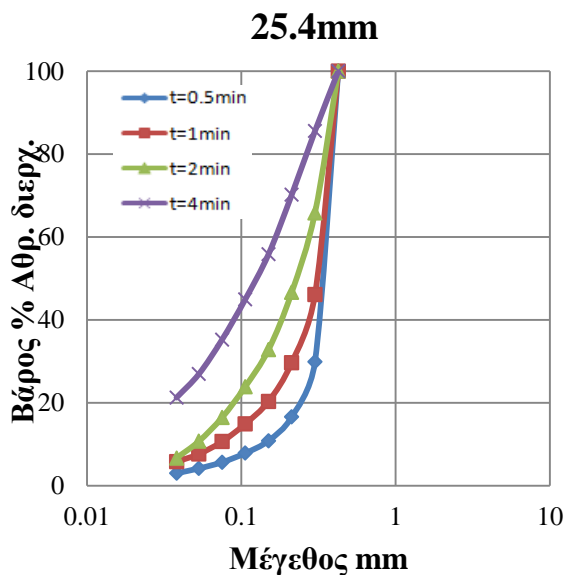
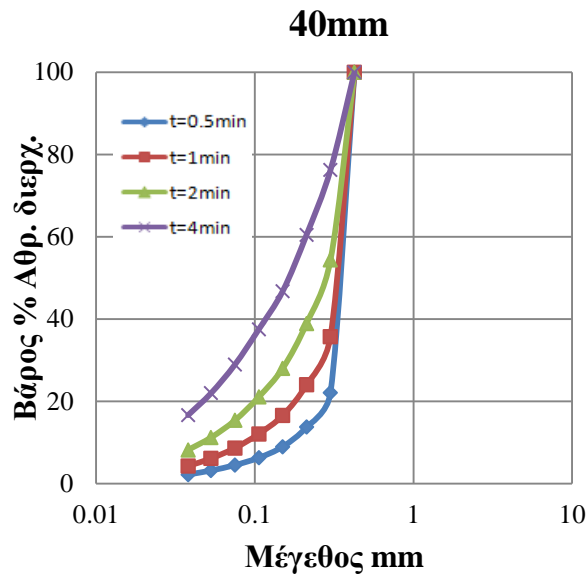
Πίνακας 4.11: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) του κλάσματος  $-0.425 +0.300\text{mm}$  για  $d=25.4\text{mm}$

25.4 mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
425	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
300	70,15	53,92	34,20	14,45	29,85	46,08	65,80	85,55
212	13,25	16,39	19,18	15,38	16,60	29,69	46,62	70,17
150	5,76	9,35	13,80	14,34	10,84	20,34	32,81	55,83
106	2,99	5,43	8,92	10,87	7,85	14,91	23,90	44,96
75	2,19	4,27	7,45	9,71	5,66	10,64	16,44	35,24
53	1,50	3,00	5,74	8,33	4,16	7,64	10,70	26,92
38	1,15	1,85	4,03	5,67	3,01	5,79	6,67	21,25
-38	3,01	5,79	6,67	21,25				
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00				

Πίνακας 4.12: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) για το κλάσμα -0.425 +0.300mm για d=12.7mm

12.7mm								
Μέγεθος μm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	0.5 min	1min	2min	4min	0.5min	1min	2min	4min
425	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
300	74,20	52,74	30,57	14,05	25,80	47,26	69,43	85,95
212	8,70	17,23	19,69	16,95	17,11	30,03	49,74	69,00
150	6,18	9,83	14,59	16,60	10,93	20,20	35,15	52,40
106	3,09	5,67	8,92	11,61	7,84	14,53	26,23	40,79
75	2,17	3,93	6,72	9,17	5,66	10,60	19,52	31,61
53	1,60	3,01	4,86	6,85	4,06	7,59	14,65	24,76
38	1,37	2,20	3,59	5,46	2,69	5,40	11,06	19,31
-38	2,69	5,40	11,06	19,31				
<b>Σύνολο</b>	100,00	100,00	100,00	100,00				

Από του πίνακες (4.10) – (4.12) προκύπτουν τα διαγράμματα (4.10) – (4.12) του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος του πιο λεπτού μεγέθους τροφοδοσίας -0.425 +0.300 mm, ανά διάμετρο σφαιρών και για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.



*Διαγράμματα 4.10 – 4.12: Αθροιστικώς διερχόμενα βάρη (%) σε σχέση με τα μεγέθη προϊόντων (mm), του κλάσματος  $-0.425 + 0.300$  mm ανά διάμετρο σφαιρών*

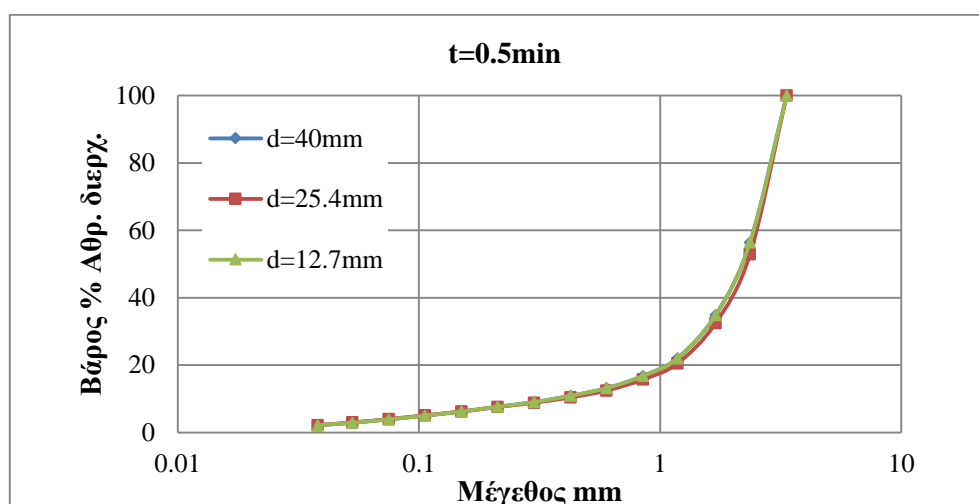
Από τα διαγράμματα (4.10) – (4.12) παρατηρείται για το πιο λεπτό κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας  $-0.425 + 0.300$ mm, ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης, με τη χρήση σφαιρών διαμέτρου 12.7mm το προϊόν αποτελείται από πολύ λεπτά κλάσματα.

Γενικά, από τα διαγράμματα (4.1) – (4.12) παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη.

## 4.2 Επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών στο μέγεθος του προϊόντος

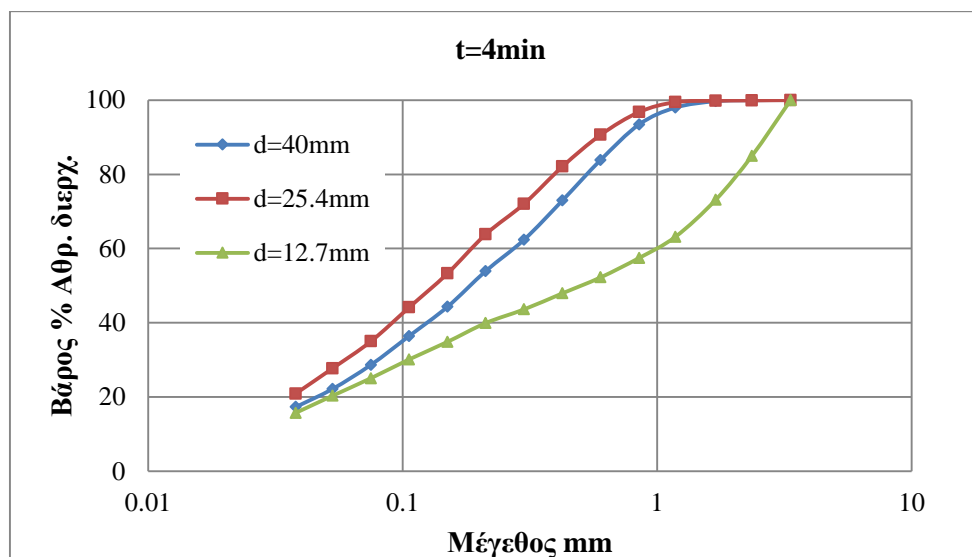
Από τα διαγράμματα (4.1) – (4.12) που παρουσιάστηκαν παρατηρήσαμε την ελάττωση του μεγέθους του προϊόντος ανά διάμετρο σφαιρών. Για την καλύτερη μελέτη της ελάττωσης του μεγέθους του προϊόντος θα παρουσιαστούν διαγράμματα του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος για το μικρότερο χρόνο λειοτρίβησης (0.5min) και για το μεγαλύτερο χρόνο λειοτρίβησης (4min). Η παράμετρος που μεταβάλλεται είναι η διάμετρος των σφαιρών.

- Υλικό τροφοδοσίας -3.35 +2.36mm



Διάγραμμα 4.13: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους για το κλάσμα -3.35 +2.36mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο  $t=0.5\text{min}$

Στο διάγραμμα (4.13) παρατηρούμε ότι στο χονδρότερο κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας -3.35 +2.36 mm, στο χρόνο 0.5 min οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος προϊόντος και για τις τρεις διαμέτρους σφαιρών ταυτίζονται. Αυτό σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος χρόνος δεν είναι αρκετός ώστε να υπάρξει διαφοροποίηση των καμπυλών για τις τρεις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών.

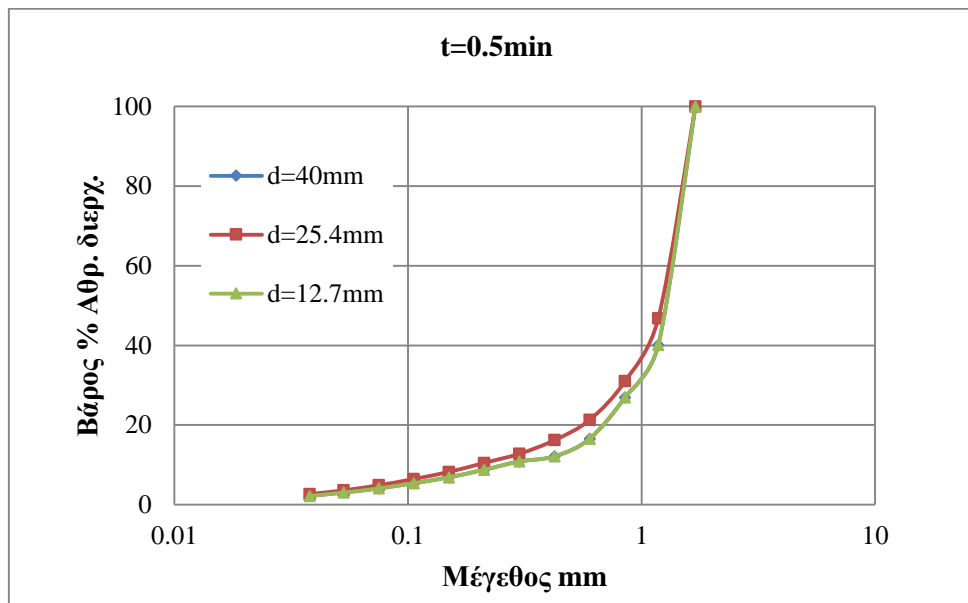


Διάγραμμα 4.14: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους για το κλάσμα -3.35 +2.36mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο  $t=4\text{min}$

Στο διάγραμμα (4.14) για το ίδιο κλάσμα τροφοδοσίας (-3.35 +2.36 mm), παρατηρούμε ότι για χρόνο λειοτρίβησης 4min η καμπύλη του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος, για τις σφαίρες διαμέτρου 25.4mm έχει ξεπεράσει την καμπύλη για τις σφαίρες διαμέτρου 40mm, με μικρή διαφορά. Και οι δύο βρίσκονται στα πιο λεπτά κλάσματα. Αντίθετα, η καμπύλη για τις σφαίρες 12.7mm βρίσκεται στα χονδρότερα κλάσματα.

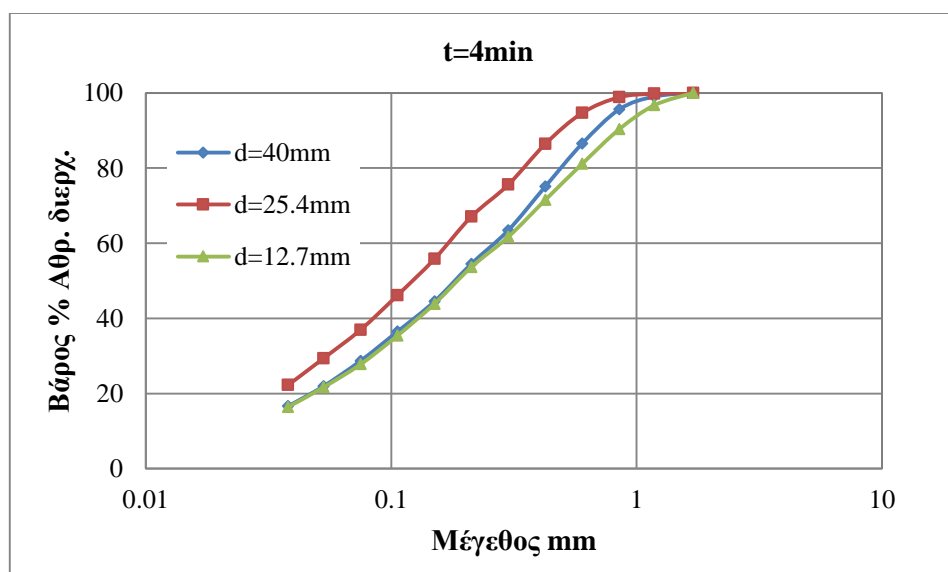
Από τα διαγράμματα (4.13) – (4.14) παρατηρούμε ότι ο χρόνος λειοτρίβησης επηρεάζει την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων. Συγκεκριμένα στο χονδρότερο κοκκομετρικό κλάσμα -3.35 +2.36mm για χρόνο 0.5min και οι τρεις διάμετροι σφαιρών θα δώσουν το ίδιο μέγεθος προϊόντος. Με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης όμως βλέπουμε, ότι οι καμπύλες αρχίζουν να διαφοροποιούνται. Συγκεκριμένα, στον χρόνο 4 min μεγαλύτερη ελάττωση του μεγέθους αποφέρουν οι σφαίρες διαμέτρου των 25.4 mm.

- Υλικό τροφοδοσίας -1.7 +1.18mm



Διάγραμμα 4.15: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους για το κλάσμα -1.7 +1.18mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο  $t=0.5\text{min}$

Στο διάγραμμα (4.15) παρατηρούμε, ότι στο αμέσως λεπτότερο κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας -1.7 +1.18 mm, στο χρόνο 0.5 min η καμπύλη του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος προϊόντος για τις σφαίρες των 25.4mm ταυτίζεται με εκείνη των 40mm. Ακόμα και σε τόσο μικρό χρόνο λειοτριβήσης η καμπύλη που αντιστοιχεί στη διάμετρο σφαιρών 12.7mm διαφοροποιείται σε σχέση με τις μεγαλύτερου διαμέτρου σφαίρες.

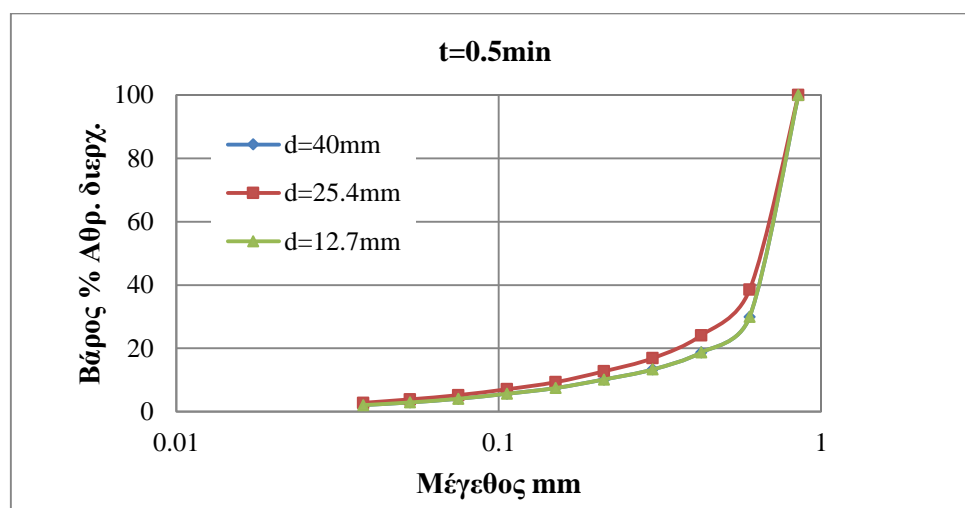


Διάγραμμα 4.16: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους για το κλάσμα -1.7 +1.18mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο  $t=4\text{min}$

Στο διάγραμμα (4.16) παρατηρούμε, ότι στο αμέσως λεπτότερο κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας  $-1.7 + 1.18 \text{ mm}$ , στον χρόνο  $4 \text{ min}$  η καμπύλη του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος προϊόντος για τις σφαίρες των  $25.4 \text{ mm}$  έχει μετακινηθεί στα λεπτότερα κλάσματα, ενώ οι καμπύλες για τις σφαίρες  $12.7 \text{ mm}$  και  $40 \text{ mm}$  τείνουν να ταυτιστούν.

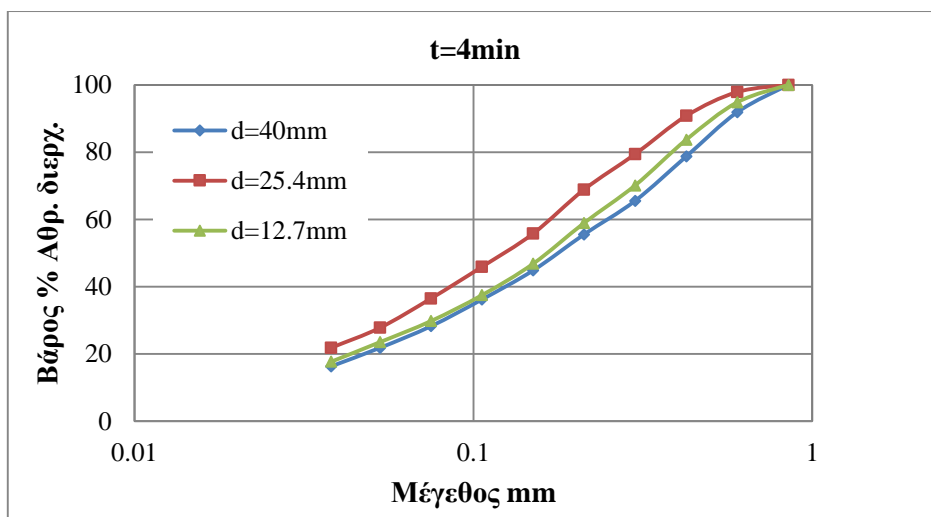
Από τα διαγράμματα (4.15) – (4.16) παρατηρούμε ότι για το κλάσμα  $-1.7 + 1.18 \text{ mm}$  ποιο αποδοτικές είναι οι σφαίρες των  $25.4 \text{ mm}$  σε χρόνο λειοτρίβησης  $4 \text{ min}$ .

- **Υλικό τροφοδοσίας  $-0.850 + 0.600 \text{ mm}$**



*Διάγραμμα 4.17: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους για το κλάσμα  $-0.850 + 0.600 \text{ mm}$  για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο  $t=0.5 \text{ min}$*

Από το διάγραμμα (4.17) για το λεπτό κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας  $-0.850 + 0.600 \text{ mm}$  παρατηρούμε ότι, για χρόνο λειοτρίβησης  $0.5 \text{ min}$  οι καμπύλες για τις σφαίρες διαμέτρου  $25.4 \text{ mm}$  και  $40 \text{ mm}$  ταυτίζονται, όπως και στο κλάσμα τροφοδοσίας  $-1.7 + 1.18 \text{ mm}$ .

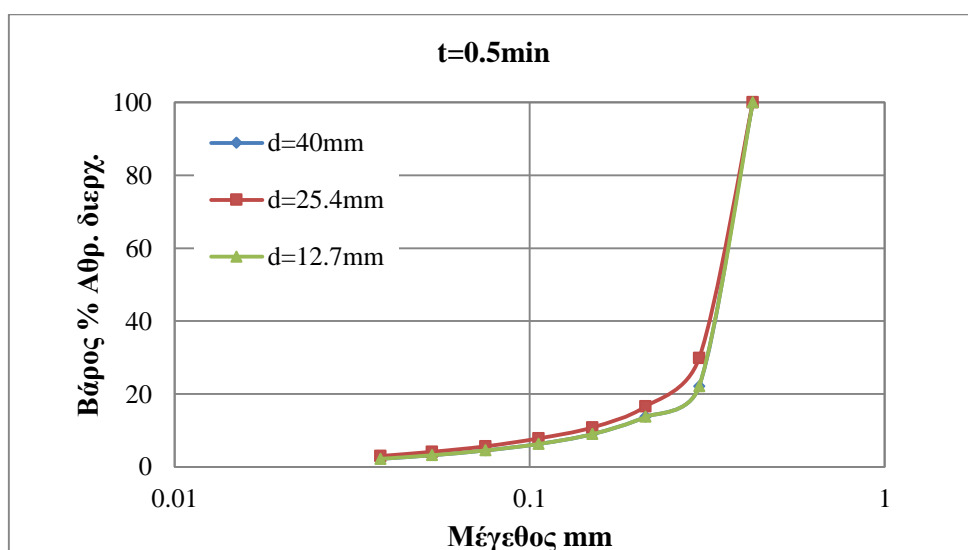


Διάγραμμα 4.18: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους για το κλάσμα  $-0.850 +0.600\text{mm}$  για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο  $t=4\text{min}$

Από το διάγραμμα (4.18) για το λεπτό κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας  $-0.850 +0.600\text{mm}$  παρατηρούμε ότι, για χρόνο λειοτρίβησης  $4\text{min}$  η καμπύλη για τις σφαίρες διαμέτρου  $25.4\text{mm}$  έχει αρχίσει να μετακινείται περισσότερο προς τα λεπτότερα μεγέθη σε σχέση με το προηγούμενο κλάσμα  $-1.7 +1.18\text{mm}$  για ίδιο χρόνο λειοτρίβησης.

Από τα διαγράμματα (4.17) – (4.18) παρατηρούμε ότι για το κλάσμα  $-0.850 +0.600\text{mm}$  ποιο αποδοτικές είναι οι σφαίρες των  $25.4\text{mm}$  ιδιαίτερα για το χρόνο  $4\text{min}$ .

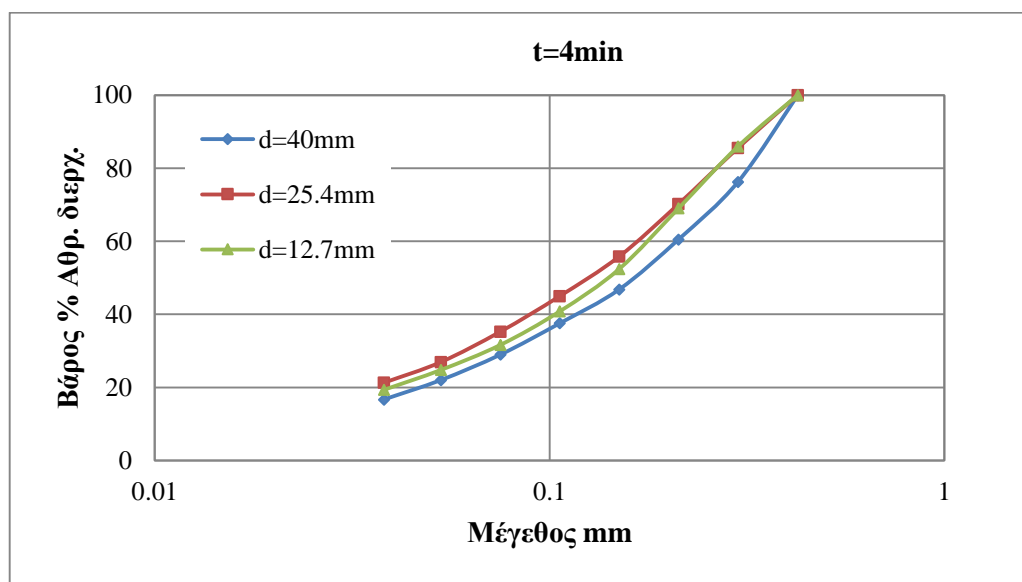
- Υλικό τροφοδοσίας  $-0.425 +0.300\text{mm}$



Διάγραμμα 4.19: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους για το κλάσμα  $-0.425 +0.300\text{mm}$  για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο  $t=0.5\text{min}$



Από το διάγραμμα (4.19) παρατηρούμε για το πιο λεπτό κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας  $-0.425 +0.300\text{mm}$ , ότι για χρόνο λειοτρίβησης  $0.5\text{min}$  οι καμπύλες για τις σφαίρες των  $25.4\text{mm}$  και  $12.7\text{mm}$  τείνουν να ταυτιστούν.



*Διάγραμμα 4.20: Αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει μεγέθους για το κλάσμα  $-0.425 +0.300\text{mm}$  για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο  $t=4\text{min}$*

Από το διάγραμμα (4.20) παρατηρούμε ότι για το λεπτότερο κοκκομετρικό κλάσμα τροφοδοσίας  $-0.425 +0.300\text{mm}$ , για χρόνο λειοτρίβησης  $4\text{min}$  η καμπύλη του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος προϊόντος, για τις σφαίρες των  $12.7\text{mm}$  τείνει να ξεπεράσει τη καμπύλη για τις σφαίρες των  $25.4\text{mm}$ .

Από τα διαγράμματα (4.19) – (4.20) παρατηρούμε ότι για το κλάσμα τροφοδοσίας  $-0.425 +0.300\text{mm}$  ελάχιστα ποιο αποδοτικές είναι οι σφαίρες των  $25.4\text{mm}$  και των  $12.7\text{mm}$ .

Συγκεντρωτικά από όλα τα διαγράμματα, παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τα τεμάχια λειοτριβούνται περισσότερο. Επίσης, για το χονδρότερο κοκκομετρικό κλάσμα οι σφαίρες των  $25.4\text{mm}$  λειοτριβούν καλύτερα τα τεμάχια, ενώ στο λεπτότερο κλάσμα οι σφαίρες των  $12.7\text{mm}$ . Εάν είχαμε ένα ακόμα πιο λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας η καμπύλη για τις σφαίρες των  $12.7\text{mm}$  θα ξεπερνούσε τη καμπύλη για τις σφαίρες των  $25.4\text{mm}$ . Συμπερασματικά, για χονδρότερα κλάσματα πιο αποδοτικές είναι οι σφαίρες μεγαλύτερου μεγέθους, ενώ για λεπτότερα ισχύει το αντίθετο.

### 4.3 Μέγεθος προϊόντος σε συνάρτηση με τη ειδική ενέργεια

Από τους πίνακες (4.1) – (4.12) του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος βρέθηκε το μέγεθος  $D_{80}$  το οποίο είναι το άνοιγμα της βροχίδας κοσκίνου από το οποίο διέρχεται το 80% του προϊόντος κοσκίνισης. Το μέγεθος αυτό μας δείχνει τη ελάττωση του μεγέθους του προϊόντος. Επίσης, από τη σχέση (7) υπολογίσαμε τη κατανάλωση της ειδικής ενέργειας.

Από τη βιβλιογραφία (Heekyu Choi et al., 2009) γνωρίζουμε, ότι στο αρχικό στάδιο της λειοτρίβησης ο ρυθμός μείωσης του μεγέθους  $D_{80}$  είναι αρκετά μεγάλος για μικρή αύξηση της κατανάλωσης της ειδικής ενέργειας. Από μια ενέργεια και μετά όμως, ο ρυθμός μειώνεται σταδιακά με συνεχόμενη αύξηση της κατανάλωσης ειδικής ενέργειας.

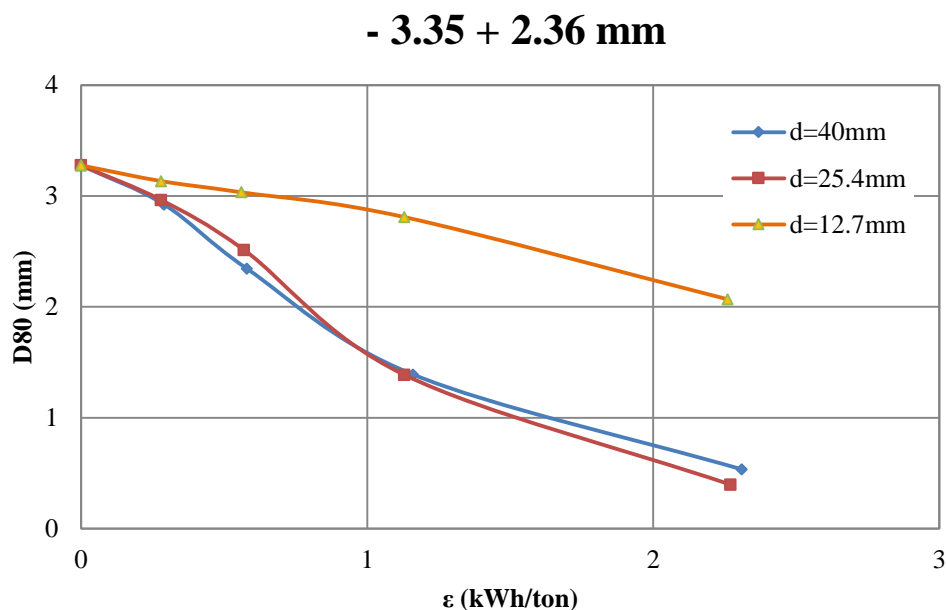
Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα των μεγεθών  $D_{80}$  και ειδικής ενέργειας και στη συνέχεια τα διαγράμματα των δυο μεγεθών.

- Υλικό τροφοδοσίας  $-3.35 + 2.36 \text{ mm}$

Πίνακας 4.13: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το  $D_{80}$  για το κλάσμα  $-3.35 + 2.36 \text{ mm}$

	40mm		25.4mm		12.7mm	
Χρόνος	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$
min	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)
0,00	0,00	3,28	0,00	3,28	0,00	3,28
0,50	0,29	2,92	0,28	2,96	0,28	3,13
1,00	0,58	2,34	0,57	2,51	0,56	3,03
2,00	1,16	1,39	1,13	1,39	1,13	2,81
4,00	2,31	0,53	2,27	0,40	2,26	2,07

Από τον πίνακα (4.13) παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η κατανάλωση της ειδικής ενέργειας για το χονδρότερο κλάσμα ( $-3.35 + 2.36\text{mm}$ ) τόσο μικραίνει το μέγεθος  $D_{80}$  του προϊόντος λειοτρίβησης. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα (4.21).



*Διάγραμμα 4.21: Μέγεθος  $D_{80}$  σε συνάρτηση με τη ειδική ενέργεια για το μέγεθος -3.35 +2.36mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών*

Στο διάγραμμα (4.21) παρατηρούμε ότι για τη ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας για το χονδρύτερο κλάσμα τροφοδοσίας (-3.35 + 2.36mm), στις σφαίρες διαμέτρου 40mm και 25.4 mm το μέγεθος  $D_{80}$  δεν έχει μεγάλη διαφορά, ενώ για σφαίρες διαμέτρου 12.7 mm το  $D_{80}$  είναι μεγαλύτερο.

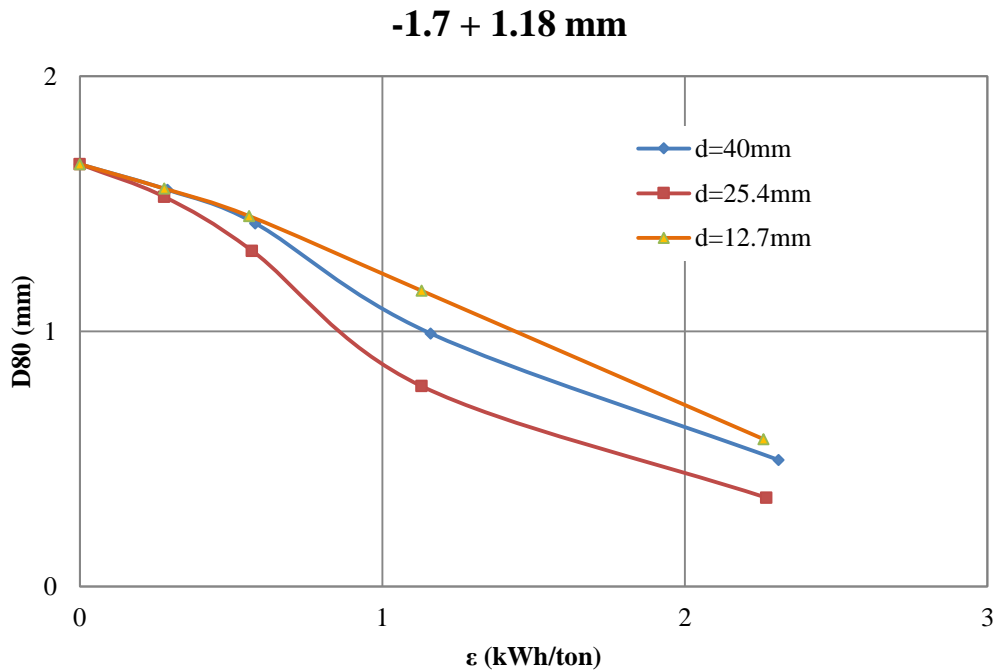
- Υλικό τροφοδοσίας -1.7 +1.18 mm

*Πίνακας 4.14: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το  $D_{80}$  για το κλάσμα -1.7 +1.18 mm*

	40mm		25.4mm		12.7mm	
Χρόνος	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$
min	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)
0,00	0,00	1,66	0,00	1,66	0,00	1,66
0,50	0,29	1,55	0,28	1,53	0,28	1,56
1,00	0,58	1,42	0,57	1,32	0,56	1,45
2,00	1,16	0,99	1,13	0,79	1,13	1,16
4,00	2,31	0,50	2,27	0,35	2,26	0,58

Από τον πίνακα (4.14) παρατηρούμε για το αμέσως λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας (-1.7 + 1.18mm) ότι και πάλι με αύξηση της κατανάλωσης της ειδικής

ενέργειας το μέγεθος  $D_{80}$  μειώνεται. Η σχέση τους γραφικά δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (4.22).



*Διάγραμμα 4.22: Μέγεθος  $D_{80}$  σε συνάρτηση με τη ειδική ενέργεια για το μέγεθος -1.7 +1.18mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών*

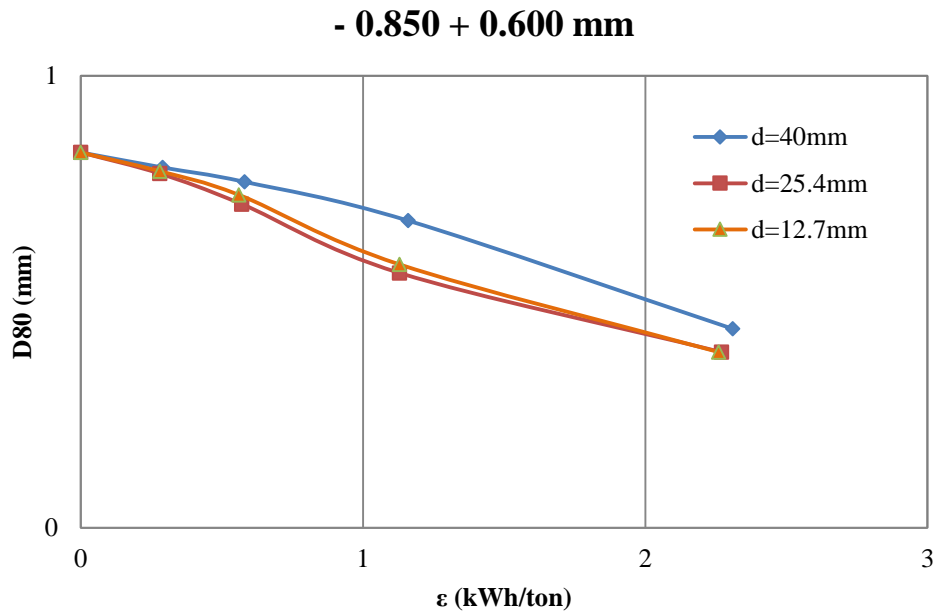
Στο διάγραμμα (4.22) παρατηρούμε ότι για τη ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας, στις σφαίρες διαμέτρου 25.4 mm το  $D_{80}$  είναι μικρότερο σε σχέση με τις άλλες διαμέτρους, ενώ το μεγαλύτερο μέγεθος του  $D_{80}$  παρατηρείται ότι είναι στις σφαίρες των 12.7 mm.

- Υλικό τροφοδοσίας -0.850 +0.600 mm

*Πίνακας 4.15: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το  $D_{80}$  για το κλάσμα -0.850 +0.600 mm*

	40mm		25.4mm		12.7mm	
Χρόνος	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$
min	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)
0,00	0,00	0,83	0,00	0,83	0,00	0,83
0,50	0,29	0,80	0,28	0,78	0,28	0,79
1,00	0,58	0,77	0,57	0,72	0,56	0,74
2,00	1,16	0,68	1,13	0,56	1,13	0,58
4,00	2,31	0,44	2,27	0,39	2,26	0,39

Από τον πίνακα (4.15) παρατηρούμε ότι για αύξηση της κατανάλωσης της ειδικής ενέργειας στο λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας (-0.850 + 0.600mm) το μέγεθος  $D_{80}$  μικραίνει. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (4.23).



*Διάγραμμα 4.23: Μέγεθος  $D_{80}$  σε συνάρτηση με τη ειδική ενέργεια για το μέγεθος -0.850 +0.600mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών*

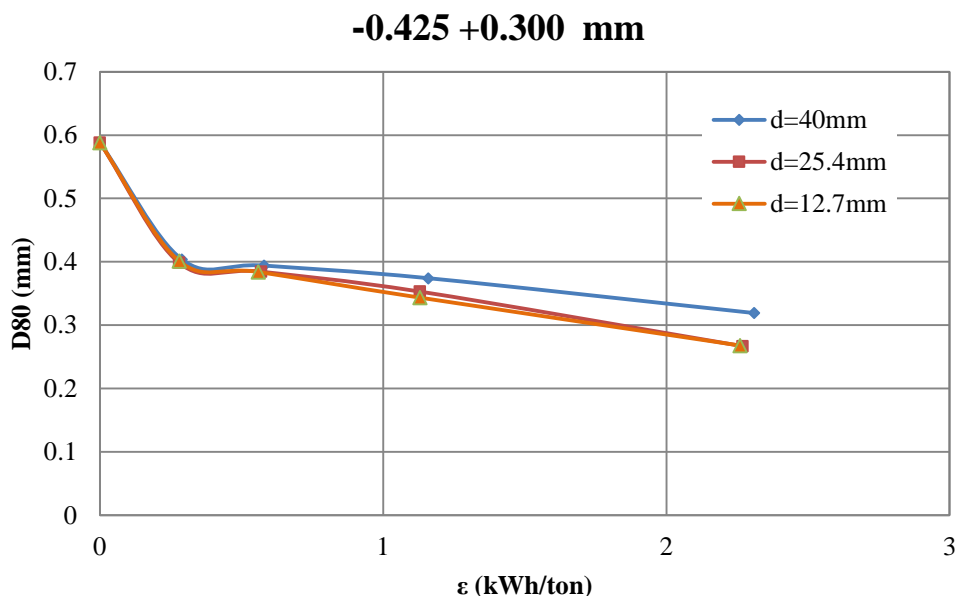
Στο διάγραμμα (4.23) παρατηρούμε ότι για τη ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας, το  $D_{80}$  είναι ελάχιστα μικρότερο για μέγεθος σφαιρών 25.4 mm σε σχέση με τις σφαίρες των 12.7 mm. Το μεγαλύτερο μέγεθος  $D_{80}$  παρατηρείται στις σφαίρες μεγέθους 40mm.

- Υλικό τροφοδοσίας -0.425 +0.300 mm

**Πίνακας 4.16: Ειδική ενέργεια σε σχέση με το  $D_{80}$  για το μέγεθος -0.425 +0.300 mm**

	40mm		25.4mm		12.7mm	
Χρόνος	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$	Ειδική ενέργεια	$D_{80}$
min	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)	kWh/ton	(mm)
0,00	0,00	0,59	0,00	0,59	0,00	0,59
0,50	0,29	0,40	0,28	0,40	0,28	0,40
1,00	0,58	0,39	0,57	0,38	0,56	0,38
2,00	1,16	0,37	1,13	0,35	1,13	0,34
4,00	2,31	0,32	2,27	0,27	2,26	0,27

Από τον πίνακα (4.16) για το λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας (-0.425 +0.300mm) παρατηρούμε ότι με αύξηση της κατανάλωσης της ειδικής ενέργειας, μειώνεται το μέγεθος  $D_{80}$ . Η σχέση τους γραφικά δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (4.24).



*Διάγραμμα 4.24: Μέγεθος  $D_{80}$  σε συνάρτηση με τη ειδική ενέργεια για το μέγεθος -0.425 +0.300mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών*

Στο διάγραμμα (4.24) παρατηρούμε ότι για τη ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας, το  $D_{80}$  είναι ελάχιστα μικρότερο για μέγεθος σφαιρών 12.7 mm σε σχέση με τις σφαίρες των 25.4 mm. Αναμένεται ότι σε ένα ακόμη πιο λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας, το μέγεθος  $D_{80}$  θα ήταν ακόμα πιο μικρό για σφαίρες διαμέτρου 12.7mm.

Συγκεντρωτικά και από τα 4 διαγράμματα (4.21) – (4.24), παρατηρείται ότι στα χονδρότερα μεγέθη τροφοδοσίας με τη χρήση σφαιρών μεγάλης διαμέτρου το μέγεθος που διέρχεται το 80% του υλικού μικραίνει, ενώ αντίθετα σε λεπτότερα μεγέθη τροφοδοσίας το μέγεθος που διέρχεται το 80% του υλικού μεγαλώνει. Αυτό σημαίνει ότι οι μεγαλύτερης διαμέτρου σφαίρες λειοτριβούν πιο αποδοτικά χονδρότερα τεμάχια και οι μικρότερης διαμέτρου λεπτότερα.

#### 4.4 Υπολογισμός ειδικού ρυθμού θραύσης

Από τη σχέση (9) που αναφέρθηκε στη θεωρία έγιναν οι υπολογισμοί του ειδικού ρυθμού θραύσης ( $S_i$ ) για κάθε κλάσμα μεγέθους και για κάθε διάμετρο σφαίρας. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ημιλογαριθμικά διαγράμματα όπου δίνουν τη σχέση του βάρους (%) που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους με το χρόνο λειοτρίβησης. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί στη θεωρία ο ειδικός ρυθμός θραύσης είναι ανεξάρτητος του χρόνου και δίνεται από τη κλίση της ευθείας που προκύπτει

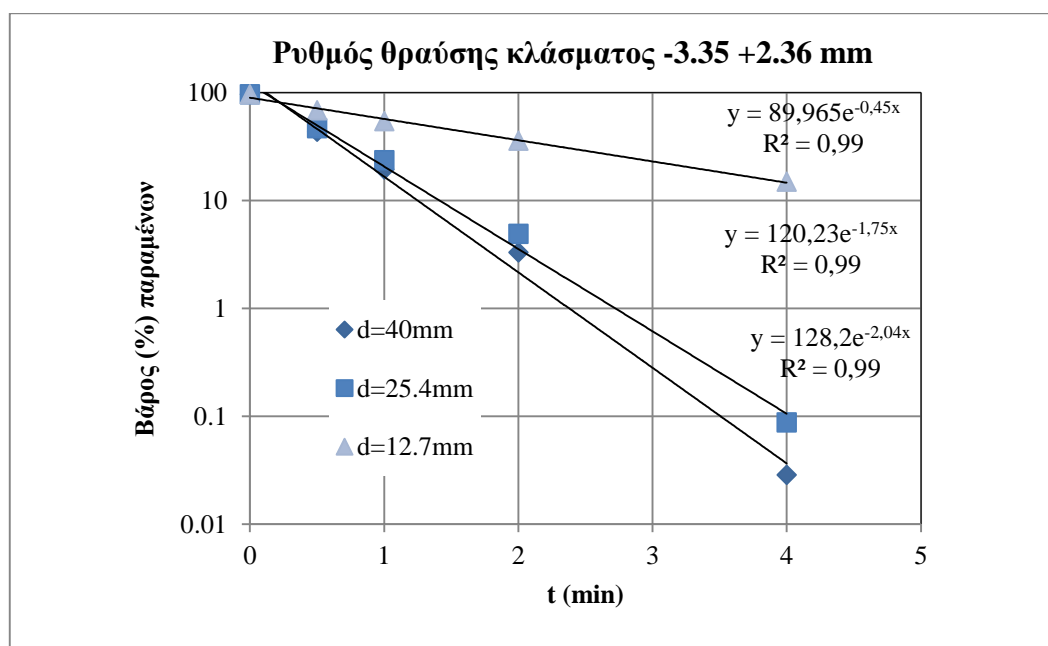
από κάθε διάμετρο σφαίρας. Έτσι, από τη γραμμή τάσης μπορούμε να υπολογίσουμε τον ειδικό ρυθμό θραύσης.

Παρακάτω δίνονται οι πίνακες και οι γραφικές παραστάσεις του ειδικού ρυθμού θραύσης σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης.

- Υλικό τροφοδοσίας -3.35 +2.36mm

Πίνακας 4.17: Μάζα υλικού(%) που παρέμεινε στη τάξη μεγέθους -3.35 +2.36mm

Χρόνος (min)	Βάρος (40mm)	Βάρος (25.4mm)	Βάρος (12.7mm)
0,00	97,00	97,00	97,00
0,50	43,61	47,13	69,06
1,00	19,50	23,78	54,49
2,00	3,32	4,93	35,88
4,00	0,03	0,09	15,01



Διάγραμμα 4.25: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος -3.35 +2.36mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών για διάφορους χρόνους

Από το διάγραμμα (4.25) παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών, η ευθεία μετακινείται προς τον άξονα y, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κλίση και άρα και ο ειδικός ρυθμός θραύσης. Το ίδιο παρατηρείται και στα υπόλοιπα διαγράμματα (4.26) – (4.28).

Πίνακας 4.18 : Ρυθμός θραύσης κλάσματος -3.35 +2.36mm για διάφορες διαμέτρους σφαιρών

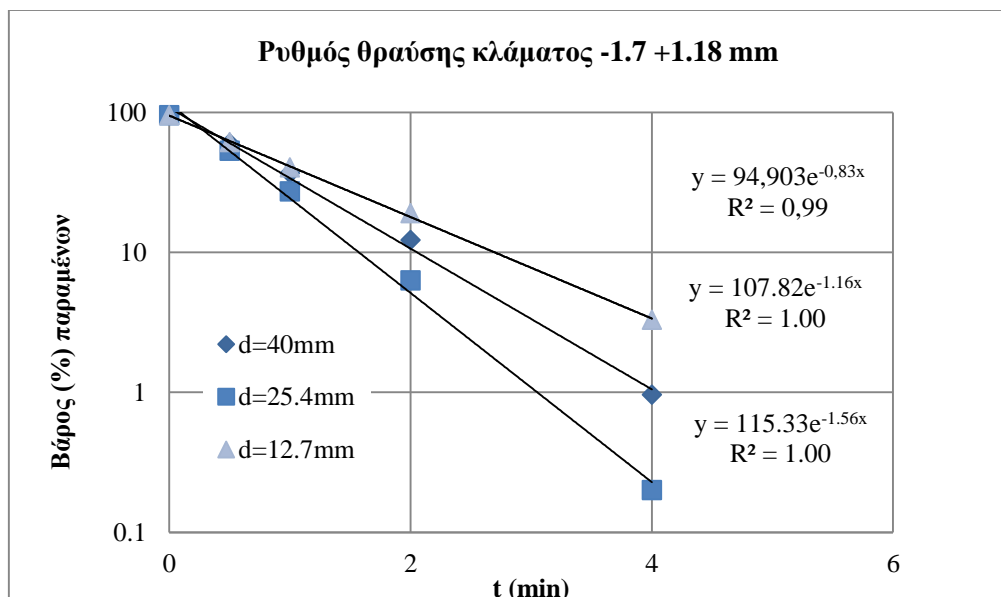
d (mm)	Si (min <sup>-1</sup> )
12.7	0.45
25.4	1.75
40	2.04

Από τον πίνακα (4.18) για το χονδρότερο κλάσμα τροφοδοσίας (-3.35 +2.36mm) παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών από 12.7mm σε 40mm αυξάνεται και ο ειδικός ρυθμός θραύσης, όπου μεγιστοποιείται για διάμετρο σφαίρας 40mm. Δηλαδή, ο μέγιστος ειδικός ρυθμός θραύσης ( $S_m$ ) για χονδρότερα μεγέθη δίνεται όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες μεγάλης διαμέτρου.

- Υλικό τροφοδοσίας -1.7 +1.18mm

Πίνακας 4.19: Μάζα υλικού(%) που παρέμεινε στη τάξη μεγέθους -1.7 +1.18mm

Χρόνος (min)	Βάρος (40mm)	Βάρος (25.4mm)	Βάρος (12.7mm)
0,00	95,30	95,30	95,30
0,50	59,86	53,18	61,11
1,00	36,79	27,22	40,33
2,00	12,23	6,30	19,05
4,00	0,96	0,20	3,29



Διάγραμμα 4.26: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος -1.7 +1.18mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε διάφορους χρόνους.



Πίνακας 4.20: Ρυθμός θραύσης -1.7 + 1.18mm για διάφορες διαμέτρους σφαιρών

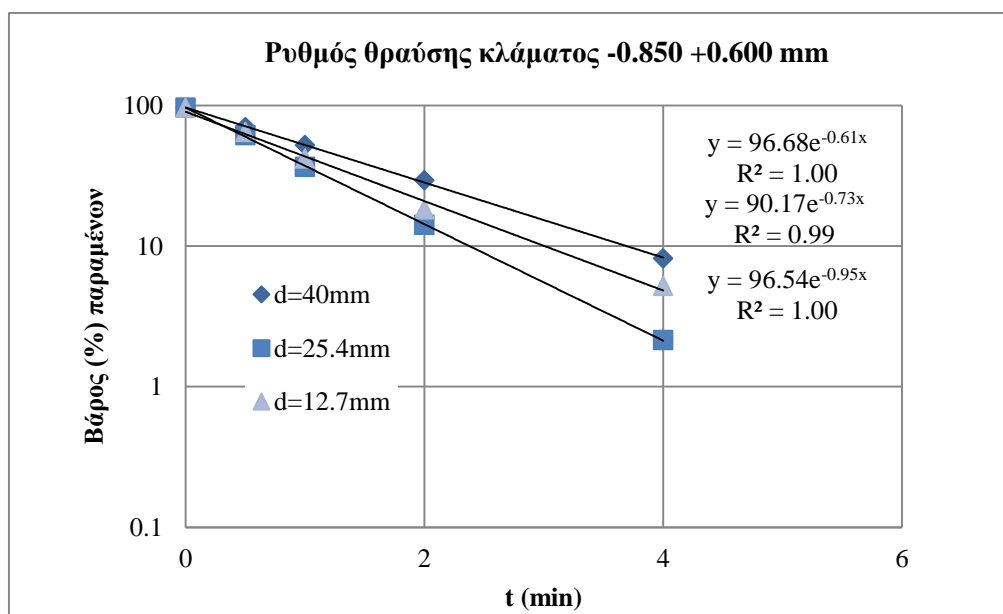
d (mm)	Si (min <sup>-1</sup> )
12.7	0.83
25.4	1.56
40	1.16

Από τον πίνακα (4.20) παρατηρούμε ότι για το αμέσως λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας (-1.7 +1.18mm) καθώς αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών από 12.7mm σε 25.4mm αυξάνεται και ο ειδικός ρυθμός θραύσης, όπου μεγιστοποιείται και έπειτα μειώνεται για διάμετρο σφαίρας 40mm.

- Υλικό τροφοδοσίας -0.850 +0.600mm

Πίνακας 4.21: Μάζα υλικού(%) που παρέμεινε στη τάξη μεγέθους -0.850 +0.600mm

Χρόνος (min)	Βάρος (40mm)	Βάρος (25.4mm)	Βάρος (12.7mm)
0,00	96,30	96,30	96,30
0,50	70,07	61,48	64,68
1,00	52,28	36,47	41,85
2,00	29,31	14,17	18,23
4,00	8,16	2,14	5,20



Διάγραμμα 4.27: Ρυθμός θραύσης του κλάματος -0.850 +0.600mm για τις 3 διαμέτρους σφαιρών σε διάφορους χρόνους

Πίνακας 4.22: Ρυθμός θραύσης κλάσματος  $-0.850 + 0.600\text{mm}$  για διάφορες διαμέτρους σφαιρών

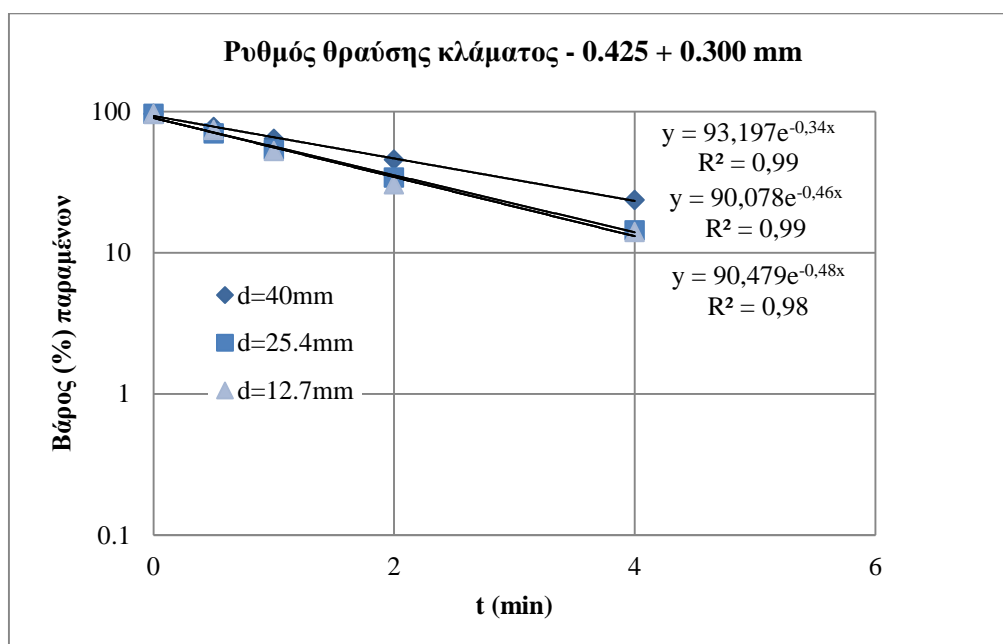
d (mm)	Si ( $\text{min}^{-1}$ )
12.7	0.73
25.4	0.95
40	0.61

Από τον πίνακα (4.22) παρατηρούμε για το λεπτό κλάσμα τροφοδοσίας ( $-0.850 + 0.600\text{mm}$ ) ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών από 12.7mm σε 25.4mm αυξάνεται ο ειδικός ρυθμός θραύσης έχει τη ίδια συμπεριφορά με το κλάσμα ( $-1.7 + 1.18\text{mm}$ ). Δηλαδή, μεγιστοποιείται όταν γίνεται χρήση σφαιρών 25.4mm και έπειτα μειώνεται για διάμετρο σφαίρας 40mm.

- Υλικό τροφοδοσίας  $-0.425 + 0.300\text{mm}$

Πίνακας 4.23: Μάζα υλικού(%) που παρέμεινε στη τάξη μεγέθους  $-0.425 + 0.300\text{mm}$

Χρόνος (min)	Βάρος (40mm)	Βάρος (25.4mm)	Βάρος (12.7mm)
0,00	96,54	96,54	96,54
0,50	77,91	70,15	74,20
1,00	64,25	53,92	52,74
2,00	45,64	34,20	30,57
4,00	23,75	14,45	14,05



Διάγραμμα 4.28: Ρυθμός θραύσης του κλάσματος  $-0.425 + 0.300\text{mm}$  για τις 3 διαμέτρους σφαιρών για διάφορους χρόνους

**Πίνακας 4.24: Ρυθμός θραύσης κλάσματος  $-0.425 + 0.300\text{mm}$  για διάφορες διαμέτρους σφαιρών**

<b>d (mm)</b>	<b>Si (min<sup>-1</sup>)</b>
12.7	0.48
25.4	0.46
40	0.34

Από τον πίνακα (4.24) παρατηρούμε για το λεπτότερο κλάσμα τροφοδοσίας ( $-0.425 + 0.300\text{mm}$ ) ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών από 12.7mm σε 40mm αυξάνεται και ο ειδικός ρυθμός θραύσης. Η μέγιστη τιμή του δίνεται για σφαίρες διαμέτρου 12,7mm. Δηλαδή, για λεπτά μεγέθη τροφοδοσίας ο ειδικός ρυθμός θραύσης είναι μέγιστος όταν χρησιμοποιούμε μικρής διαμέτρου σφαίρες.

#### **4.5 Ειδικός ρυθμός θραύσης σε σχέση με το μέγεθος της τροφοδοσίας**

Μέσω του εργαλείου solver του προγράμματος excel έγινε η επίλυση του κινητικού μοντέλου κατά Austin et al. (1984) μέσω τις σχέσης (15) που αναφέρθηκε στη θεωρία. Σκοπός ήταν να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\mu$ ,  $\Lambda$ ,  $\alpha_T$  που θα ελαχιστοποιούν το σφάλμα ανάμεσα στις πειραματικές μετρήσεις και τις μετρήσεις του μοντέλου.

Αρχικά έγινε εισαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων και θέτονταν τιμές γνωστές από τη βιβλιογραφία για τις παραμέτρους. Στη συνέχεια, γινόταν αλλαγή των τιμών αυτών προσπαθώντας να βρούμε τις ιδανικές τιμές ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα. Γνωρίζοντας από τη θεωρία ότι οι παράμετροι  $\alpha$ ,  $\Lambda$  εξαρτώνται από το υλικό προσπαθήσαμε να κρατήσουμε σταθερές τις τιμές τους, μεταβάλλοντας μόνο τα  $\mu$  και  $\alpha_T$ .

Τα αποτελέσματα δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν (4.25 – 4.28).

**Πίνακας 4.25: Ειδικό ρυθμοί θραύσης πειραμάτων και μοντέλου για  $d=40\text{mm}$**

<b>Ανώτερο μέγεθος (mm)</b>	<b>Si (min<sup>-1</sup>) πειραματικοί</b>	<b>Si (min<sup>-1</sup>) Μοντέλου</b>	<b>Διαφορά τετραγώνων</b>
<b>3,35</b>	1,90	1,79	0,01
<b>1,7</b>	1,16	1,22	0,00
<b>0,85</b>	0,61	0,68	0,00
<b>0,425</b>	0,35	0,37	0,00
			0,02

Πίνακας 4.26: Ειδικό ρυθμοί θραύσης πειραμάτων και μοντέλου για  $d=25.4mm$

Ανώτερο μέγεθος (mm)	Si (min <sup>-1</sup> ) πειραματικοί	Si (min <sup>-1</sup> ) Μοντέλου	Διαφορά τετραγώνων
3,35	1,81	1,81	0,00
1,7	1,56	1,55	0,00
0,85	0,89	0,90	0,00
0,425	0,48	0,49	0,00
			0,00

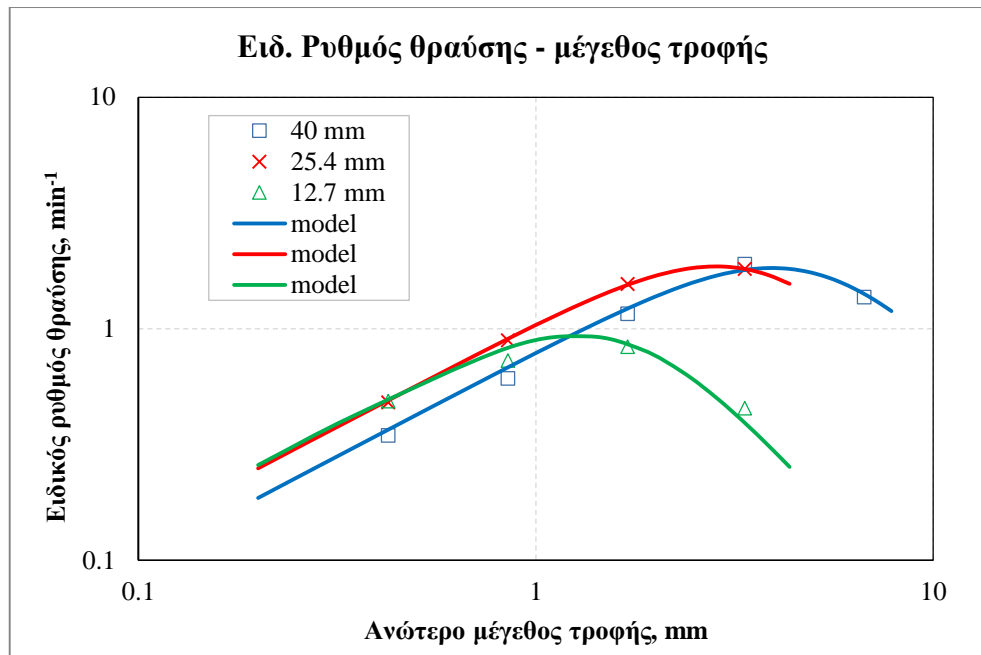
Πίνακας 4.27: Ειδικό ρυθμοί θραύσης πειραμάτων και μοντέλου για  $d=12.7mm$

Ανώτερο μέγεθος (mm)	Si (min <sup>-1</sup> ) πειραματικοί	Si (min <sup>-1</sup> ) Μοντέλου	Διαφορά τετραγώνων
3,35	0,45	0,39	0,00
1,7	0,84	0,86	0,00
0,85	0,73	0,83	0,00
0,425	0,49	0,50	0,00
			0,01

Πίνακας 4.28: Παράμετροι για κάθε διάμετρο σφαίρας

d (mm)	$\alpha_T$	$\alpha$	$\mu$	$\Lambda$
40	0.79	0.90	5.09	2.74
25.4	1.06	0.90	3.73	2.84
12.7	1.10	0.90	1.66	2.84

Από τους πίνακες (4.25) έως (4.28) προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα (4.29) όπου γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων με του μοντέλου για τον ειδικό ρυθμό θραύσης σε σχέση με το ανώτερο μέγεθος τροφής, για τις τρεις διαμέτρους σφαιρών.



*Διάγραμμα 4.29: Σύγκριση ειδικών ρυθμών θραύσης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του μοντέλου ως προς το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας για τις τρεις διαμέτρους σφαιρών*

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα (4.29) καθώς αυξάνεται το μέγεθος της τροφοδοσίας, αυξάνεται και ο ειδικός ρυθμός θραύσης όπου η μέγιστη τιμή του ( $S_m$ ) είναι διαφορετική για κάθε διάμετρο σφαίρας. Μετά τη μέγιστη τιμή, ο ειδικός ρυθμός θραύσης αρχίζει να μειώνεται.

Στη καμπύλη των σφαιρών διαμέτρου 40mm παρατηρούμε ότι η σχέση ( $S_i$ ) – ανώτερου μεγέθους, μέχρι το ανώτερο μέγεθος τροφής 3.35mm, περιγράφεται από μια ευθεία και δεν υπάρχει πειραματικό σημείο πέρα από το μέγιστο  $S_m$ . Γι αυτό το λόγο επαναλάβουμε τη πειραματική διαδικασία για ένα χονδρότερο κοκκομετρικό κλάσμα το  $-6.7 +4.75\text{mm}$  με χρήση σφαιρών 40mm. Βρήκαμε τον ειδικό ρυθμό θραύσης για το συγκεκριμένο μέγεθος τροφής και σχεδιάσαμε τη καμπύλη με ανώτερο μέγεθος το 6.7mm. Όπως παρατηρούμε ο ειδικός ρυθμός θραύσης συμπεριφέρεται όπως και για τις άλλες δυο διαμέτρους. Δηλαδή, φθάνει σε ένα μέγιστο σημείο και από εκεί και έπειτα αρχίζει να μειώνεται.

Επίσης, από το διάγραμμα (4.29) παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή του ειδικού ρυθμού θραύσης εμφανίζεται στις σφαίρες διαμέτρου 40mm με ελάχιστη όμως διαφορά από τη τιμή των σφαιρών των 25.4mm. Η μικρότερη τιμή του ειδικού ρυθμού θραύσης είναι στις σφαίρες των 12.7mm.

#### 4.6 Σχέση μέγιστου ειδικού ρυθμού θραύσης με τη διάμετρο των σφαιρών

Όπως αναφέρθηκε στη θεωρία και φάνηκε και από το προηγούμενο διάγραμμα (4.29), για κάθε διάμετρο σφαίρας κάθε μέγιστος ρυθμός θραύσης ( $S_m$ ) αντιστοιχεί σε ένα μέγιστο μέγεθος ( $x_m$ ). Παρακάτω δίνονται οι τιμές των  $S_m$  και  $x_m$  για κάθε διάμετρο σφαίρας.

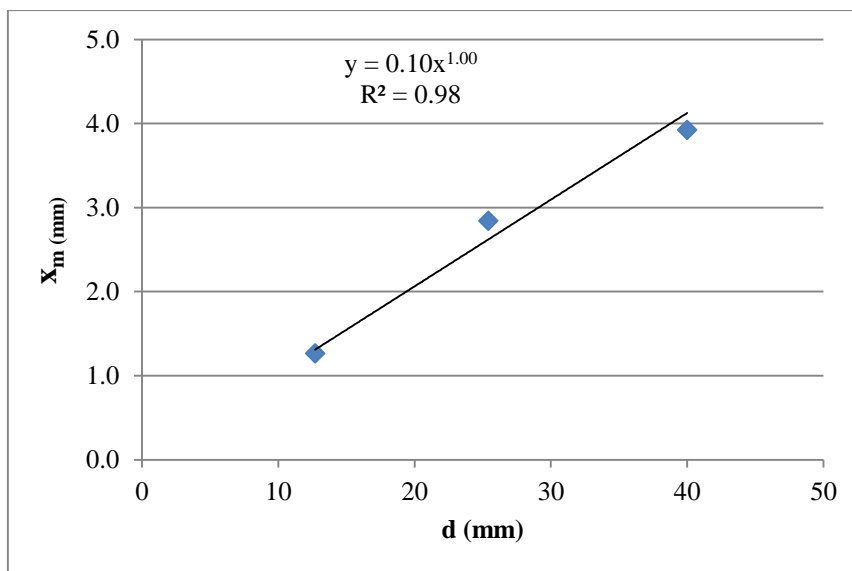
Πίνακας 4.29: Μέγιστο μέγεθος ( $x_m$ ) για κάθε διάμετρο σφαίρας

d (mm)	$x_m$ (mm)
40	3.9
25.4	2.8
12.7	1.3

Πίνακας 4.30: Μέγιστος ρυθμός θραύσης ( $S_m$ ) για κάθε διάμετρο σφαίρας

d (mm)	$S_m$ (min <sup>-1</sup> )
40	1.83
25.4	1.86
12.7	0.93

Από τις τιμές των πινάκων (4.29) – (4.30) προέκυψαν τα διαγράμματα (4.30) – (4.31) που δίνονται παρακάτω:



Διάγραμμα 4.30: Μέγιστο μέγεθος  $x_m$  σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαίρας

Από το διάγραμμα (4.30) παρατηρούμε ότι η σχέση του μέγιστου μεγέθους  $x_m$  με τη διάμετρο σφαιρών περιγράφεται από μία συνάρτηση δύναμης. Αυτό σημαίνει ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος των τεμαχίων τόσο μεγαλύτερη διάμετρος σφαιρών απαιτείται για να επιτευχθεί μέγιστος ρυθμός θραύσης.

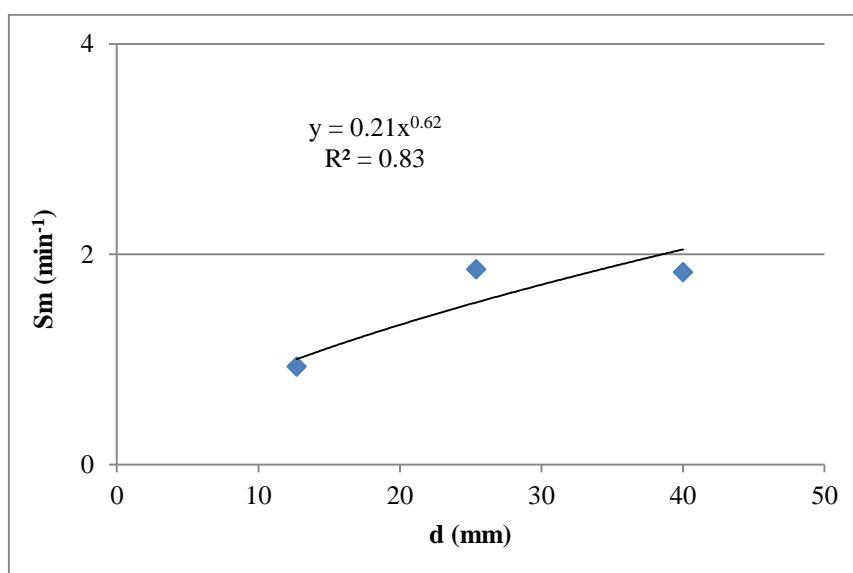
Η σχέση που συνδέει το μέγιστο μέγεθος με τη διάμετρο σφαίρας είναι η παρακάτω (27):

$$x_m = 0.10d^{1.00} \quad (27)$$

Με βάση τη σχέση (27) και τη σχέση (14α) συμπεραίνουμε ότι  $k=0.10$  και  $A=1.00$  για το μάρμαρο.

Σύμφωνα με τις τιμές της βιβλιογραφίας που έχουν αναφερθεί, το  $k$  παίρνει τιμές από  $10^{-3}$  έως  $0.7 \cdot 10^{-3}$  καθώς πάμε από μαλακά σε σκληρά υλικά (Austin et al., 1976). Μια σύγκριση της τιμής του  $k=0.10$  για το μάρμαρο που υπολογίστηκε, με τις συγκεκριμένες συνθήκες λειοτρίβησης που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί να γίνει με τη τιμή του  $k=0.17$  για το χαλαζίτη (Καρμάλη, 2015) όπου η τιμή του υπολογίστηκε κάτω από τις ίδιες συνθήκες λειοτρίβησης. Επίσης, η τιμή του  $A$  για το μάρμαρο βρέθηκε να ισούται με 1.00 ενώ για το χαλαζίτη να ισούται με 0.75.

Ακόμα από το διάγραμμα (4.30) παρατηρείται ότι το μέγιστο μέγεθος και η διάμετρος σφαιρών έχουν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του εφόσον  $R = +0.98$ . Όμως ο υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης  $R$  έγινε με βάση 3 σημεία όπου και η τιμή του είναι προσεγγιστική. Θα έπρεπε να έχουμε περισσότερα σημεία για να θεωρηθεί σωστή. Το ίδιο ισχύει και για τα επόμενα διαγράμματα.



Διάγραμμα 4.31: Μέγιστος ειδικός ρυθμός θραύσης  $S_m$  σε συνάρτηση με τη διάμετρο σφαίρας

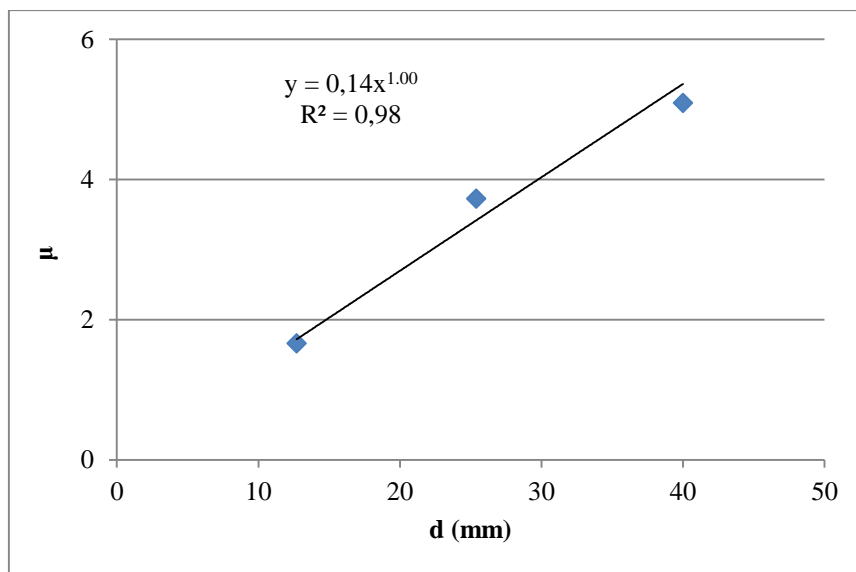
Από το διάγραμμα (4.31) παρατηρούμε ότι η σχέση του μέγιστου ειδικού ρυθμού θραύσης  $S_m$  με τη διάμετρο των σφαιρών περιγράφεται από μια συνάρτηση δύναμης. Αυτό δείχνει ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος της σφαίρας αυξάνεται και ο μέγιστος ειδικός ρυθμός θραύσης και η σχέση που το δίνει είναι η παρακάτω (28):

$$S_m = 0.21d^{0.62} \quad (28)$$

Από τη σχέση (28) και τη σχέση (14β) συμπεραίνουμε ότι το  $k'$  παίρνει τη τιμή 0.21 για το μάρμαρο ενώ το B τη τιμή 0.62. Για το χαλαζίτη η τιμή του  $k'$  είναι ίση με 0.32 και του B ίση με 0.39 (Καρμάλη, 2015).

Επίσης από το διάγραμμα (4.31) παρατηρούμε ότι υπάρχει θετική συσχέτιση των δύο μεγεθών με  $R = +0.91$ .

Η επίλυση του μοντέλου κατά Austin et al. (1984) έδωσε δύο σχέσεις που συνδέουν τις παραμέτρους  $\alpha_T$  και  $\mu$  με το μέγεθος των σφαιρών. Τα διαγράμματα αυτών των δυο σχέσεων δίνονται παρακάτω:



Διάγραμμα 4.32: Παράμετρος  $\mu$  σε συνάρτηση με το μέγεθος σφαίρας

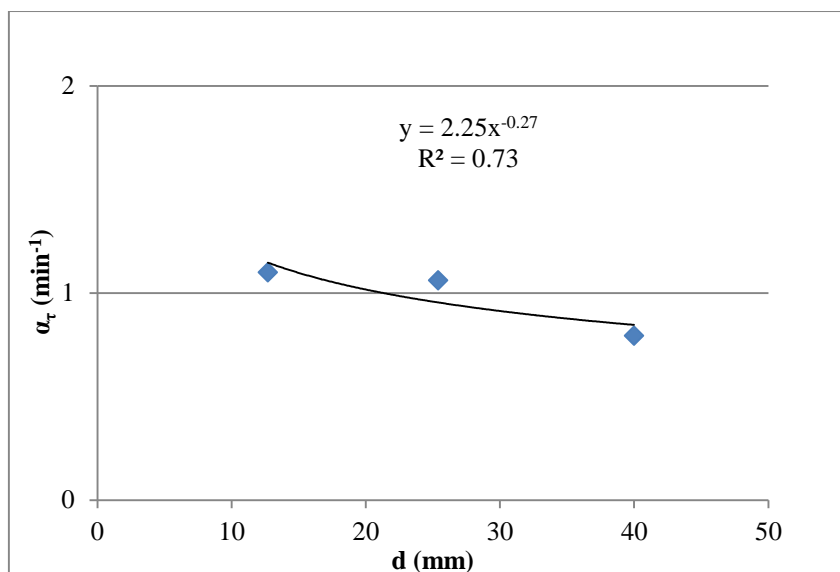
Από το διάγραμμα (4.32) παρατηρούμε ότι το μέγεθος  $\mu$  με τη διάμετρο των σφαιρών περιγράφονται από μια συνάρτηση δύναμης. Αυτό δείχνει ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος της σφαίρας τόσο αυξάνεται και η παράμετρος  $\mu$ . Η σχέση που συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη είναι η ακόλουθη (29):

$$\mu = 0.14d^{1.00} \quad (29)$$

Από τη σχέση (29) και τη σχέση (20) που αναφέρθηκε στη θεωρία προκύπτει ότι  $\mu_0 = 0.14$  και  $\eta = 1.00$  για το μάρμαρο. Για το χαλαζίτη η τιμή του  $\mu_0$  είναι ίση με 0.19, ενώ το  $\eta$  είναι ίσο με 0.82 (Καρμάλη, 2015).

Επίσης παρατηρούμε ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των 2 μεγεθών με  $R = +0.98$ .





Διάγραμμα 4.33: Παράμετρος  $\alpha_t$  σε συνάρτηση με το μέγεθος σφαιρών

Από το διάγραμμα (4.33) παρατηρούμε ότι η σχέση του μεγέθους  $\alpha_t$  με τη διάμετρο των σφαιρών περιγράφονται από μια συνάρτηση δύναμης. Αυτό δείχνει ότι για μέγεθος τροφοδοσίας 1mm όσο μειώνεται η διάμετρος των σφαιρών τόσο αυξάνεται και ο ειδικός ρυθμός θραύσης όπως είχαμε αναφέρει και στη θεωρία .

Η σχέση που συνδέει το μέγεθος  $\alpha_T$  με τη διάμετρο των σφαιρών είναι η παρακάτω (30):

$$\alpha_T = 2.25d^{-0.27} \quad (30)$$

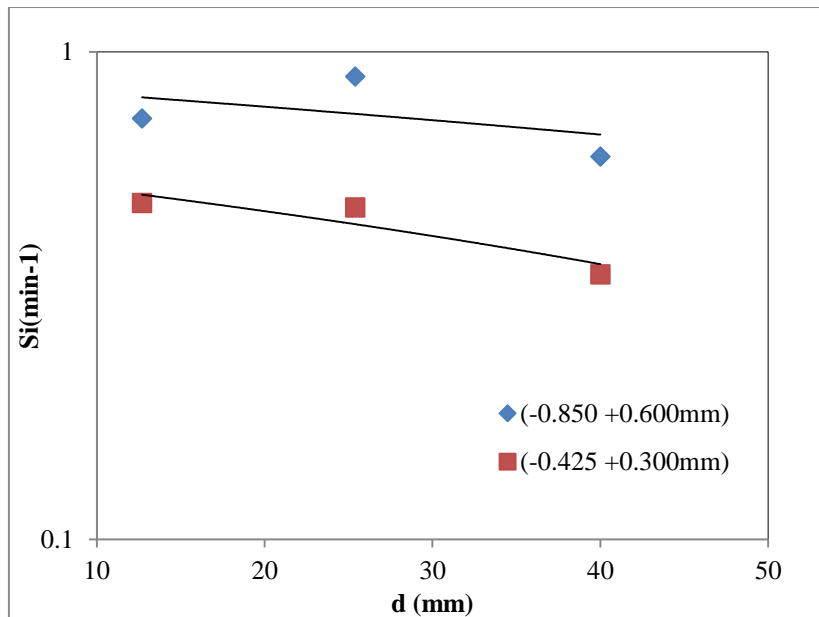
Από τη σχέση (30) και τη σχέση (19) που αναφέρθηκε στη θεωρία προκύπτει ότι  $\alpha_0=2.25$  και  $\xi= -0.27$  για το μάρμαρο. Για το χαλαζίτη το  $\xi =-0.32$  και το  $\alpha_0=2.40$  (Καρμάλη,2015)

Επίσης από το διάγραμμα (4.32) ότι υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών με  $R =-0.85$ .

Πίνακας 4.31: Ρυθμοί θραύσης στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα σε σχέση με τη διάμετρο σφαιρών

Διάμετρος σφαιρών d (mm)	Μέγεθος κλάσματος (mm)	
	(-0.850+0.600)	(-0.425+0.300)
	Si (min <sup>-1</sup> )	
40	0,61	0,35
25,4	0,89	0,48
12,7	0,73	0,49

Από τον πίνακα (4.31) προκύπτει το διάγραμμα (4.33) όπου μας δείχνει τη σχέση μεταξύ του ειδικού ρυθμού θραύσης με τη διάμετρο των σφαιρών, για τα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα.



*Διάγραμμα 4.34: Ειδικοί ρυθμοί θραύσης για τα κλάσμα (-0.850 +0.600mm) και (-0.425 +0.300mm) σε σχέση με τη διάμετρο σφαιρών*

Από το διάγραμμα (4.34) παρατηρούμε ότι όσο μικρότερη διάμετρο χρησιμοποιούμε στα λεπτότερα κοκκομετρικά κλάσματα τόσο αυξάνεται ο ειδικός ρυθμός θραύσης, το οποίο και επιβεβαιώνει τη θεωρία.

Τέλος, από τη σχέση (14α) υπολογίσαμε τη βέλτιστη διάμετρο σφαίρας που λειοτριβεί καλύτερα το υλικό, λύνοντας ως προς τη διάμετρο. Ως μέγιστο μέγεθος θέσαμε το ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα (4.32).

*Πίνακας 4.32: Βέλτιστες διαμέτροι σφαιρών για κάθε ανώτερο μέγεθος τροφοδοσίας*

Ανώτερο μέγεθος τροφής (mm)	d (mm)
3,35	33,5
1,7	17
0,85	8,5
0,425	4,25

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για τη μελέτη της διαδικασίας λειοτρίβησης και διεξαγωγή συμπερασμάτων έγινε εφαρμογή κινητικού μοντέλου στη λειοτρίβηση μαρμάρου σε σφαιρόμυλο. Δημιουργήθηκαν τέσσερα στενά κοκκομετρικά κλάσματα με λόγο  $\sqrt{2}$  όπου το κάθε ένα λειοτριβούταν για 4 χρόνους (0.5, 1, 2, 4 min) με νέα τροφοδοσία κάθε φορά. Για κάθε χρόνο λειοτρίβησης είχαμε διαφορετική τιμή για τη κατανάλωση της ειδικής ενέργειας. Η επεξεργασία τους έγινε κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειοτρίβησης με  $J = 20\%$  και  $U = 0.5$ . Η παράμετρος που μεταβαλλόταν ήταν η διάμετρος των σφαιρών (12.7, 25.4, 40mm).

Αρχικά, από τα διαγράμματα του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος για κάθε διάμετρο σφαίρας, προέκυψε ότι για χονδρότερα κοκκομετρικά κλάσματα περισσότερο αποδοτικές είναι οι σφαίρες μεγάλης διαμέτρου, ενώ για λεπτότερα περισσότερο αποδοτικές είναι οι σφαίρες μικρότερης διαμέτρου.

Από τα διαγράμματα του μεγέθους  $D_{80}$  σε σχέση με τη κατανάλωση ειδικής ενέργειας για κάθε διάμετρο σφαίρας, προέκυψε ότι καθώς αυξάνεται η κατανάλωση της ειδικής ενέργειας τόσο μειώνεται το μέγεθος του υλικού. Επίσης, είδαμε ότι για χονδρότερα κλάσματα τροφοδοσίας το υλικό λειοτριβείται περισσότερο με χρήση σφαιρών μεγάλης διαμέτρου, ενώ για λεπτότερα κλάσματα τροφοδοσίας το μέγεθος ελαττώνεται με χρήση σφαιρών μικρότερης διαμέτρου.

Έπειτα, από τα διαγράμματα του βάρους (%) που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης υπολογίστηκε η τιμή του ειδικού ρυθμού θραύσης  $S_i$  ( $\text{min}^{-1}$ ) για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, μέσω της κλίσης των ευθειών. Στη συνέχεια, η σχέση των ρυθμών θραύσης με το κάθε κοκκομετρικό κλάσμα μέσω της γραφικής παράστασης τους έδειξε ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος του υλικού αυξάνεται και ο ειδικός ρυθμός θραύσης μέχρι ένα σημείο (μέγιστο) και από εκεί και έπειτα αρχίζει να μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι τα μέσα λειοτρίβησης δεν μπορούν να λειοτριβήσουν αποδοτικά το υλικό από ένα μέγεθος και έπειτα.

Με βάση το κινητικό μοντέλο κατά Austin et al., (1984) έγινε προσπάθεια να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\Lambda$ ,  $\mu$ ,  $\alpha_T$ , με τη βοήθεια του προγράμματος solver του excel. Οι τιμές των  $\alpha$  και  $\Lambda$  όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία εξαρτώνται από το υλικό. Για το μάρμαρο η τιμή του  $\alpha$  είναι ίση με 0.90 ενώ για το  $\Lambda=2.84$ . Οι τιμές των  $\alpha_T$  και  $\mu$  εξαρτώνται από τις συνθήκες λειοτρίβησης. Με βάση τις τιμές του κάθε μεγέθους που υπολογίστηκαν έγιναν διαγράμματα αυτών των μεγεθών σε σχέση με τις διαμέτρους σφαιρών. Οι σχέσεις που προέκυψαν περιγράφονται από συναρτήσεις δύναμης με θετική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών  $\mu$  και  $d$  και αρνητική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών  $\alpha_T$  και  $d$ . Επίσης, υπολογίστηκαν οι τιμές  $\mu_0$  και  $\alpha_0$ , καθώς και οι εκθετικοί παράγοντες  $\eta$  και  $\xi$  από τις σχέσεις (19). (20), με  $\mu_0=0.14$ ,  $\eta=0.99$  και  $\alpha_0=2.25$ ,  $\xi=-0.27$ .

Από το διάγραμμα του ειδικού ρυθμού θραύσης σε σχέση με το μέγεθος της τροφής είδαμε ότι ο μέγιστος ρυθμός θραύσης ( $S_m$ ) και το μέγιστο μέγεθος ( $x_m$ ) διαφέρουν ανάλογα με τη διάμετρο. Έτσι έγιναν διαγράμματα του μέγιστου ειδικού ρυθμού θραύσης σε σχέση με τη διάμετρο και του μέγιστου μεγέθους σε σχέση με τη διάμετρο. Από τα διαγράμματα αυτά προέκυψε ότι οι σχέσεις των μεγεθών περιγράφονται από συναρτήσεις δύναμης με θετική συσχέτιση. Συγκεκριμένα, βρέθηκαν οι παράμετροι  $k$ ,  $k'$  και  $A$ ,  $B$  των μεγεθών ( $S_m$ ) και ( $x_m$ ). Οι τιμές τους είναι  $k=0.10$ ,  $k'=0.21$ ,  $A=0.10$ ,  $B=0.62$  για το μάρμαρο.

Από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε η  $k$  θεωρείται σταθερά με τιμές από  $10^{-3}$  έως  $0.7 \cdot 10^{-3}$  καθώς πάμε από μαλακά σε σκληρά υλικά ενώ άλλοι δίνουν τη τιμή του  $k$  ίση με  $0.44 \cdot 10^{-3}$ . Οι τιμές του  $A$  που έχουν βρεθεί για άλλα υλικά είναι για το χαλαζία 0.60, για τον ασβεστόλιθο 0.51, ενώ για τον τάλκη η τιμή είναι 0.48. Ακόμα, γνωρίζουμε ότι οι τιμές του  $k'$  και του  $B$ , διαφέρουν ανάλογα το υλικό. Κάποιες τιμές που έχουν βρεθεί είναι  $k'$  ίση με 0.015 για το χαλαζία και το  $B$  είναι ίσο με 1.21.

Μια καλύτερη σύγκριση θα μπορούσε να γίνει με τα αποτελέσματα της λειοτρίβησης χαλαζίτη όπου έγιναν στον ίδιο εργαστηριακό σφαιρόμυλο με τις ίδιες συνθήκες λειοτρίβησης από παλαιότερη διπλωματική εργασία. Οι τιμές των παραμέτρων  $a$ ,  $\Lambda$  για τον χαλαζίτη είναι 0.84 και 3.15 αντίστοιχα. Οι τιμές των  $k$  και  $k'$  για το ίδιο υλικό είναι 0.17 και 0.32 οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που υπολογίστηκαν για το μάρμαρο. Αυτό οφείλεται στο ότι ο χαλαζίτης έχει μεγαλύτερη σκληρότητα από το μάρμαρο.

Τέλος, από το διάγραμμα τους ειδικού ρυθμού θραύσης σε σχέση με το μέγεθος της διαμέτρου για τα δυο λεπτά κοκκομετρικά κλάσματα τροφοδοσίας ( $-0.850 + 0.600\text{mm}$  και  $-0.425 + 0.300\text{mm}$ ) παρατηρούμε ότι όταν χρησιμοποιήσαμε σφαίρες μικρότερης διαμέτρου αυξανόταν και ο ειδικός ρυθμός θραύσης, γεγονός που επιβεβαιώνει και τη θεωρία.

Μια πρόταση που θα μπορούσε να γίνει για μελλοντική έρευνα είναι να γίνουν λειοτριβήσεις διαφόρων υλικών στον ίδιο εργαστηριακό σφαιρόμυλο, με τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας και να μελετηθεί πώς επηρεάζεται ο ειδικός ρυθμός θραύσης με βάση τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των υλικών. Επίσης μπορεί να γίνει μελέτη στη λειοτρίβηση υλικών με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Δηλαδή, να μεταβάλλονται οι συντελεστές πλήρωσης σφαιρών και υλικού. Σαν τελευταία πρόταση, μπορεί να μελετηθεί ο ειδικός ρυθμός θραύσης για διάφορα υλικά αλλά σε μεγαλύτερους χρόνους λειοτρίβησης. Στην συγκεκριμένη εργασία ο μέγιστος χρόνος λειοτρίβησης ήταν τα 4 λεπτά όπου ο ειδικός ρυθμός θραύσης θεωρούταν σταθερός και ανεξάρτητος του χρόνου

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΛΙΘΟΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ:

- Austin L.G., and Luckie P.T. (1972). *Methods for determination of breakage distribution parameters*. Powder Technology 5: 215 - 222.
- Austin L. G. and Bhatia V. K. (1972). *Experimental methods for grinding studies in laboratory mills*. Powder Technology 5: 261 – 266.
- Austin L.G. and Brame K. (1983). *A comparison of Bond method for sizing wet tumbling mills with a size mass balance simulation model*. Powder Technology 34: 261 – 274.
- Austin L.G., Klimpel R.R., Luckie P.T. (1984). *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*, Society of Mining Engineers of AIME, New York
- Deniz V. (2003). *A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball mill*. Cement and Concrete Research 33: 439 - 445.
- Deniz V. (2012). *The effects of ball filling and ball diameter on kinetic parameters of barite powder*. Powder Technology 23: 640 - 646.
- Choi H., Lee W., Kim S. (2009). *Effect of grinding aids on the kinetic of fine grinding energy consumed of calcite powders by a stirred ball mill*. Powder Technology 20: 350 – 354.
- Katubilwa F. M. (2008). *Effect of ball size distribution on milling parameter*. MSc thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Katubilwa F. M. and Moys M. H. (2009). *Effect of ball size distribution on milling rate*. Minerals Engineering 22: 1283 - 1288.
- Katubilwa F. M., Moys M. H., Glasser D., Hildebrandt (2011). *An attainable region analysis of the effect of ball size on milling*. Powder Technology 210: 36 – 46.
- Kelly E.G. and Spottiswood D.J. (1982). *Introduction to Mineral Processing*, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-033790, USA
- King R. P. (2001). *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, USA
- Kotake N., Suzuki K., Asahi S., Kanda Y. (2002). *Experimental study on the grinding rate constant of solid materials in a ball mill*. Powder Technology 122: 101 - 108
- 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
- Napier – Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T. (1996). *Mineral Comminution Circuits. Their Operation and Optimization*, JKMRRC, Queensland, Australia.
- Petrakis E., Stamboliadis E., Komnitsas K. (2016). *Identification of Optimal Mill Operating Parameters during Grinding of Quartz with the Use of Population Balance Modeling*. KONA Powder and Particle Journal. DOI: 10.14356/kona.2017007.
- Wills B.A., Napier – Munn T.J. (2006). *Mineral Processing Technology*. Elsevier Science & Technology Books, ISBN 0750644508.

#### ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ:

- Θεοδωρίκας, Σ. (2010). *Ορυκτολογία – Πετρολογία*. Εκδόσεις Ερώδιος, Θεσσαλονίκη.
- Καρμάλη Δ.Β. (2015). *Βελτιστοποίηση λειοτρίβησης χαλαζίτη σε σφαιρόμυλο*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κομνίτσας Κ. (2015). *Βιομηχανική Οικολογία*, Σημειώσεις του μαθήματος. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Μισοπολινός Δ.Ν. (1990). *Γεωλογία – Πετρογραφία*. Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη
- Μουντράκης, Δ. (2010), *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας*. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Σταμπολιάδης, Η. (2008). *Μηχανική των τεμαχιδίων*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

#### ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- <http://www.e-marmara.gr/blog/102735.Oi-chriseis-tou-marmarou-kai-tis-fysikis-petras.html> (28/09/2016)