



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ
ΠΟΡΩΝ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗΣ ΧΑΛΑΖΙΤΗ ΣΕ ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟ

Διπλωματική Εργασία

Βασιλική Δ. Καρμάλη

Εξεταστική Επιτροπή:

Κομνίτσας Κων/νος, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Γαλετάκης Μιχαήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής
Αλεβίζος Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κ. Κομνίτσα. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη βελτιστοποίησης της διαδικασίας λειοτρίβησης χαλαζίτη σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο.

Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος είναι ότι για πολλά χρόνια, η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους των υλικών (ιδιαίτερα κατά το στάδιο της λειοτρίβησης σε μύλους) αποτελεί αντικείμενο μελέτης και έρευνας από πολλούς ερευνητές. Αυτό συμβαίνει, λόγω της μη αποδοτικότητας της διαδικασίας λειοτρίβησης αλλά κι από το γεγονός ότι η κατανάλωση της ενέργειας επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Κομνίτσα Κωνσταντίνο για την εμπιστοσύνη και την ανάθεση της παρούσας εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Μιχαήλ Γαλετάκη και τον επίκουρο καθηγητή κ. Γεώργιο Αλεβίζο, μέλη της τριμελούς επιτροπής, για την αποδοχή τους να αξιολογήσουν την παρούσα εργασία.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Πετράκη Ευάγγελο κυρίως για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, την πολύτιμη βοήθειά του που μου παρείχε πάντοτε καθώς και την κατανόησή του και την άριστη συνεργασία.

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

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στήριξε και με στηρίζει πάντα καθώς και τους φίλους μου για τα υπέροχα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γνωστό ότι η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων ενός υλικού, ιδιαίτερα κατά το στάδιο της λειοτρίβησης, είναι μια διαδικασία κατανάλωσης ενέργειας χαμηλής απόδοσης. Η ειδική ενέργεια που απαιτείται για τη μείωση του μεγέθους του υλικού επηρεάζεται από μεγάλο αριθμό παραγόντων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά το στάδιο της λειοτρίβησης αποτελεί αντικείμενο έρευνας, λόγω της σημαντικότητας και πολυπλοκότητας που παρουσιάζει. Επομένως, κάθε προσπάθεια μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας ενός υλικού θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους ανά μονάδα βάρους του υλικού.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η βελτιστοποίηση της λειοτρίβησης χαλαζίτη σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο. Ειδικότερα, μελετήθηκε η κατανάλωση της ενέργειας και πώς αυτή επηρεάζεται με το μέγεθος της τροφοδοσίας και το μέγεθος των μέσων λειοτρίβησης (σφαίρες). Επίσης, μελετήθηκε ο ρυθμός θραύσης (min^{-1}) κάθε τάξης μεγέθους και η επίδραση του μεγέθους των σφαιρών σε αυτόν.

Αρχικά, προετοιμάστηκαν 5 στενά κοκκομετρικά κλάσματα τροφοδοσίας με λόγο $\sqrt{2}$. Σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα πραγματοποιήθηκαν 4 σειρές δοκιμών, όπου σε κάθε σειρά η παράμετρος η οποία μεταβαλλόταν ήταν το μέγεθος των σφαιρών. Για κάθε μέγεθος σφαιρών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λειοτρίβησης για διάφορες τιμές της ειδικής ενέργειας.

Από τα διαγράμματα του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος και για κάθε μέγεθος σφαίρας, προέκυψε ότι όσο μεγαλώνει η ειδική ενέργεια λειοτρίβησης τόσο οι καμπύλες μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη. Για κάθε τιμή της ειδικής ενέργειας υπολογίστηκε, με βάση τα διαγράμματα αυτά, το μέγεθος όπου διέρχεται το 80% του υλικού (D_{80}) και για κάθε διάμετρο σφαίρας. Από τις γραφικές παραστάσεις της ειδικής ενέργειας με το μέγεθος (D_{80}), προέκυψε ότι για συγκεκριμένη τιμή της ειδικής ενέργειας, όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες μεγάλου μεγέθους στα χονδρότερα κλάσματα το μέγεθος που διέρχεται το 80% του υλικού μικραίνει, ενώ στα λεπτότερα κλάσματα συμβαίνει το αντίθετο. Δηλαδή, οι μεγάλοι μεγέθους σφαίρες θραύουν πιο αποδοτικά τα χονδρότερα κλάσματα, ενώ στα λεπτότερα μεγέθη είναι πιο αποδοτικές οι σφαίρες μικρότερου μεγέθους. Για τη μελέτη του ρυθμού θραύσης κάθε υλικού τροφοδοσίας σε σχέση με το μέγεθος των σφαιρών δημιουργήθηκαν διαγράμματα του παραμένοντος βάρους (%) σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης. Σε όλα τα διαγράμματα η σχέση ήταν γραμμική, η κλίση της οποίας μας έδινε το ρυθμό θραύσης (min^{-1}). Με βάση το μοντέλο κατά Austin et al. (1984) που συνδέει το ρυθμό θραύσης σε συνάρτηση με το μέγεθος τροφοδοσίας πραγματοποιήθηκε επίλυση (με χρήση εργαλείου του excel) με σκοπό να προσδιοριστούν συγκεκριμένες παράμετροι, όπως ορίζονται από τη βιβλιογραφία. Για την επίλυση αναζητήθηκαν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν το σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών και του μοντέλου. Από τα αποτελέσματα προέκυψαν χρήσιμες σχέσεις που συνδέουν τις παραμέτρους αυτές με το μέγεθος των σφαιρών και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες της βιβλιογραφίας.

Τέλος, από τη μελέτη της σχέσης του ρυθμού θραύσης με το μέγεθος τροφοδοσίας προέκυψε ότι ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος μέχρι μια μέγιστη τιμή (S_m) η οποία αντιστοιχεί σε ένα μέγιστο μέγεθος (x_m), ενώ πέρα από αυτό το σημείο ο ρυθμός θραύσης μειώνεται. Δημιουργήθηκαν αντίστοιχες σχέσεις (S_m) και (x_m) με το μέγεθος των σφαιρών, οι οποίες προτείνονται για το συγκεκριμένο υλικό που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας περιεχομένων:

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντικείμενο Εργασίας.....	1
1.2 Περιγραφή Υλικού – Χαλαζίτης	2
1.3 Χρήσεις Χαλαζίτη	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	3
2.1 Κατάτμηση	3
2.1.1 Δυνάμεις Κατάτμησης.....	3
2.1.2. Μηχανές Κατάτμησης	4
2.1.2.1 Μηχανές Θραύσης.....	4
2.1.2.2 Μηχανές Λειοτρίβησης	5
2.2 Κινητικά Μοντέλα	10
2.2.1 Ειδικός Ρυθμός Θραύσης (Specific rate of breakage)	10
2.2.2 Μοντέλο Ισοζυγίου Πληθυσμού (PBM)	11
2.2.3 Συνάρτηση Θραύσης (Breakage function)	13
2.3 Επίδραση μεγέθους Σφαίρας (Effect of ball size).....	15
2.3.1 Μέγεθος σφαιρών και ρυθμός θραύσης	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	20
3.1 Προέλευση Δείγματος – Περιοχή Δειγματοληψίας	20
3.2 Ορυκτολογική Ανάλυση με Περιθλασίμετρο Ακτινών – X (XRD).....	20
3.2.1 Παρατηρήσεις λεπτών και στιλπνών τομών με χρήση μικροσκοπίου διερχομένου και ανακλωμένου φωτός.....	22
3.3 Χημική Ανάλυση με XRF	23

3.4 Πυκνότητα – Πορώδες	24
3.4.1 Μέθοδος Προσδιορισμού πυκνότητας και πορώδους	25
3.5 Περιγραφή Εξοπλισμού	27
3.5.1 Εργαστηριακός Σπαστήρας με σιαγόνες.....	27
3.5.2 Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος.....	28
3.5.3 Συσκευή Κοσκίνισης	28
3.6 Πειραματική Διαδικασία.....	29
3.6.1 Διαδικασία θραύσης	29
3.6.2 Διαδικασία Λειοτρίβησης.....	30
3.6.3 Διαδικασία Κοσκίνισης	32
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑΤΩΝ	34
4.1 Αθροιστικό διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει μεγέθους.....	34
4.2 Επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών	49
4.3 Ειδική ενέργεια συναρτήσει D_{80}	59
4.4 Ρυθμός Θραύσης συναρτήσει χρόνου	64
4.5 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας	70
4.6 Σχέση μεγέθους και ρυθμού θραύσης με τη διάμετρο των σφαιρών	72
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	79
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Κατάτμηση καλείται η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους των τεμαχιδίων, των πετρωμάτων και των βιομηχανικών ορυκτών. Πραγματοποιείται με την εφαρμογή μηχανικών δυνάμεων στα στερεά τεμαχίδια, με αποτέλεσμα τη διάσπαση της συνοχής τους και την παραγωγή νέων τεμαχίων με μικρότερο μέγεθος. Τα μικρότερα τεμαχίδια τα οποία παράγονται μπορεί να είναι επιθυμητά εξαιτίας της μεγάλης ειδικής επιφάνειάς τους, του σχήματος, του μεγέθους ή του αριθμού τους. Η ελάττωση του μεγέθους αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο της επεξεργασίας των υλικών σε αρκετές βιομηχανίες όπως στη βιομηχανία τσιμέντου, κεραμικών, χημικής και μεταλλευτικής βιομηχανίας και επιτυγχάνεται συνήθως σε διάφορα στάδια ξεκινώντας από τη θραύση και καταλήγοντας στη λειοτρίβηση με χρήση μύλων λειοτρίβησης.

Όμως, η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων αποτελεί μια εξαιρετικά ενεργοβόρα διαδικασία ιδιαίτερα κατά το στάδιο της λειοτρίβησης. Έχει αποδειχθεί για παράδειγμα, ότι σε ένα σφαιρόμυλο το ποσοστό ενέργειας που είναι διαθέσιμο για την ελάττωση του μεγέθους του υλικού είναι μικρότερο από το 1% της συνολικής παρεχόμενης ενέργειας, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό καταναλώνεται στην παραγωγή θερμότητας. Συνεπώς, η κατανόηση της διαδικασίας λειοτρίβησης μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της χρήσης της διαθέσιμης ενέργειας. Για να γίνει αυτό, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της λειοτρίβησης, όπως η επίδραση των μέσων λειοτρίβησης, η ειδική ενέργεια κατανάλωσης στο μύλο κτλ., θα πρέπει να μελετηθούν.

Τα τελευταία χρόνια πολλές μελέτες έχουν γίνει σχετικά με τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε μύλους λειοτρίβησης χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό κινητικό μοντέλο το οποίο προέρχεται από εκτιμήσεις του ισοζυγίου πληθυσμού. Αυτό το κινητικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό θραύσης κάθε κατηγορίας μεγέθους καθώς και τη μάζα του υλικού που παράχθηκε κάτω από ένα μέγεθος (αθροιστική συνάρτηση θραύσης). Ο ρυθμός θραύσης καθώς και η αθροιστική συνάρτηση θραύσης επηρεάζονται από τις διαφορετικές συνθήκες λειοτρίβησης, ενώ πλήθος μελετών έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια ως προς τις βέλτιστες συνθήκες που πρέπει να επικρατούν στη διαδικασία της λειοτρίβησης.

Η παρούσα εργασία μελετά τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας λειοτρίβησης χαλαζίτη σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο. Για το σκοπό αυτό μελετάται η ενέργεια η οποία καταναλώνεται για τη λειοτρίβηση του υλικού σε συνάρτηση με το μέγεθος του προϊόντος καθώς και ο ρυθμός θραύσης του υλικού εφαρμόζοντας το κινητικό μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού. Οι παράγοντες οι οποίοι εξετάζονται είναι το μέγεθος της αρχικής τροφοδοσίας καθώς το μέγεθος των σφαιρών που χρησιμοποιούνται στο σφαιρόμυλο.

1.2 Περιγραφή Υλικού – Χαλαζίτης

Ο **χαλαζίτης** (quartzite) είναι πέτρωμα περιοχικής μεταμόρφωσης. Προέρχεται από ψαμμιτικά ή αδρόκοκκα κλαστικά ιζήματα, χαλαζιούχους φλεβικούς σχηματισμούς, τοφφίτες, πυριτιόλιθους, όξινους ηφαιστίτες.

Το σημαντικότερο ορυκτό συστατικό είναι ο χαλαζίας, ενώ απαντούν σε μικρές αναλογίες άστριοι, χλωρίτης, μαρμαρυγίες, ανδαλουσίτης, σιλλιμανίτης, επίδοτο, κυανίτης, γρανάτης, κ.α. Ο ιστός του είναι γρανοβλαστικός ή βλαστοψαμμιτικός. Το χρώμα του είναι τεφρό, τεφρόλευκο, τεφροκύανο, καστανότεφρο, τεφροπράσινο, μαύρο, λευκορόδινο (Θεωδορίκας, 2010).

1.3 Χρήσεις Χαλαζίτη

Οι χαλαζίτες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πυριμάχων, ενώ λιγότερο καθαροί χαλαζίτες χρησιμοποιούνται στην οδοποιία, καθώς και για την παραγωγή πυρίμαχων τσιμεντόλιθων (Κωστάκης, 2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Κατάτμηση

Με τον όρο κατάτμηση εννοούμε τη διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους των τεμαχιδίων των πετρωμάτων και βιομηχανικών ορυκτών σε μεγέθη κατάλληλα για τον εμπλουτισμό, την επεξεργασία και χρήση του υλικού. Η κατάτμηση περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ελάττωσης των μεγεθών (θραύση, λειοτρίβηση) ανεξάρτητα από το αρχικό και τελικό μέγεθος των τεμαχιδίων.

Η ελάττωση του μεγέθους δε γίνεται συνήθως σε ένα στάδιο, αλλά σε περισσότερα. Τα στάδια της κατάτμησης από το αρχικό μέγεθος μέχρι περίπου 10 mm έως 2 mm τα ονομάζουμε θραύση, ενώ για πιο λεπτόκοκκα προϊόντα η διαδικασία ονομάζεται λειοτρίβηση ή άλεση. Στον παρακάτω πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα συνήθη στάδια της κατάτμησης.

Πίνακας 2.1: Στάδια κατάτμησης, Μεγέθη τεμαχιδίων τροφοδοσίας και προϊόντων.

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

Η θεωρία της κατάτμησης αναφέρεται στη σχέση μεταξύ της παρεχόμενης ενέργειας και του μεγέθους των τεμαχιδίων του προϊόντος λειοτρίβησης. Πολλές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί αλλά καμία από αυτές δεν είναι πλήρως ικανοποιητική. Αυτό συμβαίνει, διότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που παρέχεται σε μια μηχανή κατάτμησης ή λειοτρίβησης, καταναλώνεται από το ίδιο το μηχάνημα και μόνο ένα μικρό ποσοστό είναι διαθέσιμο για τη θραύση του υλικού (Σταμπολιάδης, 2008).

2.1.1 Δυνάμεις Κατάτμησης

Στην κατάτμηση τα τεμαχίδια των υλικών υποβάλλονται σε θραύση με εφαρμογή δυνάμεων που παράγουν τάσεις μεγαλύτερες από το όριο αντοχής του υλικού. Έτσι,

επιτυγχάνεται η θραύση τους σε περισσότερα (μικρότερα) τεμαχίδια. Τα περισσότερα από τα μεταλλεύματα, τα πετρώματα και τα βιομηχανικά ορυκτά, κάτω από συνήθεις συνθήκες κατάρτησης, συμπεριφέρονται ως ψαθυρά υλικά, δηλαδή θραύονται χωρίς να παρουσιάσουν σημαντική παραμόρφωση πριν από τη θραύση τους. Οι κυριότερες κατηγορίες δυνάμεων που εξασκούν οι μηχανές κατάρτησης είναι οι εξής:

- **Θλίψη**: είναι η συνηθέστερη μορφή δύναμης που χρησιμοποιείται στην κατάρτηση και εφαρμόζεται με συμπίεση των σωμάτων μεταξύ δύο επιφανειών. Η πίεση εξασκείται από τη μια επιφάνεια ενώ η άλλη μένει ακίνητη. Οι κυριότεροι τύποι μηχανών κατάρτησης με θλίψη είναι οι σιαγωνοτοί, οι γυροσκοπικοί και οι κωνικοί σπαστήρες.
- **Κρούση**: είναι η απλούστερη δύναμη κατάρτησης και εξασκείται με την απότομη πρόσκρουση τεμαχιδίου κινούμενο στην επιφάνεια ή αντιστρόφως, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του τεμαχιδίου. Οι κυριότερες μηχανές κατάρτησης με κρούση είναι οι κρουστικοί περιστροφικοί σπαστήρες και εν μέρει οι σφυρόμυλοι, οι ραβδόμυλοι, οι σφαιρόμυλοι και οι μύλοι αυτογενούς λειοτρίβησης.
- **Τριβή**: είναι η δύναμη κατάρτησης που εφαρμόζεται όταν το υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων και αντίθετα κινούμενων επιφανειών που δημιουργούν διατμητικές τάσεις μέσα στο σώμα και ολίσθηση σε εσωτερικές επιφάνειες του σώματος. Ο σφυρόμυλος θεωρείται ως η κυριότερη μηχανή κατάρτησης με τριβή. Άλλες τέτοιες μηχανές είναι οι σφαιρόμυλοι και οι ραβδόμυλοι.
- **Διάττηση**: είναι κυρίως εφελκυστική δύναμη και έχει περιορισμένη εφαρμογή στην κατάρτηση και εν μέρει παρατηρείται στους σφυρόμυλους και τους οδοντωτούς κυλινδρόμυλους.

2.1.2. Μηχανές Κατάρτησης

Η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων επιτυγχάνεται με τις μηχανές κατάρτησης. Οι μηχανές κατάρτησης χωρίζονται στις μηχανές θραύσης και στις μηχανές λειοτρίβησης.

2.1.2.1 Μηχανές Θραύσης

Οι μηχανές θραύσης είναι οι εξής :

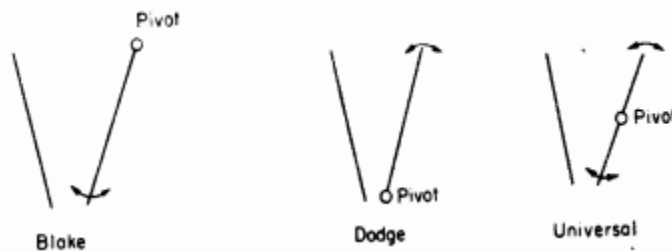
- Σιαγωνοτοί Σπαστήρες
- Γυροσκοπικός Σπαστήρας
- Κωνικός Σπαστήρας
- Σπαστήρας γυροσκοπικού δίσκου
- Σφυρόμυλος
- Κρουστικός Σπαστήρας

- Κυλινδρόμυλος
- Φυγόκεντρος Σπαστήρας

Στην παρούσα εργασία για τις ανάγκες θραύσης του υλικού χρησιμοποιήθηκε ο σιαγωνοτός σπαστήρας.

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

Τέλος, υπάρχουν διάφοροι τύποι σιαγωνοτών σπαστήρων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.

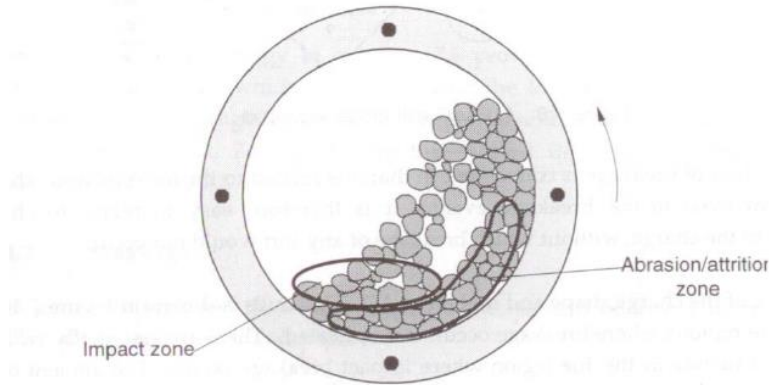


Εικόνα 2.1: Τύποι σιαγωνοτών σπαστήρων (Πηγή: Σταμπολιάδης, 2008).

2.1.2.2 Μηχανές Λειοτρίβησης

Η λειοτρίβηση διενεργείται με μηχανήματα, όπως είναι ο σφαιρόμυλος και ο ραβδόμυλος, οι οποίοι στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Δηλαδή, λειοτριβούν το μέταλλευμα με πτώση και κύλιση των μέσων λειοτρίβησης που περιέχουν. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό κέλυφος που στηρίζεται στα δύο άκρα και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Μέσα στο κέλυφος υπάρχει ένα μόνιμο φορτίο από μεταλλικές ράβδους ή σφαίρες ή και κροκάλες, που βρίσκονται σε συνεχή κίνηση λόγω της περιστροφής του κελύφους του μύλου.

Κατά την περιστροφή του μύλου οι μεταλλικές σφαίρες ή τα άλλα μέσα λειοτρίβησης είτε ανυψώνονται, μέχρι που πολλές από αυτές αρχίζουν να κυλούνται πάνω στις άλλες, είτε ανυψώνονται περισσότερο μέχρι του σημείου που πέφτουν ελεύθερα προς τα κάτω και κατακρημνίζονται ακολουθώντας μια παραβολική τροχιά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Μηχανισμός Λειοτρίβησης (Πηγή: Napier-Munn et al., 1996).

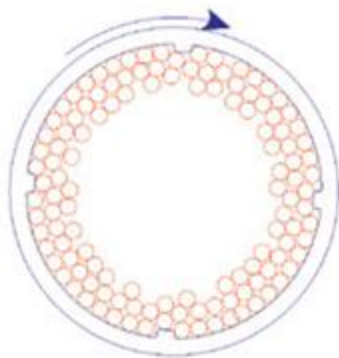
Η πτώση και το κατρακύλισμα των σφαιρών λειοτριβεί το μετάλλευμα που συνυπάρχει μ' αυτές μέσα στο μύλο. Οι κυριότερες δυνάμεις που ασκούνται στους κόκκους του μεταλλεύματος είναι οι δυνάμεις κρούσης, λόγω της ελεύθερης πτώσης των σφαιρών και οι δυνάμεις τριβής, λόγω της κύλισης των σφαιρών μεταξύ τους. 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 με διεύθυνση που περνάει από το κέντρο του τυμπάνου και της σφαίρας και φορά προς τα έξω. Το υψηλότερο σημείο που μπορεί να φτάσει μια σφαίρα κατά την περιστροφή του μύλου είναι η κορυφή του κελύφους. Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα περιστροφής ονομάζεται **κρίσιμη συχνότητα περιστροφής** N_c , διότι το κέλυφος περιστρέφεται με συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση με αυτή και τότε η σφαίρα δεν πέφτει και παραμένει συνεχώς κολλημένη στο κέλυφος, οπότε δε γίνεται λειοτρίβηση στο μύλο (Εικόνα 2.3). Συνήθως, οι μύλοι γυρίζουν με συχνότητα 60% – 80% της N_c .

Η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής N_c υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (1):

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

όπου, D είναι η διάμετρος του κελύφους σε m.

Σε μικρές συχνότητες περιστροφής δεν έχουμε ελεύθερη πτώση των σφαιρών του μύλου και απλά κυλινδρουν η μία πάνω στην άλλη. Η κίνηση αυτή δεν είναι αποδοτική και δημιουργεί πολλά ψιλά. Σε κανονική λειτουργία του μύλου υπάρχει πτώση των μέσων λειοτρίβησης που δημιουργεί κρούσεις και κατάτμηση του μεταλλεύματος. Σε μεγάλες συχνότητες, οι σφαίρες δεν πέφτουν επάνω στο φορτίο του μύλου αλλά στο απέναντι κέλυφος το οποίο και φθείρουν.



Εικόνα 2.3: Κίνηση σφαιρών όταν η συχνότητα περιστροφής είναι ίση με την κρίσιμη συχνότητα περιστροφής N_c (Πηγή: www.pauloabbe.com).

Εκτός από την κρίσιμη συχνότητα περιστροφής του μύλου N_c , υπάρχουν κι άλλες παράμετροι, όπως τα χαρακτηριστικά του μύλου, τα μέσα λειοτρίβησης, η ποσότητα του υλικού στο μύλο καθώς και η πλήρωση των κενών των μέσων λειοτρίβησης με υλικό.

Οι παράμετροι που περιγράφουν τον όγκο των μέσων λειοτρίβησης J , την ποσότητα του υλικού f_c σε σχέση με το διαθέσιμο όγκο του μύλου καθώς και ο συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό δίδονται από τις εξισώσεις (2), (3) και (4) αντίστοιχα.

Το J είναι ο συντελεστής πλήρωσης σφαιρών, δηλαδή είναι το κλάσμα του μύλου το οποίο έχει πληρωθεί από σφαίρες και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση (2):

$$J = \left(\frac{\text{μάζα σφαιρών} / \text{πυκνότητα σφαιρών}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \cdot \frac{1}{1-0.4} \quad (\%) \quad (2)$$

Το f_c είναι ο συντελεστής πλήρωσης του υλικού στο μύλο και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση (3):

$$f_c = \left(\frac{\text{μάζα υλικού} / \text{πυκνότητα υλικού}}{\text{όγκος μύλου}} \right) \cdot \frac{1}{1-0.4} \quad (3)$$

Όμως, για μετατρέψουμε το βάρος των σφαιρών σε όγκο είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την πυκνότητα σφαιρών. Το πορώδες στρώματος σφαιρών διαφέρει ελαφρώς ανάλογα με το μέγεθος των σφαιρών, την πλήρωση του υλικού κτλ, αλλά συνήθως ορίζεται σαν μια σταθερά. Οι Austin et al. (1984) έχουν προτείνει μια τυπική τιμή του πορώδους 0.4 ή 40%.

Στις βιομηχανίες είναι δύσκολο να μετρηθεί το πορώδες, γι' αυτό χρησιμοποιείται μια τυπική τιμή του πορώδους για να είναι εφικτή η σύγκριση τόσο στη βιομηχανία όσο και σε ερευνητικό επίπεδο.

Το U είναι ο συντελεστής πλήρωσης των κενών των σφαιρών με υλικό και εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση (4):

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

Από την παραπάνω σχέση (4) παρατηρούμε ότι το U εξαρτάται από το συντελεστή πλήρωσης του υλικού, το συντελεστή πλήρωσης κενών καθώς και το πορώδες στρώματος των σφαιρών.

Τέλος, οι παράμετροι που εξαρτώνται από το μύλο είναι η καθαρή ισχύς του μύλου (P) και η ενέργεια που καταναλώνεται από το μύλο (E) οι οποίες δίδονται από τις εξισώσεις (5) και (6).

Η καθαρή ισχύς του μύλου (P) μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση (5) (Σταμπολτζής, 1990):

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

όπου,

W : βάρος του φορτίου σε kg.

N : συχνότητα περιστροφής του μύλου σε rpm.

D : διάμετρος του μύλου σε m.

Η ενέργεια (E) που καταναλώνεται υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (6):

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

όπου,

P : η ισχύς του σφαιρόμυλου σε kW.

t : ο χρόνος λειοτρίβησης σε s.

Όπως φαίνεται από τη σχέση (6) η ενέργεια (E) είναι ανάλογη του χρόνου κι αν τη διαιρέσουμε με τη μάζα του υλικού δίνει την ειδική ενέργεια κατανάλωσης στο μύλο. Επομένως, η σχέση (6) γίνεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{P \cdot t}{M} \text{ (kJ/kg)} \quad (7)$$

όπου,

P: ισχύς του σφαιρόμυλου σε kW.

t: ο χρόνος λειοτρίβησης σε s.

M: η τροφή στο μύλο σε kg.

Τέλος, αν διαιρέσουμε τη σχέση (7) με το 3.6 τότε η ειδική ενέργεια (ϵ , kJ/kg) μετατρέπεται σε kWh/t.

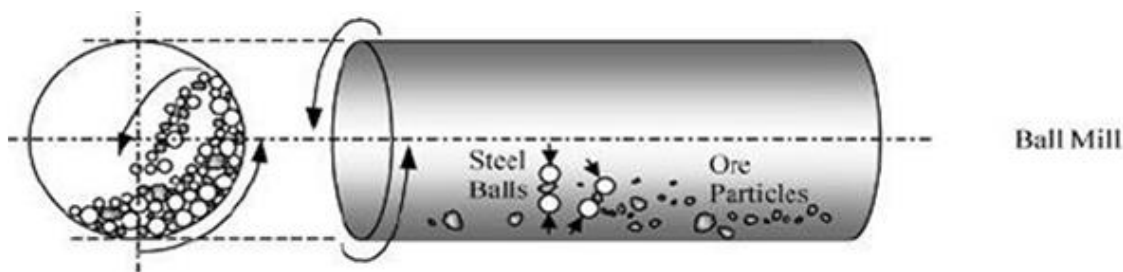
Γενικά υπάρχουν διάφορες μηχανές λειοτρίβησης, όπως:

- Ραβδόμυλοι
- Σφαιρόμυλοι
- Κωνικοί Σφαιρόμυλοι
- Μύλοι Αυτογενούς Λειοτρίβησης
- Μύλοι Κροκάλων
- Περιστρεφόμενος Σπαστήρας Γαιανθράκων
- Δονούμενος Μύλος

Ειδικά στο σφαιρόμυλο το φορτίο αποτελείται από σφαίρες διαφόρων μεγεθών κυρίως - 100 mm και σπανίως φθάνουν τα 150 mm για σκληρά υλικά και μεγάλα μεγέθη τροφοδοσίας. Η δράση της κατάτμησης στο σφαιρόμυλο εξαρτάται από την ειδική επιφάνεια του φορτίου. Η επιφάνεια αυτή είναι μεγαλύτερη για σφαίρες μικρής διαμέτρου αλλά πρέπει να υπάρχουν και μεγάλες σφαίρες για τα χονδρά τεμαχίδια. Οι σφαιρόμυλοι δουλεύουν *εν υγρώ* και *εν ξηρώ*.

Με τους σφαιρόμυλους επιτυγχάνεται λεπτομερής λειοτρίβηση σε - 200 μm έως και 70 μm ή και ακόμη μικρότερα μεγέθη, εάν υπάρχει ανάγκη. Η κατανάλωση σφαιρών εξαρτάται από το μέγεθος του τελικού προϊόντος, από τη σκληρότητα του πετρώματος και την ποιότητά τους. Συνήθως, κυμαίνεται μεταξύ 0.1 – 1 kg ανά τόνο μεταλλεύματος. Η τροφοδοσία των σφαιρόμυλων είναι συνήθως μεταξύ 10 mm και 20 mm.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, στο σφαιρόμυλο ασκούνται οι δυνάμεις κρούσης λόγω της ελεύθερης πτώσης των σφαιρών καθώς και οι δυνάμεις τριβής λόγω της κύλισης των σφαιρών μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4: Μηχανισμός Θραύσης του υλικού σε σφαιρόμυλο (
Πηγή: www.technology.infomine.com).

2.2 Κινητικά Μοντέλα

Τα κινητικά μοντέλα ανήκουν στα μοντέλα προσομοίωσης για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας κατάτμησης. Συνήθως, είναι μαθηματικές προσεγγίσεις της διαδικασίας της θραύσης, ώστε να χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά για το σχεδιασμό και τον έλεγχο ολοκλήρωσης της διαδικασίας.

Θεωρητικά έχουν αποδοθεί δύο κύριες κατηγορίες προσομοίωσης μοντέλων, οι εξής:

- Τα μοντέλα πίνακα (Lynch, 1977).
- Τα κινητικά μοντέλα.

Όλα τα μοντέλα προσομοίωσης στηρίζονται στους εξής παράγοντες:

- Πιθανότητα θραύσης τεμαχιδίων.
- Χαρακτηριστικά μεγέθη τεμαχιδίων μετά την ολοκλήρωση της θραύσης.
- Διαφορική κίνηση των τεμαχιδίων εντός ή εκτός συστήματος συνεχούς ή ημισυνεχούς λειοτρίβησης.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με το κινητικό μοντέλο προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα με το **Μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού (Population Balance Model, PBM)**. Τα κινητικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη το ρυθμό θραύσης κάθε τάξης μεγέθους καθώς και τη μάζα του υλικού που παράχθηκε κάτω από ένα μέγεθος (αθροιστική συνάρτηση κ.α.).

2.2.1 Ειδικός Ρυθμός Θραύσης (Specific rate of breakage)

Ένας μύλος λειοτρίβησης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αντιδραστήρας όπου τα αντιδρώντα είναι κόκκοι ορισμένου μεγέθους και τα προϊόντα κόκκοι μικρότερου μεγέθους. Έτσι, αν γνωρίζουμε το ρυθμό θραύσης που παράγει το μέγεθος αυτό όταν θραύεται, μπορούμε να υπολογίσουμε την κοκκομετρική κατανομή που θα υπάρχει στο μύλο σε κάθε χρονική στιγμή. Ως μέγεθος εννοούμε ένα στενό κλάσμα κόκκων που προκύπτει με κοσκίνιση και περιέχεται μεταξύ δυο συνεχόμενων κοσκίνων. Το κλάσμα αυτό των κόκκων το ονομάζουμε τάξη μεγέθους i και περιέχει κόκκους διαμέτρου μεταξύ του ανοίγματος οπών x_i του επάνω κόσκινου και του ανοίγματος οπών x_{i+1} του αμέσως κάτω απ' αυτό κόσκινου. Εάν εισάγουμε υλικό τάξης μεγέθους $i = 1$ μέσα στο μύλο και λειοτριβήσουμε το υλικό για χρονικό διάστημα t , τότε είναι δυνατόν να υπολογίσουμε το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους αυτής. Αν M είναι η μάζα του υλικού στο μύλο και $m_1(t)$ είναι το κλάσμα των κόκκων της τάξης μεγέθους $i = 1$ μετά από χρόνο t , έχει βρεθεί ότι ο ρυθμός θραύσης της τάξης μεγέθους 1 είναι ανάλογος της ποσότητας $m_i(t)$ που έχει το μέγεθος αυτό. Αυτό, μας το δείχνει η ακόλουθη σχέση (8) (Austin and Luckie, 1972; Klimpel, 1997; Deniz, 2013):

$$\frac{d[m_i(t) \cdot M]}{dt} = -S_i m_i(t) \cdot M \quad (8)$$

Εφόσον, η μάζα του υλικού M μέσα στο μύλο είναι σταθερή τότε η σχέση (8) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

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

όπου,

m_i : το κλάσμα μάζας του υλικού του μεγέθους i μετά τη λειοτριβήση σε χρόνο t .

S_i : ειδικός ρυθμός θραύσης σε min^{-1} .

i : ακέραιος αριθμός.

Επίσης, αν το S_i είναι ανεξάρτητο του χρόνου, με ολοκλήρωση της σχέση (9) προκύπτει η ακόλουθη σχέση (10):

$$\frac{m_i(t)}{m_i(0)} = \exp(-S_i t) \quad (10)$$

Τέλος, λογαριθμίζοντας τη σχέση (9) προκύπτει η ακόλουθη σχέση (11):

$$\log \left[\frac{m_i(t)}{m_i(0)} \right] = \frac{-S_i t}{2.3} \quad (11)$$

Η σχέση (11) δείχνει ότι σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα του βάρους που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους i σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβήσης, η κλίση της ευθείας είναι ο ρυθμός θραύσης (S_i) της τάξης μεγέθους i .

2.2.2 Μοντέλο Ισοζύγιου Πληθυσμού (PBM)

Το μοντέλο ισοζύγιου πληθυσμού αποτελεί ένα πλήρες ισοζύγιο ρυθμού μάζας για κάθε τάξη μεγέθους που συμμετέχει σε ένα μύλο πλήρους ανάμιξης κι έχει σκοπό την εξήγηση του φαινομένου της διαδικασίας λειοτριβήσης. Λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό θραύσης κάθε τάξης μεγέθους και τη μάζα του υλικού που παράχθηκε κάτω από το μέγεθος αυτό. Επίσης, βασίζεται στον πρώτο νόμο τάξης λειοτριβήσης και γι' αυτό πολλές φορές αναφέρεται ως 'μοντέλο πρώτης τάξης' (Napier – Munn et al, 1996). Το 'μοντέλο πρώτης τάξης' εφαρμόζεται σε κάθε

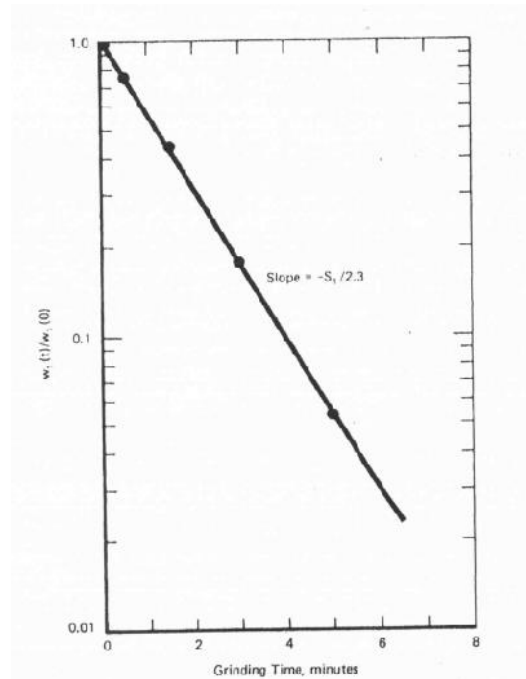
δεδομένη κατάσταση λειοτρίβησης κι όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5 δείχνει ότι ο ρυθμός θραύσης είναι ανεξάρτητος του χρόνου. Μέχρι στιγμής, έχει αποδειχθεί ότι ο νόμος αυτός ισχύει για πολλά υλικά και κυρίως για λεπτά μεγέθη. Επομένως, το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα υλικών (Austin et al,1984; Napier – Munn et al. ,1996).

Για παράδειγμα, σε έναν εργαστηριακό μύλο όπου επέρχεται μείωση του μεγέθους του υλικού που υπάρχει σε αυτόν, έχει βρεθεί ότι η μείωση αυτή επιτυγχάνεται μέσω επαναλαμβανόμενων ενεργειών θραύσης (Austin et al., 1984). Η μοντελοποίηση ενός τέτοιου μηχανισμού απαιτεί λεπτομερή κατανόηση της ίδιας της διαδικασίας θραύσης. Η διαδικασία της θραύσης επιτρέπει το συσχετισμό των λειτουργικών μεταβλητών, των χαρακτηριστικών του μηχανήματος καθώς και το μέγεθος των προϊόντων.

Τα προϊόντα τα οποία παράγονται μετά την πρώτη θραύση αποτελούνται από ένα ευρύ φάσμα μεγεθών των τεμαχιδίων. Μερικά από τα μεγέθη αυτά, μετά την πρώτη θραύση παραμένουν χονδροειδή και απαιτούν περαιτέρω θραύση.

Σύμφωνα με το μοντέλο, ο ρυθμός παραγωγής της τάξης μεγέθους i ισούται με το άθροισμα του ρυθμού εμφάνισης μεγέθους i που παράγεται από τη θραύση μεγαλύτερου μεγέθους j μείον το ρυθμό εξαφάνισης του i σε μικρότερα μεγέθη λόγω θραύσης, όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση (12), (Austin and Bhatia, 1972):

$$\frac{d w_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ i>j}}^{i-1} b_{i,j} S_j w_j(t) \quad n \geq i \geq j \geq 1 \quad (12)$$



Εικόνα 2.5: Μοντέλο πρώτης τάξης (Πηγή: Austin and Bhatia, 1972).

2.2.3 Συνάρτηση Θραύσης (Breakage function)

Η συνάρτηση θραύσης ορίζεται ως η μέση κατανομή μεγέθους που προκύπτει από τη θραύση ενός ενιαίου τεμαχιδίου (Kelly and Spottiswood, 1990). Χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κατανομής του μεγέθους των τεμαχιδίων που παράγονται μετά τη θραύση του υπό εξέταση αρχικού υλικού.

Είναι πλέον κατανοητό, ότι η σχετική κατανομή της κάθε τάξης μεγέθους μετά από θραύση δίνει μια πλήρη περιγραφή του προϊόντος. Μια τέτοια κατανομή είναι στην πραγματικότητα η συνάρτηση θραύσης. Συμβολικά, η πρωταρχική κατανομή συνάρτησης θραύσης μιας τάξης μεγέθους j που θραύεται σε τάξη μεγέθους i ορίζεται από την ακόλουθη σχέση (13):

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

Επίσης, ένας άλλος τρόπος για την περιγραφή της συνάρτησης θραύσης είναι το αθροιστικό κλάσμα βάρους του υλικού μεγέθους j που έσπασε και το οποίο διέρχεται κάτω από το μέγεθος i , όπου $i > j$. Το κλάσμα αυτό ονομάζεται αθροιστική συνάρτηση θραύσης και ορίζεται με την ακόλουθη σχέση (14) (Austin et al., 1984):

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

$$\text{όπου, } b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j}$$

Οι Austin και Bagga (1981), έχουν δείξει ότι οι τιμές του $B_{i,j}$ μπορούν να εκτιμηθούν από την ανάλυση του μεγέθους των προϊόντων για ένα σύντομο χρονικό διάστημα λειοτρίβησης, χρησιμοποιώντας ως αρχική τροφοδοσία μια στενή τάξη μεγέθους τεμαχιδίων j . Για να το δείξουν αυτό, χρησιμοποίησαν την ακόλουθη σχέση (15):

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

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

Η παραπάνω σχέση (15) προϋποθέτει ότι μια μικρή ποσότητα μικρότερων μεγεθών θα χρησιμοποιηθεί για να ξανασπάσει. Από έρευνες που έχουν γίνει παρατηρήθηκε ότι τα σωστά αποτελέσματα λαμβάνονται όταν ο χρόνος της θραύσης έχει επιλεχθεί για να δώσει μια ποσότητα από 20 έως 30% θραυσμένου υλικού κάτω από το μέγεθος j (Austin et al., 1984).

Μια ακόμη εμπειρική σχέση για την αθροιστική συνάρτηση θραύσης, αποτελεί η σχέση (16), (Austin and Luckie, 1972), η οποία περιγράφεται από το άθροισμα δύο ευθειών σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα και είναι η ακόλουθη:

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

όπου,

x_i : είναι το μέγιστο μέγεθος τεμαχιδίου.

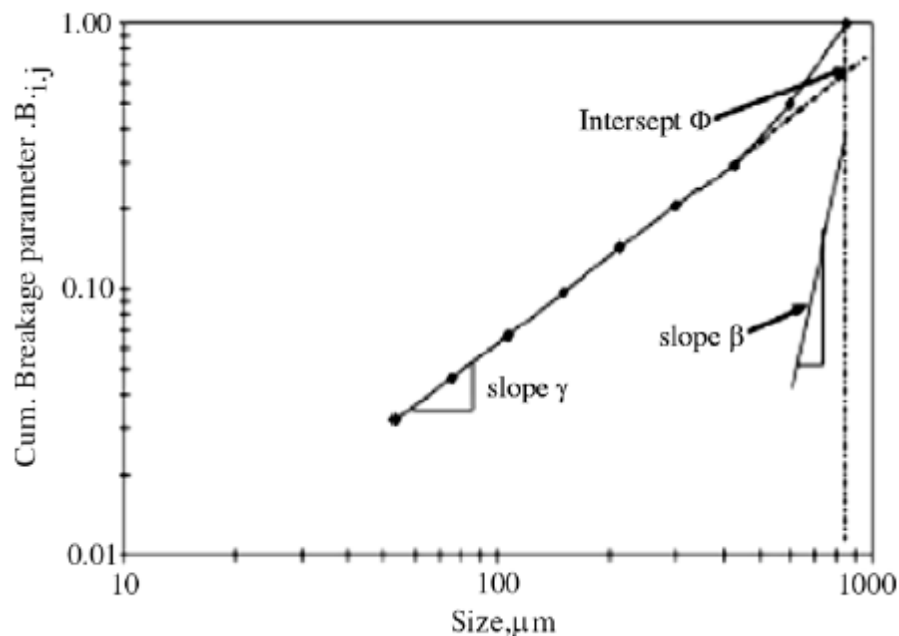
γ : είναι η κλίση του κατώτερου τμήματος ευθείας της καμπύλης.

β : είναι η κλίση του άνω τμήματος.

Φ_j : είναι το σημείο τομής του κατώτερου τμήματος της ευθείας με τον άξονα y , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6.

Επίσης, το γ χαρακτηρίζει τη σχετική ποσότητα των λεπτών που παράχθηκαν από τη θραύση κι ως εκ τούτου έχουν σχέση με την αποδοτικότητα της λειοτρίβησης.

Γενικά, τα Φ_j , γ και β είναι παράμετροι της θραύσης που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού. Τέλος, οι παράμετροι της αθροιστικής συνάρτησης θραύσης προσδιορίζονται από εργαστηριακές δοκιμές που μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν άμεσα και σε μεγαλύτερης κλίμακας λειοτρίβησης (Samanli et al., 2010).



Εικόνα 2.6: Συνάρτηση θραύσης κάτω από ορισμένες συνθήκες φορτίου του μύλου (Πηγή: Samanli et al., 2010).

2.3 Επίδραση μεγέθους Σφαίρας (Effect of ball size)

Από πολλές έρευνες παρατηρήθηκε ότι οι μεγάλες σφαίρες είναι καταλληλότερες για τα μεγάλα τεμαχίδια, ενώ οι μικρές σφαίρες είναι πιο αποτελεσματικές για την λειοτρίβηση των λεπτών τεμαχιδίων. Τα πιο σκληρά και χονδρόκοκκα υλικά απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και μεγάλα μέσα, ενώ τα λεπτά υλικά απαιτούν μεγαλύτερη επιφάνεια λειοτρίβησης και μικρότερα μέσα (Napier – Munn et al., 1996).

Αντικείμενο έρευνας αποτελεί η επιτυχής θραύση και αποδοτικότητα, βρίσκοντας το σωστό μέγεθος των σφαιρών για κάθε τάξη μεγέθους. Μια εμπειρική σχέση, η οποία δείχνει τη σχέση μεταξύ του μέγιστου μεγέθους (x_m) του θραυσμένου τεμαχιδίου και της διαμέτρου της σφαίρας (d) είναι η ακόλουθη (17α):

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

όπου,

k, A : σταθερές.

d : διάμετρος σφαίρας.

Η σχέση (17α) δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της σφαίρας αυξάνεται το μέγεθος όπου έχουμε το μέγιστο ρυθμό θραύσης.

Επίσης, για το μέγιστο μέγεθος (x_m), υπάρχει η αντίστοιχη μέγιστη τιμή του ρυθμού θραύσης (S_m) του θραυσμένου τεμαχιδίου. Η σχέση η οποία δείχνει το μέγιστο ρυθμό θραύσης (S_m) με τη διάμετρο της σφαίρας (d) είναι η ακόλουθη (17β):

$$S_m = k' \cdot d^B \quad (17\beta)$$

όπου,

k' , B : σταθερές.

d : διάμετρος σφαίρας.

Η σχέση (17β) δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της σφαίρας αυξάνεται και ο μέγιστος ρυθμός θραύσης.

Οι Austin et al. (1976) αναφέρουν ότι η σταθερά k παίρνει τιμές μεταξύ $10^{-3} - 0.7 \cdot 10^{-3}$ για μαλακά μέχρι σκληρά υλικά ενώ, οι Napier – Munn et al. (1996) βρήκαν ότι η σταθερά k είναι της τάξης $0.44 \cdot 10^{-3}$.

Επίσης, ο εκθέτης A της σχέσης (17α) ο οποίος έχει προσδιοριστεί από πολλούς ερευνητές και για διάφορα υλικά, έχει βρεθεί ότι συνήθως είναι ίσος με 2. Αυτό, όμως δεν ισχύει για όλα τα υλικά. Πιο συγκεκριμένα, οι Austin et al. (1976) αναφέρουν ότι ο εκθέτης παίρνει τιμή 2. Αντίθετα, οι Kotake et al. (2002) μετά από σειρά δοκιμών σε διάφορα υλικά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές του εκθέτη ανάλογα με το υλικό. Για παράδειγμα, στον ασβεστόλιθο ο εκθέτης παίρνει τιμή 0.51, ενώ στη γύψο 0.60. Σε μια άλλη σειρά δοκιμών οι Kotake et al. (2004) έδειξαν ότι στον τάλκη ο εκθέτης παίρνει τιμή 0.48, ενώ στη γύψο 0.60.

Ο Kotake et al. (2004) μετά από σειρά δοκιμών σε διάφορα υλικά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές της σταθεράς k' και του εκθέτη B ανάλογα με το υλικό. Για παράδειγμα, στο χαλαζίτη η σταθερά k' παίρνει τιμή 0.015 και ο εκθέτης B παίρνει τιμή 1.21. Επίσης, οι ίδιοι βρήκαν ότι για δοκιμές με διάμετρο σφαίρας, $d \leq 20 \text{ mm}$ σε ασβεστόλιθο και σε γύψο οι σταθερές k' παίρνουν τιμές 0.0092 και 0.027 και οι εκθέτες B 1.42 και 1.06 αντίστοιχα. Τέλος, βρήκαν ότι για δοκιμές με διάμετρο σφαίρας, $d \leq 10 \text{ mm}$ σε τάλκη η σταθερά k' παίρνει τιμή 0.082 και ο εκθέτης B 0.89.

2.3.1 Μέγεθος σφαιρών και ρυθμός θραύσης

Σημαντικό είναι να αναφερθεί η σχέση που υπάρχει μεταξύ του ρυθμού θραύσης και του μεγέθους του τεμαχιδίου. Σύμφωνα με τη θεωρία θραύσης του Griffith (Austin et al., 1984), πολύ λεπτά τεμαχίδια είναι δύσκολο να θραυτούν με το ίδιο μέγεθος σφαιρών στο μύλο. Αυτό, υποδηλώνει ότι όσο το μέγεθος των τεμαχιδίων αυξάνεται πρέπει να αυξάνεται συνεχώς και ο ρυθμός θραύσης.

Τα αποτελέσματα διαφόρων εργαστηριακών δοκιμών (Austin et al., 1984) έδειξαν ότι ο ειδικός ρυθμός θραύσης αυξάνεται όσο αυξάνεται και το μέγεθος των τεμαχιδίων αλλά μέχρι ένα σημείο όπου γίνεται μέγιστος και στη συνέχεια μειώνεται. Αυτή τη συμπεριφορά του ειδικού ρυθμού θραύσης τη δείχνει η ακόλουθη σχέση (18):

$$S_i = a_T x_i^a \cdot Q(x_i) = a_T x_i^a \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^A} \right) \quad (18)$$

όπου,

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

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

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

Η παράμετρος a είναι θετικός αριθμός και η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0.5 – 1.5. Αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού και είναι ανεξάρτητη της ταχύτητα περιστροφής, του φορτίο των σφαιρών και του μεγέθους των σφαιρών.

Στο συντελεστή διόρθωσης $Q(x)$, το A είναι ένας θετικός αριθμός. Εκφράζει ένα δείκτη ο οποίος δείχνει κατά πόσο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός θραύσης μετά από το μέγιστο μέγεθος.

Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του A , τόσο πιο γρήγορα μειώνονται οι τιμές. Τέλος, το A αποτελεί κι αυτό μια χαρακτηριστική παράμετρο του υλικού.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στη σχέση (18) στα μεγαλύτερα μεγέθη τροφοδοσίας το $Q(x)$ παίρνει τιμές μικρότερες του 1 και έχουμε ανώμαλη θραύση, διότι τα τεμαχίδια είναι πολύ μεγάλα και τα συγκεκριμένα μέσα λειοτριβήσης, δηλαδή οι σφαίρες, δεν είναι ικανά να θραύσουν αποδοτικά τα τεμαχίδια αυτά. Αντίθετα, στα λεπτότερα μεγέθη, το $Q(x)$ μειώνεται σε περίπου 1 και η σχέση (18) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$S_i = a_T x_i^a \quad (19)$$

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

Μια άλλη θεωρία των Austin et al. (1984) δείχνει ότι ο ρυθμός θραύσης για το ίδιο υλικό μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος της σφαίρας. Μία πιο γενική περιγραφή της επίδρασης του μεγέθους σφαίρας σχετικά με το ρυθμό θραύσης περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\alpha_T = \alpha_o \left(\frac{d_o}{d} \right)^\xi \quad (20)$$

$$\mu = \mu_o \left(\frac{d}{d_o} \right)^\eta \quad (21)$$

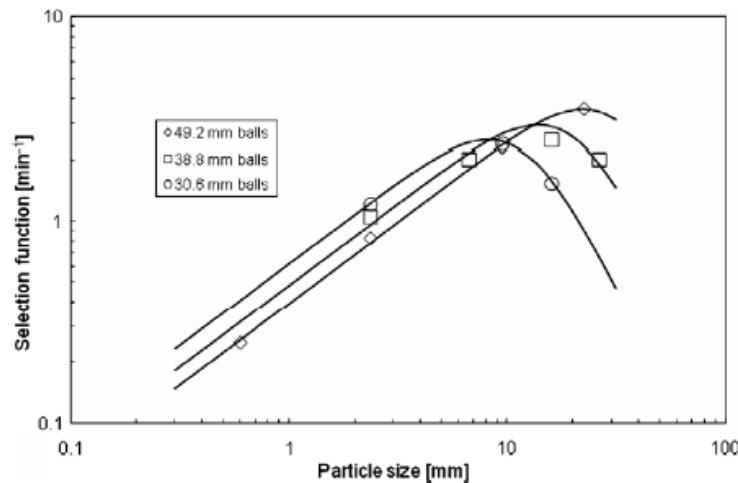
όπου,

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

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

ξ και η : σταθεροί εκθετικοί παράγοντες που αφορούν τη διάμετρο σφαίρας d στις παράμετρους θραύσης α και μ αντίστοιχα.

Οι σχέσεις (18), (20) και (21) περιγράφουν την επίδραση του μεγέθους της σφαίρας σε σχέση με το ρυθμό θραύσης, όπως φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Επίδραση μεγέθους σφαίρας στο ρυθμό θραύσης (Πηγή: Katubilwa and Moys, 2009).

Τέλος, από τις καμπύλες όπου προκύπτουν από τις σχέσεις (18), (20), (21) και φαίνονται στην Εικόνα 2.7, μπορεί να υπολογιστεί το μέγεθος των τεμαχιδίων όπου ο ρυθμός θραύσης παίρνει τη μέγιστη τιμή. Όμως, η μέγιστη τιμή του ρυθμού θραύσης διαφέρει ανάλογα με τη διάμετρο της σφαίρας. Το μέγεθος των τεμαχιδίων δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Austin et al., 1984):

$$x_m = \mu \left(\frac{\alpha}{\Lambda - \alpha} \right)^{1/\Lambda}, \Lambda > \alpha \quad (22)$$

Στην παραπάνω σχέση πρέπει να σημειωθεί ότι το x_m είναι ανάλογο του μ , θεωρώντας ότι το α και το Λ είναι σταθερές για το ίδιο υλικό.

Με παρόμοιο τρόπο και για διαφορετική διάμετρο σφαίρας d , η τιμή του μ^* μετατρέπεται στην ακόλουθη σχέση (Austin et al., 2007):

$$\mu^* = \mu_T \left(\frac{d}{d_T} \right)^n \quad (23)$$

όπου, το d_T είναι η διάμετρος των σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν στο μύλο του εργαστηρίου ενώ d είναι η διάμετρος των σφαιρών των βιομηχανικών μύλων.

Επίσης, ο εκθέτης n της σχέσης (23) έχει προσδιοριστεί από πολλούς ερευνητές. Πιο συγκεκριμένα, οι Kelsall et al. (1968) έδειξαν ότι η τιμή του n κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2 κι εξαρτάται από το υλικό. Οι Austin et al. (1984) και οι Napier – Munn et al. (1996) ανέφεραν ότι η τιμή 2 είναι η καλύτερη επιλογή όσον αφορά τη τιμή του n . Οι Yildirim et al. (1999) βρήκαν ότι η τιμή $n = 2$ είναι λογική για δοκιμές με χαλαζία. Αργότερα, οι Austin et al. (2007) βρήκαν ότι η τιμή $n = 1$ είναι πιο αποδοτική για δοκιμές χαλαζία. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι Katubilwa and Moys (2009) βρήκαν ότι το $n = 2$ είναι λογική τιμή για δοκιμές για άνθρακα της Νότιας Αμερικής που ελέγχθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Προέλευση Δείγματος – Περιοχή Δειγματοληψίας

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο χαλαζίτης που προέρχεται από την Κίσσαμο Χανίων. Η Κίσσαμος βρίσκεται στο βόρειο – δυτικό άκρο της Κρήτης. Η γεωλογική δομή της Κρήτης εξετάζεται ιδιαίτερα γιατί χαρακτηρίζεται από τα αλληπάλληλα επωθημένα τεκτονικά καλύμματα των Ελληνίδων ζωνών τα οποία συνωθούνται στο μικρό σχετικά γεωγραφικό χώρο του νησιού, με γενική κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο. Ο χαλαζίτης της περιοχής Κίσσαμου ανήκει στην ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών.

Σε όλη την έκταση της Κρήτης παρατηρείται μια ενότητα παραμορφωμένων πετρωμάτων που αρχικά θεωρήθηκαν ως το προαλπικό υπόβαθρο της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης, αλλά αργότερα καθιερώθηκαν ως μια ανεξάρτητη Ενότητα «Φυλλιτών – Χαλαζιτών». Η ενότητα αυτή αποτελείται κυρίως από εναλλασσόμενα στρώματα φυλλιτών και χαλαζιτών, αλλά συμμετέχουν και μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, μετακλαστικά ιζήματα (μεταψαμμίτες, μετακροκαλοπαγή), φακοειδείς ενστρώσεις ανακρυσταλλωμένων ασβεστολίθων, καθώς επίσης σε πολλές θέσεις βασικά και όξινα ηφαιστειακά πετρώματα. Έτσι λοιπόν, η ενότητα «Φυλλιτών – Χαλαζιτών» μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεταφλύσχης λόγω των συνεχών εναλλαγών των φυλλιτών και χαλαζιτών που ίσως ήταν παλιές εναλλαγές μαργών και ψαμμιτών (Μουντράκης, 2010).

3.2 Ορυκτολογική Ανάλυση με Περιθλασίμετρο Ακτινών – X (XRD)

Η ορυκτολογική εξέταση των δειγμάτων έγινε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση περιθλασίμετρου ακτινών – X (XRD) τύπου D8 – Advance της Bruker AXS.

Με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτινών – X είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση των γωνιών και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτινών – X που προσπίπτουν πάνω στο παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως.

Το δείγμα που πρόκειται να αναλυθεί βρίσκεται υπό μορφή κόνεως μέσα στην κοιλότητα ενός μεταλλικού ή πλαστικού πλακιδίου. Το βάθος της κοιλότητας αυτής είναι περίπου 1 mm και έχει έκταση μερικών cm², ώστε να μπορεί σε αυτό να φιλοξενηθεί μάζα ίση με 1 g, η οποία κατανέμεται στο δειγματοφορέα με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζει επίπεδη επιφάνεια. (Κωστάκης, 1988).

Το πλακίδιο αυτό τοποθετείται στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου του περιθλασίμετρου, ο οποίος βρίσκεται σε τέτοια θέση, έτσι ώστε να παραμένει πάντα στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτινών – X, και το επίπεδο του δείγματος να είναι πάντα κάθετο προς το επίπεδο του κύκλου. Ταυτόχρονα περιστρέφεται ο απαριθμητής με σταθερή γωνιακή ταχύτητα (2θ/min) και το επίπεδο του δείγματος με τη μισή τιμή της γωνιακής ταχύτητας του απαριθμητή (θ/min). Η ταυτόχρονη μετατόπιση του απαριθμητή και η

περιστροφή του δείγματος έχει σαν αποτέλεσμα ο πρώτος να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος με το σημείο εξόδου των ακτίνων – X της λυχνίας.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η καταγραφή της ακτινοβολίας που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος οι οποίοι βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων – X, που προέρχονται από τη λυχνία.

Το φαινόμενο της περίθλασης των ακτίνων – X διέπεται από το νόμο του Bragg :

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

όπου,

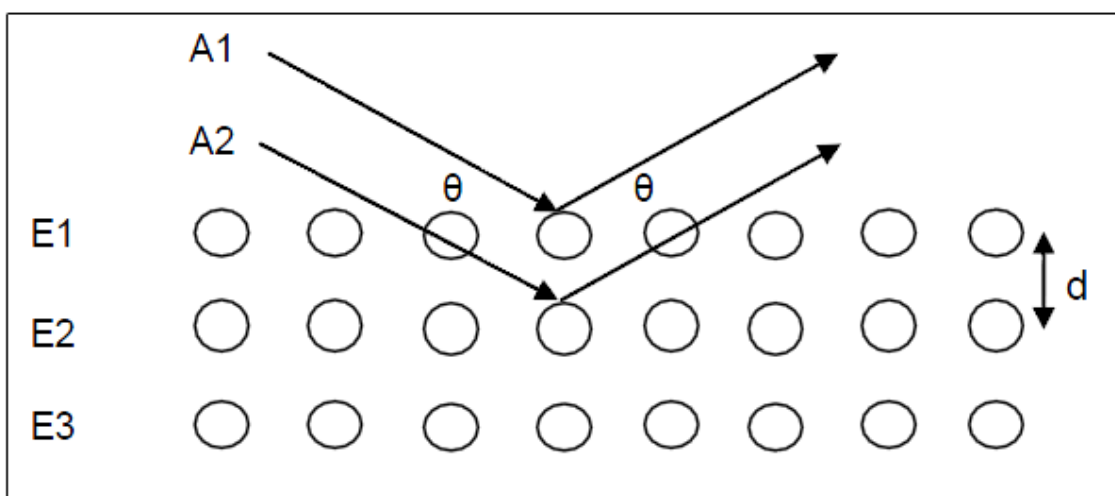
n : τάξη ανάκλασης

λ : μήκος κύματος

θ: γωνία πρόσπτωσης

d : πλεγματική απόσταση των επιπέδων ανάκλασης του κρυστάλλου.

Στην περιθλασιμετρία ακτίνων – X, το ζητούμενο μέγεθος είναι το d, γνωστό μέγεθος το λ και το μετρούμενο μέγεθος το 2θ.

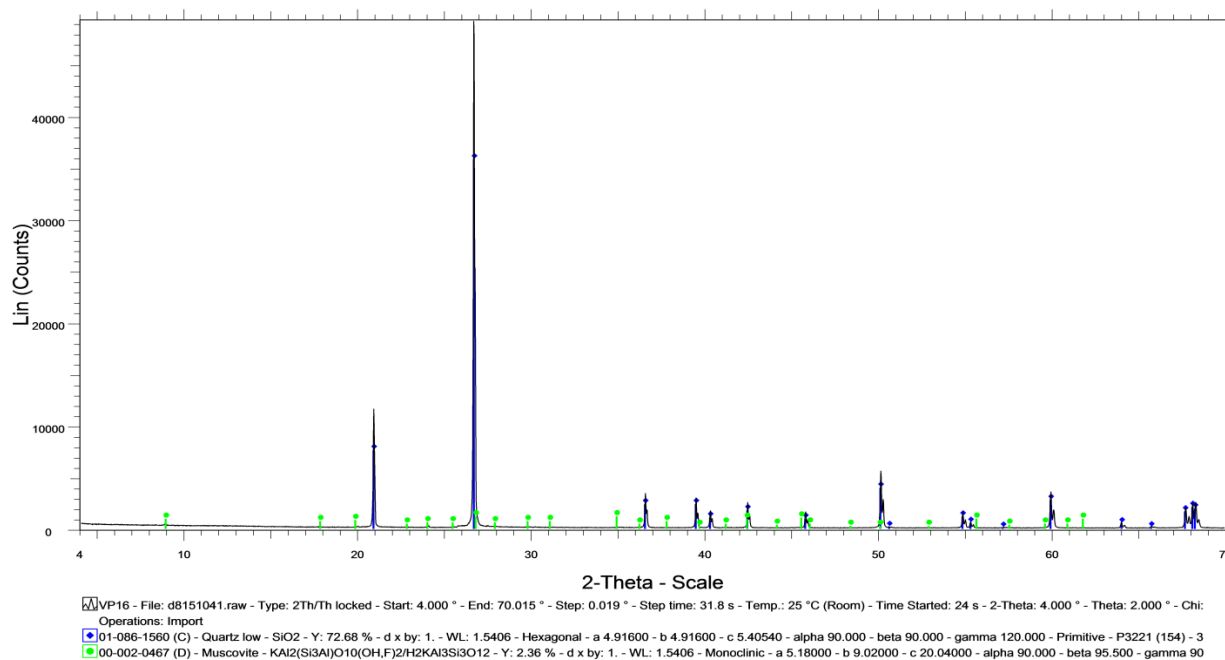


Εικόνα 3.1: Ανάκλαση ακτίνων – X στα πλεγματικά επίπεδα ενός κρυστάλλου.

Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση λυχνίας Cu, φίλτρο νικελίου, τάση λυχνίας U = 35KV και ένταση ρεύματος I = 35mA. Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων έγινε σε γωνίες μεταξύ 4 – 70° 2θ.

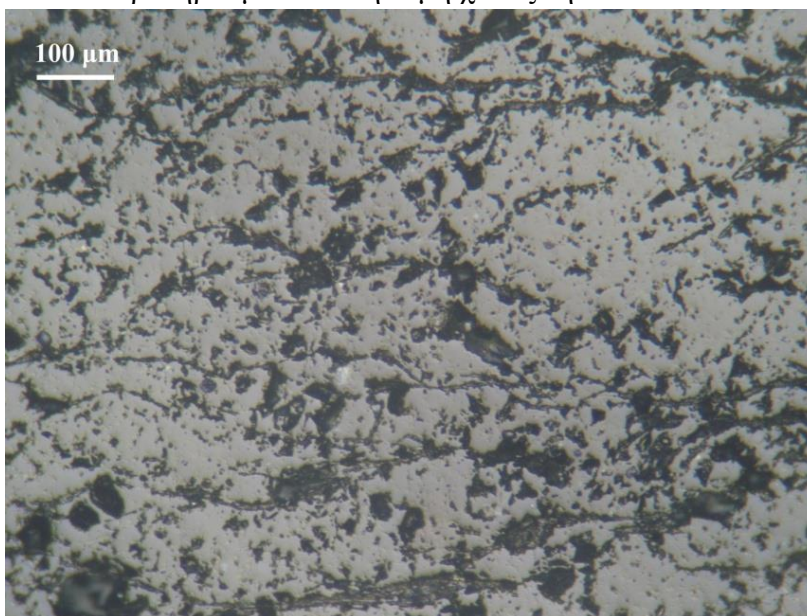
Από το παρακάτω ακτινοδιάγραμμα που ελήφθησε με το περιθλασίμετρο και αντιστοιχεί στην εξέταση του χαλαζίτη (δείγμα VP16) προκύπτει ότι στο δείγμα περιέχεται 98% χαλαζίας (SiO₂) και 2% μαρμαρυγίες.

VP16



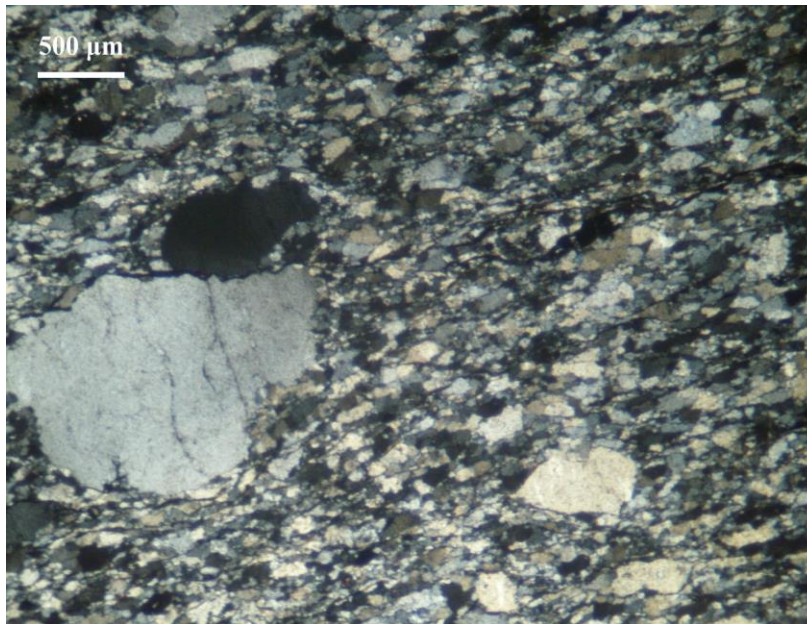
3.2.1 Παρατηρήσεις λεπτών και στιλπνών τομών με χρήση μικροσκοπίου διερχομένου και ανακλωμένου φωτός

Στην Εικόνα 3.2 παρατηρούμε στιλπνή τομή χαλαζίτη.



Εικόνα 3.2: Συμπαγής μάζα χαλαζίτη με διάκενα μεταξύ των κόκκων και στο κέντρο ίχνη σιδηρομεταλλεύματος υπό μορφή αιματίτη.
Δείγμα 1Α, ανακλώμενο φώς, // Nicols.

Στην Εικόνα 3.3 παρατηρούμε λεπτή τομή χαλαζίτη.



Εικόνα 3.3: Λεπτοκρυσταλλικό χαλαζιακό υλικό καθώς και μεμονωμένοι κόκκοι χαλαζία μεγάλου μεγέθους.

Δείγμα VP 16, διερχόμενο φως, X Nicols.

. Ο χαλαζίτης χαρακτηρίζεται από επίπεδη υφή και γρανοβλαστικό ιστό.

3.3 Χημική Ανάλυση με XRF

Η χημική ανάλυση του δείγματος μας δίνει την περιεκτικότητα του σε κύρια στοιχεία σε μορφή οξειδίων. Οι χημικές αναλύσεις, πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για τη διεξαγωγή των αναλύσεων πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία:

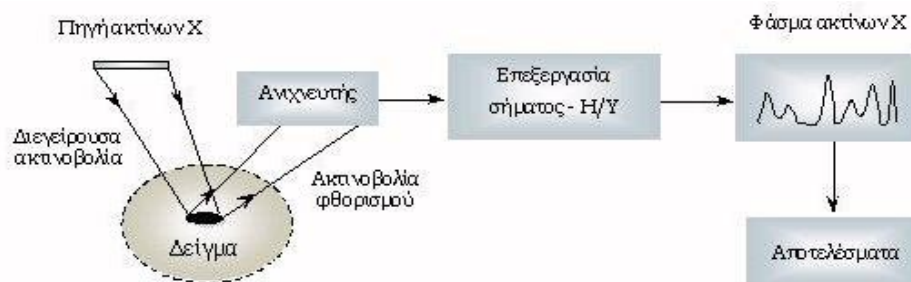
- Λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από το προς ανάλυση υλικό.
- Λειοτρίβηση δείγματος στη συσκευή του πλανητικού μύλου.
- Ψήσιμο δείγματος στους 950° C.
- Λήψη 5g δείγματος.
- Προσθήκη 0.5g Wax.
- Ανακατεύουμε το δείγμα και φτιάχνουμε την ταμπλέτα.

Εάν ένα άτομο ενός στοιχείου βομβαρδιστεί με ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή του δεσμού των ηλεκτρονίων του, τότε μετακινούνται ηλεκτρόνια από εσωτερικές σε εξωτερικές στοιβάδες. Έτσι, δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων, οι οποίες καλύπτονται από ηλεκτρόνια, που πέφτουν στις θέσεις αυτές από τις εξωτερικές στοιβάδες. Η πλήρωση των κενών θέσεων συνοδεύεται με εκπομπή ακτινών – Χ ενέργειας ίσης με τη διαφορά ενέργειας της

αντίστοιχης εξωτερικής από την εσωτερική στοιβάδα. Η διέγερση του δείγματος για εκπομπή ακτίνων – X γίνεται με ειδικές λυχνίες ακτίνων – X ενέργειας πολλαπλάσιας αυτής που θέλουμε να διεγείρουμε.

Το δείγμα διεγείρεται και στη συνέχεια εκπέμπει ακτίνες – X των στοιχείων που το αποτελούν. Σαρώνοντας μια συγκεκριμένη περιοχή 2θ με το γωνιόμετρο του φασματομέτρου, παρατηρούνται ανακλάσεις, εφόσον πληρούται η εξίσωση του Bragg. Στη συνέχεια, λύνοντας την εξίσωση αυτή ως προς λ , ($2d$: σταθερό, θ : μετράται) προσδιορίζεται το αντίστοιχο χημικό στοιχείο (Περδικάτσης και Πεντάρη, 2003).

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια αυτοματοποιημένου φασματοσκοπίου ακτίνων – X (Εικόνα 3.4) φθορισμού τύπου Brucker S2 με συνθήκες μέτρησης: $U=15$ 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.



Εικόνα 3.4: Τυπική διάταξη Energy Dispersive XRF (www.omega.physics.uoi.gr).

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του δείγματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Χημικές Αναλύσεις δείγματος VP16.

ΔΕΙΓΜΑ	Na ₂ O (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	LOI
ΧΑΛΑΖΙΤΗΣ	0.70	0.00	0.00	0.20	0.20	0.40	0.00	0.00	95.70	2.10	0.70

3.4 Πυκνότητα – Πορώδες

Το πορώδες και η πυκνότητα αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά ενός πετρώματος. Για τη μέτρησή τους κατασκευάστηκαν δυο δοκίμια. Η κατασκευή των δοκιμίων έγινε στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η κατασκευή ή/και η προπαρασκευή ενός δείγματος στο εργαστήριο ακολουθεί συνήθως τα εξής στάδια:

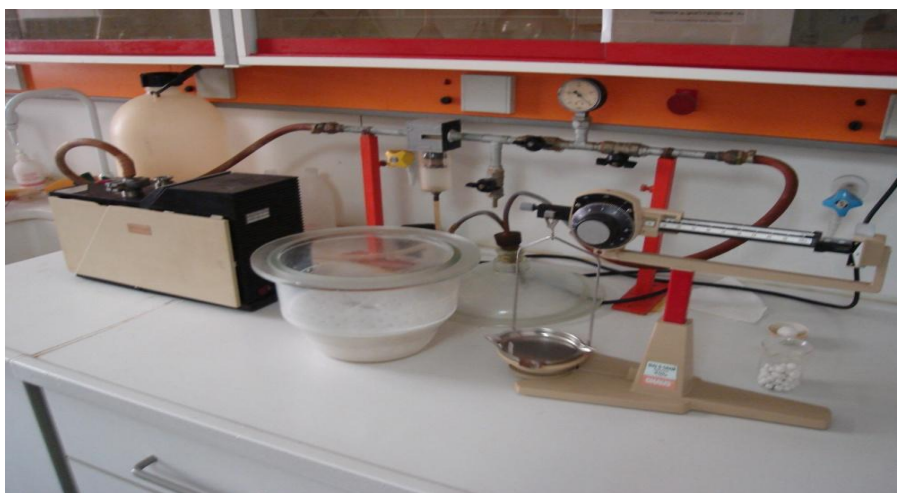
- Διάτρηση του ακανόνιστου δείγματος και λήψη πυρήνων υλικού, σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Γι' αυτό το σκοπό, το δείγμα στερεώνεται σε κατάλληλη βάση διάτρησης (drill press).

- Κοπή των άκρων των κυλίνδρων (πυρήνων) σε κατάλληλο δισκοπρίονο με αδαμαντοτροχό (diamond saw).
- Λείανση των βάσεων των κυλίνδρων σε κατάλληλο λειαντικό μηχάνημα (grinding machine).
- Μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων με τις αντοχές που προβλέπει η σχετική διαδικασία (Αγιουτάντης, 2010).

3.4.1 Μέθοδος Προσδιορισμού πυκνότητας και πορώδους

Το πορώδες και η πυκνότητα των ψημένων δοκιμίων προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Αρχιμήδη σύμφωνα με την DIN EN 993-1 στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε διάταξη αποτελούμενη από:

- α. Ζυγό Ακριβείας 0.01g,
- β. Αντλία κενού και
- γ. Γυάλινο Ξηραντήρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.5: Πειραματική διάταξη της μεθόδου DIN EN 993-1.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο είναι η εξής:

- Προσδιορισμός μάζας m_1 (ακρίβεια 0.01g) του ξηρού δοκιμίου με τον ζυγό.
- Τοποθέτηση του δοκιμίου εντός του δοχείου και ερμητικό κλείσιμο.
- Δημιουργία κενού για 15min.
- Πλήρωση του δοχείου με νερό μέχρι το 50% του ύψους των δοκιμίων και αναμονή για 30 min.

- Αναμονή επιπλέον για 30 min με το καπάκι του δοχείου να παραμένει κλειστό για να είναι βέβαιο ότι το νερό έχει εισχωρήσει σε όλους τους πόρους.
- Προσδιορισμός της φαινόμενης μάζας του εμβαπτισμένου δοκιμίου m_2 με ζύγιση (ακρίβεια 0.01g) του δίσκου του ζυγού με το δοκίμιο εντός του δοχείου με το νερό.
- Μέτρηση θερμοκρασίας νερού ($\pm 1^\circ \text{C}$).
- Προσδιορισμός της εμβαπτισμένης μάζας m_3 (ακρίβεια 0.01g). Τα δοκίμια απομακρύνονται από το νερό, σκουπίζονται με υγρό μαλακό ύφασμα ώστε να απομακρυνθούν σταγόνες από την επιφάνεια και ζυγίζονται στο ζυγό, ο δίσκος του οποίου βρίσκεται εκτός νερού.

Το φαινόμενο πορώδες ($\pi\alpha$) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (24):

$$\pi\alpha = \left[\frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \right] \cdot 100 \quad (\%) \quad (24)$$

και η πυκνότητα (ρ_b) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (25):

$$\rho_b = \left[\frac{m_1}{m_3 - m_2} \right] \cdot \rho_{lig} \quad (g/cm^3) \quad (25)$$

όπου,

- m_1 : μάζα ξηρών δοκιμίων (ακρίβεια 0.01g).
- m_2 : μάζα των εμβαπτισμένων δοκιμίων σε ζυγό εντός δοχείου με νερό.
- m_3 : εμβαπτισμένη μάζα σε ζυγό εκτός νερού.
- ρ_{lig} : πυκνότητα υγρού (νερό) σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, υπολογίζεται από πίνακες.

Η παραπάνω μέθοδος πραγματοποιήθηκε σε δυο δοκίμια χαλαζίτη (VP28, VP 29). Το πορώδες και η πυκνότητα των δοκιμίων με τη βοήθεια της παραπάνω μεθόδου εκτιμήθηκαν ως εξής:

- VP28
Από τη σχέση (24) προκύπτει ότι το πορώδες είναι: $\pi\alpha = 0.45 \%$.
κι από τη σχέση (25) προκύπτει ότι η πυκνότητα είναι: $\rho_b = 2.63 \text{ g/cm}^3$.
- VP29
Από τη σχέση (24) προκύπτει ότι το πορώδες είναι: $\pi\alpha = 1.44 \%$.
κι από τη σχέση (25) προκύπτει ότι η πυκνότητα είναι: $\rho_b = 2.63 \text{ g/cm}^3$.

3.5 Περιγραφή Εξοπλισμού

3.5.1 Εργαστηριακός Σπαστήρας με σιαγόνες

Η θραύση του υλικού (χαλαζίτης) πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης με χρήση σιαγωνοτού σπαστήρα. Ο συγκεκριμένος σπαστήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι FRITSCH pulverisette 1.

Οι σιαγωνοτοί σπαστήρες (Εικόνα 3.6), όπως έχει προαναφερθεί χρησιμοποιούνται για πρωτογενή και δευτερογενή θραύση των υλικών. Το εσωτερικό τμήμα τους είναι κατασκευασμένο από σκληρά κράματα μαγγανιούχων χαλύβων και από σιδηροκράματα Ni – Cr.



Εικόνα 3.6: Εργαστηριακός Σιαγωνοτός Σπαστήρας.

Ο σπαστήρας διαθέτει πέντε (5) θέσεις που αντιστοιχούν σε πέντε (5) διαφορετικά ανοίγματα αποκένωσης. Στον πίνακα παρουσιάζονται: 1) το μέγεθος των ελάχιστων και των μέγιστων τιμών του ανοίγματος αποκένωσης δ για κάθε θέση σπαστήρα, 2) η μέση τιμή του ανοίγματος αποκένωσης και 3) η σχέση του μέσου κάθε ανοίγματος ως προς το μέσο του μέγιστου ανοίγματος αποκένωσης στη θέση 5, όπου ονομάζεται σχέση ανοίγματος (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Το χαρακτηριστικό άνοιγμα αποκένωσης δ , για κάθε θέση του εργαστηριακού σπαστήρα με σιαγόνες.

Θέση	5	4	3	2	1
$\delta_{\max - \min} \text{ (mm)}$	15 – 9	12 – 6	9 – 4	5 – 2	3 – 1
$\delta_{\text{avg}} \text{ (mm)}$	12.0	9.0	6.5	3.5	2.0
Σχέση ανοίγματος	1.00 : 1	1.33 : 1	1.85 : 1	3.43 : 1	6.00 : 1

3.5.2 Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός σφαιρόμυλος, ο οποίος περιστρέφεται πάνω σε ένα σύστημα περιστρεφόμενων ράουλων (Εικόνα 3.7). Με τη βοήθεια του συστήματος αυτού ο μύλος περιστρεφόταν γύρω από τον άξονα του.



Εικόνα 3.7: Εργαστηριακός Σφαιρόμυλος με το σύστημα περιστροφής.

Τα χαρακτηριστικά του εργαστηριακού σφαιρόμυλου που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά εργαστηριακού σφαιρόμυλου.

Εσωτερική Διάμετρος, D(cm)	20.4	
Εσωτερικό Μήκος, L(cm)	16.6	
Όγκος Μύλου, V(cm ³)	5,423	$V = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L$
Συχνότητα Περιστροφής, N(rpm)	66	$N = 70\%N_c$
Κρίσιμη Συχνότητα Περιστροφής, N _c (rpm)	93.7	$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}}$

3.5.3 Συσκευή Κοσκίνισης

Η κοκκομετρική ανάλυση της τροφοδοσίας και των προϊόντων του χαλαζίτη, που αναφέρεται λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο, έγινε με τη βοήθεια του εργαστηριακού δονητή κοσκίνων (τύπου RETSCH VE 1000, Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Συσκευή Κοσκίνισης.

Η εργαστηριακή συσκευή κοσκίνισης RETSCH VE 1000 είναι ένα μοντέρνο υψηλής παραγωγής προϊόν της εταιρίας RETSCH.

Αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη:

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

3.6 Πειραματική Διαδικασία

3.6.1 Διαδικασία θραύσης

Η διαδικασία θραύσης πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης , όπου έγινε πρωτογενής θραύση του δείγματος χαλαζίτη σε σιαγονωτό σπαστήρα.

Αρχικά, το υλικό θραύστηκε στο σιαγονωτό σπαστήρα στο μέγιστο άνοιγμα αποκένωσης (θέση 5). Η θραύση του υλικού γινόταν σταδιακά. Αφού θραύτηκε όλη η ποσότητα του υλικού στη συνέχεια κοσκινίστηκε το υλικό σε κόσκινο 3.35 mm. Το διερχόμενο υλικό το κρατήσαμε για επόμενη διαδικασία ενώ το παραμένον υλικό στο κόσκινο το τοποθετήσαμε πάλι στο σιαγονωτό σπαστήρα αλλά αυτή τη φορά θραύστηκε σε μικρότερο άνοιγμα αποκένωσης. Η ίδια διαδικασία συνεχίστηκε μέχρι να φτάσουμε στο ελάχιστο άνοιγμα αποκένωσης (θέση 1), ώστε όλο το υλικό να διέρχεται από το κόσκινο 3.35 mm.

Στη συνέχεια, έγινε υγρή κοσκίνιση στα 150 μm . Το + 150 μm τοποθετήθηκε στο φούρνο για ξήρανση στους 100 °C για ένα 24ωρο, ενώ το - 150 μm φυλάχθηκε.

Τέλος, το εναπομείναν υλικό στο κόσκινο + 150 μm κοσκινίστηκε εν ξηρώ, όπως αναφέρεται σε επόμενο κεφάλαιο, για τη λήψη 5 στενών κοκκομετρικών κλασμάτων λόγου $\sqrt{2}$.

Τα 5 στενά κοκκομετρικά κλάσματα που δημιουργήθηκαν είναι τα εξής:

- - 3.35 + 2.36 mm
- - 1.7 + 1.18 mm
- - 0.850 + 0.600 mm
- - 0.425 + 0.300 mm
- - 0.212 + 0.150 mm

3.6.2 Διαδικασία Λειοτριβήσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από τη θραύση και κοσκίνιση του υλικού ελήφθησαν 5 στενά κοκκομετρικά κλάσματα. Το βάρος από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα που συγκεντρώθηκε ήταν της τάξης των 5 kg.

Κάθε κοκκομετρικό κλάσμα λειοτριβήθηκε στο σφαιρόμυλο για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας. Οι χρόνοι που επιλέχθηκαν για τη λειοτριβήση του υλικού ήταν 0.5 min, 1 min, 2 min, 4 min. Ο χρόνος 0 αντιστοιχεί στο αρχικό δείγμα τροφοδοσίας του σφαιρόμυλου. Οι διάμετροι των σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 40 mm, 25.4 mm, 12.7 mm (Πίνακας 3.4).

Συγκεκριμένα, έγιναν τέσσερις σειρές δοκιμών από τις οποίες οι τρεις πραγματοποιήθηκαν με ίδια διάμετρο σφαίρας, ενώ η τέταρτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε με ανάμιξη σφαιρών (mix). Το συνολικό βάρος των σφαιρών για κάθε δοκιμή κρατήθηκε σταθερό και περίπου ίσο με 5.1 kg, όπως προκύπτει από τη σχέση (27).

Η ποσότητα των σφαιρών καθώς και του υλικού που τοποθετήθηκαν στο σφαιρόμυλο για κάθε δοκιμή υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις (26) και (27) αντίστοιχα.

$$M = 0.6 \cdot f_c \cdot \text{πυκνότητα υλικού} \cdot \text{όγκος μύλου} \quad (26)$$

Από τη σχέση (26) υπολογίστηκε ότι $M = 342.5 \text{ g}$.

Επίσης, εκτός από την αρχική τροφοδοσία υπολογίστηκε και η ποσότητα των σφαιρών από την ακόλουθη σχέση (27):

$$m_b = 0.6 \cdot J \cdot \text{πυκνότητα σφαιρών} \cdot \text{όγκος μύλου} \quad (27)$$

Από τη σχέση (27) υπολογίστηκε ότι $m_b = 5104.5 \text{ g}$.

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά σφαιρών.

Διάμετρος, $d(\text{mm})$	40	25.4	12.7	Ανάμιξη σφαιρών (mix)
Αριθμός Σφαιρών	20	77	605	235
Μάζα σφαιρών (g)	5,258	5,149	5,155	5,295
Πυκνότητα, $\rho_{\text{σφ}} (\text{g/cm}^3)$	7.84	7.84	7.84	7.84
Πορώδες (%)	40	40	40	40
Συντελεστής πλήρωσης σφαιρών, $J(\%)$	20	20	20	20

Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι στη σειρά δοκιμών όπου χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές διαμέτροι σφαιρών (mix) το άθροισμα τους είναι ίσο με 5.1 kg, όπως ήταν και στις υπόλοιπες σειρές δοκιμών. Σε αυτή τη σειρά δοκιμών, από τις διαφορετικές διαμέτρου σφαιρών που χρησιμοποιήσαμε, προσπαθήσαμε να έχουν σχεδόν το ίδιο βάρος μεταξύ τους. Αναλυτικότερα φαίνονται στον πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Κατανομή μάζας σειράς δοκιμών με διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών.

Διάμετρος Σφαίρας (mm)	Αριθμός	Μάζα (g)
40	7	1,840
25.4	26	1,739
12.7	202	1,716
Σύνολο	235	5,295

Τέλος, σημαντικό είναι να αναφερθούν και τα χαρακτηριστικά του υλικού (Πίνακας 3.6).

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά υλικού (χαλαζίτης).

Πυκνότητα, ρ_b (g/cm ³)	2.63
Συντελεστής πλήρωσης υλικού στο μύλο, f_c (%)	4
Συντελεστής πλήρωσης κενών των σφαιρών με υλικό, U	0.5
Πορώδες υλικού	0.4 ή 40%

Στη συνέχεια το υλικό ζυγίζεται πριν την τοποθέτηση στο σφαιρόμυλο για λειτρίβηση (αρχική τροφοδοσία = 342.5 g) καθώς και μετά τη λειοτρίβηση (τελικό προϊόν) που πρέπει να είναι ίσο με την αρχική τροφοδοσία.

3.6.3 Διαδικασία Κοσκίνισης

Αρχικά, το τελικό προϊόν κοσκινίστηκε σε κόσκινο 38 μm εν υγρώ για την απομάκρυνση των ψιλών υλικών. Η διαδικασία της υγρής κοσκίνισης γίνεται ως εξής :

- **Υγρή Κοσκίνιση:** Το υλικό τοποθετείται επί του συγκεκριμένου κόσκινου και με την προσθήκη νερού ξεπλένεται από το υλικό με μέγεθος κόκκων μικρότερο των 38 μm . Το υλικό με μέγεθος μεγαλύτερο από 38 μm ξηραίνεται στον εργαστηριακό φούρνο. Ο πολφός με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 38 μm τοποθετείται σε ένα δοχείο όπου αφήνεται να καθιζάνει το υλικό (περίπου 1 ημέρα) και στη συνέχεια γίνεται διήθηση. Το υλικό της διήθησης τοποθετείται στο φούρνο. Στη συνέχεια ζυγίζεται και το βάρος αυτού προστίθεται στο - 38 μm της αντίστοιχης ξηρής κοσκίνισης.

Στη συνέχεια ακολουθεί η ξηρή κοσκίνιση. Η διαδικασία της ξηρής κοσκίνισης έγινε κι αυτή για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα. Ο διαχωρισμός των υλικών σε κλάσματα διαφόρων μεγεθών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας κόσκινα, των οποίων το άνοιγμα βρόγχου μειωνόταν από πάνω προς τα κάτω με λόγο $\sqrt{2}$.

Η κοσκίνιση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια εργαστηριακού δονητή κοσκίνων τύπου RETSCH VE 1000.

Για την κοσκίνιση του πρώτου κοκκομετρικού κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) χρησιμοποιήθηκαν τα εξής κόσκινα: 2.36 mm, 1.7 mm, 1.18 mm, 0.850 mm, 0.600 mm, 0.425 mm, 0.300 mm, 0.212 mm, 0.150 mm, 0.106 mm, 0.075 mm, 0.053mm, 0.038 mm. Η κοσκίνιση έγινε σε 2 σειρές. Η πρώτη σειρά περιελάμβανε τα κόσκινα 2.36 mm έως 0.300 mm και η δεύτερη τα κόσκινα 0.212 mm έως 0.038 mm. Κάθε σειρά τοποθετούνταν στη συσκευή κοσκίνισης για 15 min και η δόνηση ρυθμιζόταν στα 0.80 mm. Μετά το τέλος της πρώτης κοσκίνισης, μετράμε το βάρος του υλικού το οποίο παρέμεινε σε κάθε κόσκινο σε ζυγαριά

ακριβείας και τοποθετούμε το υλικό που έχει περάσει από το τελευταίο κόσκινο στη δεύτερη σειρά κοσκίνων. Στη συνέχεια, μετράμε το βάρος που έχει παραμείνει σε κάθε κόσκινο και στη δεύτερη σειρά κοσκίνων.

Το τελικό βάρος του κλάσματος - 38 μm είναι το άθροισμα του διερχόμενου υλικού από την ξηρή κοσκίνιση συν το - 38 μm της υγρής κοσκίνισης. Τέλος, το συνολικό άθροισμα των βαρών που παρέμειναν στα κόσκινα προσδιορίζεται, διότι δε θα πρέπει να διαφέρει από την αρχική τροφοδοσία της κοσκίνισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑΤΩΝ

4.1 Αθροιστικό διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει μεγέθους

Για την περιγραφή της κοκκομετρικής κατανομής των πέντε υλικών τροφοδοσίας, (- 3.35 + 2.36 mm), (- 1.7 + 1.18mm), (- 0.850 + 0.600mm), (- 0.425 + 0.300mm), (- 0.212 + 0.150mm) χρησιμοποιήθηκε το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%)σε συνάρτηση με το μέγεθος.

Παρακάτω παραθέτονται οι πίνακες και τα σχετικά διαγράμματα της αθροιστικής κατανομής για κάθε υλικό τροφοδοσίας ξεχωριστά.

- **Υλικό τροφοδοσίας – 3.35 + 2.36 mm**

Πίνακας 4.1:Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για d = 40 mm.

<i>d = 40 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	58.61	34.41	11.85	1.02	41.39	65.59	88.15	98.98
1.70	19.18	23.17	17.15	3.26	22.21	42.42	70.99	95.71
1.18	9.46	15.77	18.67	8.12	12.75	26.66	52.33	87.59
0.850	3.69	7.20	12.06	10.63	9.06	19.45	40.27	76.97
0.600	2.48	5.05	9.46	13.65	6.58	14.40	30.81	63.32
0.425	1.39	3.02	6.05	11.10	5.19	11.39	24.76	52.21
0.300	0.96	2.09	4.40	8.81	4.23	9.30	20.36	43.41
0.212	0.62	1.34	2.96	6.01	3.61	7.95	17.40	37.40
0.150	0.61	1.28	2.83	6.08	3.00	6.67	14.57	31.32
0.106	0.52	1.11	2.43	5.34	2.48	5.56	12.14	25.97
0.075	0.53	1.22	2.74	5.81	1.94	4.34	9.40	20.16
0.053	0.52	1.15	2.48	5.68	1.42	3.19	6.91	14.49
0.038	0.50	1.10	1.94	4.20	0.92	2.09	4.97	10.29
-0.038	0.92	2.09	4.97	10.29				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

Πίνακας 4.2: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για d = 25.4 mm.

<i>d = 25.4 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	58.82	37.44	16.21	2.15	41.18	62.56	83.79	99.96
1.70	19.59	22.76	17.10	4.33	21.59	39.80	66.70	99.92
1.18	9.04	13.90	15.43	7.04	12.55	25.90	51.27	99.82
0.850	3.52	6.38	9.51	7.48	9.03	19.52	41.75	99.59
0.600	2.31	4.56	8.21	9.96	6.72	14.96	33.54	98.45
0.425	1.30	2.83	5.70	9.37	5.42	12.13	27.84	95.10
0.300	0.95	2.05	4.47	8.54	4.47	10.07	23.37	88.07
0.212	0.62	1.38	3.00	6.35	3.85	8.69	20.37	80.11
0.150	0.60	1.33	3.19	6.80	3.25	7.36	17.19	69.94
0.106	0.53	1.21	2.80	6.16	2.72	6.15	14.39	59.73
0.075	0.57	1.31	3.05	6.98	2.15	4.85	11.34	47.51
0.053	0.56	1.25	3.00	6.78	1.59	3.60	8.34	35.43
0.038	0.53	1.15	2.67	4.79	1.07	2.45	5.67	25.32
-0.038	1.07	2.45	5.67	13.27				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

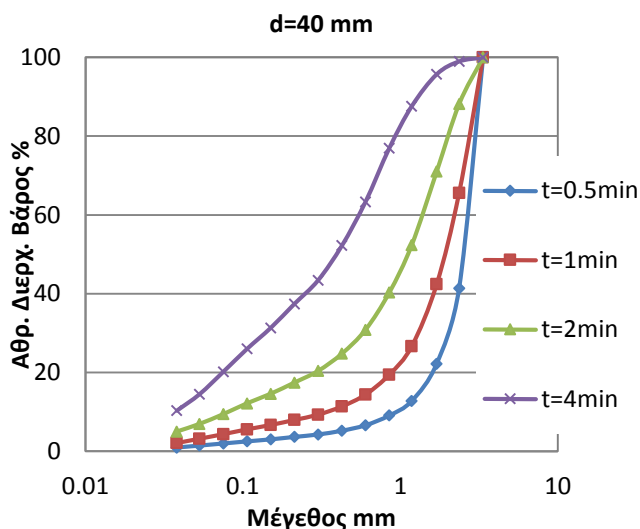
Πίνακας 4.3: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για d= 12.7 mm.

<i>d = 12.7 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	82.50	71.82	56.78	36.19	17.50	28.18	43.22	63.81
1.70	9.64	14.48	18.29	19.21	7.85	13.70	24.93	44.60
1.18	3.30	4.97	7.31	9.20	4.56	8.73	17.62	35.41
0.850	1.19	1.89	2.84	4.24	3.37	6.84	14.78	31.17
0.600	0.77	1.26	2.06	3.16	2.59	5.59	12.72	28.01
0.425	0.46	0.77	1.30	2.23	2.13	4.82	11.42	25.78
0.300	0.30	0.56	1.02	1.96	1.83	4.26	10.40	23.82
0.212	0.23	0.39	0.77	1.55	1.60	3.87	9.63	22.28
0.150	0.19	0.42	0.92	2.01	1.41	3.45	8.71	20.27
0.106	0.18	0.43	1.03	2.29	1.23	3.02	7.68	17.98
0.075	0.25	0.52	1.41	3.24	0.98	2.50	6.27	14.73
0.053	0.26	0.57	1.64	3.45	0.72	1.94	4.63	11.28
0.038	0.25	0.53	1.19	2.46	0.46	1.40	3.44	8.83
-0.038	0.46	1.40	3.44	8.83				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

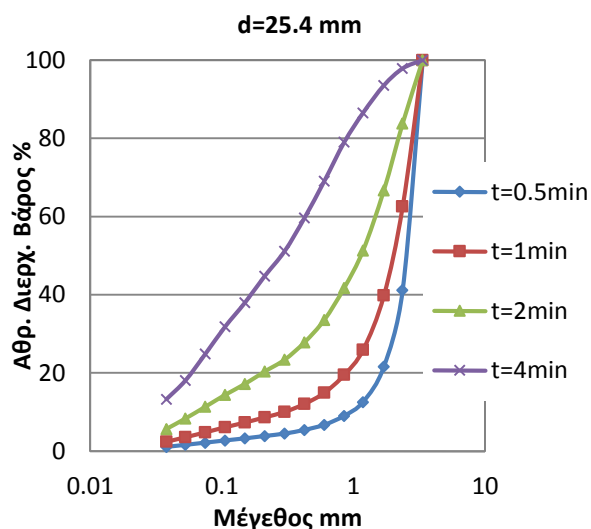
Πίνακας 4.4: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για ανάμιξη σφαιρών.

<i>mix</i>	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
Μέγεθος mm	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	68.69	26.93	26.93	8.31	31.31	73.07	73.07	91.69
1.70	15.58	20.85	20.85	10.19	15.73	52.22	52.22	81.50
1.18	6.58	13.53	13.53	10.47	9.15	38.69	38.69	71.03
0.850	2.39	6.91	6.91	7.49	6.77	31.78	31.78	63.54
0.600	1.60	5.58	5.58	7.74	5.17	26.20	26.20	55.80
0.425	0.94	3.87	3.87	6.66	4.23	22.34	22.34	49.14
0.300	0.68	3.05	3.05	5.96	3.56	19.29	19.29	43.17
0.212	0.49	2.20	2.20	4.46	3.06	17.09	17.09	38.72
0.150	0.45	2.35	2.35	5.17	2.62	14.74	14.74	33.54
0.106	0.43	2.29	2.29	5.16	2.19	12.44	12.44	28.38
0.075	0.46	2.97	2.97	5.78	1.73	9.47	9.47	22.60
0.053	0.47	2.53	2.53	5.77	1.25	6.94	6.94	16.84
0.038	0.41	2.08	2.08	5.22	0.84	4.86	4.86	11.62
-0.038	0.84	4.86	4.86	11.62				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

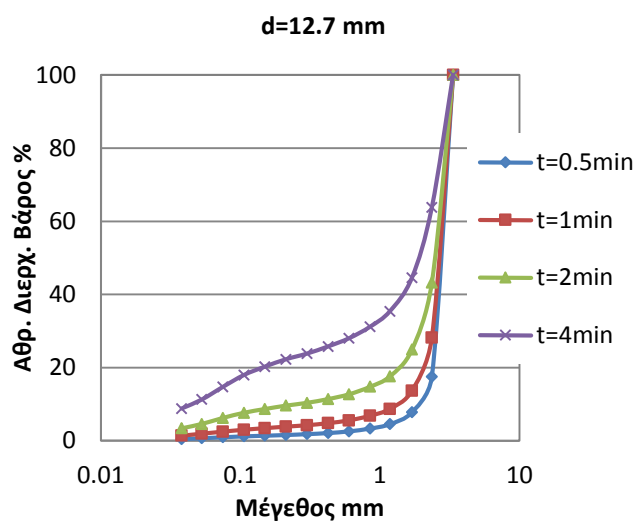
Από τους πίνακες 4.1 - 4.4 προκύπτουν τα διαγράμματα 4.1 - 4.4 που δείχνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετική διάμετρο σφαιρών.



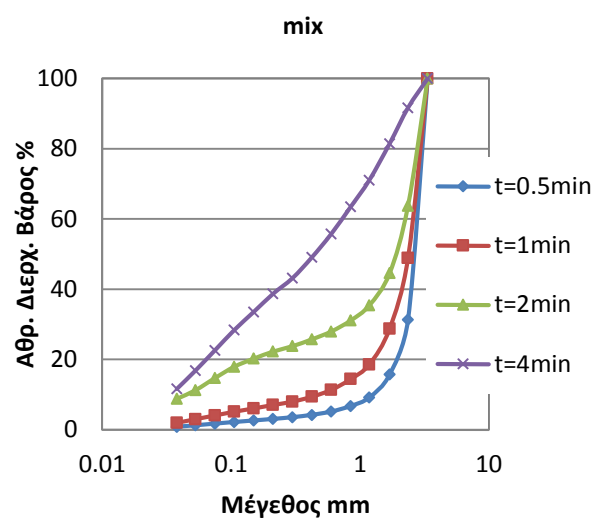
Διάγραμμα 4.1: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για d = 40 mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.2: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για d =25.4 mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.3: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για $d = 12.7$ mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.4: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για ανάμιξη σφαιρών σε διάφορους χρόνους.

- **Υλικό τροφοδοσίας – 1.7 + 1.18 mm**

Πίνακας 4.5: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για $d = 40$ mm.

$d = 40$ mm								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	58.64	33.53	14.37	1.62	41.36	66.47	85.63	98.38
0.850	17.52	23.39	17.96	5.91	23.83	43.08	67.66	92.47
0.600	8.69	14.25	17.87	13.07	15.14	28.83	49.79	79.41
0.425	4.35	7.83	11.69	13.73	10.79	21.00	38.11	65.68
0.300	2.65	4.94	8.18	11.54	8.14	16.06	29.92	54.14
0.212	1.55	2.98	5.09	7.75	6.59	13.08	24.83	46.38
0.150	1.32	2.59	4.82	7.99	5.27	10.49	20.01	38.39
0.106	1.08	2.06	3.70	6.95	4.19	8.44	16.31	31.44
0.075	1.01	2.09	3.96	7.35	3.18	6.35	12.35	24.09
0.053	0.92	1.91	3.36	7.02	2.26	4.44	8.99	17.07
0.038	0.85	1.72	3.12	5.37	1.40	2.72	5.87	11.70
-0.038	1.40	2.72	5.87	11.70				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

Πίνακας 4.6: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για d = 25.4 mm.

<i>d = 25.4 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	53.97	28.63	8.63	0.61	46.03	71.37	91.37	99.39
0.850	18.15	21.97	13.92	2.53	27.88	49.39	77.46	96.86
0.600	10.24	15.71	17.09	7.40	17.64	33.69	60.36	89.46
0.425	5.05	8.69	12.87	11.09	12.59	25.00	47.49	78.37
0.300	3.05	5.61	9.44	11.62	9.54	19.39	38.05	66.75
0.212	1.77	3.43	6.13	8.81	7.78	15.96	31.92	57.94
0.150	1.54	3.08	5.95	9.44	6.24	12.88	25.97	48.50
0.106	1.23	2.50	4.83	8.55	5.01	10.38	21.14	39.95
0.075	1.23	2.52	4.87	9.84	3.77	7.86	16.28	30.11
0.053	1.08	2.25	4.43	8.25	2.70	5.60	11.85	21.86
0.038	0.99	1.90	4.17	6.64	1.70	3.70	7.68	15.22
-0.038	1.70	3.70	7.68	15.22				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

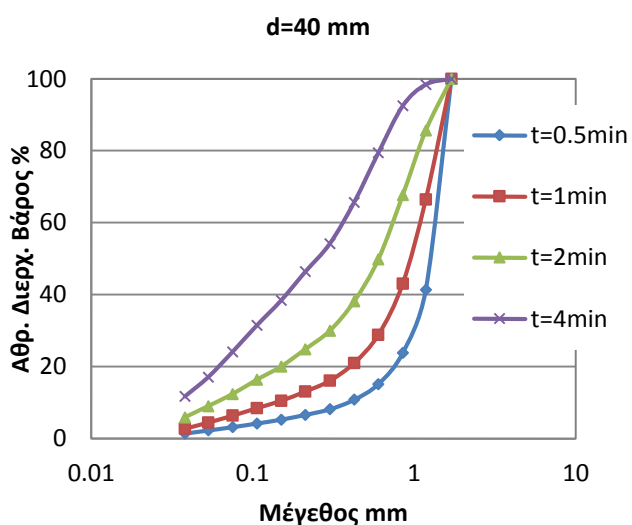
Πίνακας 4.7: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για d = 12.7 mm.

<i>d = 12.7 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	65.82	48.67	25.41	7.79	34.18	51.33	74.59	92.21
0.850	14.85	18.24	17.94	10.02	19.32	33.09	56.65	82.19
0.600	7.36	11.03	14.36	14.54	11.96	22.06	42.30	67.65
0.425	3.43	5.72	8.92	10.44	8.53	16.34	33.38	57.22
0.300	2.02	3.52	6.15	8.88	6.51	12.82	27.23	48.34
0.212	1.19	2.13	4.05	6.47	5.32	10.70	23.18	41.87
0.150	1.01	1.97	4.11	6.66	4.31	8.73	19.07	35.21
0.106	0.81	1.61	3.30	5.97	3.50	7.12	15.77	29.24
0.075	0.78	1.65	3.49	6.16	2.72	5.46	12.28	23.08
0.053	0.76	1.50	3.15	5.56	1.96	3.97	9.13	17.51
0.038	0.73	1.27	2.94	5.85	1.23	2.69	6.20	11.66
-0.038	1.23	2.69	6.20	11.66				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

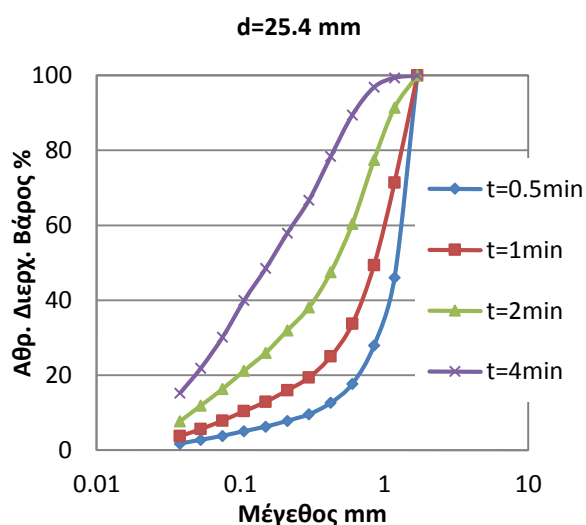
Πίνακας 4.8: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7+ 1.18 mm) για ανάμιξη σφαιρών.

<i>mix</i>	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
Μέγεθος mm	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	60.23	37.71	14.06	1.32	39.77	62.29	85.94	98.68
0.850	15.65	19.79	15.60	3.57	24.12	42.50	70.34	95.12
0.600	8.93	13.58	16.37	8.13	15.19	28.92	53.98	86.99
0.425	4.27	7.35	11.49	11.09	10.92	21.57	42.49	75.90
0.300	2.51	4.65	8.26	11.31	8.42	16.92	34.22	64.59
0.212	1.47	2.86	5.35	8.49	6.94	14.06	28.87	56.11
0.150	1.27	2.57	5.33	9.39	5.68	11.49	23.54	46.72
0.106	1.11	2.26	4.17	8.49	4.57	9.23	19.37	38.23
0.075	1.10	2.29	4.50	9.55	3.47	6.94	14.87	28.68
0.053	0.95	2.09	4.65	7.98	2.52	4.86	10.22	20.70
0.038	1.02	1.58	3.07	6.44	1.50	3.28	7.16	14.26
-0.038	1.50	3.28	7.16	14.26				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

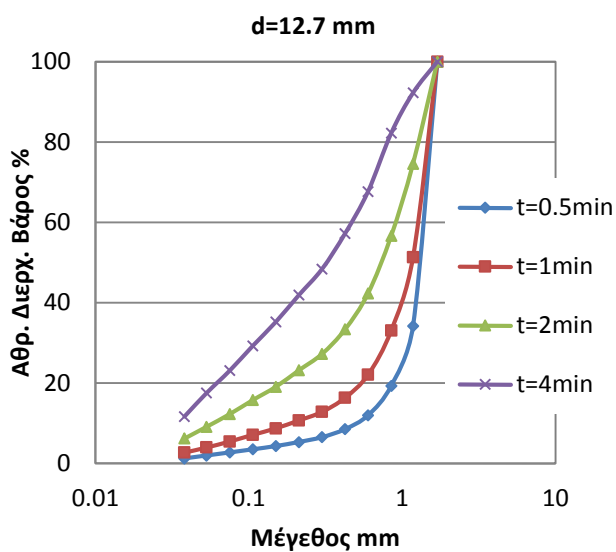
Από τους πίνακες 4.5 - 4.8 προκύπτουν τα διαγράμματα 4.5 - 4.8 που δείχνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετική διάμετρο σφαιρών.



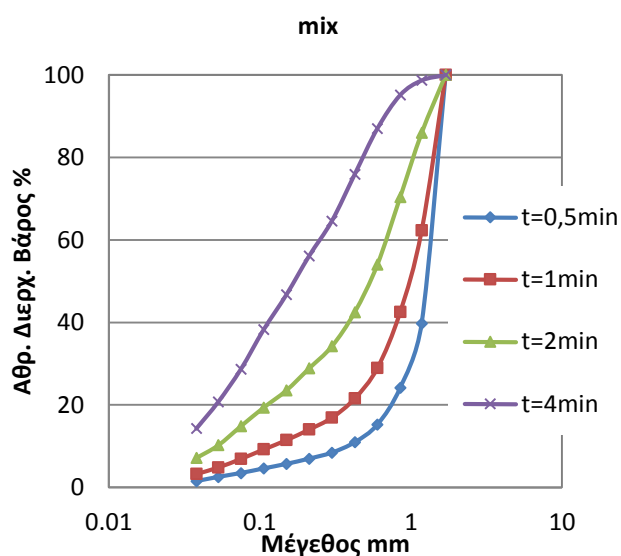
Διάγραμμα 4.5: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για $d = 40$ mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.6: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για $d = 25.4$ mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.7: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για $d = 12.7 \text{ mm}$ σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.8: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για ανάμιξη σφαιρών σε διάφορους χρόνους.

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

Πίνακας 4.9: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος ($- 0.850 + 0.600 \text{ mm}$) για $d = 40 \text{ mm}$.

$d = 40 \text{ mm}$								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	73.28	55.72	32.26	10.56	26.72	44.28	67.74	89.44
0.425	11.08	15.88	19.53	15.68	15.64	28.39	48.21	73.76
0.300	4.83	8.34	12.12	14.26	10.81	20.05	36.09	59.50
0.212	2.50	4.52	7.24	9.82	8.31	15.53	28.86	49.68
0.150	2.01	3.59	6.15	9.38	6.30	11.94	22.70	40.30
0.106	1.35	2.52	4.74	7.72	4.95	9.42	17.97	32.58
0.075	1.32	2.56	4.69	8.07	3.63	6.86	13.28	24.51
0.053	1.12	2.03	4.05	7.04	2.51	4.83	9.23	17.47
0.038	1.04	1.82	3.17	5.89	1.47	3.02	6.05	11.58
-0.038	1.47	3.02	6.05	11.58				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

Πίνακας 4.10: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για d = 25.4 mm.

<i>d = 25.4 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	65.26	42.06	17.91	3.52	34.74	57.94	82.09	96.48
0.425	13.45	19.15	19.34	9.73	21.29	38.79	62.75	86.75
0.300	6.79	11.21	14.87	13.32	14.50	27.58	47.88	73.42
0.212	3.51	6.31	9.55	11.01	10.99	21.27	38.33	62.41
0.150	2.64	4.97	8.31	10.94	8.35	16.30	30.02	51.47
0.106	1.86	3.67	6.53	9.44	6.48	12.63	23.49	42.03
0.075	1.72	3.53	6.79	9.74	4.76	9.10	16.70	32.29
0.053	1.51	3.09	5.03	8.67	3.25	6.02	11.67	23.62
0.038	1.30	2.02	4.04	7.92	1.95	4.00	7.63	15.70
-0.038	1.95	4.00	7.63	15.70				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

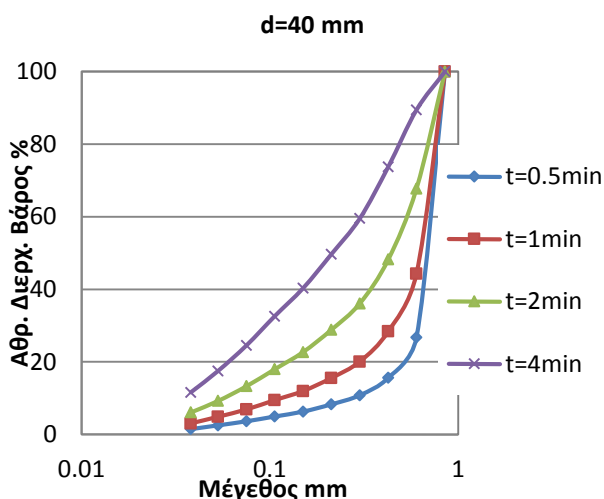
Πίνακας 4.11: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για d = 12.7 mm.

<i>d = 12.7 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	66.41	44.90	20.74	4.85	33.59	55.10	79.26	95.15
0.425	13.88	19.48	19.88	10.81	19.71	35.62	59.38	84.35
0.300	6.75	10.69	14.43	13.52	12.96	24.93	44.95	70.83
0.212	3.25	5.75	8.99	10.81	9.71	19.18	35.96	60.03
0.150	2.42	4.49	7.63	11.02	7.29	14.69	28.33	49.01
0.106	1.72	3.15	5.92	9.38	5.57	11.54	22.41	39.63
0.075	1.65	3.05	6.21	9.45	3.92	8.49	16.20	30.18
0.053	1.33	2.62	4.89	8.09	2.59	5.87	11.31	22.09
0.038	1.16	2.21	4.11	7.71	1.43	3.66	7.20	14.37
-0.038	1.43	3.66	7.20	14.37				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

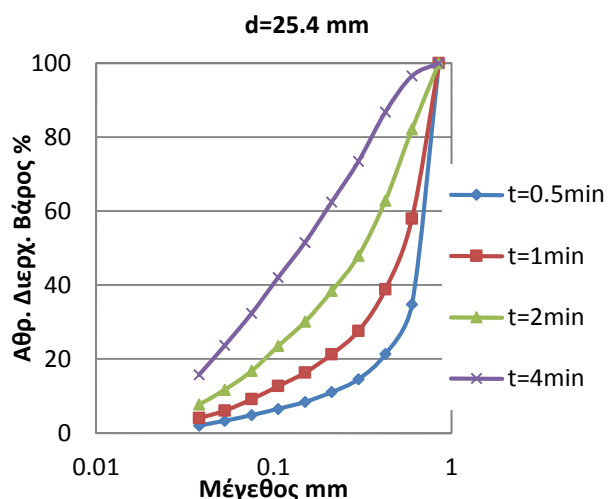
Πίνακας 4.12: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για ανάμιξη σφαιρών.

<i>mix</i>	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
Μέγεθος mm	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	64.00	42.86	18.84	3.94	36.00	57.14	81.16	96.06
0.425	14.60	19.43	18.93	9.99	21.40	37.71	62.23	86.07
0.300	6.87	10.99	14.86	13.55	14.53	26.72	47.37	72.53
0.212	3.62	6.12	9.40	10.98	10.91	20.59	37.96	61.55
0.150	2.65	4.86	8.11	10.95	8.26	15.74	29.86	50.60
0.106	1.78	3.45	6.48	9.61	6.48	12.29	23.38	40.99
0.075	1.69	3.37	7.07	9.92	4.79	8.92	16.31	31.07
0.053	1.42	2.71	5.62	8.69	3.37	6.21	10.69	22.39
0.038	1.22	2.16	3.37	7.89	2.15	4.05	7.31	14.50
-0.038	2.15	4.05	7.31	14.50				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

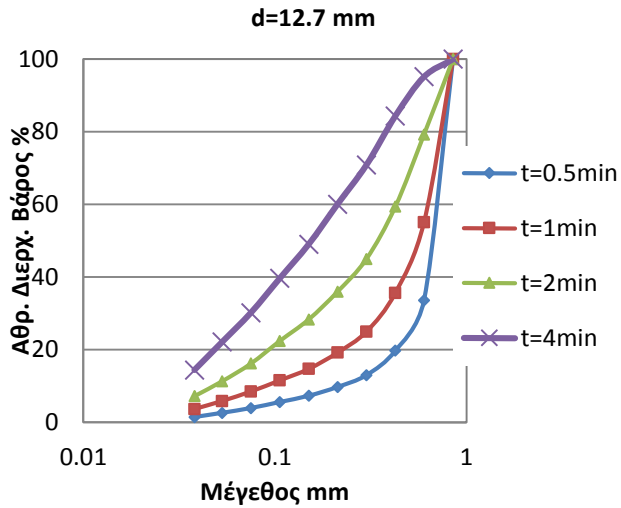
Από τους πίνακες 4.9 - 4.12 προκύπτουν τα διαγράμματα 4.9 - 4.12 που δείχνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος % συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετική διάμετρο σφαιρών.



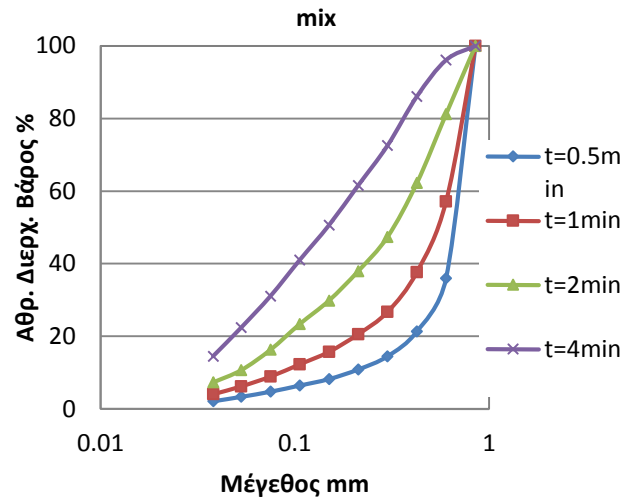
Διάγραμμα 4.9: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για d = 40 mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.10: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για d = 25.4 mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.11: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για $d = 12.7 \text{ mm}$ σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.12: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για την ανάμιξη σφαιρών σε διάφορους χρόνους.

- **Υλικό τροφοδοσίας – 0.425 + 0.300 mm**

Πίνακας 4.13: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για $d = 40 \text{ mm}$.

$d = 40 \text{ mm}$								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.425	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	83.72	72.70	49.80	28.29	16.28	27.30	50.20	71.71
0.212	6.96	9.86	15.64	17.36	9.32	17.44	34.56	54.35
0.150	2.95	4.96	9.20	11.93	6.37	12.48	25.36	42.42
0.106	1.76	3.06	6.19	9.01	4.61	9.41	19.18	33.41
0.075	1.45	2.77	5.51	9.38	3.16	6.64	13.67	24.03
0.053	1.04	2.35	4.72	7.67	2.12	4.29	8.95	16.36
0.038	0.89	1.74	3.29	5.23	1.23	2.55	5.66	11.13
-0.038	1.23	2.55	5.66	11.13				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

Πίνακας 4.14: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για d = 25.4 mm.

<i>d = 25.4 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.425	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	76.00	58.20	35.88	15.49	24.00	41.80	64.12	84.51
0.212	9.23	14.39	18.03	16.31	14.77	27.41	46.10	68.20
0.150	4.46	8.08	11.85	14.19	10.31	19.33	34.25	54.01
0.106	2.77	5.16	8.47	11.48	7.54	14.17	25.78	42.53
0.075	2.28	4.38	7.95	12.11	5.25	9.79	17.83	30.42
0.053	1.76	3.44	6.13	9.21	3.49	6.35	11.70	21.22
0.038	1.34	2.31	3.88	6.88	2.15	4.04	7.82	14.33
-0.038	2.15	4.04	7.82	14.33				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

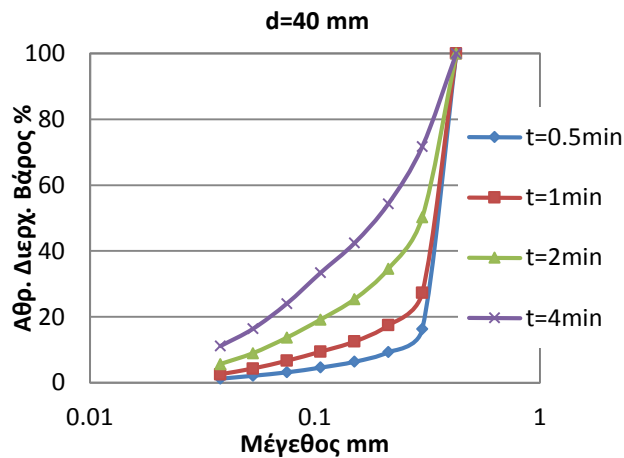
Πίνακας 4.15: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για d= 12.7 mm.

<i>D = 12.7 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.425	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	71.05	53.46	30.67	15.32	28.95	46.54	69.33	84.68
0.212	11.45	16.43	19.40	17.21	17.50	30.10	49.93	67.47
0.150	5.99	9.52	13.54	15.46	11.51	20.58	36.38	52.02
0.106	3.20	5.67	9.09	11.94	8.31	14.91	27.30	40.08
0.075	2.61	4.61	8.30	11.38	5.70	10.30	19.00	28.70
0.053	1.93	3.58	6.39	8.62	3.77	6.72	12.61	20.09
0.038	1.46	2.37	4.36	6.31	2.31	4.35	8.25	13.77
-0.038	2.31	4.35	8.25	13.77				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

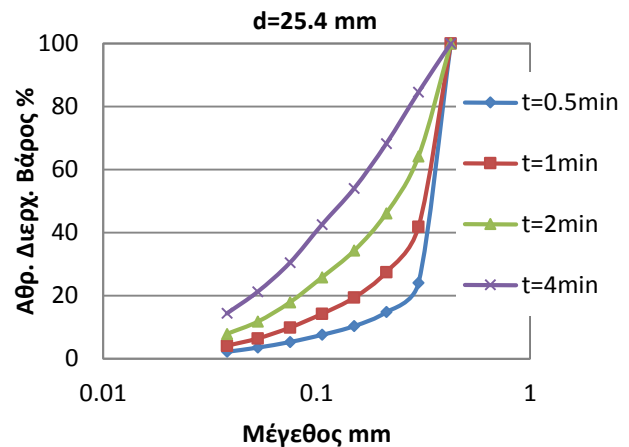
Πίνακας 4.16: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για ανάμιξη σφαιρών.

<i>mix</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.425	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	79.92	67.31	45.87	21.36	20.08	32.69	54.13	78.64
0.212	8.23	11.40	15.43	16.36	11.86	21.29	38.70	62.28
0.150	3.76	6.40	10.48	13.70	8.10	14.89	28.22	48.58
0.106	2.17	3.87	6.90	11.03	5.93	11.02	21.32	37.55
0.075	1.75	3.29	6.83	11.16	4.18	7.73	14.49	26.39
0.053	1.35	2.55	4.76	8.29	2.83	5.18	9.73	18.10
0.038	1.04	1.93	3.78	6.21	1.79	3.25	5.95	11.89
-0.038	1.79	3.25	5.95	11.89				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

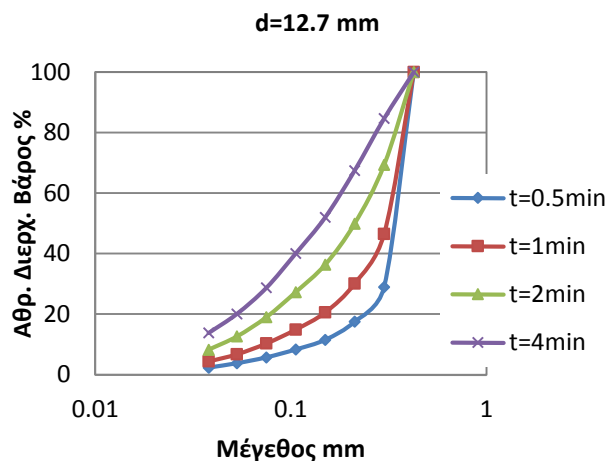
Από τους πίνακες 4.13 - 4.16 προκύπτουν τα διαγράμματα 4.13 - 4.16 που δείχνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετική διάμετρο σφαιρών.



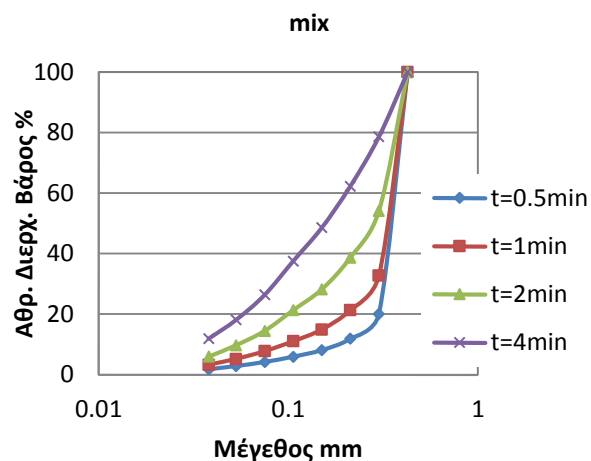
Διάγραμμα 4.13: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για d = 40 mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.14: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για d = 25.4 mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.15: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για $d = 12.7 \text{ mm}$ σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.16: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για ανάμιξη σφαιρών σε διάφορους χρόνους.

- Υλικό τροφοδοσίας – $0.212 + 0.150 \text{ mm}$

Πίνακας 4.17: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για $d = 40 \text{ mm}$.

$d = 40 \text{ mm}$								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.212	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.150	84.50	74.33	58.91	39.45	15.50	25.67	41.09	60.55
0.106	5.94	8.51	10.99	13.22	9.56	17.16	30.10	47.33
0.075	2.04	3.18	5.44	7.90	7.51	13.98	24.66	39.43
0.053	1.19	2.06	3.79	5.81	6.32	11.92	20.87	33.62
0.038	0.70	1.64	2.62	3.93	5.62	10.28	18.24	29.69
-0.038	5.62	10.28	18.24	29.69				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

Πίνακας 4.18: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) d = 25.4 mm.

<i>d = 25.4mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.212	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.150	83.79	72.54	53.55	32.93	16.21	27.46	46.45	67.07
0.106	6.60	8.85	12.29	14.32	9.60	18.61	34.15	52.75
0.075	1.88	3.81	6.43	10.18	7.72	14.80	27.72	42.57
0.053	1.38	2.30	4.98	6.58	6.34	12.50	22.74	36.00
0.038	0.99	1.87	2.82	4.20	5.35	10.62	19.92	31.80
-0.038	5.35	10.62	19.92	31.80				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

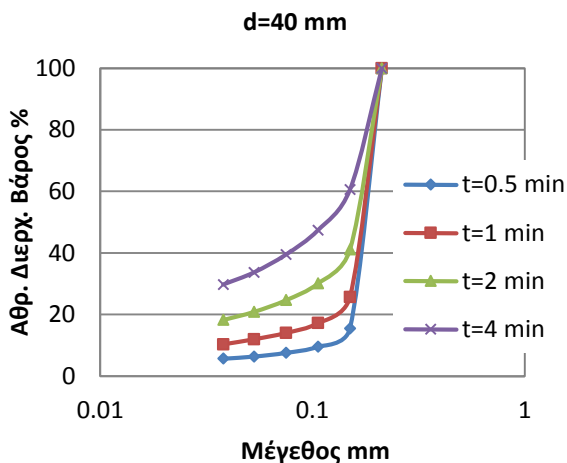
Πίνακας 4.19: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για d = 12.7 mm.

<i>d = 12.7 mm</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.212	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.150	79.63	66.45	44.08	24.74	20.37	33.55	55.92	75.26
0.106	8.53	11.09	15.40	16.09	11.85	22.45	40.53	59.17
0.075	2.83	5.26	8.56	12.60	9.02	17.19	31.96	46.56
0.053	1.82	3.09	5.56	7.46	7.20	14.10	26.40	39.10
0.038	1.31	2.27	3.45	4.86	5.89	11.83	22.95	34.24
-0.038	5.89	11.83	22.95	34.24				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

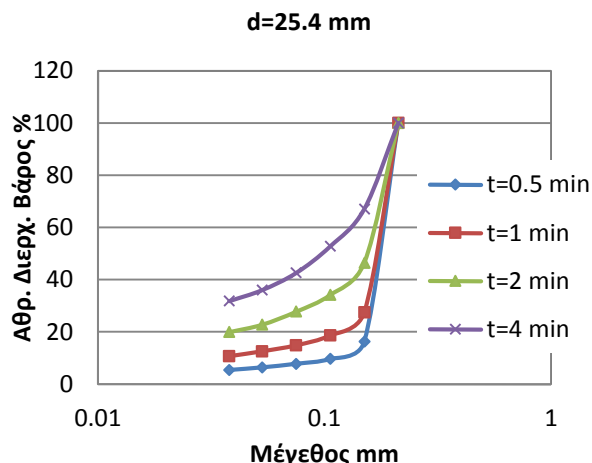
Πίνακας 4.20: Πίνακας κατανομής αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για ανάμιξη σφαιρών.

<i>mix</i>								
Μέγεθος mm	Βάρος %				Αθρ. Διερχ. Βάρος %			
	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min	t=0.5min	t=1min	t=2min	t=4min
0.212	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.150	82.10	71.51	52.69	34.65	17.90	28.49	47.31	65.35
0.106	9.15	13.00	18.59	21.16	8.75	15.49	28.72	44.19
0.075	3.34	5.70	10.68	15.23	5.41	9.79	18.04	28.96
0.053	1.99	3.44	6.92	10.08	3.42	6.35	11.12	18.87
0.038	1.45	2.58	3.99	5.96	1.98	3.77	7.13	12.91
-0.038	1.98	3.77	7.13	12.91				
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00				

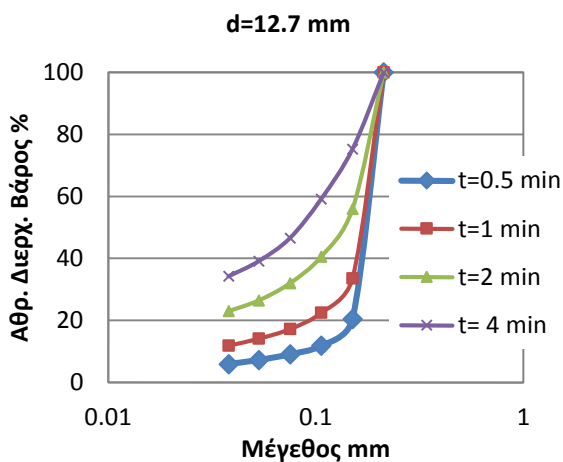
Από τους πίνακες 4.17 - 4.20 προκύπτουν τα διαγράμματα 4.17 - 4.20 που δείχνουν το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος (%) συναρτήσει του μεγέθους προϊόντος για διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετική διάμετρο σφαιρών.



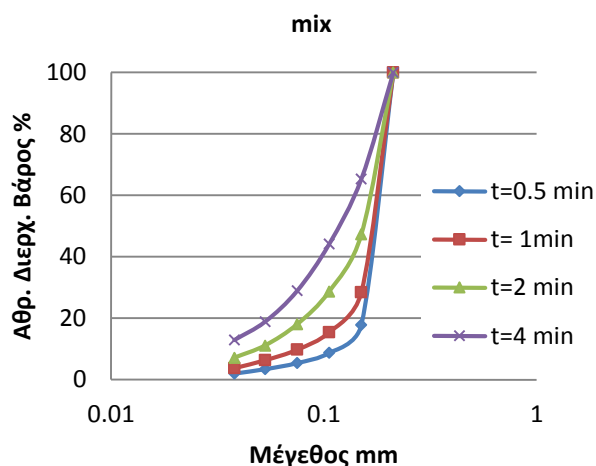
Διάγραμμα 4.17: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για d = 40 mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.18: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για d = 25.4 mm σε διάφορους χρόνους.



Διάγραμμα 4.19: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για d = 12.7 mm σε διάφορους χρόνους.

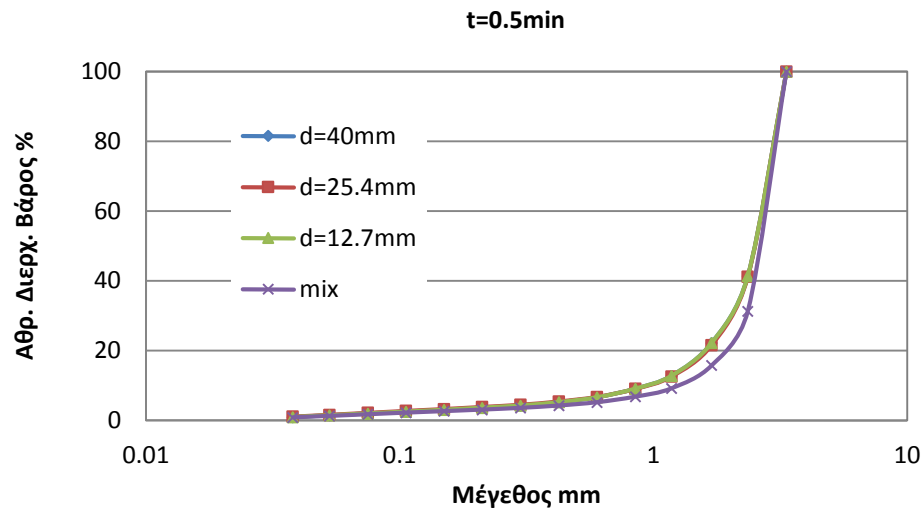


Διάγραμμα 4.20: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για την ανάμιξη σφαιρών σε διάφορους χρόνους.

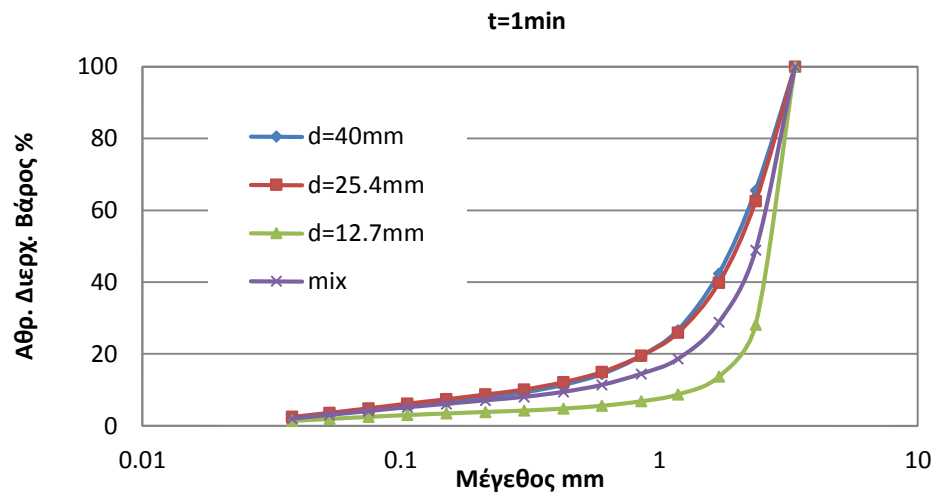
Από τα διαγράμματα 4.1 – 4.20 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος λειοτρίβησης τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος οπότε και οι καμπύλες του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) μετατοπίζονται προς τα λεπτότερα μεγέθη (αριστερά).

4.2 Επίδραση της διαμέτρου των σφαιρών

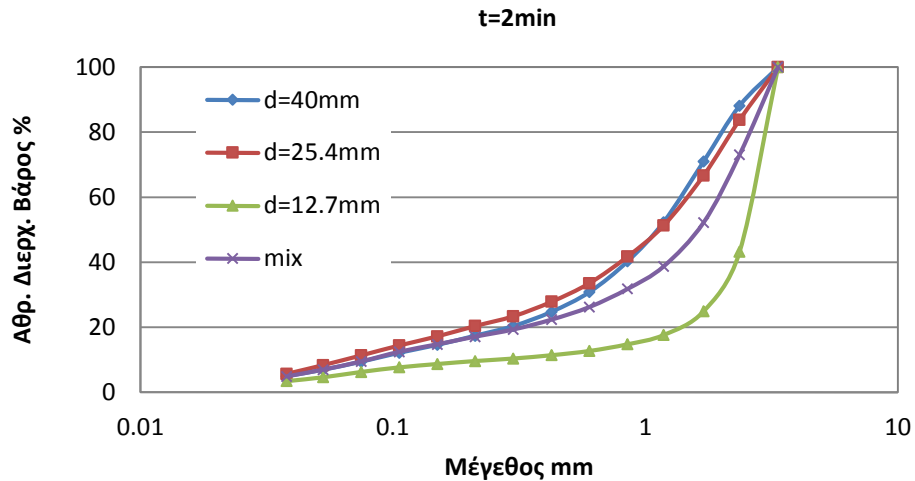
- Υλικό τροφοδοσίας - 3.35 + 2.36 mm



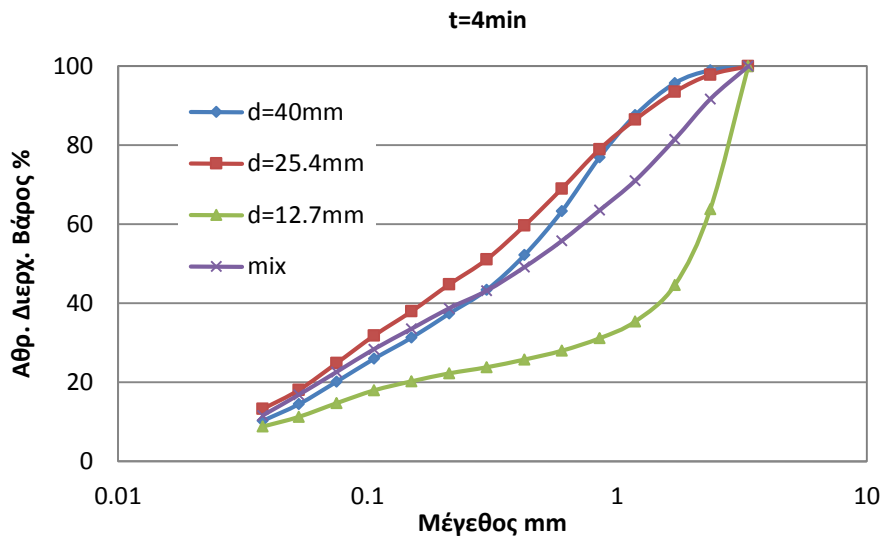
Διάγραμμα 4.21: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο t = 0.5 min.



Διάγραμμα 4.22: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο t = 1 min.



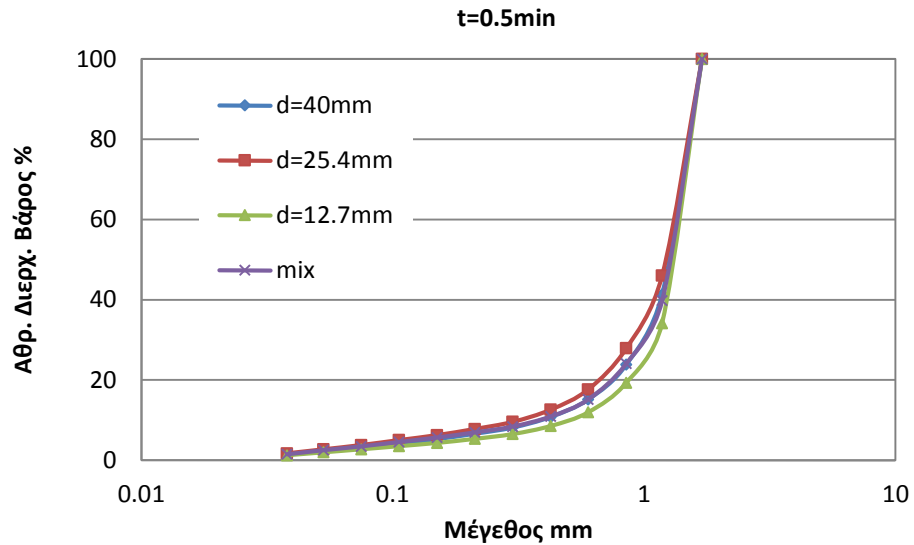
Διάγραμμα 4.23: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 2 \text{ min}$.



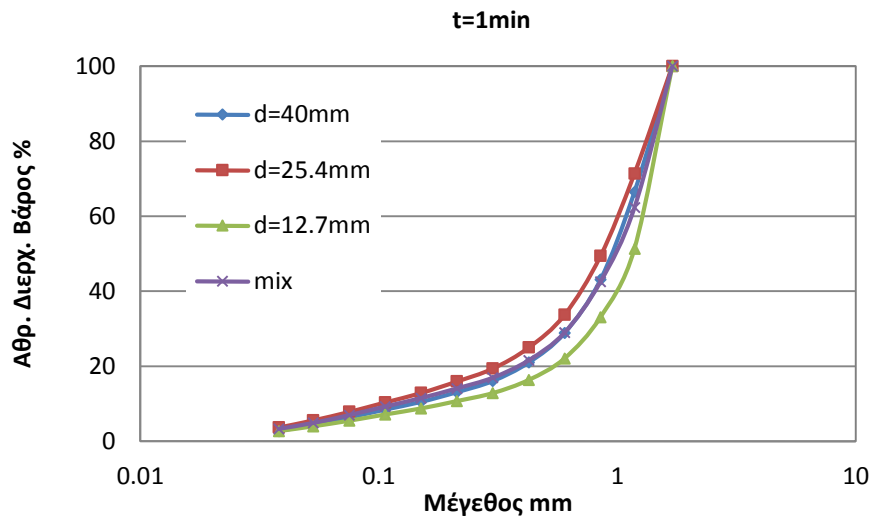
Διάγραμμα 4.24: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 3.35 + 2.36 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 4 \text{ min}$.

Στα διαγράμματα 4.21- 4.24 παρατηρούμε ότι το υλικό της τάξης μεγέθους (- 3.35 + 2.36 mm) συμπεριφέρεται διαφορετικά σε κάθε χρόνο και για συγκεκριμένη διάμετρο σφαίρας. Δηλαδή, παρατηρούμε ότι για $t = 0.5 \text{ min}$ το υλικό σπάει το ίδιο αποδοτικά για όλες τις διαμέτρους, ενώ για τους χρόνους 1, 2, 4 min το υλικό σπάει πιο αποδοτικά για διαμέτρους σφαίρας 40 mm και 25.4 mm.

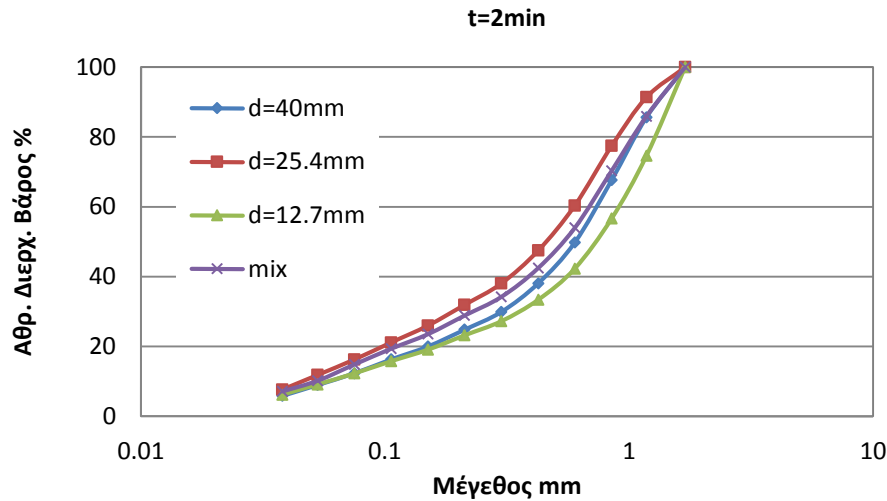
- *Υλικό τροφοδοσίας - 1.7 + 1.18 mm*



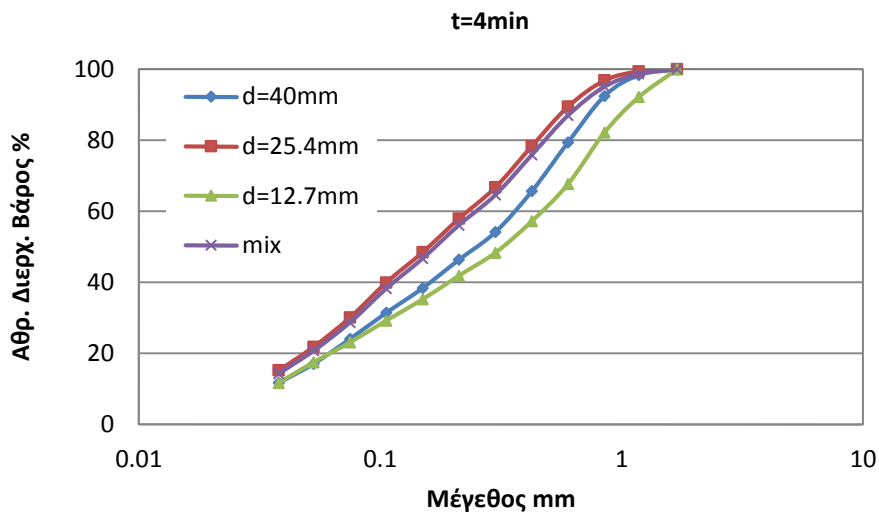
Διάγραμμα 4.25: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 0.5$ min.



Διάγραμμα 4.26: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 1$ min.



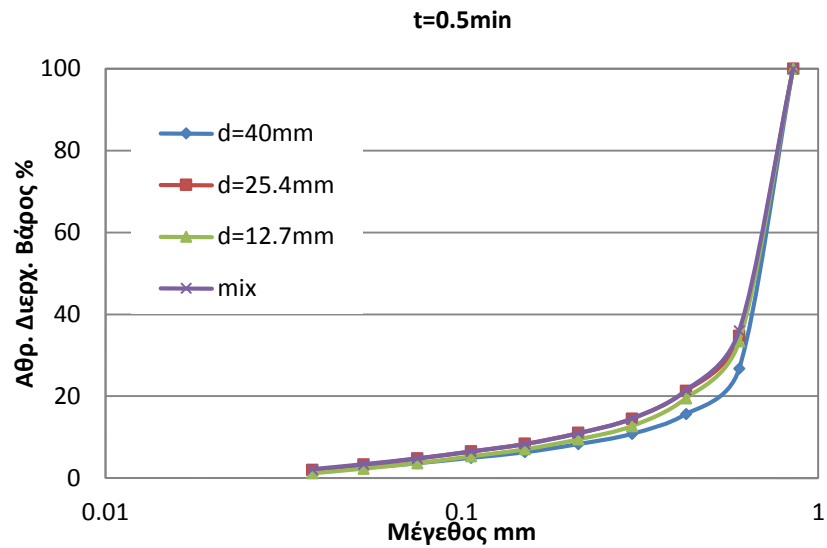
Διάγραμμα 4.27: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 2 \text{ min}$.



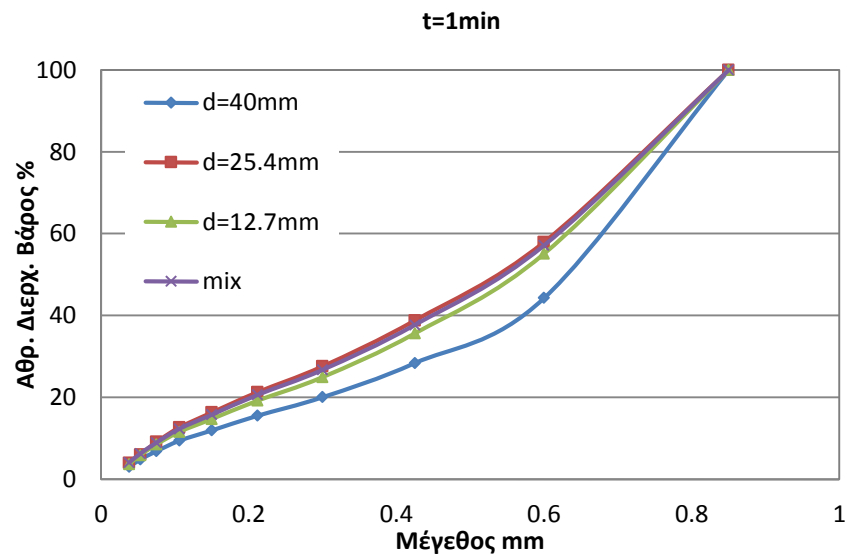
Διάγραμμα 4.28: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 1.7 + 1.18 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 4 \text{ min}$.

Στα διαγράμματα 4.25 - 4.28 παρατηρούμε ότι το υλικό της τάξης μεγέθους (- 1.7 + 1.18 mm) συμπεριφέρεται διαφορετικά σε κάθε χρόνο και για συγκεκριμένη διάμετρο σφαίρας. Δηλαδή, παρατηρούμε ότι σε όλους τους χρόνους το υλικό σπάει πιο αποδοτικά όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαμέτρου 25.4 mm, εφόσον η καμπύλη που αντιστοιχεί στην διάμετρο σφαίρας $d = 25.4 \text{ mm}$ είναι πιο αριστερά από τις υπόλοιπες καμπύλες.

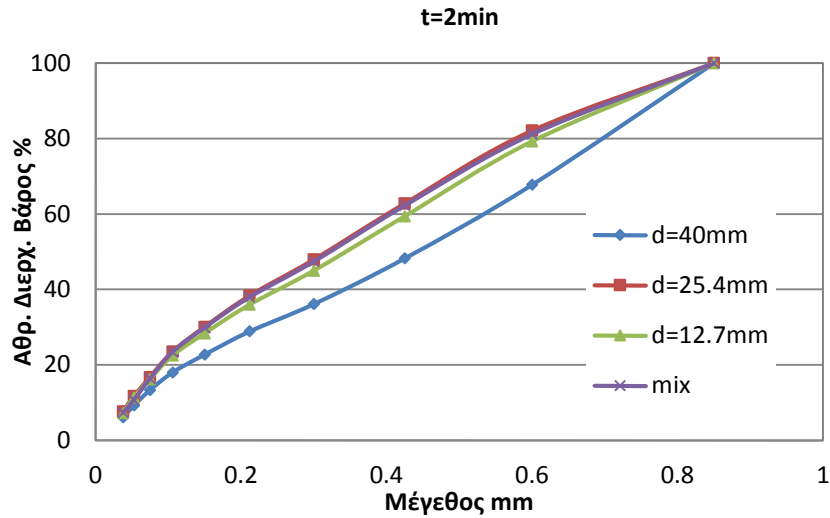
- Υλικό τροφοδοσίας – $0.850 + 0.600 \text{ mm}$



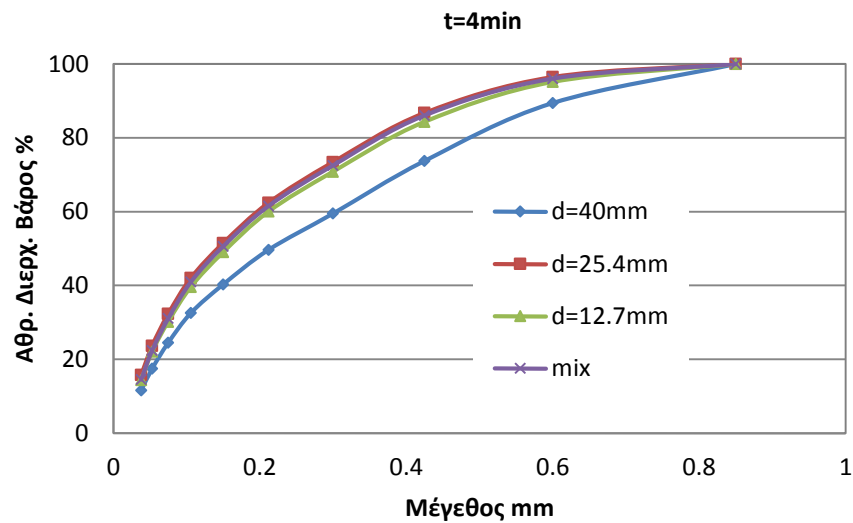
Διάγραμμα 4.29: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος ($- 0.850 + 0.600 \text{ mm}$) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 0.5 \text{ min}$.



Διάγραμμα 4.30: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος ($- 0.850 + 0.600 \text{ mm}$) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 1 \text{ min}$.



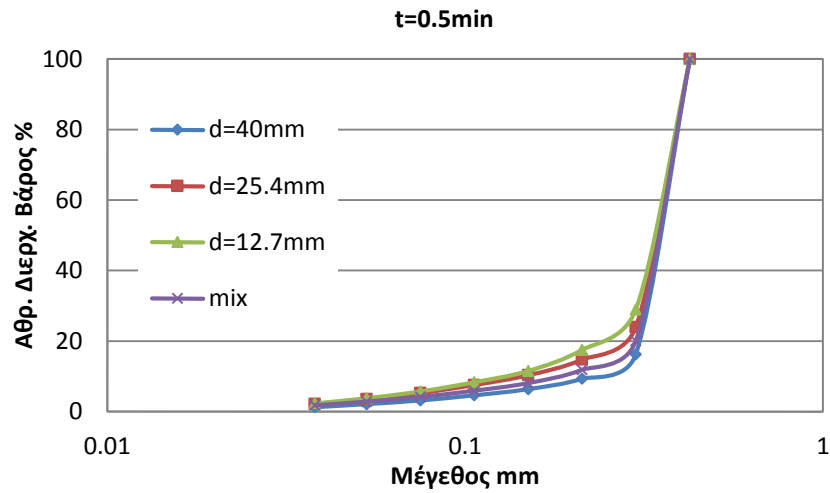
Διάγραμμα 4.31: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 2 \text{ min}$.



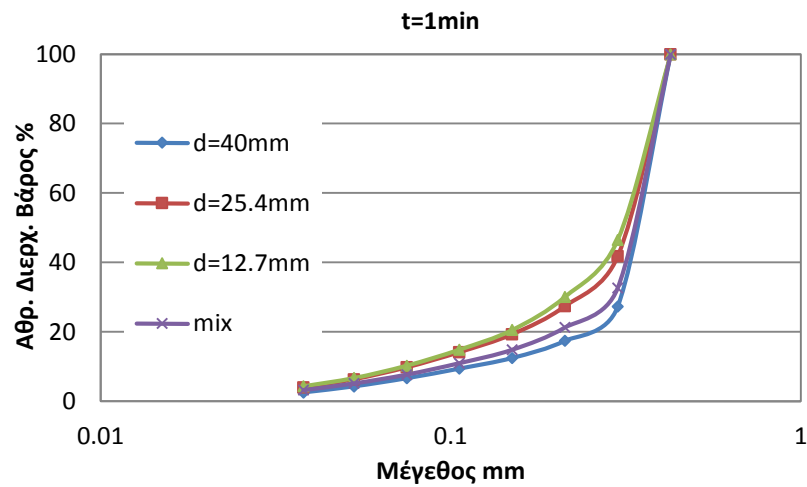
Διάγραμμα 4.32: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 4 \text{ min}$.

Στα διαγράμματα 4.29 - 4.32 παρατηρούμε ότι το υλικό της τάξης μεγέθους (- 0.850 + 0.600 mm) συμπεριφέρεται διαφορετικά σε κάθε χρόνο και για συγκεκριμένη διάμετρο σφαίρας. Δηλαδή, παρατηρούμε ότι για $t = 0.5 \text{ min}$ δεν είναι εμφανής η διαφορά της κάθε καμπύλης, εκτός από την καμπύλη που αντιστοιχεί σε διάμετρο σφαίρας 40 mm και βρίσκεται πιο δεξιά στο διάγραμμα από τις άλλες καμπύλες. Αντίθετα, για τους χρόνους 1, 2, 4 min το υλικό σπάει πιο αποδοτικά όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων (mix) καθώς και σφαίρες διαμέτρου 25.4 mm και 12.7 mm.

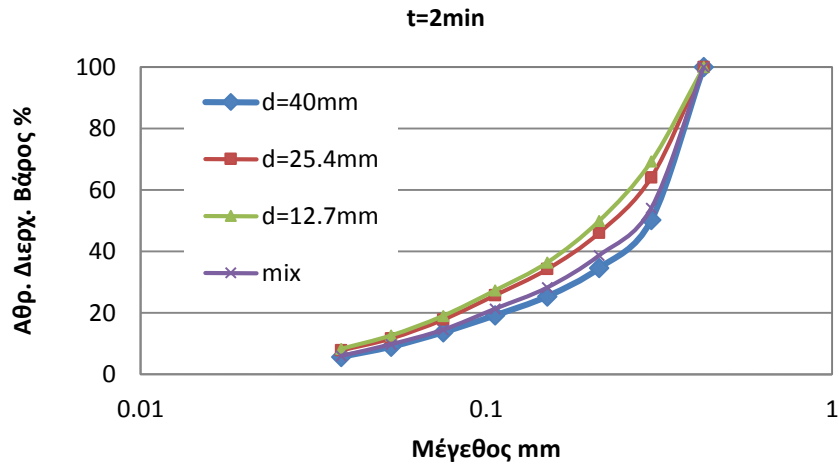
- *Υλικό τροφοδοσίας – 0.425 + 0.300 mm*



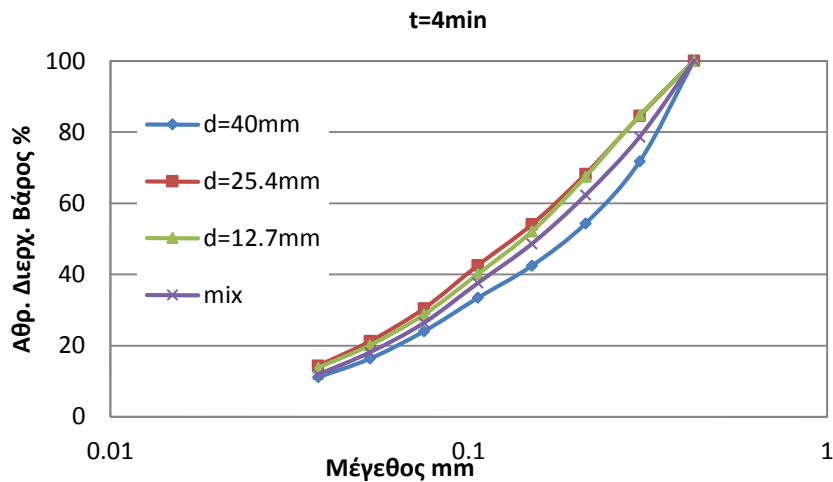
Διάγραμμα 4.33: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο t = 0.5 min.



Διάγραμμα 4.34: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο t = 1 min.



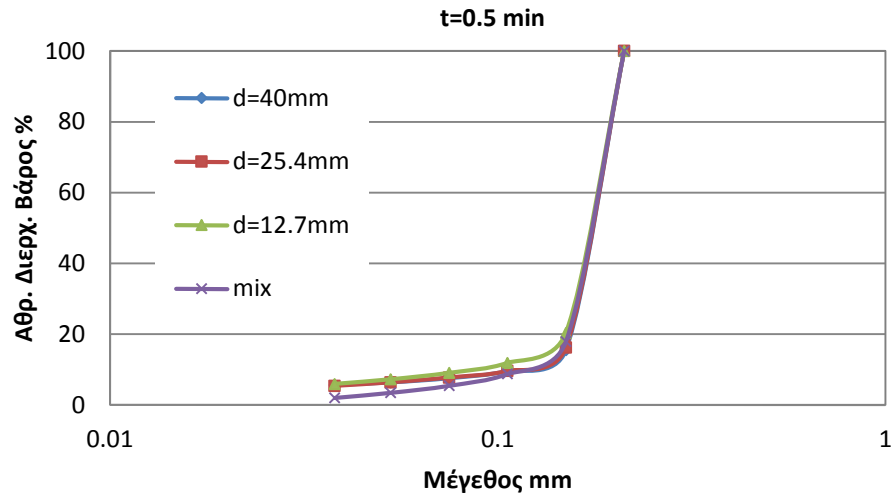
Διάγραμμα 4.35: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 2$ min.



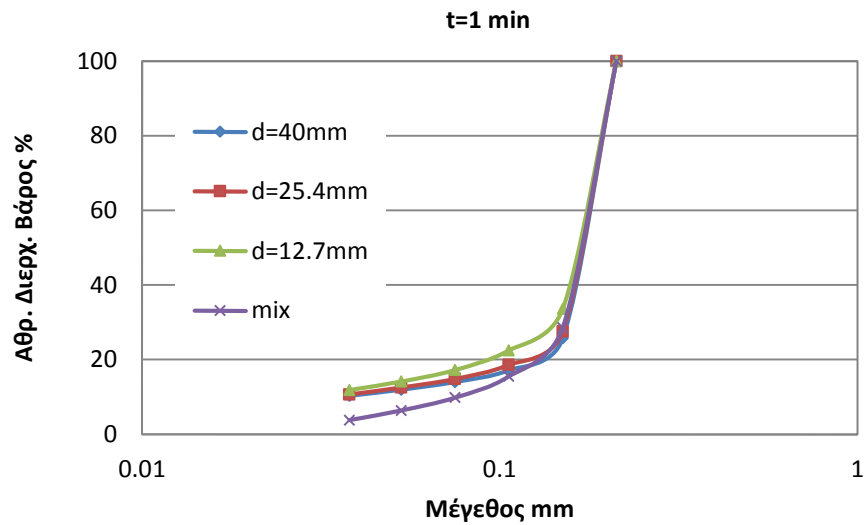
Διάγραμμα 4.36: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.425 + 0.300 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 4$ min.

Στα διαγράμματα 4.33 - 4.36 παρατηρούμε ότι το υλικό της τάξης μεγέθους (- 0.425 + 0.300 mm) συμπεριφέρεται διαφορετικά σε κάθε χρόνο και για συγκεκριμένη διάμετρο σφαίρας. Δηλαδή, παρατηρούμε ότι για όλους τους χρόνους το υλικό σπάει πιο αποδοτικά όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαμέτρου 25.4 mm και 12.7 mm, ενώ όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων (mix) καθώς και σφαίρες διαμέτρου 40 mm το υλικό σπάει λιγότερο αποδοτικά.

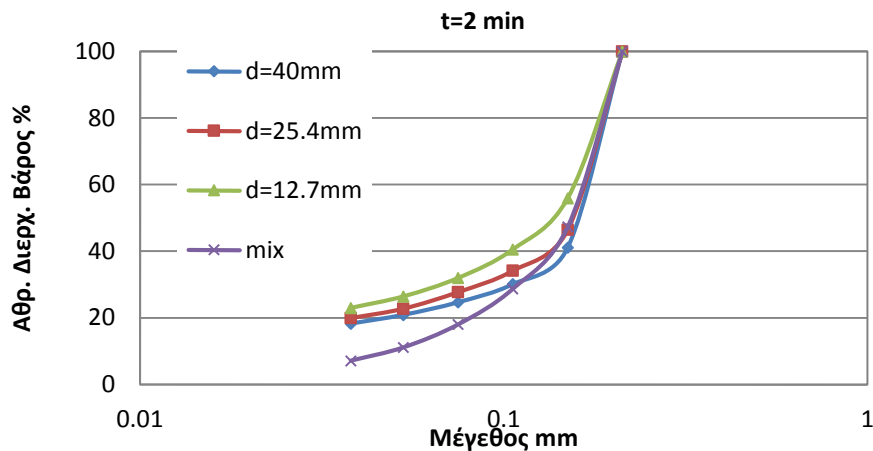
- Υλικό τροφοδοσίας – $0.212 + 0.150 \text{ mm}$



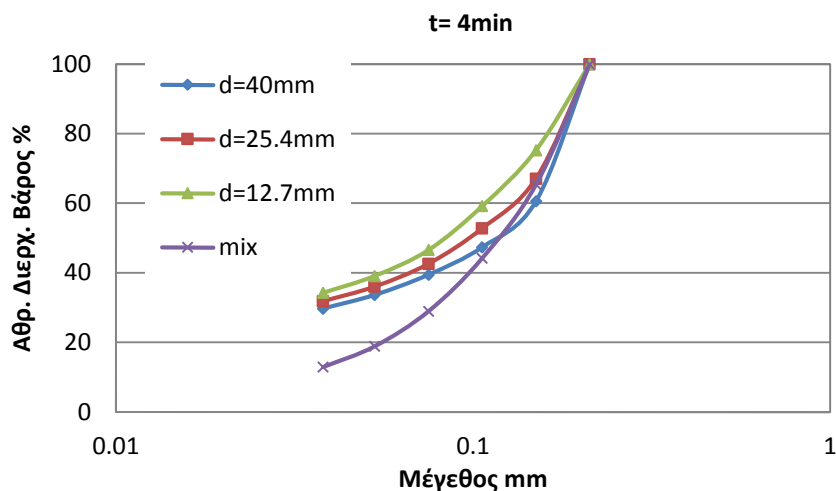
Διάγραμμα 4.37: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος ($- 0.212 + 0.150 \text{ mm}$) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 0.5 \text{ min}$.



Διάγραμμα 4.38: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος ($- 0.212 + 0.150 \text{ mm}$) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 1 \text{ min}$.



Διάγραμμα 4.39: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 2$ min.



Διάγραμμα 4.40: Οι καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους (%) του κλάσματος (- 0.212 + 0.150 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών σε χρόνο $t = 4$ min.

Στα διαγράμματα 4.37 - 4.40 παρατηρούμε ότι το υλικό της τάξης μεγέθους (- 0.212 + 0.150 mm) συμπεριφέρεται διαφορετικά σε κάθε χρόνο και για συγκεκριμένη διάμετρο σφαίρας. Πιο συγκεκριμένα σε όλους τους χρόνους οι μικρότερες σφαίρες (25.4 mm και 12.7) σπάνε πιο αποδοτικά το υλικό, εφόσον οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις συγκεκριμένες διαμέτρους σφαιρών βρίσκονται πιο αριστερά (στα λεπτότερα μεγέθη) σε σχέση με τις άλλες σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα (4.37 - 4.40).

Γενικά από τα διαγράμματα 4.21 - 4.40 παρατηρούμε ότι για το υλικό τροφοδοσίας (- 3.35 + 2.36 mm) που είναι το πιο χονδρό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία, η καμπύλη της $d = 40$ mm είναι πιο αριστερά (στα λεπτότερα μεγέθη, ενώ για τα πιο ψιλά υλικά τροφοδοσίας η καμπύλη της $d = 40$ mm μετακινείται δεξιότερα. Αυτό δείχνει ότι στα χονδρά κλάσματα πιο

αποδοτικές είναι οι μεγαλύτερες σφαίρες (40 mm), ενώ στα πιο λεπτά κλάσματα πιο αποδοτικές είναι οι σφαίρες μικρής διαμέτρου (25.4 mm και 12.7 mm).

4.3 Ειδική ενέργεια συναρτήσει D_{80}

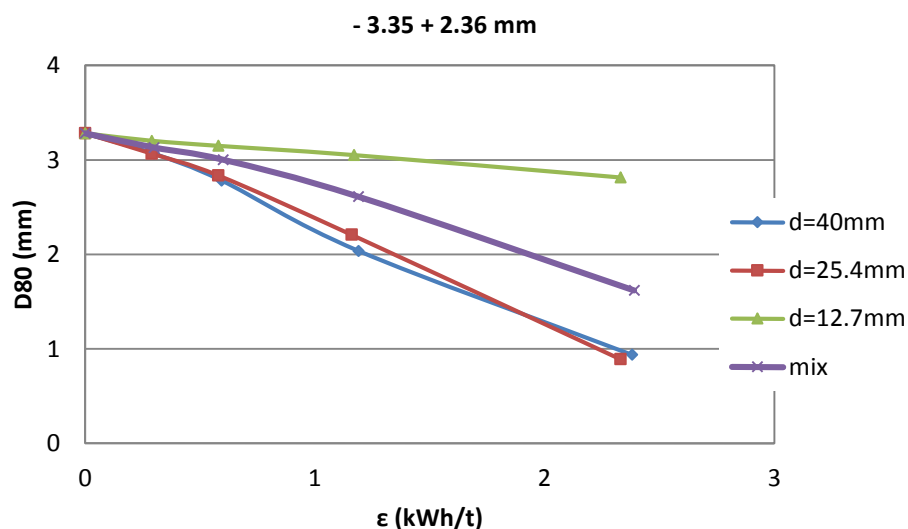
Από τα παραπάνω διαγράμματα 4.21 - 4.40 υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια (ϵ) και το μέγεθος όπου διέρχεται το 80% του υλικού (D_{80}).

Στους πίνακες 4.21 - 4.25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και στη συνέχεια τα διαγράμματα (4.41 – 4.45).

- **Υλικό τροφοδοσίας – 3.35 + 2.36 mm**

Πίνακας 4.21: Πίνακας Ειδικής ενέργειας σε σχέση με το D_{80} για το κλάσμα (- 3.35 + 2.36 mm).

	$d=40\text{ mm}$		$d=25.4\text{ mm}$		$d=12.7\text{ mm}$		<i>mix</i>	
<i>Χρόνος</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	D_{80}	<i>Ειδική ενέργεια</i>	D_{80}	<i>Ειδική ενέργεια</i>	D_{80}	<i>Ειδική ενέργεια</i>	D_{80}
<i>min</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>
0.00	0.00	3.28	0.00	3.28	0.00	3.28	0.00	3.28
0.50	0.30	3.07	0.29	3.07	0.29	3.20	0.30	3.13
1.00	0.59	2.78	0.58	2.84	0.58	3.15	0.60	3.00
2.00	1.19	2.04	1.16	2.21	1.17	3.05	1.19	2.61
4.00	2.38	0.94	2.33	0.89	2.33	2.81	2.39	1.62



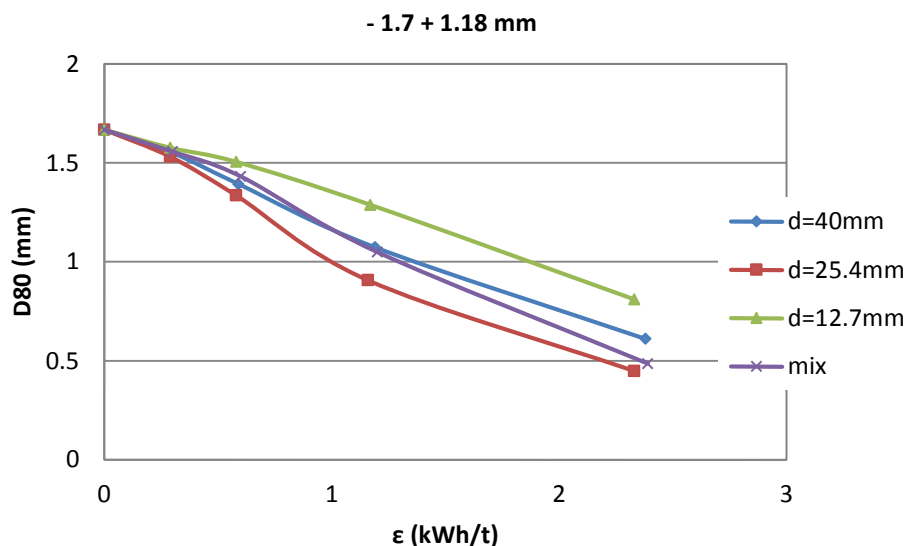
Διάγραμμα 4.41: Οι καμπύλες του D_{80} της τάξης μεγέθους (- 3.35 + 2.36 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

Στο διάγραμμα 4.41 παρατηρούμε ότι για ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας το D_{80} είναι μικρότερο για διάμετρο σφαίρας 40 mm, ενώ για διάμετρο σφαίρας 25.4 mm είναι ελάχιστο μεγαλύτερο. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων (mix) καθώς και σφαίρες διαμέτρου 12.7 mm το μέγεθος του D_{80} είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις άλλες διαμέτρους σφαιρών.

- **Υλικό τροφοδοσίας – 1.7 + 1.18 mm**

Πίνακας 4.22: Πίνακας Ειδικής ενέργειας σε σχέση με το D_{80} για το κλάσμα (- 1.7 + 1.18 mm).

	<i>d=40 mm</i>		<i>d=25.4 mm</i>		<i>d=12.7 mm</i>		<i>mix</i>	
<i>Χρόνος</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	<i>D₈₀</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	<i>D₈₀</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	<i>D₈₀</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	<i>D₈₀</i>
<i>min</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>
0.00	0.00	1.67	0.00	1.67	0.00	1.67	0.00	1.67
0.50	0.30	1.55	0.29	1.53	0.29	1.58	0.30	1.56
1.00	0.59	1.39	0.58	1.34	0.58	1.50	0.60	1.43
2.00	1.19	1.07	1.16	0.91	1.17	1.29	1.20	1.05
4.00	2.38	0.61	2.33	0.45	2.33	0.81	2.39	0.49



Διάγραμμα 4.42: Οι καμπύλες του D_{80} του κλάσματος (- 1.17 + 1.18 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

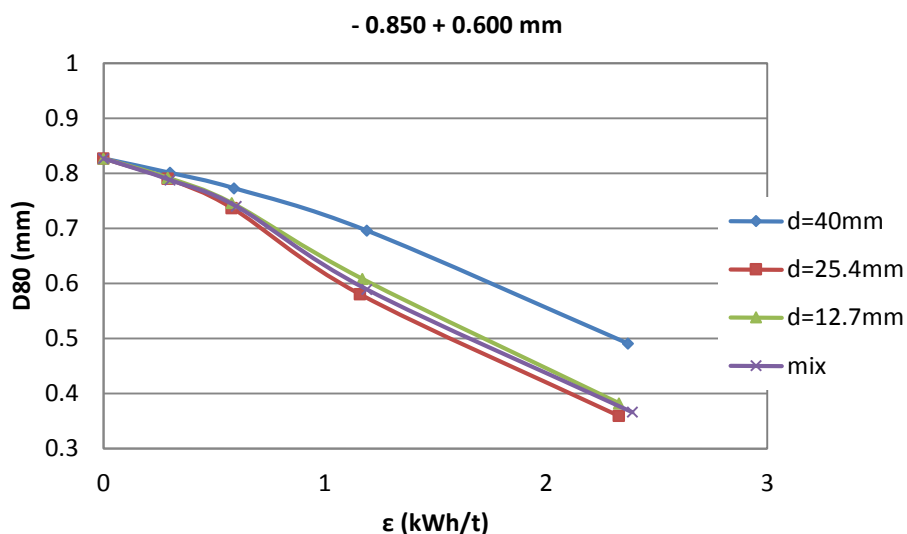
Στο διάγραμμα 4.42 παρατηρούμε ότι για ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας το D_{80} είναι μικρότερο για διάμετρο σφαίρας 25.4 mm, ενώ όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων καθώς και σφαίρες διαμέτρου 40 mm το προϊόν έχει σχεδόν το ίδιο μέγεθος. Αντίθετα, για τη διάμετρο σφαίρας 12.7 mm το μέγεθος του D_{80} είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις υπόλοιπες διαμέτρους σφαιρών. Σε σύγκριση με το κλάσμα (- 3.35 + 2.36 mm) παρατηρούμε

ότι για διάμετρο σφαιρών 40 mm και 25.4 mm το κλάσμα (- 1.7 + 1.18 mm) συμπεριφέρεται διαφορετικά.

- **Υλικό τροφοδοσίας - 0.850 + 0.600 mm**

Πίνακας 4.23: Πίνακας Ειδικής ενέργειας σε σχέση με το D_{80} για το κλάσμα (- 0.850 + 0.600) mm.

	$d=40\text{ mm}$		$d=25.4\text{ mm}$		$d=12.7\text{ mm}$		<i>mix</i>	
<i>Χρόνος</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	D_{80}	<i>Ειδική ενέργεια</i>	D_{80}	<i>Ειδική ενέργεια</i>	D_{80}	<i>Ειδική ενέργεια</i>	D_{80}
<i>min</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>
0.00	0.00	0.83	0.00	0.83	0.00	0.83	0.00	0.83
0.50	0.30	0.80	0.29	0.79	0.29	0.79	0.30	0.79
1.00	0.59	0.77	0.58	0.74	0.58	0.75	0.60	0.74
2.00	1.19	0.70	1.16	0.58	1.17	0.61	1.19	0.59
4.00	2.37	0.49	2.33	0.36	2.33	0.38	2.39	0.37



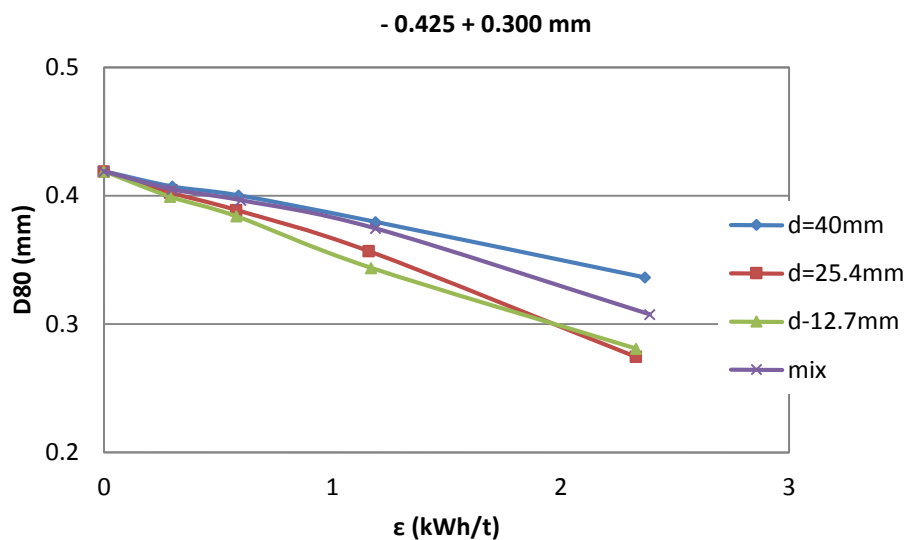
Διάγραμμα 4.43: Οι καμπύλες του D_{80} του κλάσματος (- 0.850 + 0.600 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

Στο διάγραμμα 4.43 παρατηρούμε ότι για ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας το D_{80} όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων (mix) και σφαίρες 25.4 mm και 12.7 mm έχει σχεδόν το ίδιο μέγεθος αλλά το μικρότερο μέγεθος δίνεται για τη διάμετρο σφαίρας 25.4 mm. Αντίθετα, για τη διάμετρο σφαίρας 40mm το μέγεθος του D_{80} είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις υπόλοιπες διαμέτρους σφαιρών. Επίσης, παρατηρούμε ότι αυτό το κλάσμα σε σχέση με το προηγούμενο (- 1.7 + 1.18 mm) για διάμετρο σφαιρών 40 mm και 12.7 mm συμπεριφέρεται διαφορετικά.

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

Πίνακας 4.24: Πίνακας Ειδικής ενέργειας σε σχέση με το D_{80} για το κλάσμα ($- 0.425 + 0.300 \text{ mm}$).

	$d=40 \text{ mm}$		$d=25.4 \text{ mm}$		$d=12.7 \text{ mm}$		mix	
Χρόνος	Ειδική ενέργεια	D_{80}	Ειδική ενέργεια	D_{80}	Ειδική ενέργεια	D_{80}	Ειδική ενέργεια	D_{80}
min	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)	kWh/t	(mm)
0.00	0.00	0.42	0.00	0.42	0.00	0.42	0.00	0.42
0.50	0.30	0.41	0.29	0.40	0.29	0.40	0.30	0.40
1.00	0.59	0.40	0.58	0.39	0.58	0.38	0.60	0.40
2.00	1.19	0.38	1.16	0.36	1.17	0.34	1.19	0.37
4.00	2.37	0.34	2.33	0.27	2.33	0.28	2.39	0.31



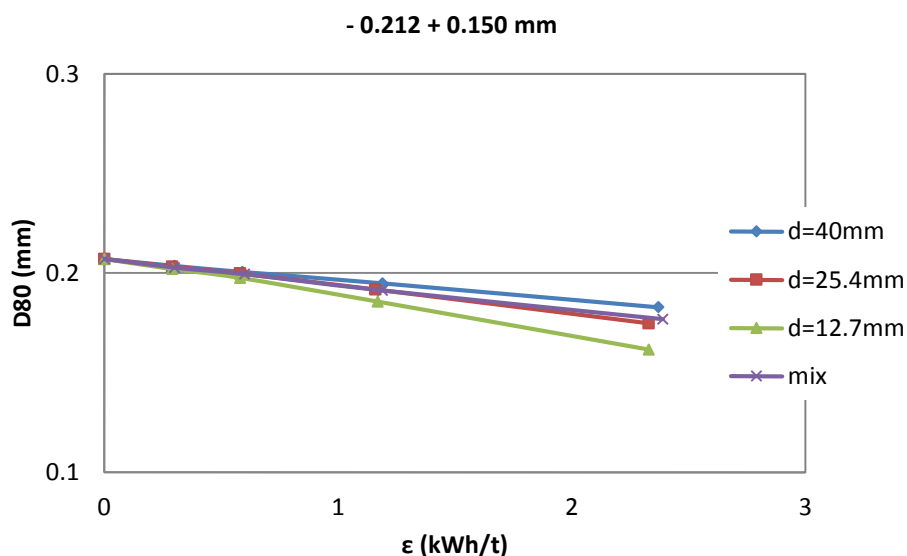
Διάγραμμα 4.44: Οι καμπύλες του D_{80} της τάξης μεγέθους ($- 0.425 + 0.300 \text{ mm}$) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

Στο διάγραμμα 4.44 παρατηρούμε ότι για ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας το D_{80} για τη διάμετρο σφαίρας 12.7 mm είναι μικρότερο, ενώ για τη διάμετρο σφαίρας 25.4 mm το προϊόν έχει λίγο μεγαλύτερο μέγεθος. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων (mix) και σφαίρες διαμέτρου 40 mm το μέγεθος του D_{80} είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις υπόλοιπες διαμέτρους σφαιρών.

- **Υλικό τροφοδοσίας – 0.212 + 0.150 mm**

Πίνακας 4.25: Πίνακας Ειδικής ενέργειας σε σχέση με το D_{80} για την τάξη μεγέθους (- 0.212 + 0.150 mm).

	<i>d=40mm</i>		<i>d=25.4mm</i>		<i>d=12.7mm</i>		<i>mix</i>	
<i>Χρόνος</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	<i>D₈₀</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	<i>D₈₀</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	<i>D₈₀</i>	<i>Ειδική ενέργεια</i>	<i>D₈₀</i>
<i>min</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>	<i>kWh/t</i>	<i>(mm)</i>
0.00	0.00	0.21	0.00	0.21	0.00	0.21	0.00	0.21
0.50	0.30	0.20	0.29	0.20	0.29	0.20	0.30	0.20
1.00	0.59	0.20	0.58	0.20	0.58	0.20	0.60	0.20
2.00	1.19	0.19	1.16	0.19	1.17	0.19	1.19	0.19
4.00	2.37	0.18	2.33	0.17	2.33	0.16	2.39	0.18



Διάγραμμα 4.45: Οι καμπύλες του D_{80} της τάξης μεγέθους (- 0.212 + 0.150 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

Τέλος, και στο διάγραμμα 4.45 παρατηρούμε ότι για ίδια τιμή της ειδικής ενέργειας το μέγεθος προϊόντος D_{80} είναι σχεδόν ίδιο για όλες τις διαμέτρους σφαιρών, εκτός από τη διάμετρο σφαιρών 12.7 mm. Πιο συγκεκριμένα, μικρότερο μέγεθος του προϊόντος παρατηρείται όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες διαμέτρους 12.7 mm.

Γενικότερα στα διαγράμματα 4.41 – 4.45 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ενέργεια τόσο το μέγεθος του προϊόντος μειώνεται. Επίσης, παρατηρούμε ότι για συγκεκριμένη τιμή της ειδικής ενέργειας, όταν χρησιμοποιούμε σφαίρες μεγάλου μεγέθους στα χονδρότερα κλάσματα το μέγεθος που διέρχεται από το 80% μικραίνει, ενώ στα λεπτότερα κλάσματα συμβαίνει το αντίθετο. Δηλαδή, οι μεγάλοι μεγέθους σφαίρες θραύουν πιο αποδοτικά τα χονδρότερα κλάσματα, ενώ στα λεπτότερα μεγέθη είναι πιο αποδοτικές οι σφαίρες μικρότερου μεγέθους.

4.4 Ρυθμός Θραύσης συναρτήσει χρόνου

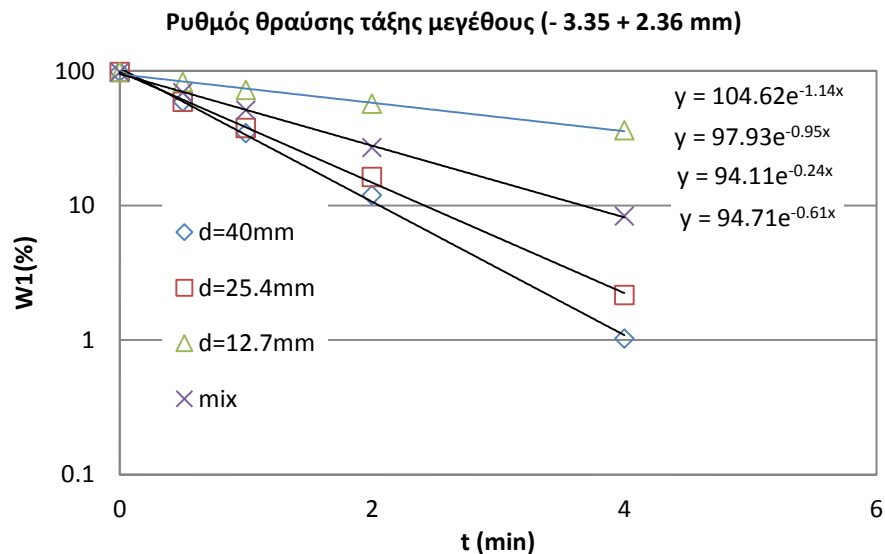
Για καθένα από τα κλάσματα υλικών τροφοδοσίας μελετήθηκε ο ρυθμός με τον οποίο θραύονται για τις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν, με τη βοήθεια της σχέσης (11) που έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος. Από τη μελέτη αυτή προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.46 - 4.50 τα οποία παριστάνουν το βάρος (%) υλικού που έχει παραμείνει σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης.

Επίσης, από το θεωρητικό μέρος της εργασίας γνωρίζουμε ότι ο ρυθμός θραύσης είναι ανεξάρτητος του χρόνου και η κλίση κάθε ευθείας είναι ο ρυθμός θραύσης S_i που αντιστοιχεί σε κάθε διάμετρο σφαίρας. Επομένως από τη γραμμική τάσης της κάθε ευθείας μπορούμε να βρούμε το S_i (min^{-1}).

- **Υλικό τροφοδοσίας – 3.35 + 2.36 mm**

Πίνακας 4.26: Πίνακας βάρους (%) υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους (- 3.35 + 2.36 mm) σε σχέση με το χρόνο για κάθε διάμετρο σφαίρας.

- 3.35 + 2.36 mm				
Χρόνος (min)	Βάρος (40mm)	Βάρος (25.4mm)	Βάρος (12.7mm)	Βάρος (mix)
0.00	97.80	97.80	97.80	97.80
0.50	58.61	58.82	82.50	68.69
1.00	34.41	37.44	71.82	51.08
2.00	11.85	16.21	56.78	26.93
4.00	1.02	2.15	36.19	8.31



Διάγραμμα 4.46: Οι καμπύλες που δείχνουν το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους (- 3.35 + 2.36 mm) για κάθε διάμετρο σφαιρών.

Από το διάγραμμα 4.46 παρατηρούμε τους ρυθμούς θραύσης της τάξης μεγέθους (- 3.35 + 2.36 mm) για κάθε διάμετρο σφαίρας.

Πίνακας 4.27: Ρυθμοί θραύσης της τάξης μεγέθους (- 3.35 + 2.36 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

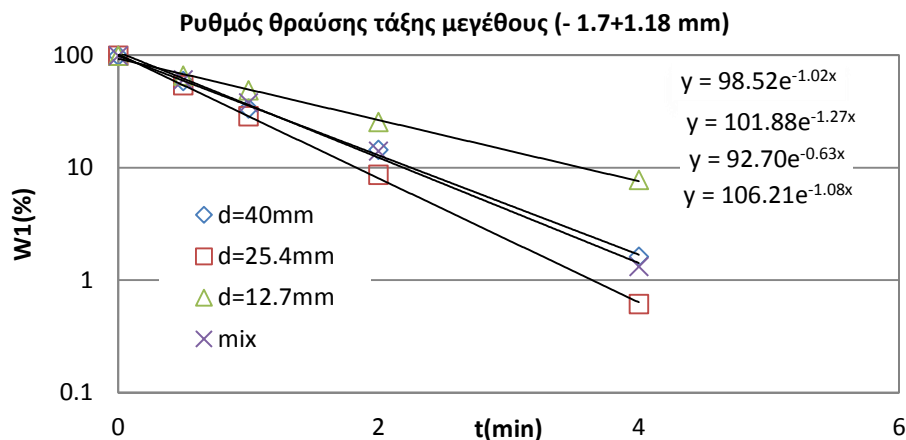
<i>d (mm)</i>	<i>Si (min⁻¹)</i>
40	1.14
25.4	0.95
12.7	0.24
mix	0.61

Από το παραπάνω πίνακα 4.27 παρατηρούμε ότι για την τάξη μεγέθους (- 3.35 + 2.36 mm) όσο αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών, αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης. Επίσης, παρατηρούμε ότι όταν αυξάνεται η διάμετρος σφαιρών από 12.7 mm σε 25.4 mm ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται και φτάνει μια μέγιστη τιμή όταν χρησιμοποιούμε διάμετρο σφαιρών 40 mm, ενώ όταν χρησιμοποιούμε διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix) ο ρυθμός θραύσης παίρνει μια ενδιάμεση τιμή σε σχέση με τους ρυθμούς θραύσης των υπόλοιπων διαμέτρων σφαιρών.

- **Υλικό τροφοδοσίας – 1.7 + 1.18 mm**

Πίνακας 4.28: Πίνακας βάρους (%) υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους (- 1.7 + 1.18 mm) σε σχέση με τον χρόνο για κάθε διάμετρο σφαίρας.

<i>- 1.7 + 1.18 mm</i>				
<i>Χρόνος (min)</i>	<i>Βάρος (40mm)</i>	<i>Βάρος (25.4mm)</i>	<i>Βάρος (12.7mm)</i>	<i>Βάρος (mix)</i>
0	98.4	98.4	98.4	98.4
0.5	58.64	53.97	65.82	60.23
1	33.53	28.63	48.67	37.71
2	14.37	8.63	25.41	14.06
4	1.62	0.61	7.79	1.32



Διάγραμμα 4.47: Οι καμπύλες που δείχνουν το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους (- 1.7 + 1.18 mm) για κάθε διάμετρο σφαιρών.

Από το διάγραμμα 4.47 παρατηρούμε τους ρυθμούς θραύσης της τάξης μεγέθους (- 1.7 + 1.18 mm) για κάθε διάμετρο σφαίρας.

Πίνακας 4.29: Ρυθμοί θραύσης της τάξης μεγέθους (- 1.7 + 1.18 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

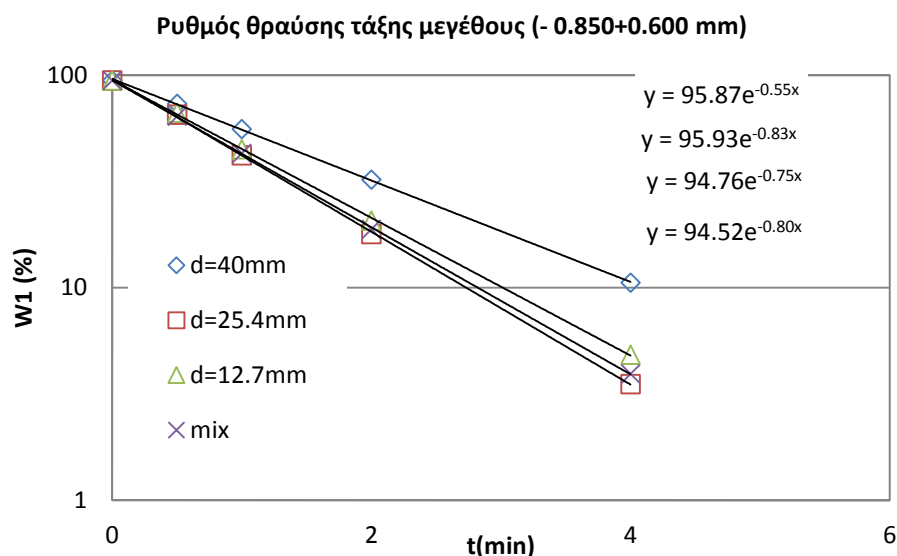
<i>d (mm)</i>	<i>Si (min⁻¹)</i>
40	1.02
25.4	1.27
12.7	0.63
mix	1.08

Από τον παραπάνω πίνακα 4.29 παρατηρούμε ότι για την τάξη μεγέθους (- 1.7 + 1.18 mm) όταν αυξάνεται η διάμετρος σφαιρών από 12.7 mm σε 40 mm τότε, αρχικά ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται, φτάνει μια μέγιστη τιμή σε διάμετρο σφαιρών 25.4 mm και στη συνέχεια μειώνεται όταν χρησιμοποιούμε διάμετρο σφαιρών 40 mm. Επίσης, παρατηρούμε ότι όταν χρησιμοποιούμε διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix) ο ρυθμός θραύσης παίρνει μια ενδιάμεση τιμή σε σχέση με τους ρυθμούς θραύσης των υπόλοιπων διαμέτρων σφαιρών.

- Υλικό τροφοδοσίας – 0.850 + 0.600 mm**

Πίνακας 4.30: Πίνακας βάρους (%) υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους (-0.850 + 0.600 mm) σε σχέση με το χρόνο για κάθε διάμετρο σφαίρας.

- 0.850 + 0.600 mm				
<i>Χρόνος (min)</i>	<i>Βάρος (40mm)</i>	<i>Βάρος (25.4mm)</i>	<i>Βάρος (12.7mm)</i>	<i>Βάρος (mix)</i>
0	94.4	94.4	94.4	94.4
0.5	73.28	65.26	66.41	64.00
1	55.72	42.06	44.90	42.86
2	32.26	17.91	20.74	18.84
4	10.56	3.52	4.85	3.94



Διάγραμμα 4.48: Οι καμπύλες που δείχνουν το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους (- 0.850 + 0.600 mm) για κάθε διάμετρο σφαιρών.

Από το διάγραμμα 4.48 παρατηρούμε τους ρυθμούς θραύσης της τάξης μεγέθους (- 0.850 + 0.600 mm) για κάθε διάμετρο σφαίρας.

Πίνακας 4.31: Ρυθμοί θραύσης της τάξης μεγέθους (- 0.850 + 0.600 mm) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

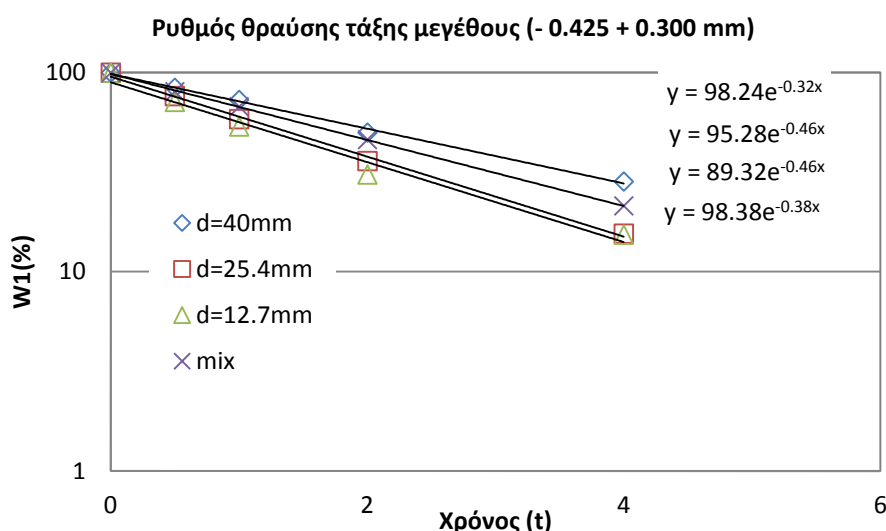
d (mm)	Si (min^{-1})
40	0.55
25.4	0.83
12.7	0.75
mix	0.80

Από τον πίνακα 4.31 παρατηρούμε ότι για την τάξη μεγέθους (- 0.850 + 0.600) όσο αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών, αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης. Δηλαδή, όταν αυξάνεται η διάμετρος σφαιρών από 12.7 mm σε 25.4 mm τότε, αρχικά, ο ρυθμός θραύσης αυξάνεται, φτάνει μια μέγιστη τιμή σε διάμετρο σφαιρών 25.4 mm και στη συνέχεια μειώνεται όταν χρησιμοποιούμε διάμετρο σφαιρών 40 mm. Επίσης, όταν χρησιμοποιούμε διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix) ο ρυθμός θραύσης παίρνει μια ενδιάμεση τιμή σε σχέση με τις υπόλοιπες διαμέτρους σφαιρών.

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

Πίνακας 4.32: Πίνακας βάρους (%) υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους ($- 0.425 + 0.300 \text{ mm}$) σε σχέση με το χρόνο για κάθε διάμετρο σφαίρας.

$- 0.425 + 0.300 \text{ mm}$				
Χρόνος (min)	Βάρος (40mm)	Βάρος (25.4mm)	Βάρος (12.7mm)	Βάρος (mix)
0	99.6	99.6	99.6	99.6
0.5	83.72	76.00	71.05	79.92
1	72.70	58.20	53.46	67.31
2	49.80	35.88	30.67	45.87
4	28.29	15.49	15.32	21.36



Διάγραμμα 4.49: Οι καμπύλες που δείχνουν το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους ($- 0.425 + 0.300 \text{ mm}$) για κάθε διάμετρο σφαιρών.

Από το διάγραμμα 4.49 παρατηρούμε τους ρυθμούς θραύσης της τάξης μεγέθους ($- 0.425 + 0.300 \text{ mm}$) για κάθε διάμετρο σφαίρας.

Πίνακας 4.33: Ρυθμοί θραύσης της τάξης μεγέθους ($- 0.425 + 0.300 \text{ mm}$) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

$d \text{ (mm)}$	$Si \text{ (min}^{-1}\text{)}$
40	0.32
25.4	0.46
12.7	0.46
mix	0.38

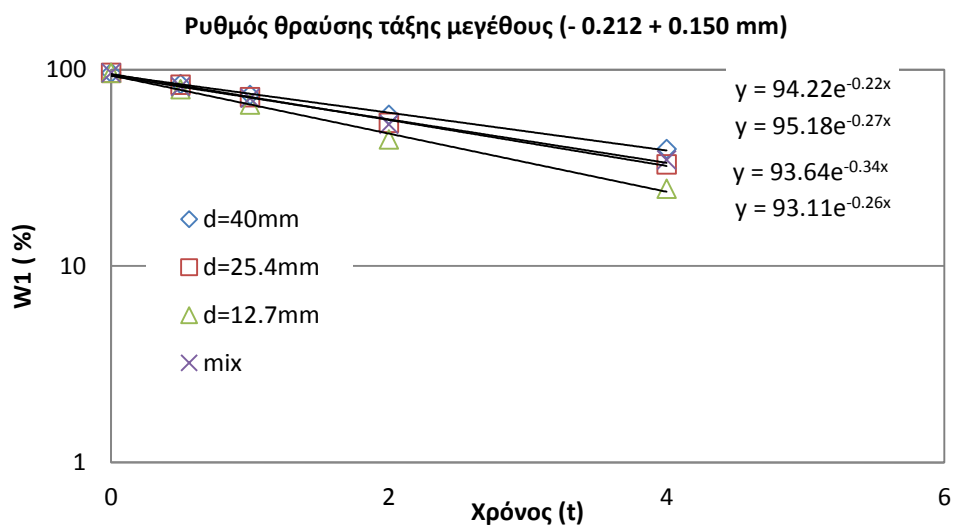
Από τον πίνακα 4.33 παρατηρούμε ότι για την τάξη μεγέθους ($- 0.425 + 0.300$) ο ρυθμός θραύσης για διαμέτρους σφαιρών 12.7 και 25.4 ταυτίζεται, ενώ όταν χρησιμοποιούμε διάμετρο σφαιρών 40 mm ο ρυθμός θραύσης μειώνεται. Επίσης, παρατηρούμε ότι όταν χρησιμοποιούμε

διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών ο ρυθμός θραύσης έχει μια ενδιάμεση τιμή σε σχέση με τους ρυθμούς θραύσης των υπόλοιπων διαμέτρων σφαιρών.

- **Υλικό τροφοδοσίας – $- 0.212 + 0.150 \text{ mm}$**

Πίνακας 4.34: Πίνακας βάρους (%) υλικού που έχει παραμείνει στην τάξη μεγέθους ($- 0.212 + 0.150 \text{ mm}$) σε σχέση με το χρόνο για κάθε διάμετρο σφαίρας.

- $0.212+0.150 \text{ mm}$				
Χρόνος (min)	Βάρος (40mm)	Βάρος (25.4mm)	Βάρος (12.7mm)	Βάρος(mix)
0	96.4	96.4	96.4	96.4
0.5	84.50	83.79	79.63	82.10
1	74.33	72.54	66.45	71.51
2	58.91	53.55	44.08	52.69
4	39.45	32.93	24.74	34.65



Διάγραμμα 4.50: Οι καμπύλες που δείχνουν το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους ($- 0.212 + 0.150 \text{ mm}$) για κάθε διάμετρο σφαιρών.

Από το διάγραμμα 4.50 παρατηρούμε τους ρυθμούς θραύσης της τάξης μεγέθους ($- 0.212 + 0.150 \text{ mm}$) για κάθε διάμετρο σφαίρας.

Πίνακας 4.35: Ρυθμοί θραύσης της τάξης μεγέθους ($- 0.212 + 0.150 \text{ mm}$) για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας.

$d \text{ (mm)}$	$Si \text{ (min}^{-1}\text{)}$
40	0.22
25.4	0.27
12.7	0.34
Mix	0.26

Από τον πίνακα 4.35 παρατηρούμε ότι για την τάξη μεγέθους ($- 0.212 + 0.150$ mm) ο ρυθμός θραύσης είναι μέγιστος όταν χρησιμοποιούμε διάμετρο σφαιρών 12.7 mm. Δηλαδή, για μικρή διάμετρο σφαιρών έχουμε μεγαλύτερο ρυθμό θραύσης. Επίσης, παρατηρούμε ότι όταν χρησιμοποιούμε διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix) ο ρυθμός θραύσης παίρνει μια ενδιάμεση τιμή (κοντινή σε αυτή που αντιστοιχεί σε διάμετρο σφαιρών 25.4 mm).

4.5 Ρυθμός θραύσης συναρτήσει του μεγέθους τροφοδοσίας

Με τη βοήθεια του προγράμματος excel και μέσω του εργαλείου solver έγινε επίλυση του μοντέλου κατά Austin et al. (1984) το οποίο λαμβάνει υπόψη το ρυθμό θραύσης σε συνάρτηση με το μέγεθος τροφοδοσίας (σχέση 18). Σκοπός της επίλυσης, ήταν να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν το σφάλμα μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και του μοντέλου. Οι παράμετροι αυτές, όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία είναι οι α_T , μ και λ .

Αρχικά, για την επίλυση δόθηκαν στις παραμέτρους οι πειραματικές τιμές και τιμές από τη βιβλιογραφία. Έγινε μια πρώτη επίλυση αλλάζοντας όλες τις παραμέτρους και παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των α και λ διέφεραν ελάχιστα μεταξύ τους αλλά δεν ταυτίζονταν.

Όμως, από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι οι παράμετροι α και λ εξαρτώνται από το υλικό, άρα πρέπει οι τιμές τους να είναι ίδιες σε όλες τις διαμέτρους σφαιρών, ενώ οι παράμετροι α_T και μ εξαρτώνται από τις συνθήκες λειοτρίβησης και διαφέρουν για κάθε διάμετρο σφαίρας. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές των α και λ . Τέλος, ξαναεπιλύσαμε με σταθερές τις μέσες τιμές των α και λ κι αλλάζοντας τις τιμές των α_T και μ .

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι σαν μέγεθος τροφοδοσίας χρησιμοποιήσαμε το ανώτερο μέγεθος από κάθε τάξη μεγέθους, όπως φαίνεται και στους παρακάτω πίνακες (4.36 - 4.39).

Στους πίνακες 4.36- 4.39 φαίνονται τα αποτελέσματα της επίλυσης για κάθε διάμετρο σφαίρας.

Πίνακας 4.36: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου για $d=40$ mm.

$d = 40$ mm			
Ανώτερο Μέγεθος	Πειραματικά Si	Μοντέλο Si	Διαφορά τετραγώνων
3.35	1.14	1.14	0.00
1.70	1.02	0.99	0.00
0.850	0.55	0.59	0.00
0.425	0.32	0.33	0.00
0.212	0.22	0.19	0.00
Σύνολο			0.00

Πίνακας 4.37: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου για d=25.4 mm.

<i>d = 25.4 mm</i>			
<i>Ανώτερο Μέγεθος</i>	<i>Πειραματικά Si</i>	<i>Μοντέλο Si</i>	<i>Διαφορά τετραγώνων</i>
3.35	0.95	0.95	0.00
1.70	1.27	1.26	0.00
0.850	0.83	0.83	0.00
0.425	0.46	0.48	0.00
0.212	0.27	0.27	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.00

Πίνακας 4.38: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου για d=12.7 mm.

<i>d = 12.7 mm</i>			
<i>Ανώτερο Μέγεθος</i>	<i>Πειραματικά Si</i>	<i>Μοντέλο Si</i>	<i>Διαφορά τετραγώνων</i>
3.35	0.24	0.21	0.00
1.70	0.63	0.64	0.00
0.850	0.75	0.76	0.00
0.425	0.46	0.48	0.00
0.212	0.34	0.27	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.01

Πίνακας 4.39: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου για ανάμιξη σφαιρών (mix).

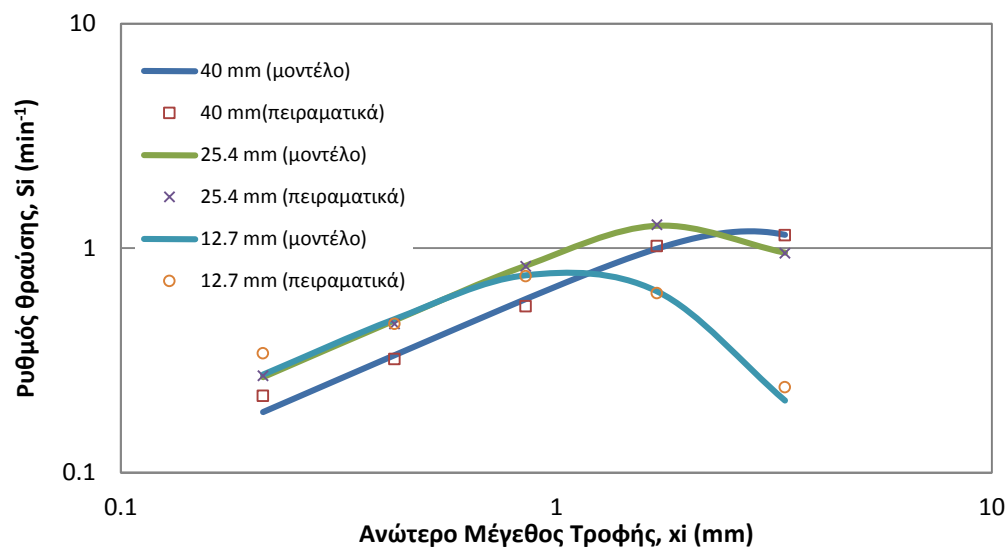
<i>mix</i>			
<i>Ανώτερο Μέγεθος</i>	<i>Πειραματικά Si</i>	<i>Μοντέλο Si</i>	<i>Διαφορά τετραγώνων</i>
3.35	0.61	0.62	0.00
1.70	1.08	1.06	0.00
0.850	0.80	0.78	0.00
0.425	0.38	0.45	0.00
0.212	0.26	0.25	0.00
<i>Σύνολο</i>			0.01

Τέλος, στον πίνακα 4.40 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραμέτρων για όλες τις διαμέτρους σφαιρών που δόθηκαν από την επίλυση με βάση τους παραπάνω πίνακες 4.36 - 4.39.

Πίνακας 4.40: Παράμετροι για κάθε διάμετρο σφαίρας.

<i>d (mm)</i>	<i>$\alpha t (min^{-1})$</i>	<i>a</i>	<i>μ</i>	<i>A</i>
40	0.68	0.84	3.84	3.15
25.4	0.98	0.84	2.76	3.15
12.7	1.01	0.84	1.51	3.15
mix	0.93	0.84	2.34	3.15

Από τους πίνακες 4.36 - 4.40 προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα 4.51 στο οποίο φαίνεται ο ρυθμός θραύσης συναρτήσει του ανώτερου μεγέθους τροφής και για κάθε διάμετρο σφαιρών.



Διάγραμμα 4.51: Σύγκριση ρυθμού θραύσης πειραματικών μετρήσεων και μοντέλου σε σχέση με το ανώτερο μέγεθος τροφής για όλες τις διαμέτρους των σφαιρών.

Στο διάγραμμα 4.51 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος τροφής αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης. Για κάθε διάμετρο σφαίρας, παρατηρούμε ότι ο μέγιστος ρυθμός θραύσης έχει διαφορετική τιμή και μετά την τιμή αυτή μειώνεται σταδιακά. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι για τη διάμετρο σφαιρών 25.4 mm ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τη διάμετρο σφαιρών 40 mm που είναι ελάχιστα μικρότερος. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιούμε διάμετρο σφαιρών 12.7 mm ο μέγιστος ρυθμός θραύσης είναι αρκετά μικρότερος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαμέτρους σφαιρών.

4.6 Σχέση μεγέθους και ρυθμού θραύσης με τη διάμετρο των σφαιρών

Από το διάγραμμα 4.51 παρατηρούμε ότι για κάθε διάμετρο σφαίρας υπάρχει ένα μέγιστο μέγεθος της τάξης μεγέθους (x_m) όπου ο ρυθμός θραύσης παίρνει τη μέγιστη τιμή του (S_m). Στους πίνακες 4.41 και 4.42 φαίνονται τα μέγιστα μεγέθη της τάξης μεγέθους (x_m) και τα μέγιστα σημεία ρυθμού θραύσης (S_m) για κάθε διάμετρος σφαίρας.

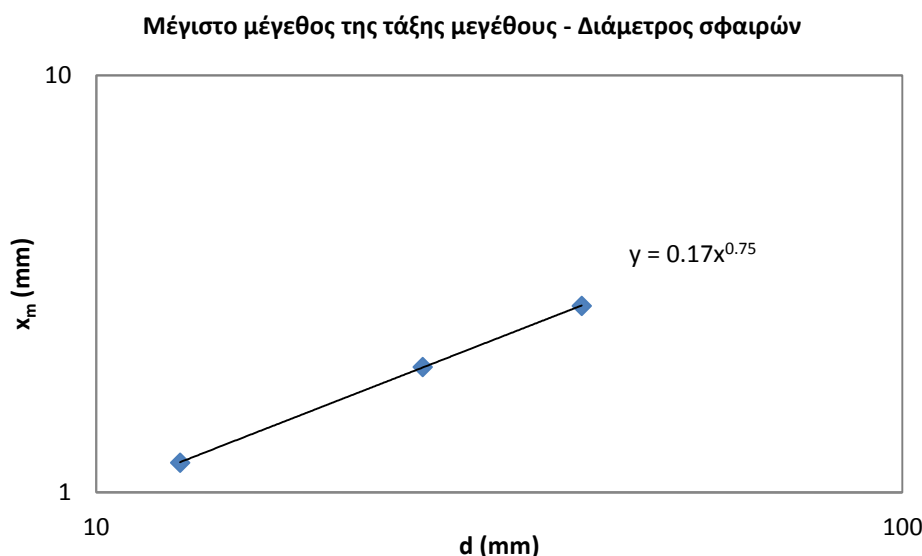
Πίνακας 4.41: Πίνακας μέγιστου μεγέθους της τάξης μεγέθους (x_m) σε σχέση με τη διάμετρο σφαιρών.

d (mm)	x_m (mm)
40	2.8
25.4	2
12.7	1.18
mix	1.83

Πίνακας 4.42: Πίνακας μέγιστου ρυθμού θραύσης (S_i) σε σχέση με τη διάμετρο σφαιρών.

d (mm)	S_m (min ⁻¹)
40	1.19
25.4	1.29
12.7	0.79
mix	1.05

Η σχέση του μέγιστου μεγέθους της τάξης μεγέθους συναρτήσει των διαμέτρων, η οποία προκύπτει από τον πίνακα 4.41, φαίνεται στο διάγραμμα 4.52.



Διάγραμμα 4.52: Σχέση μέγιστου μεγέθους της τάξης μεγέθους σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών.

Στο παραπάνω διάγραμμα 4.52 παρατηρούμε ότι η σχέση του μέγιστου μεγέθους (x_m) σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών περιγράφεται από μια συνάρτηση δύναμης. Δείχνει ότι όσο μεγαλώνει το μέγεθος της τάξης μεγέθους τόσο μεγαλύτερη διάμετρος σφαιρών απαιτείται για την επίτευξη μέγιστου ρυθμού θραύσης. Επομένως, όπως φαίνεται κι από το διάγραμμα η σχέση που συνδέει το μέγεθος της τάξης μεγέθους με τη διάμετρο των σφαιρών για το χαλαζίτη είναι η εξής:

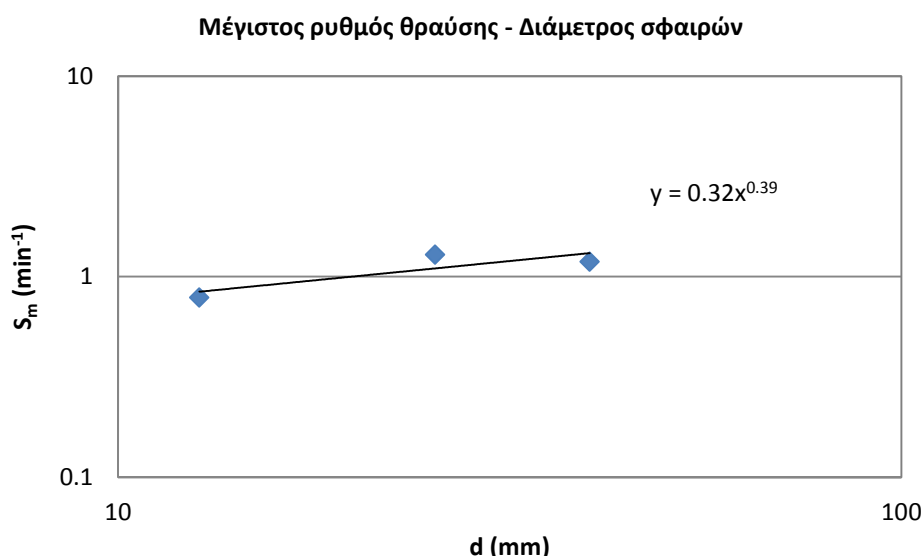
$$x_m = 0.17d^{0.75} \quad (28)$$

Η παραπάνω σχέση (28) ακολουθεί τη γενική μορφή που αναπτύχθηκε στη θεωρία (σχέση 17α) με $k = 0.17$ και $A = 0.75$ για το χαλαζίτη. Από το διάγραμμα 4.52 φαίνεται ότι υπάρχει μια τέλεια θετική συσχέτιση μεταξύ των (x_m), (d) με συντελεστή συσχέτισης $R = + 1$. Όμως, ο υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης (R) έγινε με βάση 3 σημεία. Κατά συνέπεια, η

τιμή του θεωρείται προσεγγιστική, εφόσον θα έπρεπε να είχαμε περισσότερα σημεία για είναι σωστή. Το ίδιο ισχύει και για τα επόμενα διαγράμματα.

Επίσης, από τη σχέση (28) εάν δώσουμε τιμή $x_m = 1.83 \text{ mm}$, που αντιστοιχεί σε δοκιμές με διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (πίνακας 4.41) τότε καταλήγουμε ότι $d = 23.6 \text{ mm}$. Αυτό σημαίνει ότι στις δοκιμές θα μπορούσαμε αντί για τις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix) να χρησιμοποιήσουμε σφαίρες ίδιας διαμέτρου (μεγέθους $d = 23.6 \text{ mm}$), ώστε να έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα.

Στο διάγραμμα 4.53 παρατηρούμε τη σχέση του μέγιστου ρυθμού θραύσης με τη διάμετρο των σφαιρών, η οποία προκύπτει από τον πίνακα 4.42.



Διάγραμμα 4.53: Σχέση μέγιστου ρυθμού θραύσης σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών.

Στο διάγραμμα 4.53 παρατηρούμε ότι η σχέση του μέγιστου ρυθμού θραύσης (S_m) με τη διάμετρο των σφαιρών περιγράφεται από μια συνάρτηση δύναμης. Δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των σφαιρών τόσο αυξάνεται ο μέγιστος ρυθμός θραύσης, γεγονός που επιβεβαιώνει τη θεωρία. Επομένως, όπως φαίνεται κι από το διάγραμμα 4.53, η σχέση που συνδέει το μέγιστο ρυθμό θραύσης με τη διάμετρο των σφαιρών για το χαλαζίτη είναι η εξής:

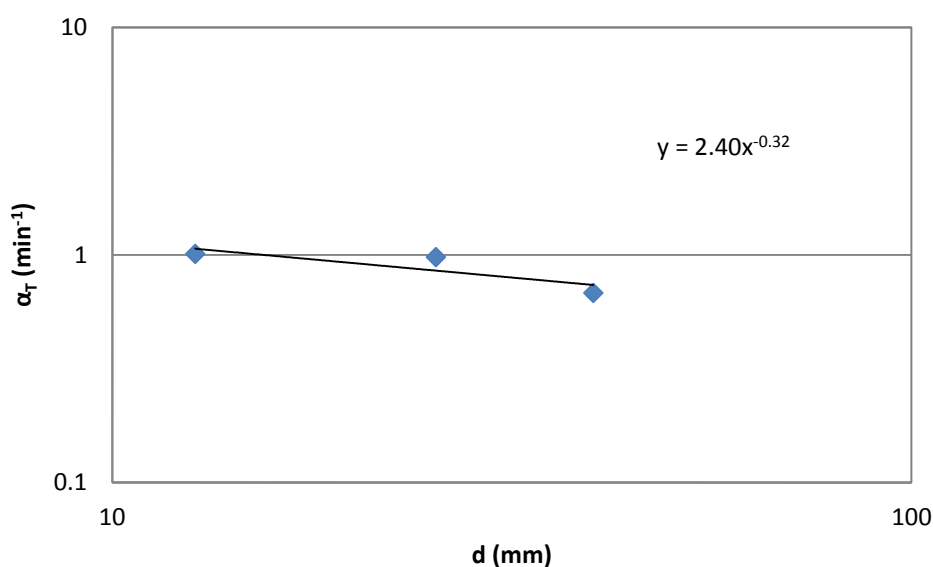
$$S_m = 0.32d^{0.39} \quad (29)$$

Η παραπάνω σχέση (29) ακολουθεί τη γενική μορφή που αναπτύχθηκε στη θεωρία (σχέση 17β) με $k' = 0.32$ και $B = 0.39$ για το χαλαζίτη. Από το διάγραμμα 4.53 φαίνεται ότι υπάρχει μια ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των (S_m), (d) με συντελεστή συσχέτισης $R = +0.85$.

Επίσης, από τη σχέση (29) εάν δώσουμε τιμή $S_m = 1.05$ mm, που αντιστοιχεί σε δοκιμές με διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (Πίνακας 4.42) τότε καταλήγουμε ότι $d = 21.1$ mm. Αυτό σημαίνει ότι στις δοκιμές θα μπορούσαμε αντί για τις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix) να χρησιμοποιήσουμε σφαίρες ίδιας διαμέτρου (μεγέθους $d = 21.1$ mm), ώστε να έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα.

Από την επίλυση του μοντέλου κατά Austin et al. (1984), προέκυψαν σχέσεις που συνδέουν τις παραμέτρους a_T και μ με το μέγεθος των σφαιρών. Οι σχέσεις αυτές φαίνονται στα διαγράμματα 4.54 – 4.55.

Στο διάγραμμα 4.54 παρατηρούμε τη σχέση της παραμέτρου a_T (ρυθμός θραύσης για μέγεθος 1mm) με τη διάμετρο των σφαιρών η οποία προκύπτει από τον πίνακα 4.40.



Διάγραμμα 4.54: Σχέση παραμέτρου a_T σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών.

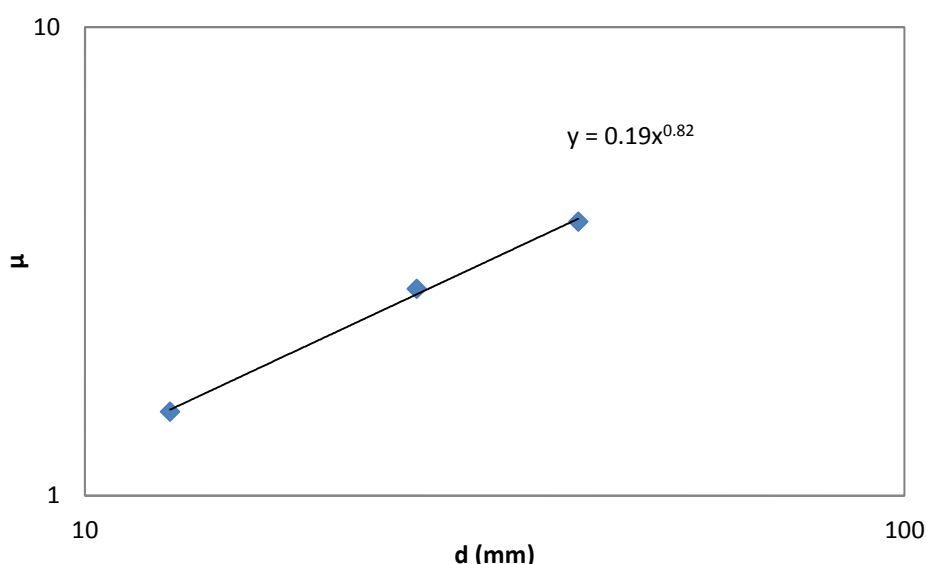
Από το παραπάνω διάγραμμα 4.54 παρατηρούμε ότι η σχέση της παραμέτρου a_T σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών περιγράφεται από μία συνάρτηση δύναμης. Δείχνει ότι για μέγεθος τροφής 1 mm όσο μικρότερη είναι η διάμετρος των σφαιρών τόσο αυξάνεται ο ρυθμός θραύσης, γεγονός που επιβεβαιώνει τη θεωρία. Επομένως, όπως φαίνεται κι από το διάγραμμα 4.54, η σχέση που συνδέει το μέγιστο ρυθμό θραύσης για μέγεθος υλικού 1mm με τη διάμετρο των σφαιρών για το χαλαζίτη είναι η εξής:

$$a_T = 2.40d^{-0.32} \quad (30)$$

Η παραπάνω σχέση (30) ακολουθεί τη γενική μορφή που αναπτύχθηκε στη θεωρία (σχέση 20) με $\alpha_o = 2.40$ και $\xi = -0.32$ για το χαλαζίτη. Από το διάγραμμα 4.54 φαίνεται ότι υπάρχει μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των (a_T), (d) με συντελεστή συσχέτισης $R = -0.84$.

Επίσης, από τη σχέση (30) εάν δώσουμε τιμή $a_T = 0.93 \text{ mm}$, που αντιστοιχεί σε δοκιμές με διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (Πίνακας 6.40) τότε καταλήγουμε ότι $d = 18.3 \text{ mm}$. Αυτό σημαίνει ότι στις δοκιμές θα μπορούσαμε αντί για τις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix) να χρησιμοποιήσουμε σφαίρες ίδιας διαμέτρου (μεγέθους $d = 18.3 \text{ mm}$), ώστε να έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα.

Ακόμα ένα διάγραμμα που προκύπτει από τον πίνακα 4.40 και δείχνει τη σχέση της παραμέτρου μ με τη διάμετρο των σφαιρών είναι το παρακάτω διάγραμμα 4.55.



Διάγραμμα 4.55: Σχέση παραμέτρου μ σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών.

Στο διάγραμμα 4.55 παρατηρούμε ότι η σχέση της παραμέτρου μ με τη διάμετρο των σφαιρών περιγράφεται από μια συνάρτηση δύναμης. Δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος σφαίρας αυξάνεται η τιμή του μ . Επομένως, όπως φαίνεται κι από το διάγραμμα 4.55, η σχέση που συνδέει την παράμετρο μ με τη διάμετρο των σφαιρών για το χαλαζίτη είναι η εξής:

$$\mu = 0.19d^{0.82} \quad (31)$$

Η παραπάνω σχέση (31) ακολουθεί τη γενική μορφή που αναπτύχθηκε στη θεωρία (σχέση 21) με $\mu_o = 0.19$ και $\eta = 0.82$ για το χαλαζίτη. Από το διάγραμμα 4.55 φαίνεται ότι υπάρχει μια τέλεια θετική συσχέτιση μεταξύ των (μ), (d) με συντελεστή συσχέτισης $R = +1$.

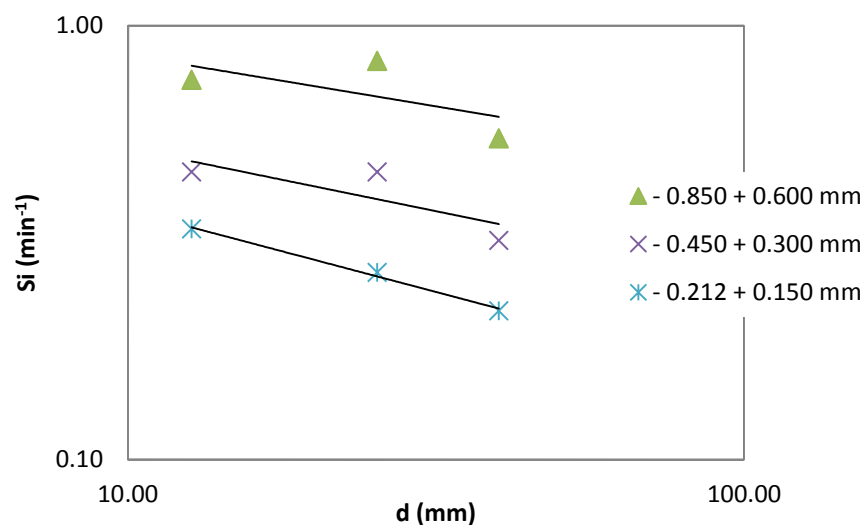
Επίσης, από τη σχέση (31) εάν δώσουμε τιμή $\mu = 2.34$, η οποία αντιστοιχεί σε δοκιμές με διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (Πίνακας 6.40) τότε καταλήγουμε ότι $d = 21.3 \text{ mm}$. Αυτό σημαίνει ότι στις δοκιμές θα μπορούσαμε αντί για τις διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix)

να χρησιμοποιήσουμε σφαίρες ίδιας διαμέτρου (μέγεθος $d = 21.3 \text{ mm}$), ώστε να έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα.

Πίνακας 4.43: Ρυθμοί θραύσης για τα μικρότερα κλάσματα μεγέθους σε σχέση με τη διάμετρο των σφαιρών.

Μέγεθος κλάσματος	0.850 + 0.600 mm	0.450 + 0.300 mm	0.212 + 0.150 mm
$d \text{ (mm)}$	$S_i \text{ (min}^{-1}\text{)}$		
40.00	0.55	0.32	0.22
25.40	0.83	0.46	0.27
12.70	0.75	0.46	0.34

Με βάση τον πίνακα 4.43 στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχέση του ρυθμού θραύσης στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα τροφοδοσίας με τις διαμέτρους των σφαιρών.



Διάγραμμα 4.56: Ρυθμός θραύσης σε σχέση με τα μεγέθη σφαίρας στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα.

Στο διάγραμμα 4.56 παρατηρούμε ότι στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα που χρησιμοποιήθηκαν, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος σφαίρας που χρησιμοποιούμε τόσο αυξάνεται ο ρυθμός θραύσης, γεγονός που επιβεβαιώνει τη θεωρία.

Τέλος, με βάση τη σχέση (28) που συνδέει το μέγεθος με τη διάμετρο των σφαιρών και λύνοντάς την ως προς την διάμετρο σφαιρών, υπολογίστηκε για τα συγκεκριμένα μεγέθη τροφοδοσίας που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία, η διάμετρος σφαίρας που θραύει πιο αποδοτικά την συγκεκριμένη τροφοδοσία (Πίνακας 4.44).

Πίνακας 4.44: Βέλτιστες διάμετροι σφαίρας για κάθε υλικό τροφοδοσίας.

<i>Ανώτερο Μέγεθος Τροφής (mm)</i>	<i>d (mm)</i>
3.35	53.23
1.7	21.54
0.85	8.55
0.425	3.39
0.212	1.34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η βελτιστοποίηση της λειοτρίβησης χαλαζίτη σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η ενέργεια που καταναλώνεται κατά το στάδιο της λειοτρίβησης του υλικού σε συνάρτηση με το μέγεθος του προϊόντος αλλάζοντας το μέγεθος των σφαιρών καθώς και το μέγεθος της τροφοδοσίας. Επίσης, μελετήθηκε ο ρυθμός θραύσης του υλικού εφαρμόζοντας το μοντέλο κατά Austin et al. (1984) σε κάθε τάξη μεγέθους.

Για το σκοπό αυτό, προετοιμάστηκαν 5 στενά κοκκομετρικά κλάσματα τροφοδοσίας με λόγο $\sqrt{2}$ (-3.35 + 2.36 mm, -1.7 + 1.18 mm, -0.850 + 0.600 mm, -0.425 + 0.300 mm, -0.212 + 0.150 mm). Στις 4 σειρές δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν η παράμετρος η οποία μεταβαλλόταν ήταν το μέγεθος των σφαιρών (διάμετρος σφαιρών: 40 mm, 25.4 mm, 12.7mm και διαφορετικές διαμέτροι σφαιρών (mix)). Για κάθε σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης 0.5 min, 1 min, 2 min, 4 min που αντιστοιχούν σε τιμές ειδικής ενέργειας 0.30 kWh/t, 2.14 kWh/t, 1.19 kWh/t και 2.38 kWh/t.

Αρχικά, από τα διαγράμματα του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους (%) σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος και για κάθε μέγεθος σφαίρας προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η ειδική ενέργεια τόσο μειώνεται το μέγεθος του προϊόντος. Από τα διαγράμματα αυτά και με βάση το μέγεθος όπου διέρχεται το 80% του υλικού (D_{80}) προέκυψε ότι για κάθε τιμή της ειδικής ενέργειας οι σφαίρες μεγάλου μεγέθους είναι πιο αποδοτικές για τα χονδρότερα κλάσματα, ενώ στα λεπτότερα κλάσματα είναι πιο αποδοτικές οι σφαίρες μικρότερου μεγέθους.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν διαγράμματα του παραμένοντος βάρους (%) σε κάθε τάξη μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτρίβησης. Στα διαγράμματα αυτά η σχέση ήταν γραμμική, η κλίση της οποίας έδινε το ρυθμό θραύσης της τάξης μεγέθους i (S_i , min^{-1}). Από τα διαγράμματα του ρυθμού θραύσης συναρτήσεως της τάξης μεγέθους, προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η τάξη μεγέθους αυξάνεται και ο ρυθμός θραύσης. Αυτό όμως, συνέβαινε μέχρι μια μέγιστη τιμή του ρυθμού θραύσης (S_m), η οποία αντιστοιχούσε σε ένα μέγιστο μέγεθος (x_m) και μετά από αυτό το σημείο ο ρυθμός θραύσης μειωνόταν.

Με βάση το μοντέλο κατά Austin et al. (1984) που συνδέει το ρυθμό θραύσης κάθε τάξης μεγέθους σε συνάρτηση με το μέγεθος, πραγματοποιήθηκε επίλυση (με χρήση του εργαλείου SOLVER του Excel), με σκοπό να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων (a_T , α , μ και Λ). Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι οι παράμετροι α και Λ εξαρτώνται από το υλικό, ενώ οι παράμετροι a_T και μ εξαρτώνται από τις συνθήκες λειοτρίβησης. Από την επίλυση προσδιορίστηκαν οι σχέσεις που συνδέουν τις παραμέτρους a_T και μ με το μέγεθος των σφαιρών. Οι σχέσεις που προέκυψαν περιγράφονται από συναρτήσεις δύναμης με αρνητική συσχέτιση της παραμέτρου a_T με το μέγεθος των σφαιρών και ισχυρή θετική συσχέτιση της παραμέτρου μ με το μέγεθος των σφαιρών. Από τις σχέσεις (30) και (31), υπολογίστηκαν οι τιμές για τις σταθερές (α_o) και (μ_o) καθώς και για τους εκθέτες (ξ) και (η) αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι για το χαλαζίτη στη σχέση (30), η σταθερά (α_o) παίρνει τιμή 2.40 και ο εκθέτης (ξ) παίρνει τιμή - 0.32, ενώ από τη σχέση (31), βρέθηκε ότι για το χαλαζίτη η σταθερά (μ_o) παίρνει τιμή 0.19 και ο εκθέτης (η) παίρνει τιμή 0.82.

Από τα διαγράμματα του ρυθμού θραύσης με το μέγεθος παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των (x_m) και (S_m) διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος των σφαιρών. Έτσι, υπολογίστηκαν οι σχέσεις αυτών με τη διάμετρο των σφαιρών. Οι σχέσεις που προέκυψαν περιγράφονται από συναρτήσεις δύναμης θετικής συσχέτισης. Από τις σχέσεις (28) και (29), υπολογίστηκαν οι τιμές για τις σταθερές k και k' και για τους εκθέτες A και B αντίστοιχα. Ειδικότερα, βρέθηκε ότι για το χαλαζίτη στη σχέση (28), η σταθερά k παίρνει τιμή 0.17 και ο εκθέτης A παίρνει τιμή 0.75, ενώ στη σχέση (29), η σταθερά k' παίρνει τιμή 0.32 και ο εκθέτης B παίρνει τιμή 0.39.

Από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι οι σταθερές k , k' και οι εκθέτες A , B παίρνουν διαφορετικές τιμές ανάλογα με το υλικό. Πιο συγκεκριμένα, η σταθερά k παίρνει τιμές μεταξύ $10^{-3} - 0.7 \cdot 10^{-3}$ για μαλακά μέχρι σκληρά υλικά. Στην παρούσα εργασία για το χαλαζίτη προτείνεται η τιμή $k = 0.17$. Επίσης, ο εκθέτης A παίρνει συνήθως την τιμή 2. Η τιμή αυτή δεν ισχύει για όλα τα υλικά. Έχει βρεθεί ότι στον ασβεστόλιθο ο εκθέτης παίρνει τιμή 0.51, στη γύψο παίρνει τιμή 0.60, στον τάλκη παίρνει τιμή 0.48, ενώ στο χαλαζία ο εκθέτης έχει τιμή 0.60. Στην παρούσα εργασία για το χαλαζίτη προτείνεται για τον εκθέτη A η τιμή 0.75. Για την σταθερά k' και τον εκθέτη B έχει βρεθεί ότι στο χαλαζίτη η σταθερά k' παίρνει τιμή 0.015 και ο εκθέτης B παίρνει τιμή 1.21. Επίσης, για δοκιμές με διάμετρο σφαίρας, $d \leq 20 \text{ mm}$ σε ασβεστόλιθο και σε γύψο οι σταθερές k' παίρνουν τιμές 0.0092 και 0.027 και οι εκθέτες B παίρνουν τιμές 1.42 και 1.06 αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία για το χαλαζίτη προτείνονται οι τιμές για την σταθερά k' και τον εκθέτη B 0.32 και 0.39 αντίστοιχα.

Τέλος, όλες οι τιμές των παραμέτρων υπολογίστηκαν και για τις δοκιμές με διαφορετικές διαμέτρους σφαιρών (mix). Γνωρίζοντας τη σχέση που συνδέει τις παραμέτρους αυτές με το μέγεθος των σφαιρών ίδιας διαμέτρου υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες ισοδύναμες διάμετροι οι οποίες θα επέφεραν το ίδιο αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η τιμή της ισοδύναμης διαμέτρου σφαίρας κυμαίνεται από 18.3 – 23.6 mm. Επομένως, με βάση τα συμπεράσματα καταλήγουμε ότι τα αποτελέσματά μας επιβεβαιώνουν όσα έχουν αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της εργασίας.

Όσον αφορά τις προτάσεις, η μελέτη της βελτιστοποίησης της λειοτρίβησης θα μπορούσε να γίνει και για άλλα υλικά. Επίσης, μια πρόταση για το μέλλον είναι η εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου σε διαφορετικά υλικά, ώστε να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων (α_T , μ , a και A) και στη συνέχεια η αποδοτικότερη διάμετρος σφαίρας για κάθε τάξη μεγέθους του υλικού τροφοδοσίας. Άλλη μια πρόταση θα ήταν να γίνουν κι άλλες σειρές δοκιμών, μελετώντας άλλες παραμέτρους για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, όπως ο συντελεστής πλήρωσης σφαιρών (J) ή ο συντελεστής πλήρωσης υλικού στο μύλο (f_c). Τέλος, προτείνεται η μελέτη του συγκεκριμένου μοντέλου για μεγαλύτερους χρόνους λειοτρίβησης, δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία εξετάστηκε ο ρυθμός θραύσης για δοκιμές λειοτρίβησης μικρότερες των 4 min, όπου ο ρυθμός θραύσης θεωρούνταν σταθερός κι ανεξάρτητος του χρόνου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2010). Στοιχεία Γεωμηχανικής, *Μηχανική Πετρωμάτων*. Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, σελ. 256
2. Θεοδωρίκας, Σ. (2010). *Ορυκτολογία – Πετρολογία*. Εκδόσεις Ερώδιος, Θεσσαλονίκη, σελ. 862
3. Κωστάκης, Γ. (1988). *Φυσικές ιδιότητες των ορυκτών*, Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, σελ. 33.
4. Κωστάκης, Γ. (2005). *Συστηματική Ορυκτολογία*. Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, σελ. 72.
5. Μουντράκης, Δ. (2010), *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας*. University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 197.
6. Περδικάτσης, Β. και Πεντάρη, Δ. (2003). *Εργαστηριακές ασκήσεις γεωχημείας*, Εργαστηριακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, σελ. 71.
7. Πετράκης, Ε. (2004). *Σχέση ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την λειοτρίβηση ψαθυρών υλικών*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
8. Σταμπολιάδης, Ηλ. (2008). *Μηχανική των τεμαχιδίων*, Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, σελ. 66, 68, 88 – 90.

ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ

9. Austin L.G., and Luckie P.T. (1972). *Methods for determination of breakage distribution parameters*. Powder Technology 5: 215 - 222.
10. Austin L. G. and Bhatia V. K. (1972). *Experimental methods for grinding studies in laboratory mills*. Powder Technology 5: 261 – 266.

11. Austin L.G, Shojl K., Luckie P.T. (1976). *The Effect of Ball Size on Mill Performance*. Powder Technology 14: 71 - 79
12. Austin L.G., and Bagga, P. (1981). *An analysis of fine dry grinding in ball mills*. Powder Technology 28: 83 - 90.
13. Austin L. G., Klimpel, R. and Luckie P. T. (1984). *Process Engineering of Size Reduction Ball Milling*, New-York: SME, AIME.
14. Austin L. G., Julianelli K., Sampaio de Souza, Schneider C. L. (2007). *Simulation wet ball milling of iron at Carajas, Brazil*. Mineral processing 84: 157 – 171.
15. Deniz V. (2013). *Effect of mill speed on kinetic breakage four different particulate pumices*. Particulate Science and Technology 31: 101 - 108.
16. Katubilwa F. M. (2008). *Effect of ball size distribution on milling parameter*. MSc thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
17. Katubilwa F. M., Moys M. (2009). *Effect of ball size distribution on milling rate*. Minerals Engineering 22 (15): 1283 – 1288.
18. Katubilwa F. M. (2012). *Effect of pool volume on wet milling efficiency*. PhD thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
19. Kelsall D. F., Reid C.J., Restarick C. J. (1968). *Continues grinding in a small wet ball mill – part I. A study of the influence of ball diameter*. Powder Technology 5: 291 – 300.
20. Kelly E. G., Spottiswood, D. J. (1990). *The breakage function; What is it really?*. Minerals Engineering 5: 405 – 414.
21. Klimpel R. R. and Austin L. G. (1977). *The Back – Calculation of Specific Rates of Breakage and Non – Normalized Breakage Distribution Parameters from Batch Grinding Data*. Mineral Processing 4: 7 – 32.
22. 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.
23. 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 43– 144: 196 - 203.

24. Lynch A.J. (1977). Mineral Crushing and Grinding Circuits. *Their Simulation, Optimization, Design and Control*, New York: Elvesier Scientific Publishing Co.
25. Napier – Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T. (1996). Mineral Comminution Circuits. *Their Operation and Optimization*, JKMRC, Queensland, Australia.
26. Samanli S., Cuhadaroglu D., Ipek H., Ucbas Y. (2010). *The investigation of grinding kinetics of power plant solid fossil fuel in ball mill*. Fuel 89 (3): 703 – 707.
27. Stamboltzis G. (1990) *Calculation of the Net Power of Laboratory Ball Mills*. Mining and Metallurgical Annals, No. 76: 47-55, in Greek.
28. Yildirim K., Cho H., Austin L. G. (1999). *The modeling of dry grinding of quartz in tumbling media mills*. Powder Technology 105 (1 – 3): 210 – 221.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

29. <http://www.omega.physics.uoi.gr> (02/10/2015)
30. <http://www.technology.infomine.com/reviews/grindingmills/welcome.asp?view=full> (07/10/2015)
31. <http://www.pauloabbe.com/size-reduction/resources/mill-speed-critical-speed> (08/10/2015)

