

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗΣ ΧΑΛΑΖΙΑ ΚΑΙ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΣΕ  
ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟ»

ΑΝΤΩΝΗΣ ΣΚΑΝΔΑΛΑΚΗΣ

A.M.: 2000020035

***ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:***

Αν. Καθηγητής Η. ΣΤΑΜΠΟΛΙΑΔΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)  
Λέκτορας Β. ΣΠΙΤΑΣ  
Αν. Καθηγητής Κ. ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2006

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία δοκιμή-παρουσίαση ενός πρωτότυπου μύλου ξηρής λειοτρίβησης, του *δακτυλιόμυλου*. Επίσης η εργασία περιλαμβάνει σύγκριση των αποτελεσμάτων από την λειοτρίβηση δύο διαφορετικών υλικών στον δακτυλιόμυλο και τη σύγκριση του ίδιου υλικού σε διαφορετικούς μύλους (στον δακτυλιόμυλο και στον ραβδόμυλο). Η εργασία δηλαδή μπορεί να χαρακτηριστεί και ως benchmarking που σαν σκοπό έχει να αποδείξει την καταλληλότητα του δακτυλιόμυλου για περαιτέρω βιομηχανικές εφαρμογές.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα το οποίο στην πρώτη ενότητα προσομοιώνει την λειτουργία του δακτυλιόμυλου και οποίο υπολογίζει τις πιο σημαντικές γεωμετρικές παραμέτρους του μύλου, τις δυνάμεις που ασκούνται στους κόκκους κατά την λειοτρίβηση και τις παραμέτρους που αξιολογούν την απόδοση του δακτυλιόμυλου όπως για παράδειγμα τον βαθμό απόδοσής του. Η δεύτερη ενότητα του παραπάνω προγράμματος μας δίνει την δυνατότητα πρόβλεψης της κοκκομετρικής κατανομής των προϊόντων εφόσον γνωρίζουμε την κοκκομετρία της τροφοδοσίας και το υλικό.

Στον δακτυλιόμυλο ο λόγος ορθών προς διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σωματίδιο μπορούν να ρυθμιστούν σύμφωνα με τις μηχανικές απαιτήσεις του προς λειοτρίβησης υλικού. Σε αντίθεση με τον ραβδόμυλο ή σφαιρόμυλο, ο δακτυλιόμυλος χρησιμοποιεί αρκετούς μεταλλικούς δακτυλίους, οι οποίοι περιστρέφονται ελεύθερα κατά μήκος των βραχιόνων ενός ορθογώνιου πλαισίου το οποίο περιστρέφεται μαζί με τον κεντρικό άξονα του. Η πρωτοτυπία και συνάμα το κύριο πλεονέκτημά του είναι η ευελιξία όσο αναφορά την μεταβολή-ρύθμιση του λόγου ορθής προς διατμητικής τάσης που δρουν σε ένα σωματίδιο κατά την λειοτρίβηση.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων λειοτρίβησης ασβεστόλιθου και χαλαζία συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμός λειοτρίβησης  $K(x)$  στον δακτυλιόμυλο είναι αντιστρόφως ανάλογος του φορτίου. Όσο αναφορά τον ρυθμό περιστροφής, η εξάρτηση του ρυθμού λειοτρίβησης είναι μικρότερη και αφορά κυρίως τα υλικά μεγαλύτερη σκληρότητας και συνοχής, όπως ο χαλαζίας.

Κύριο πλεονέκτημα του δακτυλιόμυλου, έναντι του ραβδόμυλου, είναι η αυξημένη συγκέντρωση ισχύος που παρουσιάζει ανά μονάδα όγκου του. Η μεγάλη συγκέντρωση ισχύς δίνει την ικανότητα στον δακτυλιόμυλο να είναι αποτελεσματικότερος για λειοτριβήσεις σε μικρά κλάσματα όπου οι συμβατικοί μύλοι κυλιόμενου φορτίου (ραβδόμυλος, σφαιρόμυλος) χρειάζονται πολύ περισσότερο χρόνο, τόσο που η λειοτρίβηση να καθίσταται πρακτικά αδύνατη.

## ABSTRACT

The present work is going to demonstrate and test a prototype dry pulverizer, the *ringmill*. Also it presents the comparison results from the grinding test of two different materials. This work is a rigorous benchmarking in which we want to prove that ring mill's abilities are far beyond rod mills in industrial production of fine powders.

A new software programme has developed which can simulate the pulverization of the material. This programme lies mainly in theoretical analysis and its purpose is to calculate important geometric variables, the forces exerted on a particle during its pulverization and variables that evaluate the pulverization such as the efficiency of pulverizer. The second part of this program allows the prediction of the product size distribution in a batch grinding process.

The pulverizer offers considerable advantages when compared to commonly used comminution processes, especially in the fine and superfine milling of minerals. The originality of the pulverizer lies mainly in that it allows the variation of the ratio of the shear to the compression forces acting on a particle during its pulverization. The ratio is adjusted to the mechanical requirements of the material to be pulverizer. Instead of a single roller or balls, the pulverizer employs several annular rings, thus allowing better grinding of the finer fractions of the original material.

The mathematical model presented, in order to describe the breakage function in a batch-grinding mill (the ring mill), uses a parameter  $k_i$  that determines the breakage rate of a material in kg/joule at any size  $x_i$ . The experimental results shows that  $k_i$ , firstly depends on the material load and secondly on the rate of rotation of the ring mill's main shaft.

Main advantage of the ring mill is the high power per volume that presents which increase the breakage rate in smaller fraction of the original material.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το benchmarking ενός πρωτότυπου νέου μύλου ξηρής λειοτρίβησης, του δακτυλιόμυλου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δοκιμές λειοτρίβησης χαλαζία και ασβεστολίθου στον δακτυλιόμυλο αντιπαρατίθενται με αυτά από ένα ραβδόμυλο. Το θέμα αυτό επιλέχθηκε με γνώμονα την σύγκριση μίας νέας μηχανής λειοτρίβησης με τις υπάρχουσες, έτσι ώστε να παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα με σκοπό την μελλοντική ευρύτερη βιομηχανική εφαρμογή του δακτυλιόμυλου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Λέκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Βασίλιο Σπιτά για την ανάθεση του θέματος και την βοήθεια που μου πρόσφερε καθόλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και γενικότερα για τις συμβουλές και την μάθηση που μου προσφέρει όλο αυτόν τον καιρό. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ηλία Σταμπολιαδή για την βοήθεια που μου πρόσφερε χωρίς την οποία δεν θα είχε επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Μαρία Φούντη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την πραγματοποίηση των πειραμάτων λειοτρίβησης στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκόνης των Μηχανολόγων Μηχανικών καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γιώργο Ζανή, Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π, για την βοήθεια που μου πρόσφερε κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων στο Ε.Μ.Π.

Συμπληρωματικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συμμαθητή Χρήστο Αττίκο, πτυχιούχος Πληροφορικής Πειραιά, για την βοήθεια του στην υλοποίηση του προγράμματος προσομοίωσης της λειτουργίας του δακτυλιόμυλου και του προγράμματος πρόβλεψης της κοκκομετρικής κατανομής των προϊόντων λειοτρίβησης χωρίς την βοήθεια του οποίου δεν θα γινόταν εφικτό η δημιουργία τους.

Τέλος ευχαριστώ την επιστημονική συνεργάτιδα του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Όλγα Παντελάκη, Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, για την βοήθεια της στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>IV</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>2 ΘΡΑΥΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....</b>	<b>4</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	4
2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	4
2.3 ΘΕΩΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΘΡΑΥΣΗ - ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ.....	7
2.3.1 Γενικά.....	7
2.3.2 Οι βασικές θεωρίες.....	7
2.3.3 Κατάτμηση.....	10
<b>3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ.....</b>	<b>12</b>
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	12
3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	12
3.3 ΚΟΣΚΙΝΙΣΗ.....	13
<b>4 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ: ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ.....</b>	<b>14</b>
4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	14
4.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ.....	15
4.4 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	18
4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ.....	20
4.5.1 Βασικές δυναμικές και κινηματικές εξισώσεις.....	20
4.5.2 Ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται στους δακτυλίους.....	22
4.5.3 Υπολογισμός της συνολικής ισχύος, της καθαρής ισχύος και του βαθμού αποδόσεως του δακτυλιόμυλου.....	24
4.6 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ.....	25
4.6.1 Αποτελέσματα.....	28
4.7 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ.....	31
4.7.1 Αρχές σχεδιασμού.....	31
4.7.2 Χαρακτηριστικά του δακτυλιόμυλου.....	34
4.8 ΔΙΑΤΑΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ.....	39
4.8.1 Ηλεκτροκινητήρας.....	39
4.8.2 Μετατροπέας συχνότητας (Frequency inverter).....	39
<b>5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ-ΡΑΒΔΟΜΥΛΟΥ.....</b>	<b>41</b>
5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	41

5.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ .....	41
5.2.1	Εργαστηριακός θραυστήρας με σιαγόνες.....	41
5.2.2	Εργαστηριακός ραβδόμυλος.....	42
5.2.3	Μηχανή κοσκίνισης.....	43
5.2.4	Κοκκομετρικός αναλυτής Laser .....	44
5.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	46
5.3.1	Διαδικασία θραύσης.....	46
5.3.2	Διαδικασία ξηρής λειοτρίβησης.....	46
5.3.3	Διαδικασία κοσκίνισης.....	47
5.4	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	48
5.4.1	Κοκκομετρικές κατανομές.....	48
5.4.2	Υπολογισμός της κλίσης $\alpha$ .....	54
5.4.3	Υπολογισμός ενέργειας κατά την λειοτρίβηση .....	63
5.4.4	Λειτουργία θραύσης στον δακτυλιόμυλο (breakage function) .....	69
5.5	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ.....	92
5.5.1	Αποτελέσματα.....	93
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	95
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	99
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	101
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	101
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	102
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	104
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	108

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συνθήκες μεταλλογένεσης και συνύπαρξης των μεταλλευμάτων ή των ορυκτών με τα στεία σε ένα κοίτασμα δημιούργησε την ανάγκη εμπλουτισμού τους. Εμπλουτισμός ονομάζεται το σύνολο των διαδικασιών που υφίσταται ένα μέταλλευμα για να διαχωριστεί το χρήσιμο ορυκτό από τα συνυπάρχοντα στεία υλικά. Ο εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων προϋποθέτει την εφαρμογή μεθόδων με τις οποίες βελτιώνεται η ποιότητα των μεταλλευμάτων, και συμβάλει στην οικονομική εκμετάλλευση και αξιοποίηση ακόμα και ‘φτωχότερων’ κοιτασμάτων.

Οι διαφορές των ορυκτολογικών ιδιοτήτων του χρήσιμου ορυκτού και του στείρου κατέστησαν δυνατό τον διαχωρισμό με την εφαρμογή των αντίστοιχων μεθόδων εμπλουτισμού. Ο διαχωρισμός είναι συνήθως φυσικός και κατά τον εμπλουτισμό δεν αλλοιώνεται η φυσική και χημική υπόσταση των ορυκτών. Οι κυριότερες ιδιότητες τις οποίες εκμεταλλευόμαστε για τον διαχωρισμό των ορυκτών είναι οι διαφορές στην όψη, στην πυκνότητα, στην μαγνητική διαπερατότητα, στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, στο μέγεθος, στο σχήμα, στη σκληρότητα και σε άλλες [1].

Η τεχνολογία του εμπλουτισμού διακρίνεται σε τρεις κυρίως φάσεις οι οποίες είναι:

- Η κατάτμηση η οποία περιλαμβάνει τις διαδικασίες της θραύσης, λειοτρίβησης και άλεσης, ανάλογα με τον απαιτούμενο βαθμό αποδέσμευσης ή επιδιωκόμενο σκοπό,
- Η ταξινόμηση κατά μεγέθη που εξαρτάται από το μέγεθος αποδέσμευσης και την μέθοδο εμπλουτισμού,
- Η συγκέντρωση που περιλαμβάνει την εφαρμογή της μεθόδου εμπλουτισμού και την παραγωγή προϊόντων.

Κατάτμηση ονομάζουμε γενικά την λειτουργία, κατά την οποία τα τεμάχια του υλικού υποβάλλονται σε θραύση με την εφαρμογή μίας δύναμης ανώτερης του ορίου ελαστικότητας του υλικού. Ο τρόπος εφαρμογής της δύναμης δημιουργεί διάφορες συνθήκες κατάτμησης και τις αντίστοιχες μηχανές κατάτμησης.

Η ελάττωση του μεγέθους δεν γίνεται σε ένα στάδιο αλλά σε περισσότερα και εξαρτάται από το επιθυμητό μέγεθος τεμαχίων για κάθε στάδιο. Τα στάδια της κατάτμησης από το αρχικό μέγεθος μέχρι τελικού μεγέθους 10 – 2 mm, ονομάζονται θραύση, ενώ για πιο λεπτόκοκκα προϊόντα η διαδικασία ονομάζεται λειοτρίβηση.

Η λειοτρίβηση αποτελεί, γενικά, αναπόσπαστη διαδικασία της βιομηχανίας με την οποία επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες, ανάλογα με την εφαρμογή, κοκκομετρίες. Μερικές από τις εφαρμογές των λεπτομερών αυτών υλικών είναι κυρίως ως πληρωτικά υλικά στην βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών, στην βιομηχανία χάρτου, στη φαρμακοβιομηχανία, στα υλικά

στεγανώσεως, πληρώσεως αρμών και συγκολλήσεως. Επίσης λειοτριβημένα υλικά χρησιμοποιούνται στα κονιάματα, στα επιχρίσματα και ως μονωτικά υλικά από τη θερμότητα και το ψύχος, ως πρόσθετα υλικά σκυροδέματος καθώς και σε διάφορες άλλες εφαρμογές [2].

Κατά την διαδικασία της λειοτρίβησης προκύπτουν αρκετά προβλήματα, τα οποία σχετίζονται αφενός με την επίτευξη της επιθυμητής κοκκομετρίας του προϊόντος και αφετέρου με την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας [3]. Οι δύο αυτοί παράμετροι αποτελούν το ‘κλειδί’ για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας της λειοτρίβησης.

Κύριες μηχανές λειοτρίβησης είναι ο ραβδόμυλος και ο σφαιρόμυλος, οι οποίοι στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Οι μηχανές αυτές όμως, όπως έχει αποδειχθεί στην πράξη, μπορούν να λειοτριβήσουν το υλικό μέχρι μία συγκεκριμένη κοκκομετρία, μέχρι και -70 μm, πέρα από την οποία η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων συναρτήσει του χρόνου παραμονής του υλικού μέσα στο μύλο γίνεται δυσανάλογη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μη εφαρμογή των συγκεκριμένων μύλων σε βιομηχανική κλίμακα για λειοτριβήσεις στις οποίες το προϊόν απαιτείται να είναι μικρότερων των 100 μm ή ακόμα και αν χρησιμοποιούνται να μην είναι οικονομικά συμφέρουσες. Άλλα είδη μύλων όπως για παράδειγμα οι air-impact mills, οι counter flow mills και οι raw mills, βασίζονται στην κρούση και εξαρτώνται κυρίως από την κανονικότητα των δυνάμεων κατά την κρούση, παρά από τις ασθενέστερες διατμητικές δυνάμεις. Υπάρχουν βέβαια και άλλα είδη μύλων όπως ο πλανητικός σφαιρόμυλος της Hicom, ο οποίος δεν υπόκειται στον περιορισμό της κρίσιμης ταχύτητας και μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής και επομένως μεγαλύτερες φυγόκεντρους δυνάμεις που φθάνουν τα 50g [4]. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγάλη ενέργεια σε μικρό χώρο λειοτρίβησης. Αυτό αποτελεί ένα κοινό χαρακτηριστικό μεταξύ του Hicom Mill και του δακτυλιόμυλου. Οι μύλοι οι οποίοι συγκεντρώνουν μεγάλη ενέργεια σε μικρό θάλαμο λειοτρίβησης μπορούν να αντικαταστήσουν πολύ μεγαλύτερους σε όγκο μύλους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι ένα benchmarking ενός νέου μύλου ξηρής λειοτρίβησης, του δακτυλιόμυλου, έναντι του ραβδόμυλου. Επίσης γίνεται παρουσίαση και εκτενή αναφορά στον νέο αυτό μύλο ξηρής λειοτρίβησης, και θα μελετάται η διαδικασία λειοτρίβησης ως προς το μέγεθος της απαιτούμενης ενέργειας για την κατάτμηση των τεμαχίων, και ως προς την κατανομή των προϊόντων του. Επίσης αναλύονται τα πλεονεκτήματα του δακτυλιόμυλου έναντι του ραβδόμυλου καθώς θα υπάρξει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από δοκιμές λειοτρίβησης δύο διαφορετικών υλικών, ασβεστόλιθου και χαλαζία, στον δακτυλιόμυλο με τα αποτελέσματα λειοτρίβησης των ίδιων υλικών σε ένα ραβδόμυλο.

Η επιλογή του ραβδόμυλου, ως δεύτερη μηχανή λειοτρίβησης για την σύγκρισή μας, προέκυψε λόγω του ότι είναι από τις πιο διαδεδομένες μηχανές λειοτρίβησης, μαζί με τον σφαιρόμυλο αλλά εν αντιθέσει με τον σφαιρόμυλο, ο ραβδόμυλος παράγει ένα ομοιόμορφο υλικό με όσο το δυνατό λιγότερα ‘ψιλά’ και λίγα επίσης ‘χονδρά’ [4]. Με τον τρόπο αυτό θα συγκριθεί άμεσα



η απόδοση και τα συνολικά αποτελέσματα που θα προκύψουν κατά την χρήση του νέου αυτού μύλου (του δακτυλιόμυλου) σε σχέση με έναν συμβατικό μύλο (έναν ραβδόμυλο), τόσο από άποψη επίτευξης της κοκκομετρίας του τελικού προϊόντος, όσο και από κατανάλωση ενέργειας. Η επιλογή των δύο αυτών υλικών για την δοκιμή μας, του ασβεστόλιθου και του χαλαζία, έγινε με σκοπό την εύκολη σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από την λειοτρίβησή τους στον δακτυλιόμυλο με τα αποτελέσματα από την λειοτρίβηση των προαναφερθέντων υλικών στον ραβδόμυλο. Η επιλογή του ασβεστόλιθου και του χαλαζία δεν έγινε τυχαία. Τα δύο αυτά υλικά αποτελούν κοινό παρανομαστή όσο αναφορά της δοκιμής λειοτρίβησης, αφενός γιατί υπάρχει μεγάλος όγκος ασβεστολιθικών και χαλαζιακών πετρωμάτων στον Ελλαδικό χώρο και αφετέρου γιατί αποτελούν πολύ σημαντικά ορυκτά όσο αναφορά την κατάταξή τους στην κλίμακα του Mohs (κλίμακα σκληρότητας). Η σκληρότητα του ασβεστίτη, το ορυκτό που αποτελεί κατά βάση τον ασβεστόλιθο έχει σκληρότητα 3 και ο χαλαζίας 7, με μέγιστη σκληρότητα το 10 (αδάμας).

Μέρος επίσης της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η κατασκευή ενός ηλεκτρονικού προγράμματος που σκοπό έχει τη προσομοίωση της λειτουργίας του δακτυλιόμυλου. Το πρόγραμμα αυτό γράφτηκε στη *Visual Basic.net*, η οποία αποτελεί την πιο σύγχρονη γλώσσα προγραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να μεταβάλλει κάποιες από τις κρίσιμες παραμέτρους, είτε κατασκευαστικές είτε λειτουργικές παραμέτρους και σύμφωνα με τις δοθείσες παραμέτρους υπολογίζει τις ασκούμενες δυνάμεις, τον βαθμό απόδοσης του μύλου συνολικά και άλλες σημαντικές παραμέτρους ως προς την λειοτρίβηση του εκάστοτε υλικού. Το παραπάνω πρόγραμμα επεκτάθηκε έτσι ώστε να προβλέπει την κοκκομετρική κατανομή των προϊόντων λειοτρίβησης συναρτήσει του χρόνου, εφόσον είναι γνωστή η κοκκομετρική κατανομή της τροφοδοσίας και το μαθηματικό μοντέλο του ρυθμού λειοτρίβησης που ακολουθείται.

## 2 ΘΡΑΥΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 2.1 Γενικά

Η εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων σε ένα υλικό, μεγαλύτερων από την τιμή της αντοχής του το οδηγεί σε θραύση. Η θραύση ξεκινάει στις τυχόν ρωγμές του υλικού ή στην επαφή δύο διαφορετικών ορυκτολογικών συστατικών που αποτελούν περιοχές ελάχιστης αντοχής.

Οι θεωρίες της θραύσης που έχουν αναπτυχθεί επικεντρώνονται κυρίως στην ενέργεια ανά μονάδα βάρους που απαιτείται, ώστε από μία τροφοδοσία ενός αρχικού μεγέθους, να επιτευχθεί το επιθυμητό μέγεθος προϊόντος. Η ενέργεια που απαιτείται για την θραύση είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του παραγόμενου κόκκου.

### 2.2 Στοιχεία από την αντοχή των υλικών

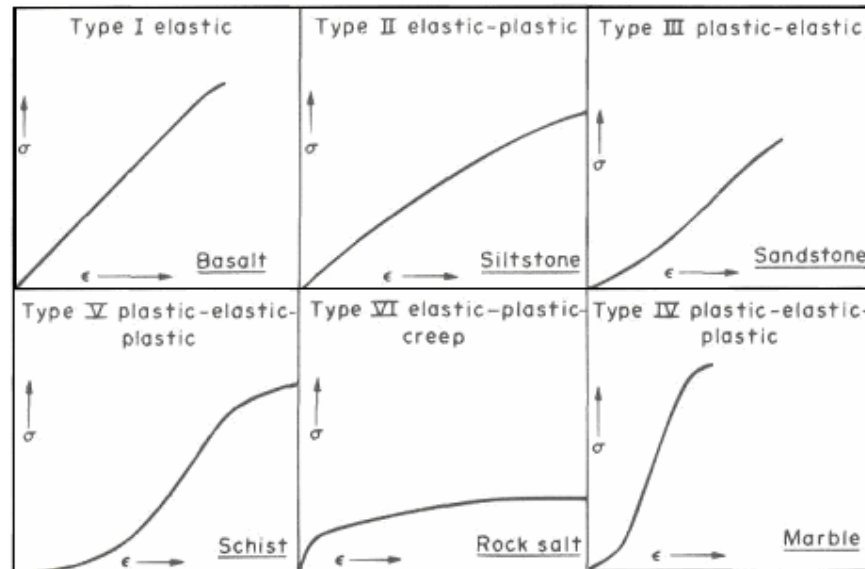
Για την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ενός ορυκτού ή πετρώματος χρησιμοποιούμε συνήθως την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης κατά την οποία ένα δοκίμιο, κυλινδρικής μορφής με μήκος 2 – 3 φορές τη διάμετρό του, υποβάλλεται σε θλίψη. Στην περίπτωση αυτή οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων του υλικού μεταβάλλονται και το σχήμα του παραμορφώνεται καθώς η εξωτερική δύναμη αυξάνεται. Από τις δοκιμές αυτές προκύπτουν διαγράμματα (Σχήμα 2-1 και Σχήμα 2-2) στα οποία ο άξονας Ογ περιγράφει τις εφαρμοζόμενες τάσεις  $\sigma$  (για κάθε χρονική στιγμή), ενώ ο άξονας Οκ δείχνει τις αντίστοιχες ανηγμένες παραμορφώσεις  $\varepsilon$ .

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2:1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2:2)$$

Όπου,  $\sigma$ : τάση,  $F$ : δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο,  $A$ : αρχική διατομή δοκιμίου,  $\varepsilon$ : ανηγμένη παραμόρφωση,  $\Delta L$ : παραμόρφωση,  $L$ : αρχικό μήκος δοκιμίου

Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης (stress-strain curve). Η μορφή των διαγραμμάτων αυτών μεταβάλλεται ανάλογα το υλικό. Το σχήμα 2-1 παρουσιάζει τυπικές μορφές καμπυλών που προκύπτουν από την αποτύπωση των τιμών τάσεων – παραμόρφωσης που προέκυψαν από πειράματα σε διάφορα υλικά [5].

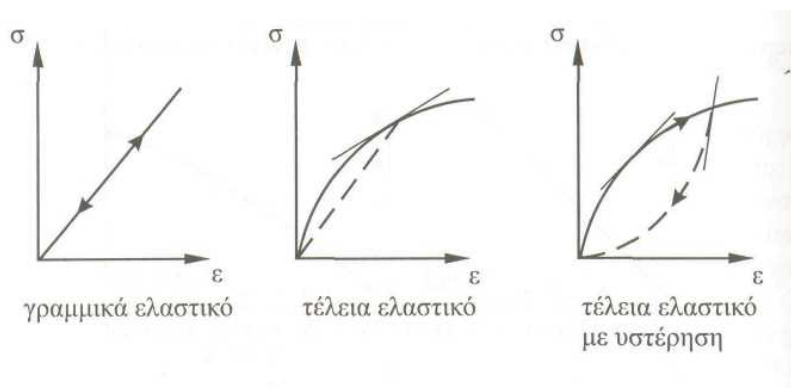


Σχήμα 2-1: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για μερικά πετρώματα

Όταν το υλικό δεν υφίσταται μόνιμες παραμορφώσεις υπό την επίδραση εξωτερικών τάσεων και είναι δυνατόν να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, όταν σταματήσει η εφαρμογή του εξωτερικού φορτίου, τότε το υλικό θεωρείται ελαστικό. Στην περίπτωση αυτή το υλικό μας, το οποίο είναι ασβεστόλιθος και χαλαζίας, χαρακτηρίζεται με έναν από τους ακόλουθους τρεις τρόπους όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-2:

- Ένα υλικό χαρακτηρίζεται γραμμικά ελαστικό (linearly elastic) όταν η σχέση τάσης παραμόρφωσης είναι της μορφής:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  (Νόμος του Hooke) όπου E μία σταθερά που εξαρτάται από το υλικό και που καλείται μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus).
- Ένα υλικό χαρακτηρίζεται τέλεια ελαστικό (perfectly elastic) όταν δεν έχει παραμένονσα παραμόρφωση και δεν έχει υστέρηση.
- Ένα υλικό χαρακτηρίζεται τέλεια ελαστικό υλικό με υστέρηση όταν κατά την αποφόρτισή του ακολουθείται διαφορετική τροχιά στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, από αυτή που παρουσιάζεται κατά την φόρτιση του.

Πλαστικό ή όλκιμο (ductile, yielding) χαρακτηρίζεται ένα υλικό όταν μπορεί να υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις, διατηρώντας παράλληλα την ικανότητα να παραλαμβάνει φορτία. Τα περισσότερα υλικά επιδεικνύουν μία ελαστική συμπεριφορά σε χαμηλές περιοχές τάσεων. Η πλαστική συμπεριφορά ακολουθεί την ελαστική συμπεριφορά στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης και το εύρος της ποικίλει ανάλογα με το υλικό.



**Σχήμα 2-2: Γραμμικά ελαστικό υλικό (α), τέλεια ελαστικό υλικό (b) και τέλεια ελαστικό με υστέρηση (c)**

Ψαθυρό χαρακτηρίζεται ένα υλικό όταν η ικανότητά του να ανθίσταται στο επιβαλλόμενο φορτίο μειώνεται καθώς αυξάνει η παραμόρφωσή του. Η ψαθυρή περιοχή ακολουθεί την πλαστική περιοχή και χαρακτηρίζεται από την έναρξη των φαινομένων αστοχίας του υλικού. Το μέγιστο της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, που αποτελεί το όριο ανάμεσα στην πλαστική και την ψαθυρή περιοχή, είναι μία χαρακτηριστική παράμετρος του υλικού και η οποία ονομάζεται αντοχή σε θλίψη, για συγκεκριμένο πλευρικό περιορισμό. Στις περιπτώσεις μονοαξονικών δοκιμών η παράμετρος αυτή ονομάζεται αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (uniaxial compressive strength) και συμβολίζεται με  $C_0$ .

Γενικά έχει επικρατήσει, τα υλικά που παραμορφώνονται σημαντικά πριν τη θραύση τους να χαρακτηρίζονται σαν όλκιμα, ενώ αυτά που θραύονται χωρίς να υποστούν σημαντικές παραμορφώσεις καλούνται ψαθυρά. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο τα περισσότερα μέταλλα χαρακτηρίζονται σαν όλκιμα υλικά, ενώ τα πετρώματα και τα κεραμικά υλικά σαν ψαθυρά.

Τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης, εκτός από την αντοχή σε θλίψη, μας βοηθούν στον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του υλικού, το οποίο υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης.

## 2.3 Θεωρίες για την θραύση - κατάτμηση

### 2.3.1 Γενικά

Στον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων μας ενδιαφέρει η ενέργεια ανά μονάδα βάρους που απαιτείται από το εκάστοτε μηχάνημα λειοτριβήσης, έτσι ώστε από μία τροφοδοσία ενός αρχικού μεγέθους να επιτευχθεί το επιθυμητό μέγεθος προϊόντος.

Το κυριότερο πρόβλημα έγκειται στο ότι από την ενέργεια που παράγουν οι μηχανές θραύσης και λειοτριβήσης μόνο ένα μικρό ποσοστό διατίθεται για την ελάττωση του μεγέθους των κόκκων του υλικού, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Για παράδειγμα σε ένα σφαιρόμυλο έχει διαπιστωθεί ότι μόνο το 1% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται διατίθεται για την μείωση του μεγέθους των τεμαχίων [6]. Επίσης, οι θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί κάνουν την παραδοχή ότι όλα τα υλικά είναι ψαθυρά και ότι σπάζουν αμέσως στο όριο ελαστικής παραμόρφωσης, χωρίς να σπαταλάται ενέργεια για τυχόν μόνιμη παραμόρφωση του υλικού (επιμήκυνση ή σμίκρυνση των κόκκων).

### 2.3.2 Οι βασικές θεωρίες

Βασικές θεωρίες που περιγράφουν τη σχέση ενέργειας και μεγέθους τεμαχίου κατά την κατάτμηση είναι των P.R. Rittinger [7], F. Kick [8] και F.C. Bond [9]. Οι θεωρίες αυτές όμως δεν ανταποκρίνονται άμεσα σε κάποιο συγκεκριμένο φυσικό μηχανισμό κατάτμησης, αλλά κάθε μία προσεγγίζει συγκεκριμένα μεγέθη και μηχανές κατάτμησης. Τέτοιες εργασίες, που να μελετούν το φαινόμενο αυτό έχουν γίνει από τους R.J. Charles [10] και Η.Σταμπολιάδη [11].

Σύμφωνα με τη θεωρία του Rittinger (1867) [7], ο οποίος έκανε την παραδοχή ότι η καταναλισκόμενη ενέργεια στην ελάττωση του μεγέθους είναι ανάλογη της νέας επιφάνειας που παράγεται. Η επιφάνεια ενός συγκεκριμένου βάρους κόκκων ομοιόμορφης διαμέτρου είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου. Οπότε ο νόμος του Rittinger μπορεί να εκφραστεί μέσω της εξίσωσης 2:3.

$$e_{R12} = C_R \cdot \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (2:3)$$

Η θεωρία του Kick (1885) [8], σύμφωνα με την οποία η ενέργεια που απαιτείται για την ελάττωση του μεγέθους δεν εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του αρχικού και του τελικού προϊόντος, αλλά μόνο από τη σχέση μεγέθους και εκφράζεται μέσω της εξίσωσης 2:4. Αν και η αρχική μορφή της εξίσωσης που πρότεινε ο Kick ήταν η εξής [18]:  $\frac{E_{k1}}{x_1} = \frac{E_{k2}}{x_2}$

$$e_{K12} = C_K \cdot \log \frac{x_1}{x_2} \quad (2:4)$$

Η θεωρία του Bond (1952) [9], αναφέρει ότι η ενέργεια που απαιτείται είναι ανάλογη του συνολικού μήκους των ρωγμών που συνετέλεσαν στην θραύση. Το μήκος αυτό ανά μονάδα βάρους του υλικού είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της επιφάνειας που δημιουργείται κατά την θραύση, που όπως παραπάνω είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου των κόκκων, και εκφράζεται μέσω της εξίσωσης 2:5.

$$e_{B12} = C_B \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (2:5)$$

όπου,  $e_{12}$  η ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά μονάδα βάρους) για την μείωση από ένα αρχικό μέγεθος  $x_1$  σε τελικό μέγεθος  $x_2$  και  $C$ : σταθερά. Οι δείκτες  $R$ ,  $B$  και  $K$  αναφέρονται στο όνομα της αντίστοιχης θεωρίας. Στην περίπτωση του Bond το μέγεθος αντιστοιχεί στο 80% αθροιστικώς διερχόμενο βάρος.

Παρόλα αυτά έγιναν προσπάθειες να περιγραφεί το φαινόμενο της κατάτμησης από μία γενική θεωρία και η προσπάθεια αυτή έγινε από τους Walker και Shaw (1954) με τη θεωρία αυτή να εκφράζεται μέσω της εξίσωσης 2:6.

$$d_{ex} = -C \cdot \frac{d_x}{x^m} \quad (2:6)$$

όπου,  $d_{ex}$  είναι η στοιχειώδης ειδική ενέργεια που απαιτείται για να προκληθεί απειροελάχιστη μεταβολή μεγέθους κατά  $d_x$  σε ένα τεμάχιο μεγέθους  $x$ , ενώ  $C$  και  $m$  σταθερές  $>0$ . Η ολοκλήρωση της εξίσωσης 2:6 για  $m = 1$  δίνει την εξίσωση 2:7 η οποία αντιστοιχεί στην εξίσωση του Kick.

$$e_x = -C \cdot \ln x \quad (2:7)$$

Η ολοκλήρωση για  $m \neq 1$  δίνει την εξίσωση 2:8, η οποία αντιστοιχεί στις εξισώσεις του Rittinger και Bond, για  $m=2$  και  $m=1,5$  αντίστοιχα.

$$e_x = \frac{C}{m-1} \cdot x^{1-m} \quad (2:8)$$

Πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις δεν ανταποκρίνονται σε κάποιο συγκεκριμένο φυσικό μηχανισμό κατάτμησης, καθώς και ότι δεν γίνεται καμία αναφορά για τον πληθυσμό των κόκκων. Προσεγγιστικά ο νόμος του Kick έχει μεγαλύτερη ακρίβεια για μεγέθη χονδρομερούς θραύσεως μέχρι 10 mm. Ο νόμος του Bond μπορεί να εφαρμοστεί στους ραβδόμυλους, ενώ ο νόμος του Rittinger έχει καλύτερη εφαρμογή στους σφαιρόμυλους για μεγέθη 10-1000  $\mu m$  [12].

Άλλες θεωρίες, οι οποίες θέλησαν να προσεγγίσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια το πολύπλευρο πρόβλημα της θραύσης των υλικών, έγιναν πρώτα από τον R.J. Charles (1957) [10] και αργότερα από τον H. Σταμπολιάδη (1996, 2000) [11], [13]. Στις δύο αυτές περιπτώσεις το υλικό θεωρήθηκε ότι αποτελείται από πολλούς κόκκους όπου όλοι μαζί διατηρούν την αρχική μάζα και μετά από κάθε στάδιο κατάτμησης ακολουθούν πάντα ένα συγκεκριμένο τύπο κατανομής που περιγράφεται από τον τύπο Gates Gaudin Schuhman (G.G.S.) Ο τύπος της κατανομής είναι σταθερός για όλα τα συμβάντα θραύσης και περιγράφεται από την εξίσωση 2:9.

$$W = W_o \cdot \left( \frac{x}{y} \right)^a \quad (2:9)$$

Όπου W η αθροιστική μάζα των τεμαχίων μεγέθους μικρότερου του x, W<sub>o</sub> η συνολική μάζα του υλικού, y το μεγαλύτερο μέγεθος του τεμαχίου (size modulus) και a μία σταθερά >0 που καθορίζει την κατανομή (distribution modulus).

Ο Charles χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2:8 κατέληξε στην εξίσωση 2:10 όπου οι νόμοι των Rittinger και Bond αποτελούν μερικές περιπτώσεις, όπως και στην εξίσωση 2:8. Η κύρια διαφορά έγκειται στο ότι η εξίσωση 2:10 αναφέρεται σε ένα πληθυσμό κόκκων μεγέθους 0 έως K, ενώ η εξίσωση 2:8 αναφέρεται σε ένα μέγεθος κόκκου.

$$e_k = \frac{C \cdot a}{(m-1) \cdot (1-m+a)} \cdot K^{1-m} \quad (2:10)$$

Ο H. Σταμπολιάδης σε μία προσπάθεια περιγραφής της σχέσης ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την κατάτμηση κατέληξε στα ίδια αποτελέσματα διατυπώνοντας μία διαφορετική προσέγγιση. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η κρουστική θραύση δίνει ένα προϊόν που έχει μία κατανομή μεγέθους τεμαχιδίων. Η απαιτούμενη ενέργεια για την δημιουργία καθενός τεμαχιδίου, εκθέτοντας όλη του την επιφάνεια, δίνεται από τον εξής τύπο:

$$Q_x = (C_s \cdot S_x)^n \text{ ή } Q_x = (C_s \cdot f)^n \cdot x^{2n} \quad (2:11)$$

Όπου x: το μέγεθος του τεμαχιδίου, S<sub>x</sub>: η εξωτερική του επιφάνεια, f : ο συντελεστής επιφάνειας και

C<sub>s</sub> & n: σταθερές > 0.

Η ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά μονάδα μάζας) για το ίδιο τεμαχίδιο είναι:

$$q_x = \frac{(C_x f)^n \cdot x^{2n-3}}{k \cdot \rho} \quad (2:12)$$

Όπου ρ: η πυκνότητα του υλικού και k: ο συντελεστής όγκου.

Θεωρώντας μία κατανομή μεγέθους κατά G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τα παραγόμενα τεμαχίδια, η απαιτούμενη ειδική ενέργεια για την παραγωγή ενός συνόλου τεμαχιδίων συνολικής μάζας  $W_0$ , με χαρακτηριστικό μέγεθος  $y$  και χαρακτηριστική κατανομή  $a$ , δίνεται από τις εξισώσεις 2:13 και 2:14 ανάλογα με την τιμή του  $2n-3+a$ :

$$e_y = A \cdot \frac{a}{2n-3+a} \cdot y^{2n-3}, \quad 2n-3+a > 0 \quad (2:13)$$

$$e_y = A \cdot \frac{\ln y^a}{y^a}, \quad 2n-3+a = 0 \quad (2:14)$$

Στην περίπτωση της εξίσωσης 2:13 οι νόμοι των Rittinger και Bond παράγονται ως υποπεριπτώσεις για τιμές του  $n$  ίσες με 1 και 1,25 αντίστοιχα. Οι ποσότητες  $(1-m)$  και  $(1-m+a)$  του Charles αντιστοιχούν στις  $(2n-3)$  και  $(2n-3+a)$  του Σταμπολιάδη.

Οι τιμές της σταθεράς  $a$  (distribution modulus) μπορούν να υπολογιστούν μέσω των μετρήσεων της κατανομής βάρους κατά μέγεθος των προϊόντων της κατάτμησης ενός υλικού από την log-log γραφική παράσταση του βάρους % αθροιστικώς διερχόμενου σε συνάρτηση με το μέγεθος. Η τιμή του  $a$  είναι κλίση της ευθείας που προκύπτει. Οι εκθέτες  $(2n-3)$  της εξίσωσης 2:13 ή  $(1-m)$  της εξίσωσης 2:10 μπορούν να υπολογιστούν από το log-log διάγραμμα της ενέργειας που καταναλώνεται για την παραγωγή ενός συνόλου κόκκων σε συνάρτηση με το μέγεθος. Οι εκθέτες αποτελούν την κλίση της προκύπτουσας γραμμής.

### 2.3.3 Κατάτμηση

Η εργασία η οποία διενεργείται με σκοπό την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων των πετρωμάτων και των βιομηχανικών ορυκτών καλείται κατάτμηση. Η εργασία αυτή πραγματοποιείται με την εφαρμογή μίας δύναμης μεγαλύτερης του ορίου ελαστικότητας του υλικού. Ο όρος κατάτμηση περιλαμβάνει όλες τις μεθόδους ελάττωσης του μεγέθους των τεμαχίων ανεξαρτήτου αρχικής και τελικής διάστασής τους. Η ελάττωση αυτή πραγματοποιείται κυρίως σε περισσότερα από ένα στάδια. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2-1) παρουσιάζονται τα συνήθη στάδια της κατάτμησης.

Τα στάδια της κατάτμησης από το αρχικό μέγεθος μέχρι περίπου τα 10 mm έως 2 mm, ονομάζονται θραύση, ενώ για τα πιο λεπτόκοκκα προϊόντα η διαδικασία ονομάζεται λειοτριβήση ή άλεση. Οι κυριότερες κατηγορίες δυνάμεων που εξασκούν οι μηχανές κατάτμησης, στα ψαθυρά υλικά για την μείωση του μεγέθους των τεμαχίων, είναι η θλίψη, η κρούση, η τριβή και εν μέρει η διάτμηση.

- Η *θλίψη*: είναι η συνηθέστερη μορφή δύναμης που χρησιμοποιείται στην κατάτμηση και εφαρμόζεται δια της συμπίεσης των σωμάτων μεταξύ δύο επιφανειών. Η πίεση εξασκείται



συνήθως από τη μία επιφάνεια ενώ η άλλη παραμένει ακίνητη. Οι κυριότερες μηχανές κατάτμησης με θλίψη είναι οι σιαγονωτοί σπαστήρες, οι γυροσκοπικοί και οι κωνικοί σπαστήρες καθώς και οι κυλινδρόμυλοι.

- Η *κρούση*: είναι η απλούστερη δύναμη κατάτμησης και εξασκείται με την απότομη πρόσκρουση τεμαχίου επί ταχέως κινούμενης επιφάνειας ή αντιστρόφως, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του τεμαχίου. Κυριότερες μηχανές κατάτμησης με κρούση είναι οι περιστροφικοί σπαστήρες και εν μέρει ο σφυρόμυλος, ο ραβδόμυλος και ο σφαιρόμυλος.
- Η *τριβή*: εφαρμόζεται όταν το υλικό ευρίσκεται μεταξύ δύο παραλλήλων και αντιθέτως κινούμενων επιφανειών που δημιουργούν διατμητικές τάσεις μέσα στο σώμα και ολίσθηση σε εσωτερικές επιφάνειες του σώματος. Η τριβή δημιουργεί επίσης φθορά στην επιφάνεια τριβής του τεμαχίου με τις κινούμενες επιφάνειες ή τα άλλα τεμάχια μέσα στην μηχανή κατάτμησης. Ο σφυρόμυλος θεωρείται η κυριότερη μηχανή κατάτμησης με τριβή
- Η *διάτμηση*: είναι κυρίως εφελκυστική δύναμη και έχει περιορισμένη εφαρμογή στην κατάτμηση. Εν μέρει παρατηρείται στους σφυρόμυλους και τους οδοντωτούς κυλινδρόμυλους.

Κατά την λειτουργία μίας μηχανής εξασκούνται πολλά είδη δυνάμεων, αλλά ένα είδος χαρακτηρίζει, συνήθως τη λειτουργία της συγκεκριμένης μηχανής.

Η κατάτμηση εξυπηρετεί τις προδιαγραφές χρήσης του προϊόντος, τις απαιτήσεις της διαδικασίας που ενδεχομένως ακολουθεί και τις ανάγκες αποδέσμευσης του υλικού. Όταν πρόκειται για μέταλλευμα που προορίζεται για να υποστεί μία διαδικασία για τον διαχωρισμό του χρήσιμου από το άχρηστο ορυκτό θα πρέπει το μέγεθος να είναι τέτοιο ώστε να μην συνυπάρχουν το χρήσιμο με τα άχρηστα ορυκτά στον ίδιο κόκκο [4].

**Πίνακας 2-1: Στάδια κατάτμησης, μεγέθη τεμαχιδίων τροφοδοσίας και προϊόντων**

Στάδια	Φάσεις	Μέγεθος τεμαχιδίων (mm)	
		Τροφοδοσίας	Προϊόντων
Θραύση	Πρωτογενής	1200-200	300-60
	Δευτερογενής	250-90	80-25
		100-30	30-8
	Τριτογενής	35-5	10-2
Λειοτρίβηση	Χονδρομερής	25-2	1-0,5
	Λεπτομερής	10-2	0,5-0,074
	Άλεση	10-2	-0,074 ή -0,040

### 3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

#### 3.1 Γενικά

Η ταξινόμηση, σαν διαδικασία, χρησιμεύει στην μέτρηση της κατανομής του μεγέθους ενός δείγματος καθώς και στη λήψη δειγμάτων από σωματίδια ίδιου μεγέθους. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η κοσκίνιση. Η κοσκίνιση παρέχει την δυνατότητα να απομονώνει κλάσματα διαφόρων μεγεθών από τα συνολικά δείγματα, έτσι ώστε να υποστούν μετέπειτα είτε περαιτέρω επεξεργασία είτε κάποια χημική ή ορυκτολογική ανάλυση. Για μικρότερα μεγέθη τα ανοίγματα των πλεγμάτων των κόσκινων φράζουν από τους κόκκους με παραπλήσιες διαστάσεις, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η απόδοση της κοσκίνισης. Για τα μικρά αυτά μεγέθη κόκκων προτιμώνται άλλες μέθοδοι όπως αυτή της υδροταξινόμισης και της αεροταξινόμισης.

#### 3.2 Προσδιορισμός μεγέθους σωματιδίων

Κάθε μέθοδος που υπάρχει, για τον προσδιορισμό του μεγέθους των σωματιδίων, χρησιμοποιεί και διαφορετική ιδιότητα του τεμαχίου με διαφορετική τεχνική. Επίσης οι ισοδύναμοι διάμετροι που μετριοούνται δεν είναι οι ίδιες. Οι σημαντικότερες μέθοδοι, καθώς επίσης και η τάξη μεγέθους των σωματιδίων που μετριοούνται με κάθε μία παρουσιάζονται στον πίνακα 3-1.

**Πίνακας 3-1: Οι κυριότερες μέθοδοι προσδιορισμού μεγέθους των σωματιδίων**

Μέθοδος		Μετρούμενη διάμετρος	Τάξη μεγέθους (μm)
Κοσκίνιση	1. Διάτρητες λαμαρίνες	$d_A$	500.000 - 75
	2. Πλέγματα		
Μικροκοσκίνιση		$d_A$	100 - 10
Μικροσκόπιο		$d_M, d_F, d_a$	10 - 1
Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο		$d_a$	5 - 0,01
Καθίζηση		$d_{st}$	50 - 10
Φυγοκέντριση		$d_{st}$	10 - 0,05
Αεροταξινόμιση		$d_{st}$	50 - 10
Φωτομετρική		$d_v$	5 - 0,5
Ακτίνες Laser		$d_v$	50 - 0,1
Μετρητής Coulter		$d_v$	100 - 1
Μέτρηση επιφάνειας	1. Προσρόφηση αερίων	Επιφάνεια	> 1 m <sup>2</sup> /gr
	2. Διαπερατότητα		

Συνήθως το δείγμα σωματιδίων των οποίων το μέγεθος θέλουμε να μετρηθεί, αποτελείται από σωματίδια διαφόρων μεγεθών. Εκτός από την μέτρηση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων επιθυμείται πολλές φορές και η λήψη δείγματος από σωματίδια διαφόρων μεγεθών. Για το σκοπό αυτό μόνο η μέθοδος της κοσκίνισης, και σε μερικές περιπτώσεις η μέθοδος της καθίζησης, μπορούν να δώσουν ξεχωριστά δείγματα διαφόρων κλασμάτων.

### 3.3 Κοσκίνιση

Οι επιδιωκόμενοι στόχοι της κοσκίνισης είναι συνήθως να απομακρύνει τα ψιλά κλάσματα πριν από κάποιο σπαστήρα έτσι ώστε να έχουμε αύξηση της απόδοσής του ή για να εμποδίσει τα χονδρά κλάσματα στο να εισέλθουν σε κάποια από τις επόμενες διαδικασίες (χρήση κυκλωμάτων θραύσης). Τέλος, ένας άλλος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται είναι, για να προετοιμάσει ένα ‘στενό’ μέγεθος κλάσματος ως τροφή σε κάποια διαδικασία.

Η κοσκίνιση μπορεί να γίνει εν ξηρό ή εν υγρό. Η υγρή κοσκίνιση έχει σαν πλεονέκτημα ότι σπάζει τα συσσωματώματα κόκκων και ότι ξεπλένει τους μεγάλους κόκκους από τους μικρούς που συγκολλούνται πάνω τους. Κατά την διαδικασία της κοσκίνισης οι κόκκοι τοποθετούνται πάνω στο πλέγμα και δονούνται με κάποιο μηχανισμό. Όσους από αυτούς είναι μικρότεροι από τους βρόχους του πλέγματος διέρχονται από αυτούς, ενώ όσοι είναι μεγαλύτεροι παραμένουν επί του πλέγματος. Με τον τρόπο αυτό το δείγμα χωρίζεται σε δύο κλάσματα, το παραμένον και το διερχόμενο. Η ταξινόμηση ενός δείγματος σε πολλά κλάσματα γίνεται με την τοποθέτηση κόσκινων το ένα κάτω από το άλλο. Σε μία σειρά κόσκινων σημασία έχει η σχέση ανοίγματος των βρόχων των διαδοχικών πλεγμάτων. Η σχέση μεγαλύτερου προς μικρότερου είναι συνήθως  $\sqrt{2}=1.41$  ή  $\sqrt[4]{2}=1.19$ . Στην περίπτωση μας η σχέση αυτή ίση με 2 λόγω του ότι τα κόσκινα που χρησιμοποιήσαμε για τον προσδιορισμό της κατανομής της τροφοδοσίας του υλικού του δακτυλιόμυλου ήταν κατά σειρά τα εξής: 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 και 0.063 mm.

## 4 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ: ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

### 4.1 Γενικά

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση ενός νέου μύλου ξηρής λειοτρίβησης, του *δακτυλιόμυλου*, για την παραγωγή κονιαμάτων με χαμηλό κόστος, καθώς και η αρχή λειτουργίας που τον διέπει. Επίσης θα αναλυθούν οι βασικές εξισώσεις όσο αναφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δακτυλιόμυλου αλλά και οι εξισώσεις των δυνάμεων που ασκούνται στα σωματίδια κατά την διαδικασία της λειοτρίβησης. Τέλος θα γίνει αναφορά στις εξισώσεις υπολογισμού διαφόρων σημαντικών παραμέτρων όπως την συνολική ισχύ του μύλου (total milling power  $N$ ) και τον βαθμό απόδοσης του μύλου (efficiency of the pulverizer).

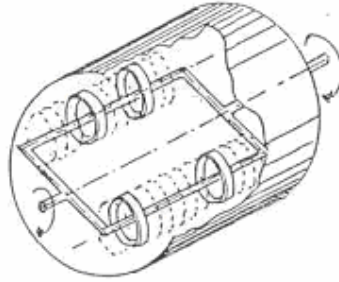
### 4.2 Εισαγωγή

Η παρούσα τάση για παραγωγή μεγάλου όγκου υλικών με πολύ λεπτομερή κοκκομετρία, αυξάνει την ανάγκη για το σχεδιασμό και την περαιτέρω ανάπτυξη ειδικών μύλων χαμηλού κόστους για την παραγωγή των υλικών αυτών. Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του υλικού μετά την άλεση καθορίζει την τελική ποιότητα του προϊόντος καθώς και τις ρεολογικές του ιδιότητες.

Ο πρωτότυπος αυτός μύλος ξηρής λειοτρίβησης ονομάζεται *δακτυλιόμυλος* και αναπτύχθηκε ως ιδέα από τους Π. Μακρή, Β. Σπιτά και Μ. Φούντη [14]. Ο σκοπός της δημιουργίας του μύλου αυτού είναι η επαρκής κονιορτοποίηση διαφόρων βιομηχανικών υλικών. Το υλικό λειοτριβείται από την συνδυασμένη δράση ορθών και διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται στο υλικό, κυρίως από τα μεταλλικά μέρη του μύλου (τους δακτυλίους) και δευτερευόντως από τους γειτονικούς κόκκους. Οι κλασικοί μύλοι, όπως ο σφαιρόμυλος, ο ραβδόμυλος, ο σφυρόμυλος και άλλοι, έχουν από κοινού ότι η ορθή και διατμητική τάση που ασκούν σε ένα κόκκο έχουν άμεση σχέση η μία με την άλλη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορούν να ρυθμιστούν-μεταβληθούν ανεξάρτητα. Είναι γενικά αποδεκτό (D.W.Fuerstenau and P.C.Kapur, [15] και Hamada et al., [16]) ότι οι διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται σε ένα κόκκο αυξάνουν την κατανάλωση ενέργειας, χωρίς όμως ανταπόκριση όσο αναφορά την βελτίωση της κοκκομετρίας, δηλαδή την μείωση του μεγέθους των κλασμάτων. Ο λόγος ορθών προς διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σωματίδιο μπορούν να ρυθμιστούν στον δακτυλιόμυλο σύμφωνα με τις μηχανικές απαιτήσεις του προς λειοτρίβηση υλικού. Σε αντίθεση με τον ραβδόμυλο ή τον σφαιρόμυλο, ο δακτυλιόμυλος χρησιμοποιεί αρκετούς μεταλλικούς δακτυλίους, οι οποίοι περιστρέφονται ελεύθερα κατά μήκος των βραχιόνων (arms) ενός ορθογώνιου πλαισίου και το οποίο επίσης περιστρέφεται γύρω από τον κεντρικό άξονα του κυλινδρικού μύλου. Η πρωτοτυπία του και συνάμα το κύριο πλεονέκτημά του είναι η ευελιξία όσο αναφορά την μεταβολή-ρύθμιση του λόγου ορθής προς διατμητικής τάσης που δρουν σε ένα σωματίδιο κατά την άλεση.

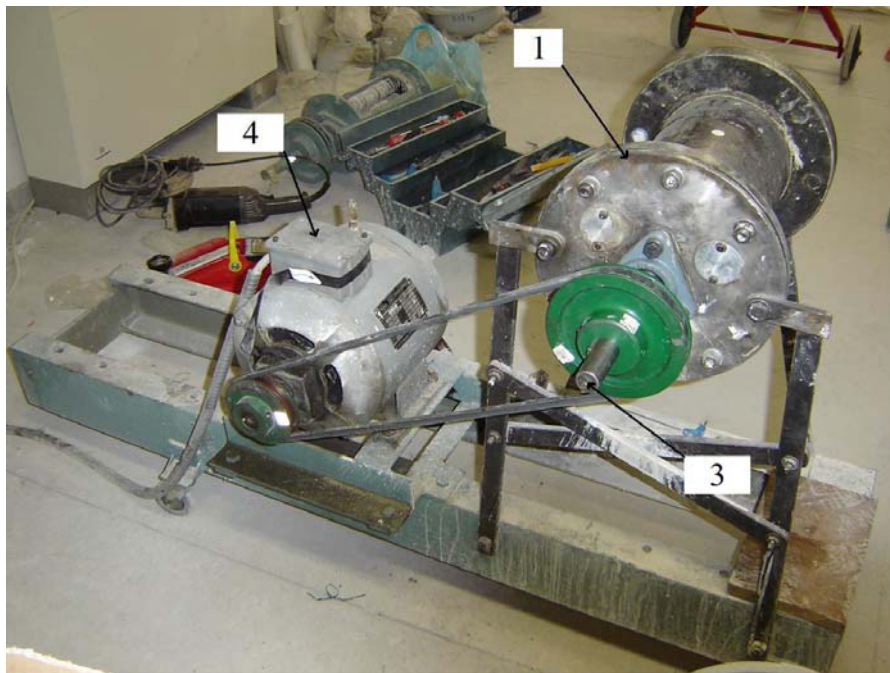
### 4.3 Περιγραφή του δακτυλιόμυλου

Ο πρωτότυπος αυτός μύλος ξηρής λειοτρίβησης περιλαμβάνει ένα μεταλλικό κέλυφος, το οποίο περικλείει το κύριο σώμα του μύλου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-1.



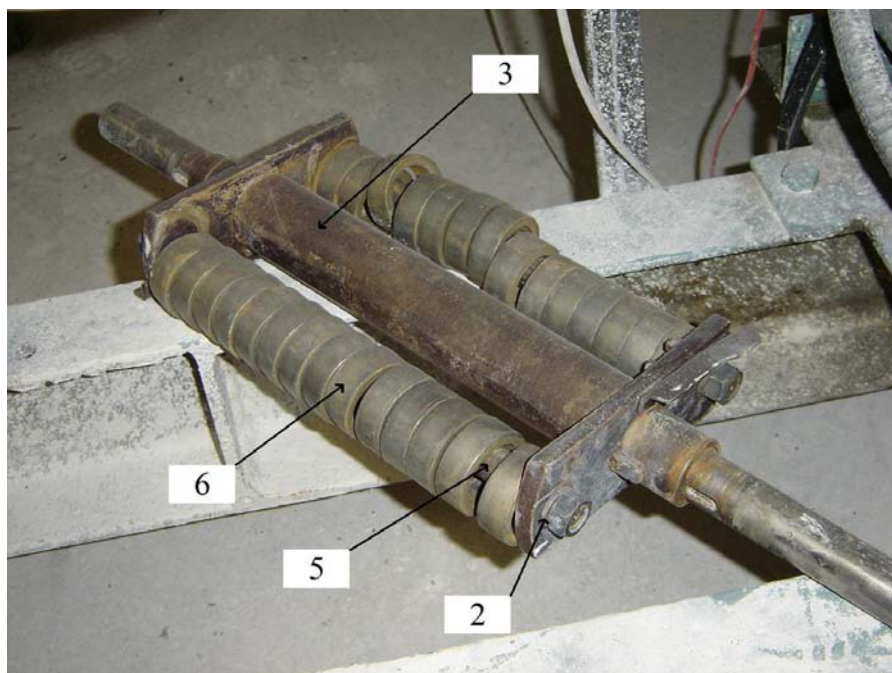
Σχήμα 4-1: Τριδιάστατη τομή του δακτυλιόμυλου

Μέσα στον μεταλλικό κύλινδρο (1) έχει τοποθετηθεί ένα ορθογώνιο μεταλλικό πλαίσιο (2) κατά μήκος του κύριου άξονα του κυλίνδρου και το οποίο είναι προσαρτημένο στον κεντρικό άξονα (3). Ο κεντρικός άξονας μπορεί να περιστρέφεται με την βοήθεια ενός ηλεκτρικού κινητήρα (4) μέσω ιμάντα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-1.



Εικόνα 4-1: Μεταλλικός κύλινδρος–Σύνδεση δακτυλιόμυλου με ηλεκτροκινητήρα μέσω ιμάντα

Το ορθογώνιο αυτό μεταλλικό πλαίσιο περιλαμβάνει δύο βραχίονες, οι οποίοι παραμένουν παράλληλοι με την βοήθεια δύο συνδετικών ράβδων. Ένας μεγάλος αριθμός από μεταλλικούς δακτύλιους εισάγονται κατά μήκος της κάθε συνδετικής ράβδου (5) όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 4-2. Κάθε δακτύλιος μπορεί να κινείται ελεύθερα κατά μήκος και γύρω από την ράβδο. Κατά την διάρκεια της περιστροφής του ορθογώνιου πλαισίου, οι μεταλλικοί δακτύλιοι (6) λόγω της φυγόκεντρου δύναμης, ασκούν τάσεις στους κόκκους που βρίσκεται μεταξύ του εκάστοτε δακτύλιου και της εσωτερικής επιφάνειας του κελύφους του μύλου. Ταυτόχρονα δημιουργούνται δυνάμεις τριβής μεταξύ των μεταλλικών δακτυλίων και της εσωτερικής επιφάνεια του μύλου.



**Εικόνα 4-2: Μεταλλικό πλαίσιο-συνδετικές ράβδοι με δακτυλίους και βραχίονες**

Για τον λόγο αυτό οι δακτύλιοι περιστρέφονται ελεύθερα γύρω από τον άξονα συμμετρίας τους ενώ ταυτόχρονα ολισθαίνουν κατά μήκος των βραχιόνων του πλαισίου και κυλούν παράλληλα με την εσωτερική επιφάνεια του μύλου. Τα σωματίδια πληρούν το χώρο μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του μύλου και των μεταλλικών δακτυλίων. Συνεπώς οι κόκκοι του υλικού υφίστανται την επίδραση ορθών και διατμητικών τάσεων.

Οι άξονες στους οποίους οι δακτύλιοι μπορούν να περιστρέφονται ελεύθερα, συνδέονται με τον κύριο άξονα του μύλου μέσω μία ρυθμιζόμενης γωνίας  $\varphi$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-2, και η οποία αίρει τον δακτύλιο με μία ποικιλία τιμών της γωνίας  $\varphi$ . Ο τρόπος με τον οποίο οι δακτύλιοι

‘αιωρούνται’ από τους άξονές τους, ελέγχει την ικανότητα του να μεταβάλλεται η γωνία  $\varphi$  (suspension angle  $\varphi$ ).

Βάση των προηγούμενων, η διαδικασία λειοτρίβησης του δακτυλιόμυλου δύναται να βελτιστοποιηθεί με την ρύθμιση των παρακάτω παραμέτρων:

- Το πλάτος της γωνίας  $\varphi$ , η οποία ρυθμίζεται, σύμφωνα με την εξίσωση 4:3, μεταβάλλοντας την απόσταση των συνδετικών ράβδων  $l$ , την εσωτερική ακτίνα των δακτυλίων ή την ακτίνα των συνδετικών ράβδων ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε υλικού και
- Το μέγεθος των δακτυλίων, που δρουν τις ορθές και διατμητικές τάσεις στους κόκκους του υλικού που βρίσκεται μεταξύ των δακτυλίων και της εσωτερικής επιφάνειας του μύλου, το οποίο επιλέγεται με σκοπό την επίτευξη μέγιστης ενεργής επιφάνειας. Με τον τρόπο αυτό ρυθμίζεται ο λόγος ορθών προς διατμητικών δυνάμεων που δρουν στο υλικό σύμφωνα με την εξίσωση 4:1.

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια λειτουργίας του μύλου, οι δακτύλιοι επιδεικνύουν μικρή σχετική κίνηση η οποία οφείλεται στο ότι το υλικό που βρίσκεται πάνω στην εσωτερική επιφάνεια του μύλου δεν έχει παντού το ίδιο πάχος. Οι δυνάμεις τριβής που δημιουργούνται μεταξύ δύο διαδοχικών δακτυλίων είναι αμελητέες, το οποίο οφείλεται στο ότι ο μύλος βρίσκεται σε οριζόντια θέση και κατά συνέπεια καμία κάθετη δύναμη δεν ασκείται μεταξύ των δακτυλίων.

Τέλος, αναφορικά με τις βιομηχανικές εφαρμογές του δακτυλιόμυλου πρέπει να ειπωθεί ότι ο δακτυλιόμυλος λειτουργεί ήδη σε τρεις διαφορετικές βιομηχανίες με μεγάλη επιτυχία. Χρησιμοποιείται από μία βιομηχανία τσιμέντου για λειοτρίβηση του τσιμέντου που προορίζεται να προστεθεί σε τούβλα ως βελτιωτικό για τις ιδιότητές τους, από μία βιομηχανία λειοτρίβησης ανθρακικού ασβεστίου και τέλος από μία χαρτοβιομηχανία για λειοτρίβηση των υλικών που χρησιμοποιεί ως πληρωτικά.

#### 4.4 Ονοματολογία

Πίνακας 4-1: Μεγέθη – Σύμβολα – Μονάδες

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδες
Γωνία	$\chi$	rad
Γωνία σχεδιασμού (design angle)	$\theta$	rad
Γωνία	$\varphi$	rad
Απόσταση συνδετικών ράβδων από το κέντρο O	$l$	m
Κέντρο συνδετικής ράβδου	$O_1$	-
Κέντρο κυλίνδρου	$O$	-
Κέντρο δακτυλίου	$O_2$	-
Φυγόκεντρος δύναμη	$F_c$	N
Συντελεστής αντίστασης στην κύλιση	$\alpha$	m
Δύναμη συμπίεσης	$P$	N
Διάμετρος-ακτίνα συνδετικής ράβδου	$d-r$	m
Βαθμός απόδοσης δακτυλιόμυλου	$\eta$	-
Δύναμη τριβής στην ράβδο	$T_f$	N
Απώλεια ενέργειας λόγω τριβών	$N_f$	Watt
Διάμετρος-ακτίνα μύλου (εσωτερική)	$D-R$	m
Διάμετρος-ακτίνα δακτυλίου (εσωτερική)	$d_i-r_i$	m
Μήκος του μύλου	$L$	m
Συντελεστής δύναμης (P/T)	$f$	-
Ισχύς του δακτυλιόμυλου	$N$	Watt
Καθαρή ισχύς του συστήματος του δακτυλιόμυλου	$N_{net}$	Watt
Δύναμη που ασκείται στην συνδετική ράβδο	$F$	N
Αριθμός δακτυλίων για κάθε βραχίονα	$z$	-
Διάμετρος-ακτίνα δακτυλίου (εξωτερική)	$d_o-r_o$	m
Μάζα δακτυλίων	$m$	kg
Πλάτος δακτυλίων	$b$	m
Συντελεστής τριβής μεταξύ δακτυλίου και ράβδου	$\mu$	-
Γωνιακή ταχύτητα του άξονα	$\omega$	rad/s
Ροπή του άξονα	$M$	Nm
Δύναμη συνάφειας	$T$	N



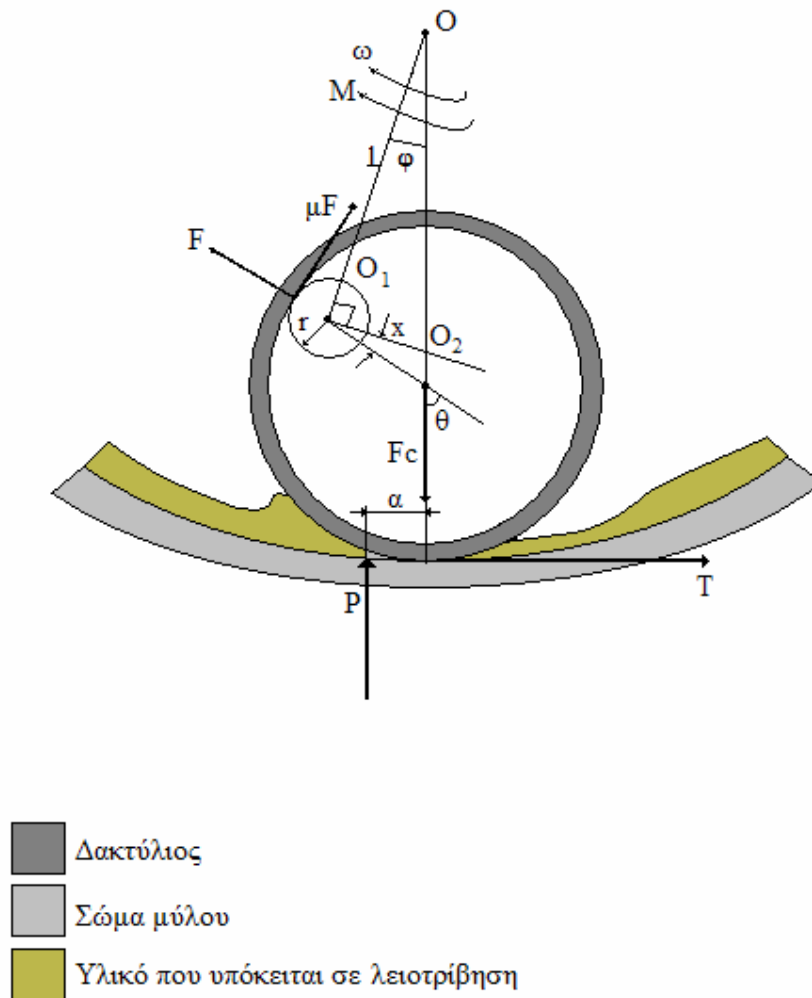
Σχετική ταχύτητα μεταξύ δακτυλίων και ράβδου	$V_s$	m/s
Πυκνότητα υλικού των δακτυλίων	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
Μήκος δακτυλίων (Ενεργό μήκος)	$b_{eff}$	m
Πάχος υλικού κατανεμημένου στην περιφέρεια του δακτυλιόμυλου	$h$	m
Ορθή δύναμη που ασκεί το υλικό στον δακτύλιο (αντίδραση)	$P'$	N
Διατμητική δύναμη που ασκεί το υλικό στον δακτυλιόμυλο (αντίδραση)	$T'$	N
Όγκος υλικού προς λειοτρίβηση στον δακτυλιόμυλο	$V$	m <sup>3</sup>
Εμβαδόν κυκλικής επιφάνειας του δακτυλιόμυλου	$A$	m <sup>2</sup>
Βαθμός πλήρωσης του δακτυλιόμυλου	$V/V_{total}$	-

## 4.5 Ανάλυση των βασικών εξισώσεων του δακτυλιόμυλου

### 4.5.1 Βασικές δυναμικές και κινηματικές εξισώσεις

Η ‘γωνία σχεδιασμού’  $\theta$  υπολογίζεται από τον νόμο των συνημίτονων στο τρίγωνο  $OO_1O_2$  (Σχήμα 4-2):

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{(R - r_o)^2 + (r_i - r)^2 - l^2}{2(R - r_o)(r_i - r)} \right) \quad (4:1)$$



Σχήμα 4-2: Δυνάμεις που ασκούνται σε κόκκους κατά την λειοτρίβηση, στον δακτυλιόμυλο

Όπου:

$O$ : το κέντρο του κυλίνδρου

$O_I$ : το κέντρο της συνδετικής ράβδου

$O_2$ : το κέντρο του δακτυλίου

$l$ : απόσταση των συνδετικών ράβδων από το κέντρο  $O$

$R$ : η εσωτερική ακτίνα του μύλου

$r_o$ : η εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου

$r_i$ : η εσωτερική ακτίνα του δακτυλίου

$r$ : η ακτίνα του συνδετικού βραχίονα, και

$\theta$ : η γωνία σχεδιασμού (design angle)

Όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις και στα σχήματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4-1.

Αν όμως η γωνία σχεδιασμού  $\theta$  δίνεται, τότε η απόσταση των συνδετικών ράβδων (arms)  $l$  από το κέντρο υπολογίζεται ως εξής:

$$l = \sqrt{(R - r_o)^2 + (r_i - r)^2 - [2 \cdot \cos \theta \cdot (R - r_o) \cdot (r_i - r)]} \quad (4:2)$$

Η γωνία  $\phi$  (Σχήμα 4-2) υπολογίζεται από τον νόμο των ημιτόνων στο τρίγωνο  $OO_1O_2$ :

$$\frac{l}{\sin \theta} = \frac{r_i - r}{\sin \phi} \Rightarrow \phi = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta (r_i - r)}{l} \right) \quad (4:3)$$

Η γωνία  $x$  (Σχήμα 4-2) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$x = \frac{\pi}{2} - \phi - \theta \quad (4:4)$$

#### 4.5.2 Ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται στους δακτυλίους

Για την επίτευξη ισορροπίας δυνάμεων κατά το οριζόντιο άξονα πρέπει να ισχύει:

$$T = F(\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad (4:5)$$

Για την ισορροπία δυνάμεων κατά τον κατακόρυφο άξονα ισχύει:

$$m\omega^2(R - r_o) - P = F(\cos \theta + \mu \sin \theta) \quad (4:6)$$

όπου  $m$ , η μάζα των δακτυλίων, η οποία συνδέεται με την πυκνότητα του υλικού των δακτυλίων,  $\rho$  ( $\text{gr/cm}^3$ ) και με το ενεργό μήκος των δακτυλίων,  $b_{\text{eff}}$  (mm) με τον εξής τύπο:  $m = \pi(r_o^2 - r_i^2)b_{\text{eff}} \cdot \rho$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 4:5 και 4:6 έχουμε:

$$\frac{T}{m\omega^2(R - r_o) - P} = \frac{\sin \theta - \mu \cos \theta}{\cos \theta + \mu \sin \theta} \quad (4:7)$$

Η εξίσωση 4:7 συσχετίζει την ορθή τάση με την διατμητική. Από τη στιγμή που καθένας δακτύλιος περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών (ως προς το  $O_2$ ) που προκαλούνται από τις  $P$ ,  $T$  και  $F$  πρέπει να είναι μηδέν.

$$-P \cdot a + T \cdot r_o - \mu F \cdot r_i = 0 \quad (4:8)$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις 4:5 και 4:6 υπολογίζεται η δύναμη  $F$  (εξίσωση 4:12). Αντικαθιστώντας την ορθή τάση ( $P$ ), την διατμητική τάση ( $T$ ) από τις εξισώσεις 4:6 και 4:7 στην εξίσωση 4:8 καθώς και την δύναμη  $F$ , υπολογίζεται η ορθή και η διατμητική τάση, εξισώσεις 4:9 και 4:10.

$$P = m\omega^2(R - r_o) \cdot \frac{r_o(\sin \theta - \mu \cos \theta) - \mu \cdot r_i}{r_o(\sin \theta - \mu \cos \theta) + \alpha(\cos \theta + \mu \sin \theta) - \mu \cdot r_i} \quad (4:9)$$

$$T = \frac{m\omega^2(R - r_o) \cdot a(\sin \theta - \mu \cos \theta)}{r_o(\sin \theta - \mu \cos \theta) + a(\cos \theta + \mu \sin \theta) - \mu \cdot r_i} \quad (4:10)$$

Ο συντελεστής δύναμης  $f$  (force factor) υπολογίζεται ως εξής:

$$f = \frac{P}{T} = \frac{r_o}{a} - \mu \frac{r_i}{a} \cdot \frac{1}{\sin \theta - \mu \cos \theta} \quad (4:11)$$

Η μεταβολή της τιμής του συντελεστή δύναμης  $f$  αποτελεί ένα κρίσιμο πρόβλημα, λόγω του ότι εξαρτάται όχι μόνο από το υλικό ( $\mu$ ,  $a$ ) αλλά και από τη γεωμετρία και τις σχεδιαστικές παραμέτρους του μύλου ( $r_o$ ,  $r_i$  και γωνία  $\theta$ ).

Συνεπώς αλλάζοντας την γωνία σχεδιασμού  $\theta$ , χωρίς την μεταβολή καμίας άλλης από τις παραμέτρους λειτουργίας του μύλου, κάτι το οποίο μπορεί να γίνει ακόμα και κατά την διάρκεια που ο μύλος είναι σε λειτουργία, μεταβάλλεται ο συντελεστής δύναμης ( $P/T$ ), έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του μύλου για συγκεκριμένο υλικό και για συγκεκριμένη κοκκομετρία.

Η μεταβολή του λόγου ορθών προς διατμητικών δυνάμεων ρυθμίζεται μέσω της γωνίας σχεδιασμού  $\theta$ . Η ρύθμιση της γωνίας  $\theta$  επιτυγχάνεται με την αλλαγή των υφιστάμενων δακτυλίων, με άλλων διαφορετικής διαμέτρου ( $r_o$ ) και πάχους ( $r_i$ ). Ένας άλλος τρόπος ρύθμισης της  $\theta$  είναι μεταβάλλοντας την απόσταση των συνδετικών ράβδων  $l$  ή το πάχος τους  $t$ . Οι μεταβολές που αναφέρθηκαν ρυθμίζουν την τιμή της γωνίας  $\theta$  σύμφωνα με την εξίσωση (4:1). Ο βέλτιστος συνδυασμός των δυνάμεων  $P$  και  $T$ , έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη λειοτρίβηση των μικρότερων κλασμάτων του υλικού, όσο αναφορά την κατανομή της κοκκομετρίας καθώς και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας για την συγκεκριμένη διαδικασία.

Η δύναμη  $F$  που ασκείται στη συνδετική ράβδο μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις 4:5 και 4:6.

$$F = \frac{m\omega^2 a \cdot (R - r_o)}{r_o (\sin \theta - \mu \cos \theta) + a (\cos \theta + \mu \sin \theta) - \mu \cdot r_i} \quad (4:12)$$

Ενώ η δύναμη τριβής  $T_f$  υπολογίζεται ως εξής:

$$T_f = \mu \cdot F = \frac{m\omega^2 \mu \cdot a \cdot (R - r_o)}{r_o (\sin \theta - \mu \cos \theta) + a (\cos \theta + \mu \sin \theta) - \mu \cdot r_i} \quad (4:13)$$

#### 4.5.3 Υπολογισμός της συνολικής ισχύος, της καθαρής ισχύος και του βαθμού αποδόσεως του δακτυλιόμυλου

Λαμβάνοντας υπόψη τις δυνάμεις  $F$  και  $T$  που δρουν στους δακτυλίους και κατά συνέπεια στη ράβδο σύζευξης, μπορούμε να υπολογίσουμε την ολική ροπή  $M$  για κάθε δακτύλιο.

$$M = m\omega^2 a \cdot \frac{(R - r_o) \cdot [l \sin(\phi + \theta) - l \cos(\phi + \theta) + \mu \cdot r]}{r_o (\sin \theta - \mu \cos \theta) + a (\cos \theta + \mu \sin \theta) - \mu \cdot r_i} \quad (4:14)$$

Η συνολική ισχύς του μύλου (total milling power,  $N$ ) είναι το γινόμενο της ροπής  $M$  με την γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  του άξονα.

$$N = M \cdot \omega = m\omega^3 a \cdot \frac{(R - r_o) \cdot [l \sin(\phi + \theta) - l \cos(\phi + \theta) + \mu \cdot r]}{r_o (\sin \theta - \mu \cos \theta) + a (\cos \theta + \mu \sin \theta) - \mu \cdot r_i} \quad (4:15)$$

Η σχετική ταχύτητα μεταξύ των δακτυλίων και της ράβδου είναι:

$$V_s = \omega \cdot R \cdot \frac{r_i}{r_o} \quad (4:16)$$

Η απώλεια ενέργειας λόγω τριβής υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4:13.

$$N_f = T_f \cdot V_s = \mu \cdot F \cdot V_s \quad (4:17)$$

Η καθαρή ισχύς του συστήματος του μύλου (net power  $N_{Net}$ ) προκύπτει ως εξής:

$$N_{net} = N - N_f \quad (4:18)$$

Ο βαθμός αποδόσεως του μύλου (efficiency of the milling machine,  $\eta$ ), υπολογίζεται από την εξίσωση 4:19, και αποδεικνύεται ότι είναι ανεξάρτητη του συντελεστή  $a$ .

$$\eta = 1 - \frac{N_f}{N} = 1 - \mu \cdot \frac{R}{l \sin(\phi + \theta) - l \cos(\phi + \theta) + \mu \cdot r} \quad (4:19)$$

#### 4.6 Πρόγραμμα προσομοίωσης της λειτουργίας του δακτυλιόμυλου

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ένα καινοτόμο πρόγραμμα που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το πρόγραμμα αυτό χωρίζεται σε δύο ενότητες Α και Β. Σκοπός της ενότητας Β του προγράμματος αυτού είναι η προσομοίωση της λειτουργίας του δακτυλιόμυλου συναρτήσει των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στις ενότητες 4.3 και 4.5. (Grinding simulation). Η κατασκευή του προγράμματος έγινε στην γλώσσα προγραμματισμού *visual basic.net* και χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις της ενότητας 4.5. Η λειτουργία του προγράμματος είναι σχετικά απλή και το μόνο που απαιτείται από τον χρήστη, είναι η εισαγωγή των πέντε σημαντικών γεωμετρικών παραμέτρων του μύλου, στις μονάδες μέτρησης που του ζητείται. Αυτό αποτελεί το πρώτο μέρος, της Α ενότητας του προγράμματος, κατά το οποίο δύναται στον χρήστη η επιλογή να υπολογίσει την απόσταση των συνδετικών ράβδων ( $l$ ) μέσω της γωνίας σχεδιασμού ( $\theta$ ) ή το αντίστροφο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-3.

TUC Project v2.1

Program Help

A) Grain distribution B) Grinding simulation

Inner mill radius R: 81.7 (mm)

Rod radius r: 8.0 (mm)

Outer ring radius r0: 22.1 (mm)

Inner ring radius ri: 16.2 (mm)

1. Geometry 2. RingForces 3. Efficiency

Design angle θ: 82.9 degrees

Arm length l: 59.1 (mm)

Select

☒ Compute θ

☐ Compute l

Compute

Εικόνα 4-3: Υπολογισμός των γεωμετρικών παραμέτρων του δακτυλιόμυλου

Οι παράμετροι οι οποίοι τοποθετούνται στα κελιά υπόκεινται σε κάποιους μαθηματικούς περιορισμούς, χωρίς τους οποίους δεν ισχύουν οι εξισώσεις της ενότητας 4.5 κατ' επέκταση το πρόγραμμα δεν μπορεί να λειτουργήσει και εμφανίζει μήνυμα σφάλματος το οποίο εντοπίζει το λάθος και προτρέπει το χρήστη να το διορθώσει. Όπως για παράδειγμα ότι η εσωτερική ακτίνα του μύλου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική ακτίνα των δακτυλίων. Οι περιορισμοί είναι οι εξής:

1.  $r < r_i < r_o < R$
2.  $\min l = R - r_o - r_i + r$
3.  $\max l \rightarrow \theta = 90^\circ$
4.  $\theta > 0^\circ$  και  $\theta < 180^\circ$

Το δεύτερο μέρος του προγράμματος συνυπολογίζει τις δοθείσες τιμές του χρήστη από το πρώτο καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-4.

The screenshot shows the 'TUC Project v2.1' software window. It has a menu bar with 'Program' and 'Help'. Below the menu bar are two tabs: 'A) Grain distribution' and 'B) Grinding simulation'. The 'Grinding simulation' tab is active. The interface is divided into two main sections. The top section is for input parameters, and the bottom section is for calculated results. A 'Compute >>' button is located in the center of the bottom section.

**Input Parameters (Top Section):**

- Inner mill radius:  $R$ : 81.7 (mm)
- Rod radius:  $r$ : 8.0 (mm)
- Outer ring radius:  $r_o$ : 22.1 (mm)
- Inner ring radius:  $r_i$ : 16.2 (mm)

**Calculated Results (Bottom Section):**

- Ring mass:  $m$ : 2.49 (kg)
- Shear force:  $T$ : 51.4 (N)
- Compressive force:  $P$ : 473 (N)
- Milling force factor:  $f$ : 9.21
- Normal force on connecting rod:  $F$ : 59.1 (N)
- Friction force on rod:  $T_f$ : 11.8 (N)

**Input Parameters (Bottom Left Section):**

- Density:  $\rho$ : 7800 (kg/m<sup>3</sup>)
- Length:  $B_{eff}$ : 450 (mm)
- Shaft velocity:  $\omega$ : 620 (r.p.m.)
- Coefficient of rolling resistance:  $\alpha$ : 2.4 (mm)
- Ring/rod friction coefficient:  $\mu$ : 0.2

Εικόνα 4-4: Υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται στους κόκκους



Στο δεύτερο μέρος του προγράμματος ο χρήστης εισάγει την παράμετρο της πυκνότητας υλικού ( $\rho$ ), από την οποία κατασκευάστηκαν οι δακτύλιοι καθώς και το συνολικό τους μήκος, αφού τοποθετηθούν ο ένας δίπλα στον άλλο πάνω στην συνδετική ράβδο. Το μήκος αυτό αναφέρεται ως ενεργό μήκος,  $B_{eff}$ . Επίσης εισάγονται και άλλες παράμετροι όπως η γωνιακή ταχύτητα του άξονα ( $\omega$ ), ο συντελεστής τριβής μεταξύ των δακτυλίων και την ράβδου ( $\mu$ ) και ο συντελεστής αντίστασης στην κύλιση ( $\alpha$ ). Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους και παράλληλα με την εισαγωγή των νέων δεδομένων τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, το πρόγραμμα υπολογίζει μια νέα σειρά παραμέτρων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-4. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν τις δυνάμεις που ασκούνται στους κόκκους κατά την λειοτρίβηση. Υπολογίζεται με τον τρόπο αυτό η ορθή ( $P$ ) και η διατμητική ( $T$ ) τάση που ασκούνται στο υλικό, ο συντελεστής δύναμης ( $f = P/T$ ), την δύναμη που ασκείται στην συνδετική ράβδο ( $F$ ), την δύναμη τριβής στην ράβδο ( $T_f$ ) καθώς και την συνολική μάζα των δακτυλίων ( $m$ ).

**TUC Project v2.1**

Program Help

A) Grain distribution B) Grinding simulation

Inner mill radius R: 81.7 (mm)

Rod radius r: 8.0 (mm)

Outer ring radius r0: 22.1 (mm)

Inner ring radius ri: 16.2 (mm)

1. Geometry 2. RingForces 3. Efficiency

Shaft torsional moment M: 2.731 (Nm)

Frictional power loss Nf: 46 (Watt)

Milling power N: 177 (Watt)

Net milling power Nnet: 131 (Watt)

Sliding velocity Vs: 3.89 (m/s)

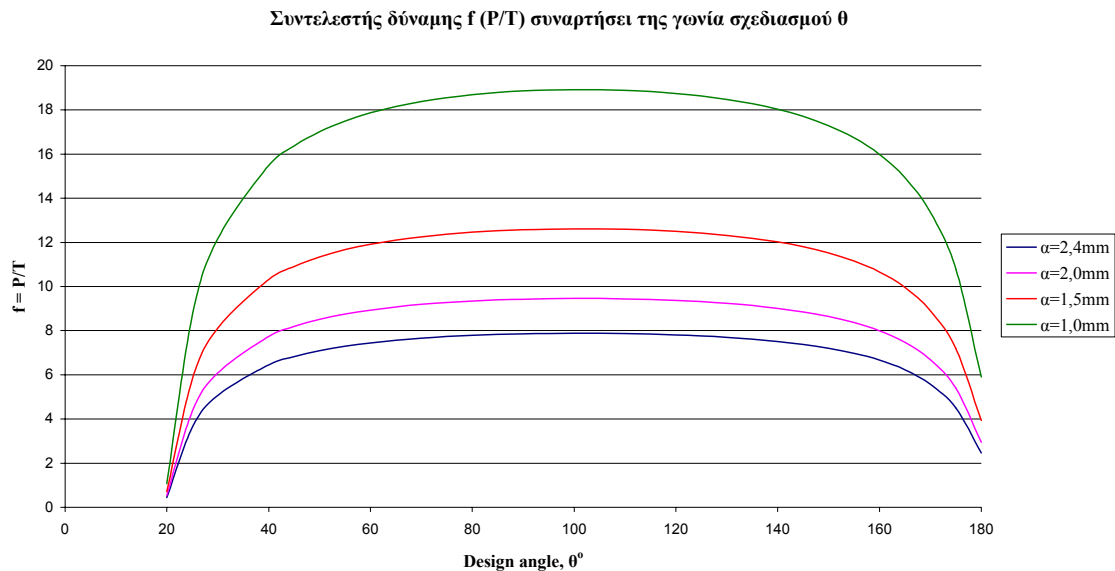
Efficiency η: 74.1 %

Εικόνα 4-5: Υπολογισμός παραμέτρων που ‘αξιολογούν’ την απόδοση του δακτυλιόμυλου

Με τη σειρά τους τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τελικών και πιο σημαντικών παραμέτρων (τρίτο μέρος-Efficiency) οι οποίες ουσιαστικά ‘αξιολογούν’ την απόδοση του μύλου. Οι παράμετροι αυτοί είναι: η ροπή του κεντρικού άξονα ( $M$ ), την ισχύ του μύλου ( $N$ ), την σχετική ταχύτητα μεταξύ των δακτυλίων και της ράβδου ( $V_s$ ), τις απώλειες λόγω τριβών ( $N_f$ ), την καθαρή ισχύ του συστήματος ( $N_{net}$ ) και τέλος τον βαθμό αποδόσεως ( $\eta$ ) του μύλου (Εικόνα 4-5).

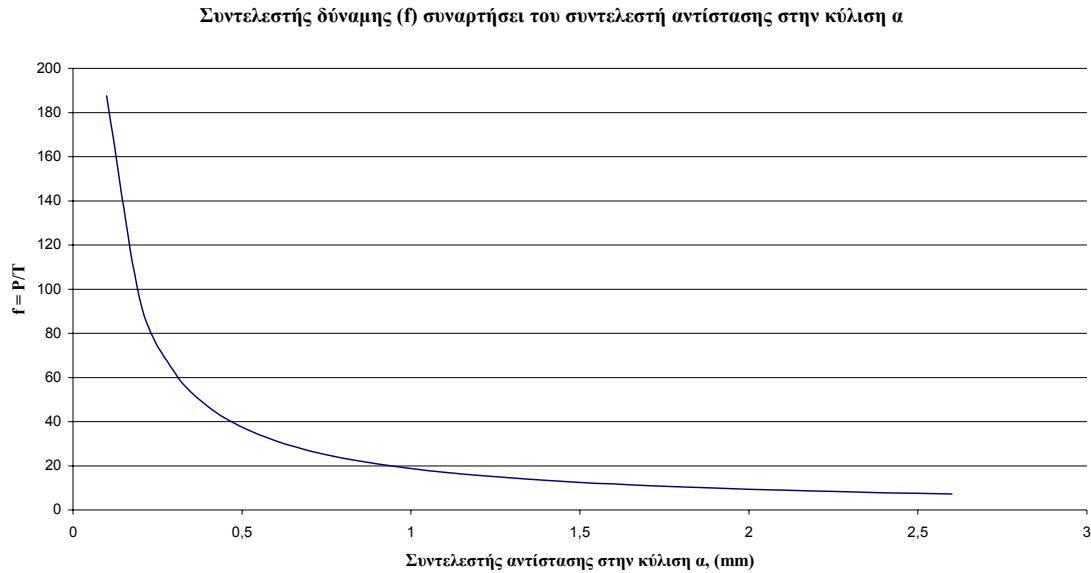
#### 4.6.1 Αποτελέσματα

Βάση του παραπάνω προγράμματος και με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης του δακτυλιόμυλου, παρουσιάζονται τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή του προγράμματος. Το διάγραμμα 4-1 παριστά τον συντελεστή δύναμης  $f$ , συναρτήσει της γωνίας σχεδιασμού  $\theta$ , για διάφορες τιμές του συντελεστή αντίστασης στην κύλιση ( $\alpha$ ). Ο συντελεστής δύναμης  $f$  ισούται με τον λόγο ορθών προς διατμητικών δυνάμεων, δηλαδή  $P/T$ . Συνεπώς όσο αυξάνεται ο συντελεστής  $f$ , τόσο αυξάνονται οι ορθές έναντι των διατμητικών τάσεων που ασκούνται στο προς λειοτριβήση υλικό. Παρατηρώντας το διάγραμμα 4-1, γίνεται κατανοητό ότι ο συντελεστής  $f$  και κατ’ επέκταση η ορθές τάσεις που δέχεται το υλικό, αυξάνονται μειούμενου του συντελεστή  $\alpha$ . Επίσης η μέγιστη τιμή του συντελεστή  $f$ , για κάθε τιμή του συντελεστή  $\alpha$ , είναι για γωνία σχεδιασμού ίση με  $100^\circ$ .



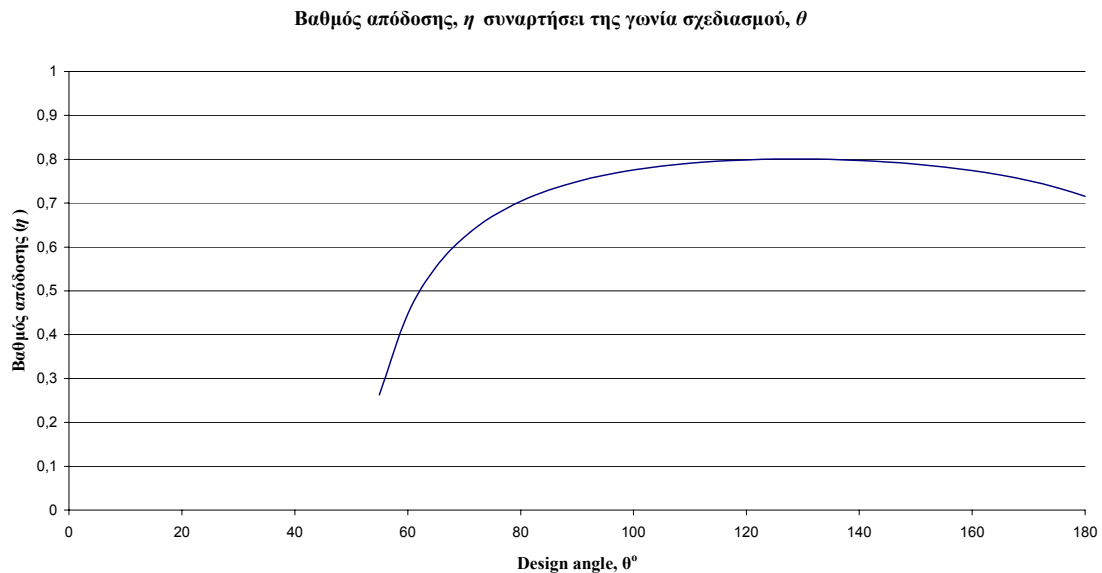
**Διάγραμμα 4-1: Συντελεστής δύναμης  $f$ , συναρτήσει της γωνίας σχεδιασμού  $\theta^\circ$ , για διάφορες τιμές του συντελεστή αντίστασης στην κύλιση  $\alpha$**

Στο διάγραμμα 4-2 παρίσταται ο συντελεστής δύναμης  $f$  ( $P/T$ ) συναρτήσει του συντελεστή κύλισης  $\alpha$  και γίνεται απολύτως κατανοητό ότι όσο μειώνεται ο συντελεστής αντίστασης στην κύλιση  $\alpha$ , τόσο αυξάνεται ο λόγος  $P/T$ , δηλαδή αυξάνονται οι ορθές δυνάμεις έναντι των διατμητικών.



**Διάγραμμα 4-2: Λόγος ορθών προς διατμητικών δυνάμεων ( $f$ ), συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης  $\alpha$**

Στο διάγραμμα 4-3 παρίσταται ίσως η πιο σημαντική παράμετρος του προγράμματος προσομοίωσης, ο βαθμός απόδοσης του μύλου ( $\eta$ ) συναρτήσει της γωνίας σχεδιασμό  $\theta^\circ$  (design angle).



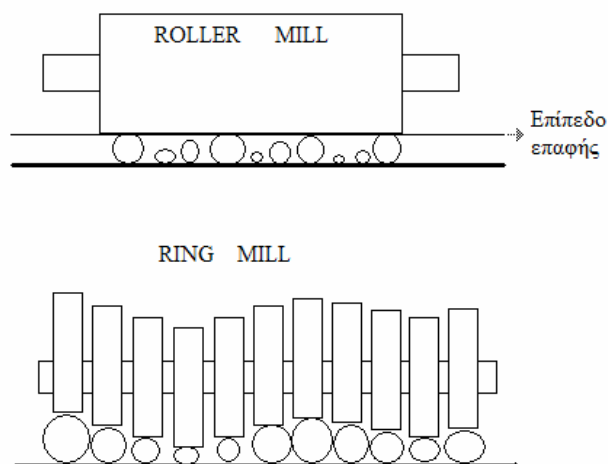
**Διάγραμμα 4-3: Βαθμός απόδοσης  $\eta$ , συναρτήσει της γωνίας σχεδιασμού  $\theta^\circ$**

Από το διάγραμμα 4-3, προκύπτει ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ( $\eta$ ), επιτυγχάνεται για γωνία σχεδιασμού  $130^\circ$ .

## 4.7 Γενικές αρχές και χαρακτηριστικά του δακτυλιόμυλου

### 4.7.1 Αρχές σχεδιασμού

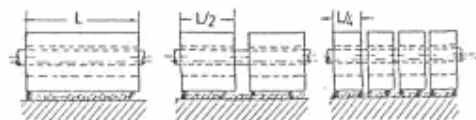
Στην πλειοψηφία των μύλων λειοτριβήσης το επίπεδο επαφής μεταξύ της επιφάνειας λειοτριβήσης και του υλικού είναι μία εικονική ευθεία γραμμή η οποία ορίζεται από τα μεγαλύτερα σωματίδια όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-3: Επίπεδο επαφής σε συμβατικό μύλο και στον δακτυλιόμυλο

Αυτό υποδηλώνει ότι τα μεγαλύτερα σωματίδια αλέθονται αποτελεσματικότερα από ότι τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια. Γενικά τα μεσαίου μεγέθους σωματίδια δεν λειοτριβούνται ικανοποιητικά [14]. Αυτός ο λόγος είναι που οδήγησε στην ανάπτυξη κλειστών κυκλωμάτων με μύλο και κόσκινα έτσι ώστε το υλικό σταδιακά να αλέθεται στο επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα (τελική κοκκομετρία).

Αν όμως το κύριο σώμα λειοτριβήσης του μύλου χωριζόταν σε μικρότερα κομμάτια (δακτυλίους), όπως παρίσταται στο Σχήμα 4-4, τότε η επιφάνεια επαφής, από μία ευθεία που είναι σε ένα συμβατικό μύλο, θα σχημάτιζε μία τεθλασμένη γραμμή όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι δυνάμεις να ασκούνται σε ένα μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων, και όχι μόνο στα μεγαλύτερα όπως γίνεται στους συμβατικούς μύλους. Με τον τρόπο αυτό έχουμε αύξηση του αριθμού των λειοτριβούμενων κόκκων και κατά συνέπεια βελτίωση της ποιότητας άλεσης.



**Σχήμα 4-4: Αύξηση του αριθμού των δακτυλίων**

Είναι προφανές ότι όταν η επιφάνεια επαφής χωριστεί σε μικρότερα τμήματα (Σχήμα 4-4), με την ίδια ενέργεια λειοτρίβησης, οι δυνάμεις που θα ασκούνται από το κάθε τμήμα-δακτύλιο θα είναι μικρότερες. Το γεγονός αυτό μας επιβάλλει ένα φυσικό εμπόδιο στην αύξηση, μετά από ένα όριο, του αριθμού των τμημάτων-δακτυλίων.

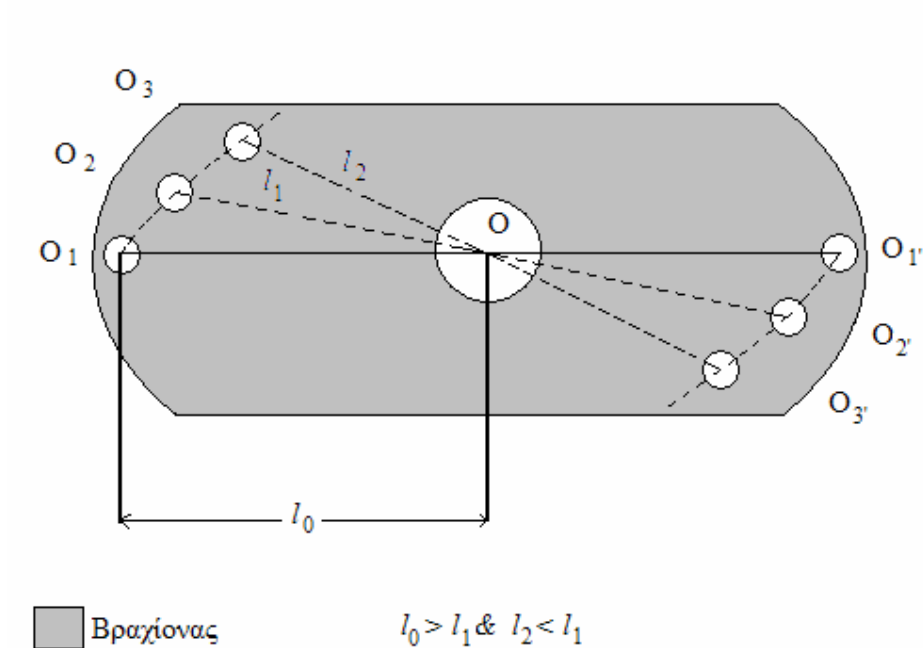
Κατά το σχεδιασμό του δακτυλιόμυλου υπάρχουν διάφοροι παράμετροι οι οποίοι θεωρούνται ότι συνεισφέρουν στην βελτιστοποίηση της απόδοσης του δακτυλιόμυλου. Η πιο σημαντική παράμετρος όμως είναι η γωνία  $\theta$ , η ρύθμιση της οποίας αποτελεί καινοτομία. Ο λόγος για τον οποίο αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο είναι ότι μέσω αυτής της γωνίας δίνεται η δυνατότητα μεταβολής του λόγου ορθών προς διατμητικών δυνάμεων ( $P/T$ ) που ασκούνται στο προς λειοτρίβηση υλικό.

Η ρύθμιση της γωνίας  $\theta$  αποτελεί καινοτομία γιατί γίνεται σχετικά εύκολα στον ήδη υπάρχον μύλο με την απλή αλλαγή κάποιων εξαρτημάτων του. Έτσι μεταβάλλοντας τον λόγο  $P/T$  μέσω της γωνίας  $\theta$  μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση του δακτυλιόμυλου ανάλογα με το προς λειοτρίβηση υλικό. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα λειοτρίβησης μεγάλης ποικιλίας υλικών διαφορετικών ιδιοτήτων στον ίδιο μύλο.

Η μεταβολή του λόγου ορθών προς διατμητικών τάσεων γίνεται εφικτή μέσω της ρύθμισης της γωνίας  $\theta$ . Η ρύθμιση της γωνίας  $\theta$  επιτυγχάνεται, σύμφωνα με την εξίσωση 4:1, ως εξής: είτε αλλάζοντας τους υπάρχον δακτυλίους με άλλους διαφορετικού μεγέθους ή πάχους ( $r_o$  ή  $r_i$ ), είτε μεταβάλλοντας την απόσταση των συνδετικών ράβδων ( $l$ ), είτε αντικαθιστώντας τις συνδετικές ράβδους με άλλες διαφορετικού πάχους ( $r$ ).

Στον μέλλον η μεταβολή της γωνίας  $\theta$  θα μπορούσε να γίνεται on line, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-5, αλλάζοντας απλά την θέση των συνδετικών ράβδων έτσι ώστε να μεταβάλλεται η απόσταση  $l$  στην επιθυμητή τιμή. Με τον τρόπο αυτό θα δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης του λόγου  $P/T$  αλλάζοντας τα σημεία επαφής των συνδετικών ράβδων με τους βραχίονες (για παράδειγμα από

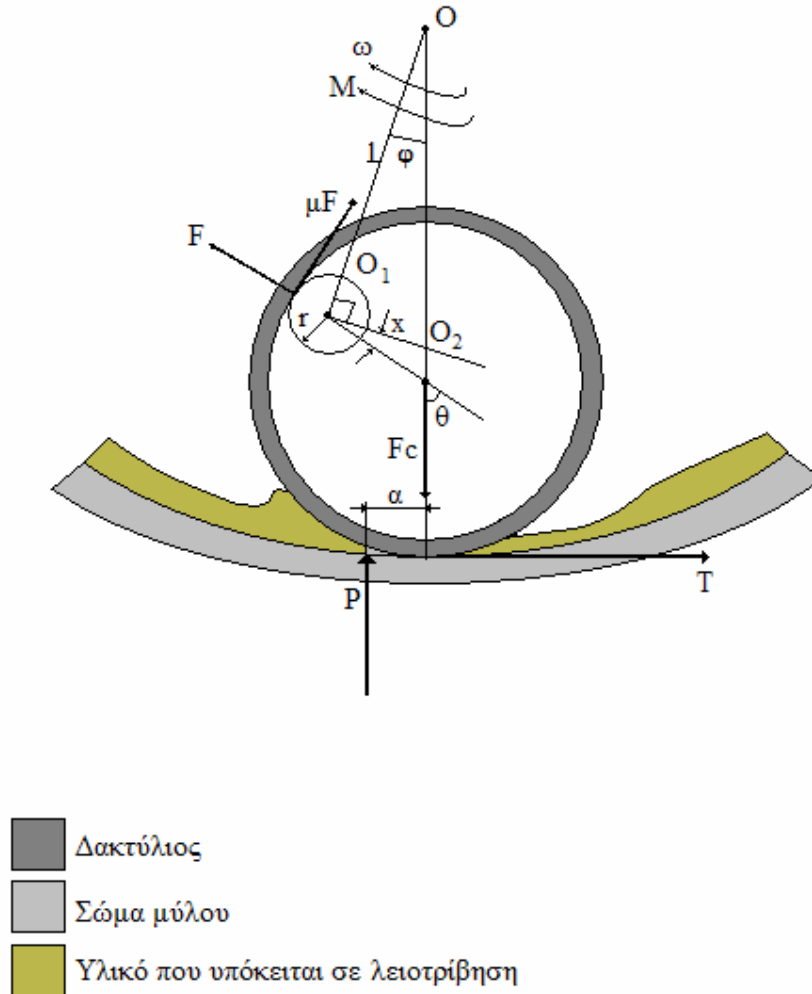
$O_1-O_1'$  σε  $O_2-O_2'$ ) με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταβάλλεται η απόσταση  $l$  ανάλογα με τις ανάγκες του υλικού που λειοτριβείται (από  $l_0$  σε  $l_1$  και από  $l_1$  σε  $l_2$ ).



Σχήμα 4-5: On line μεταβολή της γωνίας  $\theta$ , μέσω αλλαγής της απόστασης των συνδετικών ράβδων ( $l$ )

#### 4.7.2 Χαρακτηριστικά του δακτυλιόμυλου

Το Σχήμα 4-6 δείχνει τις δυνάμεις που ασκούνται γενικά σε ένα σωματίδιο κατά την άλεσή του στον δακτυλιόμυλο. Στους κυλινδρικούς μύλους, κάθε μία ‘κεφαλή’ λειοτρίβησης, ακολουθεί την εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του μύλου με ταχύτητα περιστροφής  $\omega$ , ασκώντας στα σωματίδια δύο κύριες δυνάμεις οι οποίες είναι: την ορθή τάση,  $P$ , και την διατμητική τάση,  $T$ .



Σχήμα 4-6: Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σωματίδιο κατά την λειοτρίβηση στον δακτυλιόμυλο

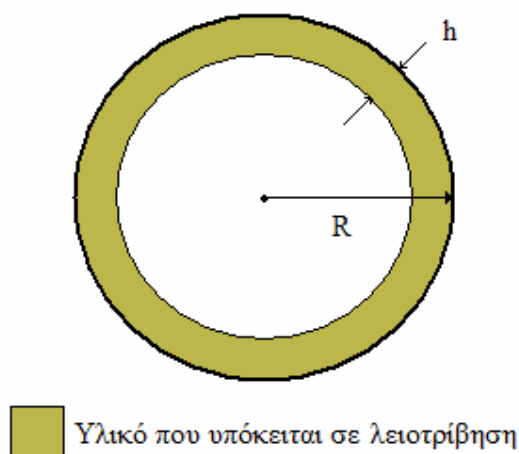
Στις περιπτώσεις των δακτυλίων, των σφαιρών, των κώνων και των ράβδων η τάση ασκείται σε μία απόσταση  $\alpha$  (offset distance) από το κέντρο της περιοχής επαφής και το  $\alpha$  δείχνει την αντίσταση κύλισης (rolling resistance offset). Ο λόγος  $P/T$  εξαρτάται από τις σχεδιαστικές αρχές και εξασφαλίζει τον συντελεστή τριβής,  $\mu$ , στην περίπτωση του δακτυλιόμυλου και τον λόγο  $ra/\alpha$ . Αυτοί οι συντελεστές παραμένουν σταθεροί μέσα σε κάποια συγκεκριμένα όρια, από τη στιγμή που η



γεωμετρία στους υπάρχον μύλους, είναι γενικά προκαθορισμένη. Η θεωρητική ανάλυση (Π. Μακρής, [17]) έδειξε ότι ο λόγος  $P/T$  μπορεί να κυμαίνεται από μηδέν μέχρι  $rA/\alpha$ , όπου  $rA$  είναι η εξωτερική διάμετρος των δακτυλίων και  $\alpha$  η αντίσταση κύλισης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-6.

Η ελάχιστη ενέργεια για την άλεση ενός υλικού επιτυγχάνεται για ένα συγκεκριμένο λόγο  $P/T$  και ο οποίος χαρακτηρίζει κάθε ένα υλικό ξεχωριστά. Η ικανότητα του μύλου στο να ρυθμίζουμε τα γωνία ταλάντωσης  $\varphi$  (suspension angle), μας επιτρέπει να μεταβάλλουμε το λόγο  $P/T$  κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Παράλληλα αυξάνεται η ικανότητα του μύλου να αλέθει επιτυχώς μία μεγάλη ποικιλία υλικών. Αυτό σημαίνει ότι για να επιτύχουμε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την άλεση ενός συγκεκριμένου υλικού, θα πρέπει ο λόγος  $P/T$  να μεταβάλλεται μέχρι να βρούμε την βέλτιστη τιμή. Αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας το  $P$  ή το  $T$  ή και τα δύο μαζί.

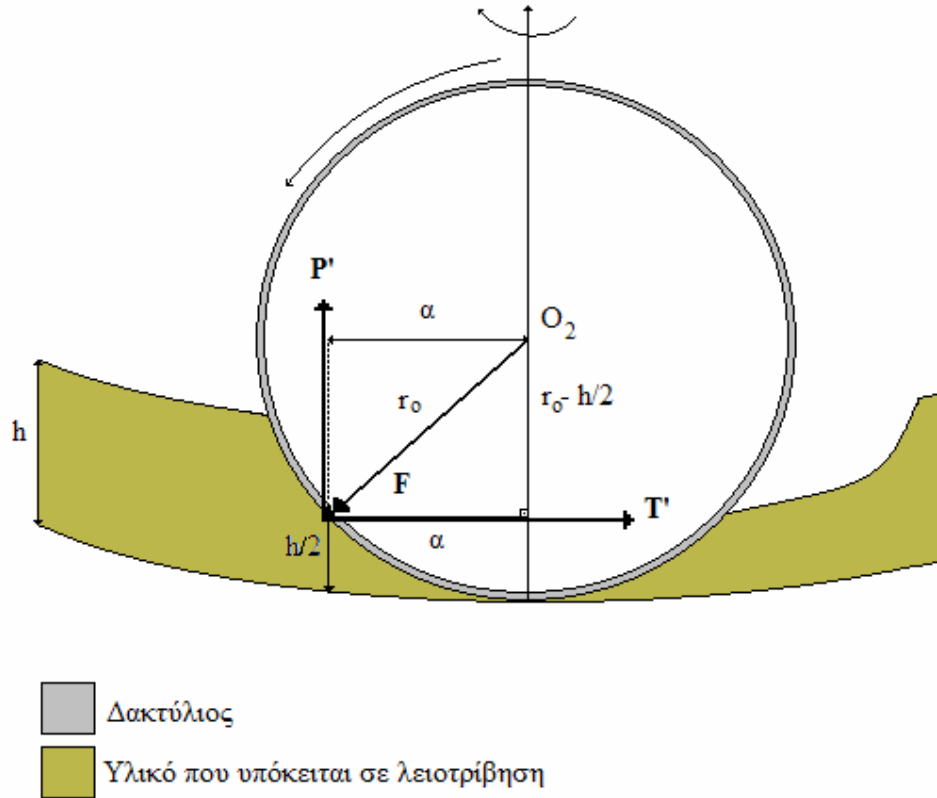
Σύμφωνα με τα παραπάνω, το υλικό που υπόκειται σε λειοτρίβηση στον δακτυλιόμυλο, θεωρητικά κατανέμεται ομοιόμορφα στην περιφέρεια του κυλινδρικού τμήματος του μύλου σχηματίζοντας ένα στρώμα πάχους  $h$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-7.



**Σχήμα 4-7: Ομοιόμορφα κατανεμημένο υλικό στην περιφέρεια του δακτυλιόμυλου με πάχος  $h$**

Το υλικό αυτό κατά την διάρκεια της λειοτρίβησης δέχεται μία δύναμη  $F$  (η οποία αναλύεται στις  $P$  και  $T$ ) από τον εκάστοτε δακτύλιο λόγω της φυγοκέντρου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-6. Η δύναμη  $F$  που ασκείται από τον δακτύλιο στο υλικό αναλύεται στις  $P$  και  $T$ . Οι  $P$  και  $T$  ασκούνται στο υλικό σε μία απόσταση  $a$ , η οποία είναι ο συντελεστής αντίστασης στην κύλιση (coefficient of rolling resistance). Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει αυτή η μετατόπιση του σημείου εφαρμογής των δυνάμεων

P και T είναι το πάχος του ισοκατανεμημένου υλικού h. Το φαινόμενο αυτό διακρίνεται καλύτερα στο Σχήμα 4-8 που αποτελεί μεγέθυνση του σχήματος 4-6. Το υλικό με τη σειρά του λόγω δράσης-αντίδρασης ασκεί και αυτό μία δύναμη F' στον δακτύλιο, η οποία F' αναλύεται στις P' και T' όπως παρίσταται στο Σχήμα 4-8.



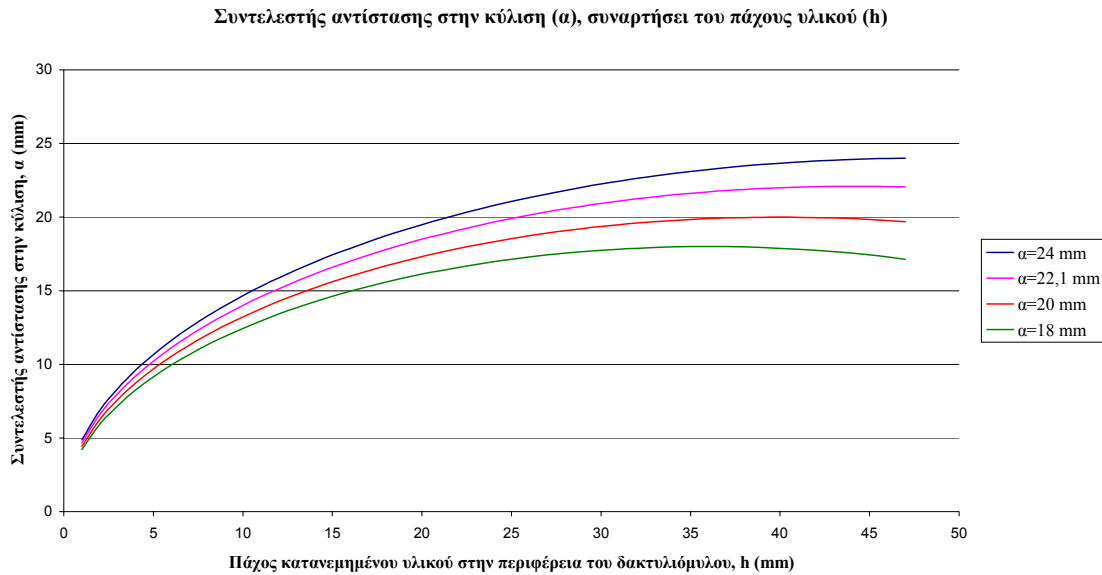
Σχήμα 4-8: Δυνάμεις P' και T' που ασκεί το υλικό στο δακτύλιο

Από τη γεωμετρία που προκύπτει υπολογίζεται ο συντελεστής α συναρτήσει του πάχους του υλικού h ως εξής:

$$r_0^2 = a^2 + \left(r_0 - \frac{h}{2}\right)^2 \Rightarrow a^2 = r_0 h - \frac{h^2}{4} \quad (4:20)$$

$$a = \sqrt{r_0 h - \frac{h^2}{4}} \quad (4:21)$$

Από τη σχέση 4:21 προκύπτει το Διάγραμμα 4-4, από το οποίο συμπεραίνεται ότι το πάχος του υλικού  $h$  επηρεάζει τον συντελεστή αντίστασης στην κύλιση  $a$  μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή, πέρα από την οποία ο συντελεστής  $a$  σταθεροποιείται σε μία τιμή ανεξάρτητα της αύξησης της τιμής του πάχους του υλικού  $h$ .



**Διάγραμμα 4-4: Συντελεστής αντίστασης στην κύλιση  $a$ , συναρτήσει του πάχους του υλικού  $h$**

Συμπερασματικά καταλήγουμε ότι ο συντελεστής αντίστασης στην κύλιση  $a$ , εξαρτάται από το πάχος του κατανεμημένου υλικού μέχρι μία τιμή πέρα από την οποία παύει να τον επηρεάζει. Άρα και ο όγκος του υλικού (βαθμός πλήρωσης) που υπάρχει μέσα στον δακτυλιόμυλο ( $V$ ), ο οποίος είναι συνάρτηση του πάχους  $h$ , επηρεάζει και αυτός με την σειρά του τον συντελεστή αντίστασης στην κύλιση  $a$  μέχρι μία τιμή πέρα από την οποία το  $a$  σταθεροποιείται. Αυτό αποδεικνύεται παρακάτω.

Το υλικό του σχήματος 4-7 έχει πάχος  $h$  και όγκο  $V$  και ισχύει ότι:

$$V = A \cdot L \quad (4:22)$$

$$A = \pi R^2 - \pi(R - h)^2 \Rightarrow A = \pi h(2R - h) \quad (4:23)$$

Από τις εξισώσεις 4:22 και 4:23 έχουμε:

$$V = \pi h(2R - h) \cdot L \Rightarrow -\pi h^2 + 2\pi hR - \frac{V}{L} = 0 \quad (4:24)$$

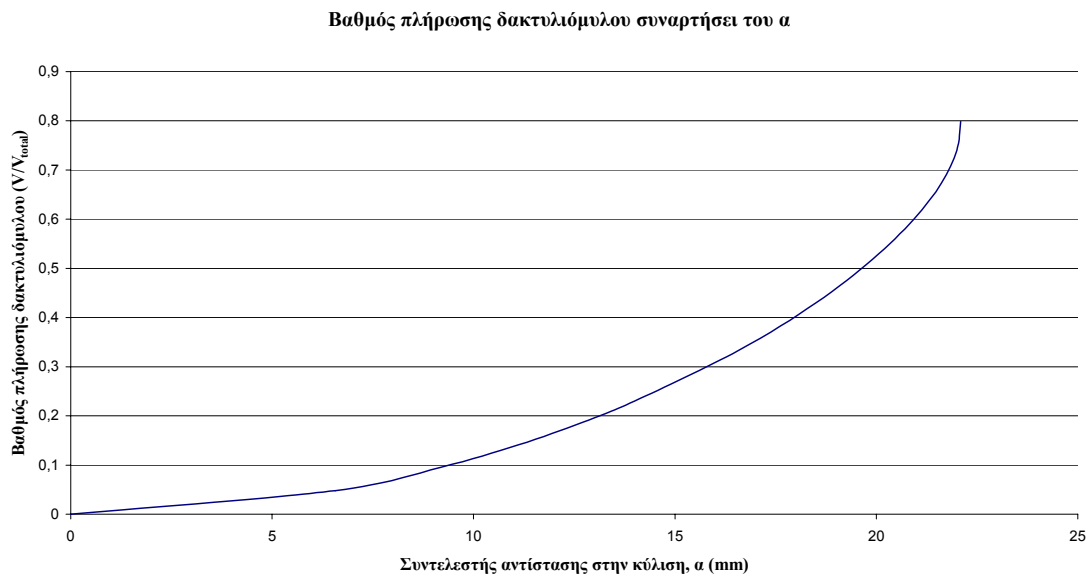
Η εξίσωση 4:24 είναι ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού, το οποίο έχει δύο ρίζες,  $h_1$  και  $h_2$ :

$$h_{1,2} = \frac{-2\pi R \pm \sqrt{4\pi^2 R^2 - \frac{4\pi V}{L}}}{-2\pi} \quad (4:25)$$

Από τις δύο αυτές ρίζες δεχόμαστε την  $h_1$  και απορρίπτουμε την  $h_2$ :

$$h_1 = \frac{-2\pi R + \sqrt{4\pi^2 R^2 - \frac{4\pi V}{L}}}{-2\pi} \quad (4:26)$$

Από τις σχέσεις 4:26 και 4:21 συσχετίζεται ο βαθμός πλήρωσης του δακτυλιόμυλου συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης στην κύλιση  $\alpha$  και προκύπτει το Διάγραμμα 4-5 που αποδεικνύει την εξάρτηση του βαθμού πλήρωσης από τον συντελεστή  $\alpha$ .



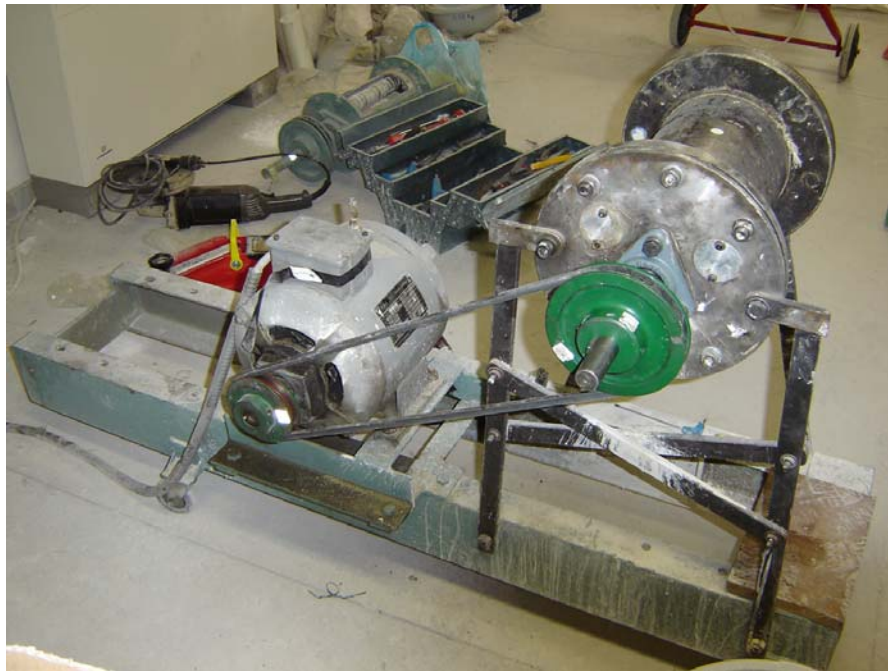
**Διάγραμμα 4-5: Βαθμός πλήρωσης συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης στην κύλιση  $\alpha$**

#### 4.8 Διάταξη λειτουργίας του δακτυλιόμυλου

Ο δακτυλιόμυλος για την λειοτρίβηση του υλικού, του παρέχεται ενέργεια από έναν ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον δακτυλιόμυλο μέσω ενός ιμάντα. Επίσης για τον έλεγχο του ηλεκτροκινητήρα της εγκατάστασης χρησιμοποιείται μετατροπέας συχνότητας (frequency inverter).

##### 4.8.1 Ηλεκτροκινητήρας

Για την κίνηση του άξονα του δακτυλιόμυλου χρησιμοποιείται ασυγχρόνιστος τριφασικός κινητήρας ισχύος 4,5 Ps (5,5 kW) ελληνικής κατασκευής, ο οποίος μεταδίδει την κίνηση μέσω ενός ιμάντα, όπως διακρίνεται στην διάταξη της Εικόνα 4-6.



Εικόνα 4-6: Σύστημα κινητήρα – ιμάντα και δακτυλιόμυλου

##### 4.8.2 Μετατροπέας συχνότητας (Frequency inverter)

Για τον έλεγχο του ηλεκτροκινητήρα της εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε μετατροπέας συχνότητας της εταιρίας LENZE. Η διάταξη αυτή είναι ένας σύνθετος μετατροπέας ο οποίος περιλαμβάνει το τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής συχνότητας 50 Hz του δικτύου της Δ.Ε.Η. και το μετατρέπει σε εναλλασσόμενο ρεύμα ελεγχόμενης συχνότητας (Εικόνα 4-7). Η

ελεγχόμενη συχνότητα μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 480 Hz. Οι μεγάλες συχνότητες όμως είναι μόνο για ειδικής κατασκευής κινητήρες, ενώ για κινητήρες όπως αυτός των δοκιμών μας η συχνότητα δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 50 Hz. Ο μετατροπέας συχνότητας (inverter) ελέγχει τον κινητήρα με μεταβολή της παρεχόμενης τάσης και συχνότητας στο πρωτεύων.

Ο έλεγχος του κινητήρα με τον τρόπο αυτό δίνει την δυνατότητα να πραγματοποιηθεί κάθε φορά ο απαιτούμενος συνδυασμός ροπής και στροφών με μικρές απώλειες και δυνατότητα ηλεκτρονικού ελέγχου.



**Εικόνα 4-7: Μετατροπέας συχνότητας της LENZE (frequency inverter)**

Ο έλεγχος του κινητήρα με το συγκεκριμένο inverter έγινε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, δηλαδή με συνδυασμό οθόνης – πληκτρολογίου και ροοστάτη. Η οθόνη παρέχει την δυνατότητα να βλέπουμε μία σειρά από ενδείξεις όπως την συχνότητα εξόδου (Hz), την τάση του κινητήρα (volt), το ρεύμα του κινητήρα (A) και το φορτίο του κινητήρα (% 5,5 kW). Με τον ροοστάτη ρυθμίζουμε την συχνότητα εξόδου και με τον συνδυασμό οθόνης – πληκτρολογίου προγραμματίζουμε το inverter και παίρνουμε στην οθόνη την ένδειξη της καταναλισκόμενης ισχύς. Η ένδειξη αυτή εμφανίζεται στην οθόνη σαν ποσοστό %. Αυτό σημαίνει ότι η ένδειξη που δίνει το inverter για την ισχύ του κινητήρα εμφανίζεται σαν ποσοστό της ονομαστικής του ισχύς του.

## 5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΜΥΛΟΥ-ΡΑΒΔΟΜΥΛΟΥ

### 5.1 Γενικά

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει την πρωτογενή θραύση των υλικών σε σπαστήρα με σιαγόνες για την λήψη δείγματος τροφοδοσίας του δακτυλίουμυλου και εν συνεχεία τα δείγματα υπέστησαν ξηρή λειοτρίβηση στον δακτυλίουμλο. Κατά την λειοτρίβηση στον δακτυλίουμλο πάρθηκαν δείγματα υλικού για διάφορους χρόνους. Ως υλικά χρησιμοποιήθηκαν ο ασβεστόλιθος, από το Χορδάκι Χανίων, και ο χαλαζίας, από την Μακεδονία, τα οποία αποτελούν πολύ σημαντικά υλικά λόγω του ότι υπάρχουν σε μεγάλη έκταση στον Ελλαδικό χώρο. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει επίσης και αναφορά στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την πρωτογενή θραύση (θραύση των υλικών της τροφοδοσίας), για την κοκκομετρική ταξινόμηση της αρχικής τροφοδοσίας και για την κοκκομετρική ανάλυση των προϊόντων της λειοτρίβησης του δακτυλίουμλου.

### 5.2 Περιγραφή εξοπλισμού

#### 5.2.1 Εργαστηριακός θραυστήρας με σιαγόνες

Η θραύση των υλικών του μαρμάρου και του χαλαζία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης με την βοήθεια σιαγονωτού θραυστήρα (Jaw crusher) τύπου FRITSCH pulverisette 1, ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 5-1.



Εικόνα 5-1: Εργαστηριακός θραυστήρας με σιαγόνες τύπου FRITSCH pulverisette 1

Ο θραυστήρας με σιαγόνες είναι τύπου FRITSCH pulverisette 1 και του οποίου το εσωτερικό τμήμα είναι κατασκευασμένο από σιδηρόχρωμα Ni-Cr. Αποτελείται από μία ακίνητη επιφάνεια, σχεδόν κατακόρυφη, απέναντι στην οποία βρίσκεται μία δεύτερη, κινητή επιφάνεια υπό γωνία. Η κίνηση της δεύτερης επιφάνειας συνθλίβει τα σώματα που βρίσκονται μεταξύ των δύο επιφανειών, που ενεργούν σαν είδος σιαγόνων. Το άνοιγμα στο πάνω μέρος των σιαγόνων καθορίζει το μέγεθος των τεμαχίων της τροφοδοσίας, ενώ το άνοιγμα στο κάτω μέρος καθορίζει το μέγεθος του προϊόντος που δεν είναι σταθερό. Ο θραυστήρας τύπου FRITSCH pulverisette 1 διαθέτει πέντε θέσεις που αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα αποκένωσης. Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται τα εξής: α) το μέγεθος των μέγιστων και των ελάχιστων τιμών του ανοίγματος αποκένωσης  $\delta$  για κάθε θέση του σπαστήρα, β) η μέση τιμή του ανοίγματος αποκένωσης και γ) η σχέση ανοίγματος σε κάθε θέση η οποία ισούται με τον λόγο της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή ανοίγματος για κάθε θέση.

**Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικό άνοιγμα αποκένωσης  $\delta$  για κάθε θέση του εργαστηριακού σπαστήρα με σιαγόνες**

Θέση	5	4	3	2	1
$\delta_{\max}/\delta_{\min}$ (mm)	15/9	12/6	9/4	5/2	3/1
$\delta_{\text{avg}}$ (mm)	12.00	9.00	6.50	3.50	2.00
Σχέση ανοίγματος	1.67	2.00	2.25	2.50	3.00

### 5.2.2 Εργαστηριακός ραβδόμυλος

Ο ραβδόμυλος αποτελεί, μαζί με τον σφαιρόμυλο, τις κυριότερες μηχανές λειοτρίβησης κυλιόμενου φορτίου. Η αρχή λειτουργίας του ραβδόμυλου είναι η πτώση και η κύλιση των μέσων λειοτρίβησης, δηλαδή των ράβδων, που περιέχει. Αποτελείται από ένα κυλινδρικό κέλυφος που στηρίζεται στα δύο άκρα του και περιστρέφεται περί τον άξονά του. Οι κυριότερες δυνάμεις που ασκούνται επί των κόκκων του μεταλλεύματος είναι οι δυνάμεις κρούσης, από την ελεύθερη πτώση των ράβδων (ή των σφαιρών αν επρόκειτο για σφαιρόμυλο), και δυνάμεις τριβής, οι οποίες δημιουργούνται από την κύλιση των ράβδων μεταξύ τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός ραβδόμυλος ασυνεχούς λειτουργίας τύπου Sepor (batch rod mill) Εικόνα 5-2. Ο ραβδόμυλος αυτός συνοδευόταν με ένα σύστημα τριών περιστρεφόμενων κυλίνδρων (Sepor drive rolls) με την βοήθεια του οποίου ο μύλος μπορούσε να περιστραφεί γύρω από τον άξονά του.





**Εικόνα 5-2: Εργαστηριακός ραβδόμυλος τύπου Sepor**

Τα χαρακτηριστικά του εργαστηριακού ραβδόμυλου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

**Πίνακας 5-2: Χαρακτηριστικά εργαστηριακού ραβδόμυλου**

Εσωτερική διάμετρος	203 mm
Εσωτερικό μήκος	235 mm
Επιτρεπόμενη συχνότητα περιστροφής	47 – 79 r.p.m.
Καθαρή ισχύς	20 Watt
Ισχύς κινητήρα	0,50 hp

### 5.2.3 Μηχανή κοσκίνισης

Για την μέτρηση της κοκκομετρικής κατανομής των υλικών, του μαρμάρου και του χαλαζία, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός δονητής κοσκίνων τύπου RETSCH VE 1000. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται είναι τα εξής:

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

Η κοσκίνιση των υλικών έγινε χρησιμοποιώντας τυποποιημένα κόσκινα ASTM διαμέτρου Φ200 και βάθους 50 mm.

#### 5.2.4 Κοκκομετρικός αναλυτής Laser

Ο αναλυτής Mastersizer S της Malvern (Εικόνα 5-3) χρησιμοποιήθηκε για να μετρηθούν τα κλάσματα των  $-0,710\text{ mm}$  των προϊόντων από την θραύση των υλικών του ασβεστόλιθου και του χαλαζία στον δακτυλιόμυλο.

Ο Mastersizer S είναι ένα σύστημα με 2 mW ισχύ He/Ne laser που χρησιμοποιείται για να υπολογίζει την κατανομή κατά μέγεθος του προς ανάλυση υλικού. Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στην εκτροπή των ακτίνων laser, όταν αυτές προσπίπτουν σε κόκκους. Η γωνία εκτροπής εξαρτάται από το μέγεθος του κόκκου και συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο το μέγεθος, τόσο μικρότερη η γωνία εκτροπής.



Εικόνα 5-3: Ο κοκκομετρικός αναλυτής Mastersizer S της Malvern

Οι βασικές μονάδες από τις οποίες αποτελείται ο αναλυτής είναι:

α) Οπτική μονάδα μέτρησης (*optical measurement unit*)

Η Mastersizer οπτική μονάδα μέτρησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη:

- Πομπό (transmitter), που περιλαμβάνει τη μονάδα του laser

- Δέκτη (receiver), που περιλαμβάνει τη μονάδα του ανιχνευτή
- Περιοχή κάλυψης του δείγματος (sampler area cover), που περιλαμβάνει το κελί μέτρησης και
- Φακό (range lens), Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο 300 RF που αναλύει κόκκους με μέγεθος 0.05-880  $\mu\text{m}$ .

*β) Μονάδα αιώρησης του δείγματος (sample suspension unit)*

Η μονάδα αυτή διασπείρει το υλικό και είναι κατάλληλη για την μέτρηση της πλειοψηφίας των υλικών. Το σύστημα χρησιμοποιεί 1 lt νερό μέσα στο οποίο το υπό μέτρηση υλικό είναι διασπαρμένο. Περιλαμβάνει επίσης, ένα σύστημα υπερήχων και ανάδευσης για την διασπορά των συνεκτικών υλικών και για την αποφυγή της κροκίδωσης των κόκκων. Κατά την διαδικασία της μέτρησης ο πολφός με την βοήθεια μίας αντλίας κυκλοφορεί συνεχώς μεταξύ του κελιού μέτρησης και της δεξαμενής.

*γ) Σύστημα H/Y*

Ο αναλυτής laser περιλαμβάνει ένα σύστημα υπολογιστή (DTK computer) ο οποίος είναι συμβατός με το λειτουργικό πρόγραμμα της Malvern, και έναν εκτυπωτή HP Deskjet 600 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

*δ) Λειτουργικό πρόγραμμα της Malvern*

### 5.3 Διαδικασία

#### 5.3.1 Διαδικασία θραύσης

Στο εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης θραύτηκαν πρωτογενώς δείγματα ασβεστόλιθου και χαλαζία. Η συνολική ποσότητα που θραύτηκε για κάθε υλικό ήταν 5 kg.

Αρχικά το κάθε υλικό θραύτηκε στο σιαγονωτό σπαστήρα στο μικρότερο άνοιγμα αποκένωσης του θραυστήρα δηλαδή στη θέση 1 ( $\delta_{\max} / \delta_{\min} = 3/1$  mm). Το προϊόν της θραύσης ομογενοποιήθηκε και με τη χρήση του διαχωριστή Jones χωρίσαμε την ποσότητα των 5 kg, για κάθε υλικό, σε 8 δείγματα των 625 gr περίπου. Στη συνέχεια κοσκινίσαμε από ένα δείγμα για κάθε υλικό, για την μέτρηση της κοκκομετρικής κατανομής των προϊόντων που προέκυψε από την πρωτογενή θραύση. Τα μεγέθη των βρόχων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 4, 2, 1, 0.5, 0.250, 0.125 και 0.063 mm.

#### 5.3.2 Διαδικασία ξηρής λειοτρίβησης

Τα δείγματα που ετοιμάστηκαν στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης, μεταφέρθηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο για την διαδικασία ξηρής λειοτρίβησής τους στον δακτυλιόμυλο του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκόνης στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών.

Για την διαδικασία ξηρής λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 4 δείγματα από κάθε υλικό. Η διαδικασία λειοτρίβησης για κάθε υλικό περιλάμβανε τρεις δοκιμές κατά τις οποίες μεταβάλλαμε διάφορες παραμέτρους όπως φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5-3).

**Πίνακας 5-3: Μεταβολή παραμέτρων ανά δοκιμή ξηρής λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο**

Υλικό	Αριθμός δοκιμής	Πλήθος δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν	Φορτίο δοκιμής (gr)	R.P.M.
Ασβεστόλιθος	Δοκιμή1	1	587,1	800
	Δοκιμή2	2	1203,5	800
	Δοκιμή3	1	587,6	500
Χαλαζίας	Δοκιμή4	1	660,3	800
	Δοκιμή5	2	1193,5	800
	Δοκιμή6	1	587,1	500

Κάθε μία από τις 6 αυτές δοκιμές λειοτριβήθηκε και πάρθηκαν δείγματα ανά επιλεγμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία ήταν για 0, 10, 20, 40 και 80 sec. Ο χρόνος 0 sec αντιστοιχεί στο

αρχικό δείγμα τροφοδοσίας του δακτυλιόμυλου. Συνολικά δηλαδή για κάθε μία δοκιμή πάρθηκαν 4 δείγματα (24 δείγματα συνολικά). Η δειγματοληψία επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη περίπτωση λόγω της δυσκολίας εισαγωγής και εξαγωγής του υλικού στο δακτυλιόμυλο, μιας και η λειοτρίβηση δεν ήταν συνεχής αλλά σε batch.

### **5.3.3 Διαδικασία κοσκίνισης**

Τα δείγματα που πάρθηκαν ζυγίστηκαν και μετά κοσκινίστηκαν στο κόσκινο 0,710 mm, εν ξηρό. Τα κλάσματα των -0,710 mm, αφού ζυγίστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της κοκκομετρικής κατανομής των δειγμάτων στον κοκκομετρικό αναλυτή Mastersizer S της Malvern. Οι κοκκομετρικές κατανομές που προέκυψαν ανάχθηκαν στο ποσοστό επί της % του εκάστοτε κλάσματος των -0,710 mm.

## 5.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

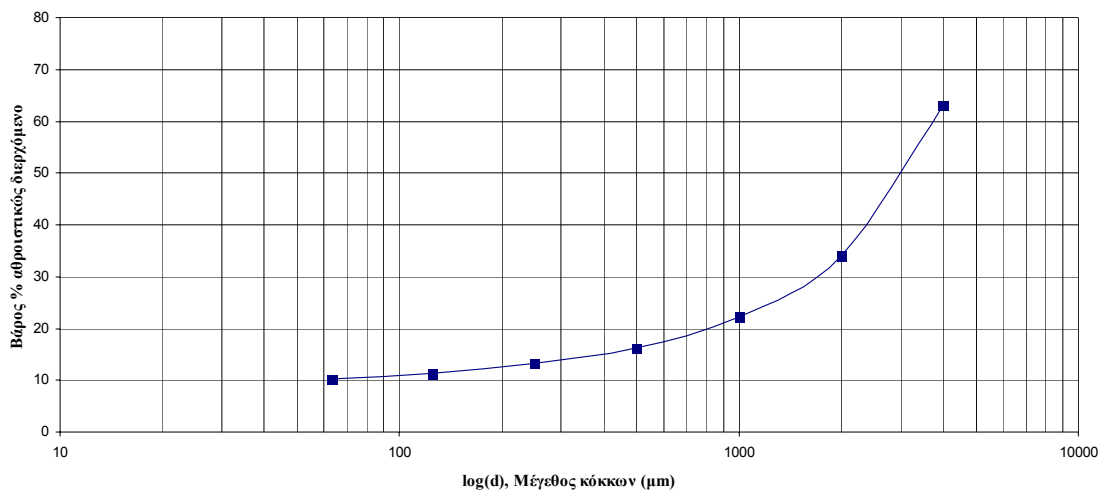
### 5.4.1 Κοκκομετρικές κατανομές

Τα αποτελέσματα της κοσκίνισης δείγματος ασβεστόλιθου, της αρχικής τροφοδοσίας του δακτυλιόμυλου παρατίθενται στον πίνακα 5-4. Η γραφική παράσταση της κοκκομετρικής κατανομής της τροφοδοσίας του ασβεστόλιθου παρίσταται στο Διάγραμμα 5-1.

**Πίνακας 5-4: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης για τον ασβεστόλιθο**

		Βάρος (gr)	Βάρος (gr) για κάθε κλάσμα	Βάρος (%)	Βάρος % αθροιστικό διερχόμενο	Βάρος % αθροιστικό παραμένον
παραμένον	4	223,2	223,2	36,81	63,19	36,81
>>	2	176,3	176,3	29,08	34,11	65,89
>>	1	72,0	72,0	11,88	22,23	77,77
>>	0,5	36,6	36,6	6,04	16,20	83,80
>>	0,25	18,4	18,4	3,03	13,16	86,84
>>	0,125	11,2	11,2	1,85	11,31	88,69
>>	0,063	6,5	6,5	1,07	10,24	89,76
διερχόμενο	-0,063	1,7	62,1	10,24		
διερχόμενο	-0,063	60,4				
ΣΥΝΟΛΟ:		606,3	606,3	100,00		

**Κοκκομετρική ανάλυση τροφοδοσίας ασβεστόλιθου**



**Διάγραμμα 5-1: Κοκκομετρική κατανομή τροφοδοσίας ασβεστόλιθου**

Τα αποτελέσματα της κοσκίνισης δείγματος χαλαζία, της αρχικής τροφοδοσίας του δακτυλιόμυλου, παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω (Πίνακας 5-5).

**Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης για τον χαλαζία**

Κοσκίνιση:(mm)		Βάρος (gr)	Βάρος (gr) για κάθε κλάσμα	Βάρος (%)	Βάρος % αθροιστικό διερχόμενο	Βάρος % αθροιστικό παραμένον
παραμένον	4	169,0	169,0	24,71	75,29	24,71
>>	2	251,8	251,8	36,82	38,46	61,54
>>	1	110,9	110,9	16,22	22,24	77,76
>>	0,5	56,8	56,8	8,31	13,94	86,06
>>	0,25	31,7	31,7	4,64	9,30	90,70
>>	0,125	26,3	26,3	3,85	5,45	94,55
>>	0,063	27,1	27,1	3,96	1,49	98,51
διερχόμενο	-0,063	5,3	10,2	1,49		
διερχόμενο	-0,063	4,9				
ΣΥΝΟΛΟ:		683,8	683,8	100,00		

Το γράφημα της κοκκομετρικής κατανομής της τροφοδοσίας του δακτυλιόμυλου με χαλαζία παρατίθεται στο Διάγραμμα 5-2.



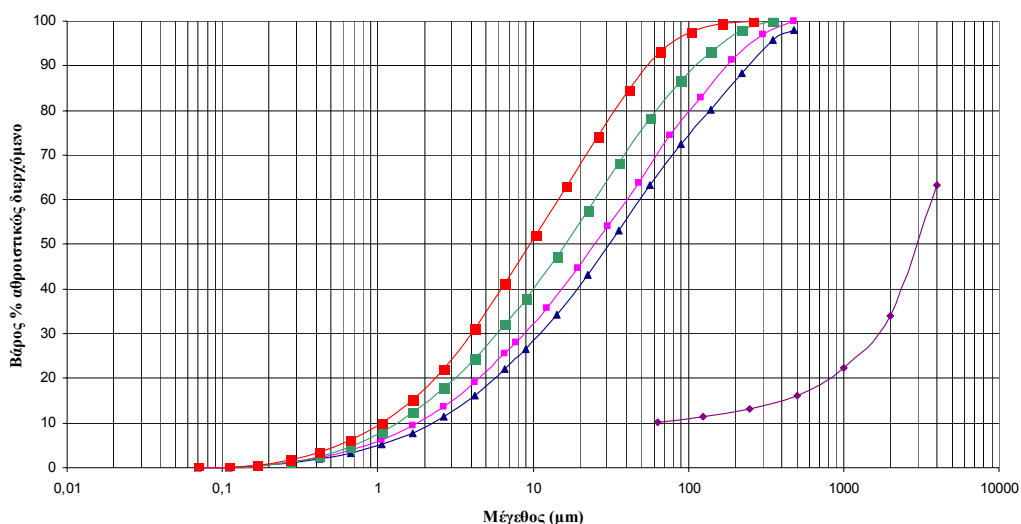
**Διάγραμμα 5-2: Κοκκομετρική κατανομή τροφοδοσίας χαλαζία**

Κατά την διάρκεια λειοτρίβησης των υλικών στον δακτυλιόμυλο, του ασβεστόλιθου και του χαλαζία, πάρθηκαν δείγματα σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, όπως αναφέρεται αναλυτικά και στον Πίνακα 5-3. Τα δείγματα αυτά εισήχθησαν στον κοκκομετρικό αναλυτή laser, Mastersizer S της Malvern, από τον οποίο εξήχθησαν τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής κατανομής του εκάστοτε δείγματος. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η σύγκριση των κοκκομετρικών κατανομών των υλικών για διάφορους χρόνους λειοτρίβησης.

Για την περιγραφή της κοκκομετρικής κατανομής των υλικών συνήθως χρησιμοποιείται η αθροιστική κατανομή (βάρος % αθροιστικώς διερχόμενο). Η αθροιστική κατανομή κάθε κλάσματος για τους αντίστοιχους χρόνους λειοτρίβησης και τις αντίστοιχες παραμέτρους λειτουργίας του δακτυλιόμυλου, παρίστανται στα διαγράμματα 5-3 έως και 5-8. Τα διαγράμματα αυτά έχουν στον οριζόντιο άξονα το μέγεθος των κόκκων, σε  $\mu\text{m}$ , και στον κατακόρυφο το βάρος % αθροιστικώς διερχόμενο από το αντίστοιχο μέγεθος. Επίσης ο οριζόντιος άξονας των διαγραμμάτων της αθροιστικής κατανομής συναρτήσει του μεγέθους, είναι σε λογαριθμική κλίμακα, διότι με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία ισοκατανομή των σημείων. Εάν η κλίμακα των μεγεθών ήταν κανονική τότε θα υφίστανται μικρός αριθμός σημείων στα μεγάλα μεγέθη, εν αντιθέσει με τα μικρά μεγέθη όπου θα υπήρχε συνωστισμός.

Τα πειράματα λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο περιλάμβαναν τρεις δοκιμές για κάθε υλικό, έξι συνολικά. Στη 1<sup>η</sup> δοκιμή, Διάγραμμα 5-3, ο ρυθμός περιστροφής του μύλου είναι 800 r.p.m. και το φορτίο (βάρος τροφοδοτούμενου υλικού) περίπου 625 gr ασβεστόλιθου.

**Κατανομή του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (ΔΟΚΙΜΗ 1η)**

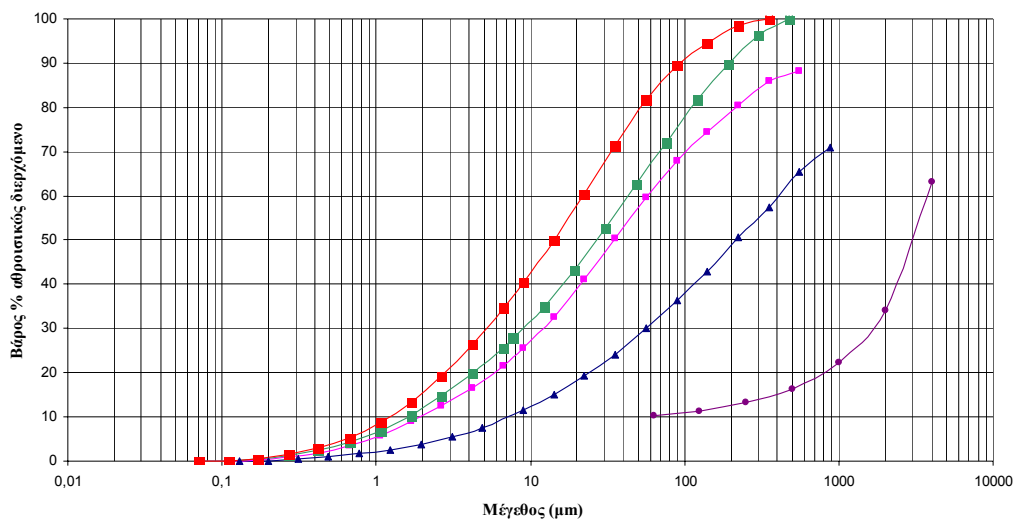


**Διάγραμμα 5-3: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (1<sup>η</sup> Δοκιμή)**



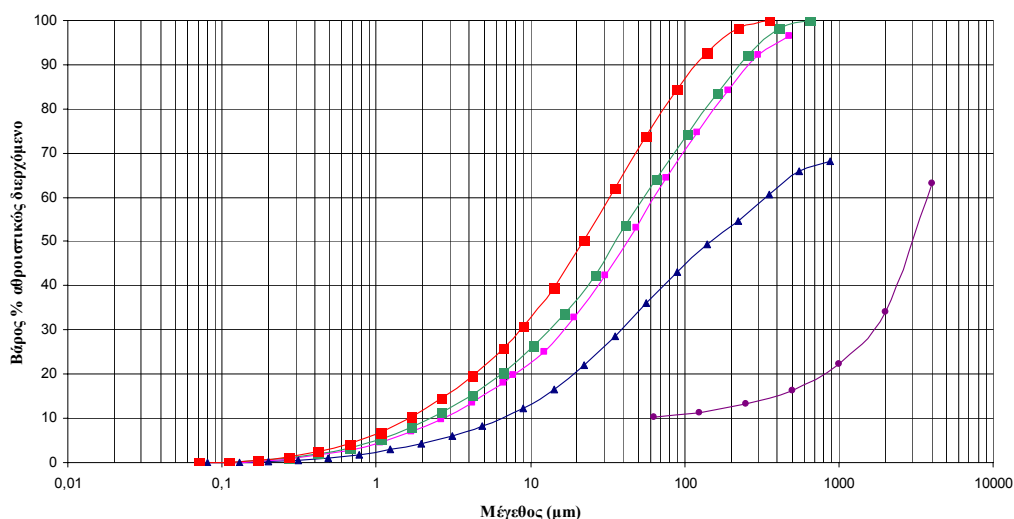
Κατά την 2<sup>η</sup> δοκιμή, Διάγραμμα 5-4, ο ρυθμός περιστροφής του μύλου παρέμεινε σταθερός στις 800 r.p.m. άλλαξε όμως το φορτίο που τοποθετήθηκε προς λειοτρίβηση, το οποίο στην περίπτωση αυτή ήταν 1200 gr περίπου. Στην 3<sup>η</sup> δοκιμή, Διάγραμμα 5-5, ο ρυθμός περιστροφής του μύλου μειώνεται στις 500 r.p.m. και το φορτίο του είναι 625 gr περίπου, όσο και της 1<sup>ης</sup> δοκιμής.

**Κατανομή του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (ΔΟΚΙΜΗ 2η)**



**Διάγραμμα 5-4: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (2<sup>η</sup> Δοκιμή)**

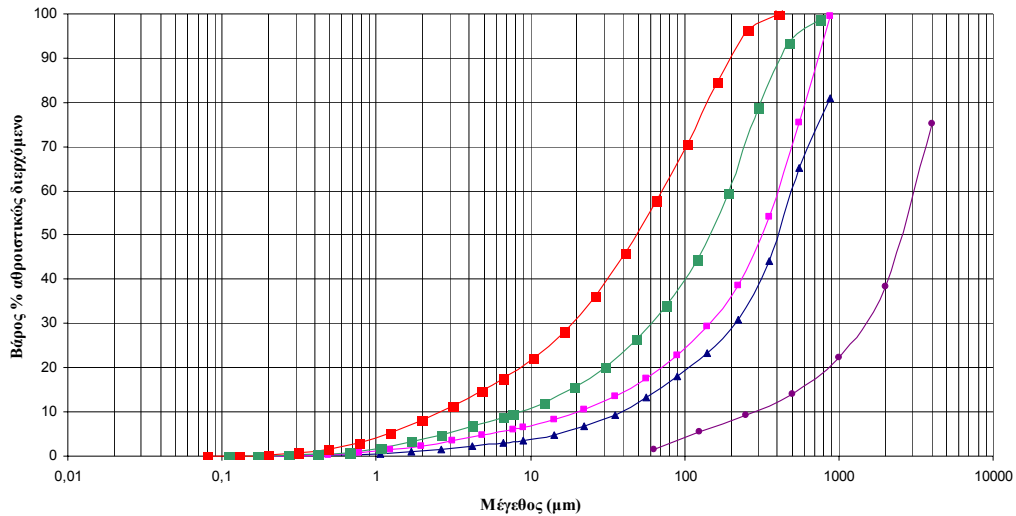
**Κατανομή του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (ΔΟΚΙΜΗ 3η)**



**Διάγραμμα 5-5: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (3<sup>η</sup> Δοκιμή)**

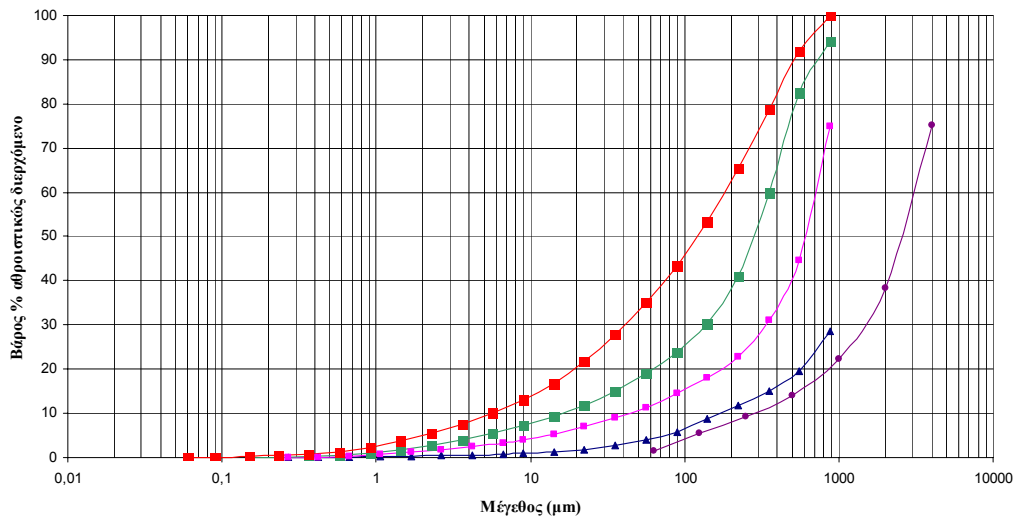
Κατά την 4<sup>η</sup> δοκιμή λειοτριβήσης, Διάγραμμα 5-6, ο ρυθμός περιστροφής του μύλου είναι 800 r.p.m. και το φορτίο αποτελείται από 625 περίπου gr χαλαζία. Στην 5<sup>η</sup> δοκιμή, Διάγραμμα 5-7, οι στροφές του μύλου παραμένουν στις 800 r.p.m. και το φορτίο του αυξάνεται στα περίπου 1250 gr χαλαζία.

**Κατανομή του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (ΔΟΚΙΜΗ 4η)**



**Διάγραμμα 5-6: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτριβήσης (4<sup>η</sup> Δοκιμή)**

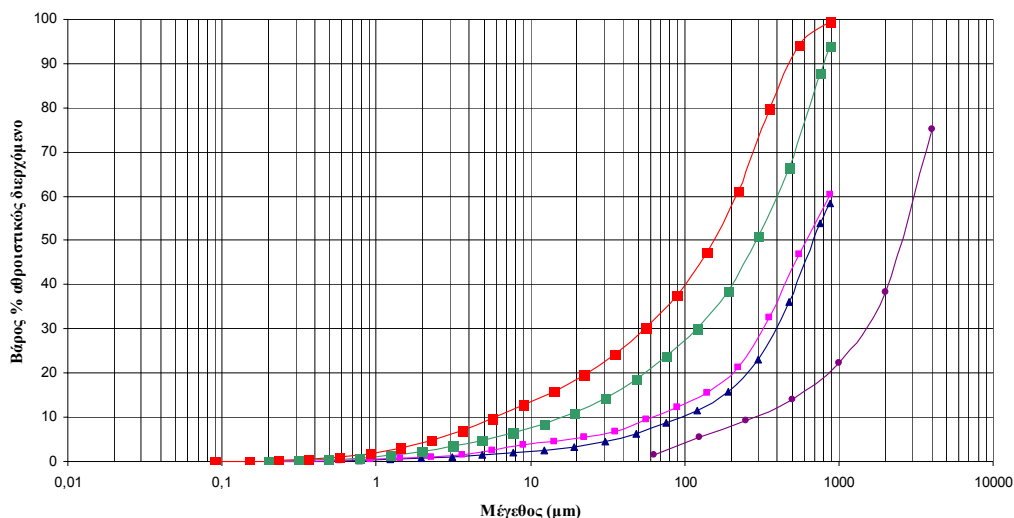
**Κατανομή του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (ΔΟΚΙΜΗ 5η)**



**Διάγραμμα 5-7: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτριβήσης (5<sup>η</sup> Δοκιμή)**

Στην 6<sup>η</sup> και τελευταία δοκιμή, Διάγραμμα 5-8, ο ρυθμός περιστροφής του μύλους μειώνεται στις 500 r.p.m. και το προς λειοτρίβηση φορτίο είναι περίπου 625 gr χαλαζία.

**Κατανομή του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (ΔΟΚΙΜΗ 6η)**



**Διάγραμμα 5-8: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (6<sup>η</sup> Δοκιμή)**

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα δείγματα του ασβεστόλιθου και του χαλαζία που λειοτριβήθηκαν στον δακτυλιόμυλο προήλθαν από πρωτογενή θραύση σε σιαγονωτό σπαστήρα τύπου FRITSCH pulverisette 1. Το προϊόν της θραύσης υπέστη ομογενοποίηση και κατόπιν διαχωρίστηκε με τη βοήθεια του διαχωριστήρα Jones. Με τον τρόπο αυτό η αρχική ποσότητα των 5 kg, για κάθε υλικό, χωρίστηκε σε 8 δείγματα. Τα δείγματα αυτά λόγω της προαναφερθείσας διαδικασίας έχουν όμοια κοκκομετρική κατανομή ενώ το βάρος τους είναι περίπου το ίδιο (όχι ακριβώς το ίδιο).

### 5.4.2 Υπολογισμός της κλίσης $a$

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των αθροιστικών κατανομών βάρους συναρτήσει του μεγέθους, 5-3 έως 5-8, γίνεται εμφανές ότι τα γραφήματα που δημιουργούνται παρουσιάζουν κάποια καμπυλότητα στο άνω και κάτω μέρος τους. Για τον λόγο αυτό έχουν επινοηθεί διάφοροι μέθοδοι τροποποίησης των κλιμάκων των συντεταγμένων για να δίνεται μία ευθεία γραμμή.

Η επικρατέστερη εξίσωση η οποία χρησιμοποιείται για την μαθηματική περιγραφή της αθροιστικής κατανομής του βάρους συναρτήσει του μεγέθους είναι η εξίσωση Gates Gaudin Schuhman (G.G.S.) εξίσωση 5:1:

$$W = 100 \left( \frac{d}{d_o} \right)^a \quad (5:1)$$

όπου:  $W$ : το ποσοστό % του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους από το μέγεθος  $d$

$d_o$ : το μέγιστο μέγεθος κόκκου και

$a$ : μία σταθερά που εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους.

Από τους λογαρίθμους της εξίσωσης 5:1:

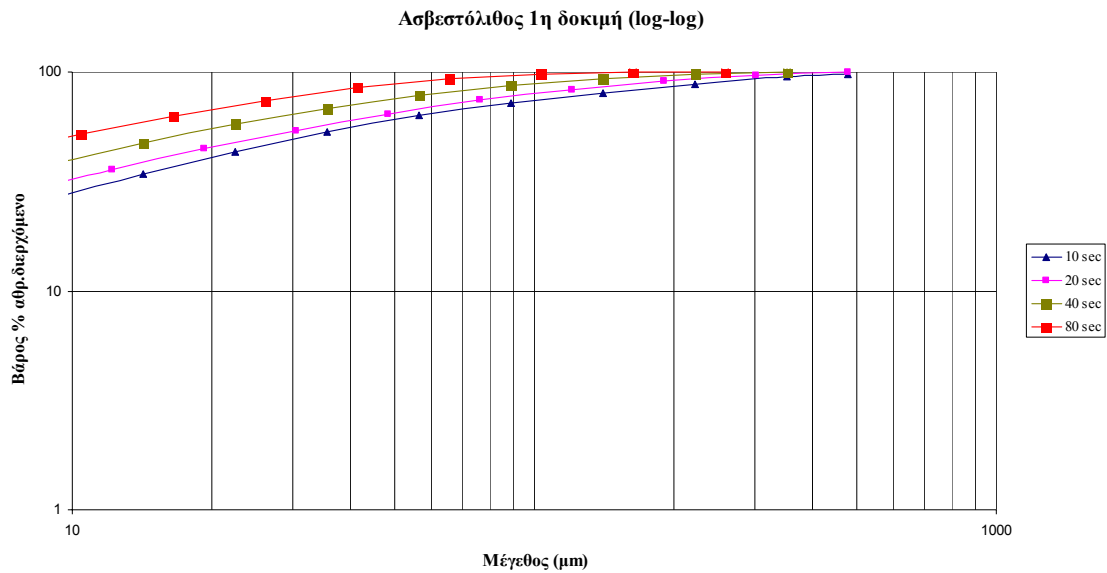
$$\log W = 2 + a \log d - a \log d_o \Rightarrow \log W = A + a \log d$$

όπου:  $A = 2 - a \log(d_o) = \text{σταθερά}$

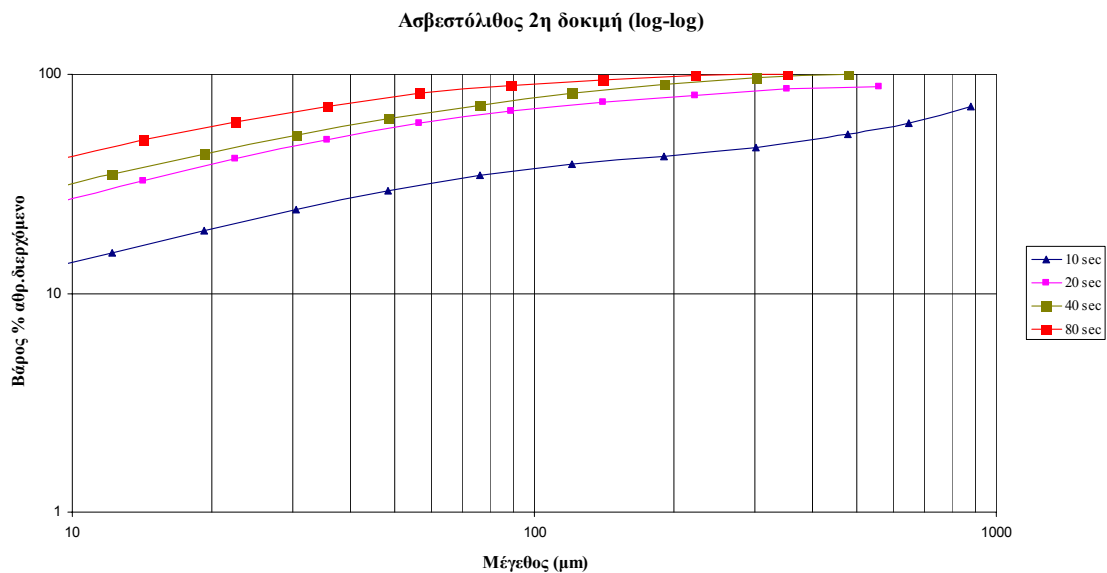
Επομένως η γραφική παράσταση του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους συναρτήσει του μεγέθους, με συντεταγμένες  $\log - \log$ , δίνει ευθεία γραμμή με κλίση ίση με  $a$ .

Τα διαγράμματα των κατανομών αθροιστικώς διερχόμενου βάρους σε συνάρτηση με το μέγεθος, με συντεταγμένες  $\log - \log$ , παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5-9 έως και 5-14. Από τις ευθείες που προκύπτουν, υπολογίζοντας τις κλίσεις τους, προκύπτει μία μαθηματική έκφραση της αθροιστικής κατανομής βάρους κατά μέγεθος για κάθε χρόνο λειοτριβήσης του δακτυλιόμυλου.

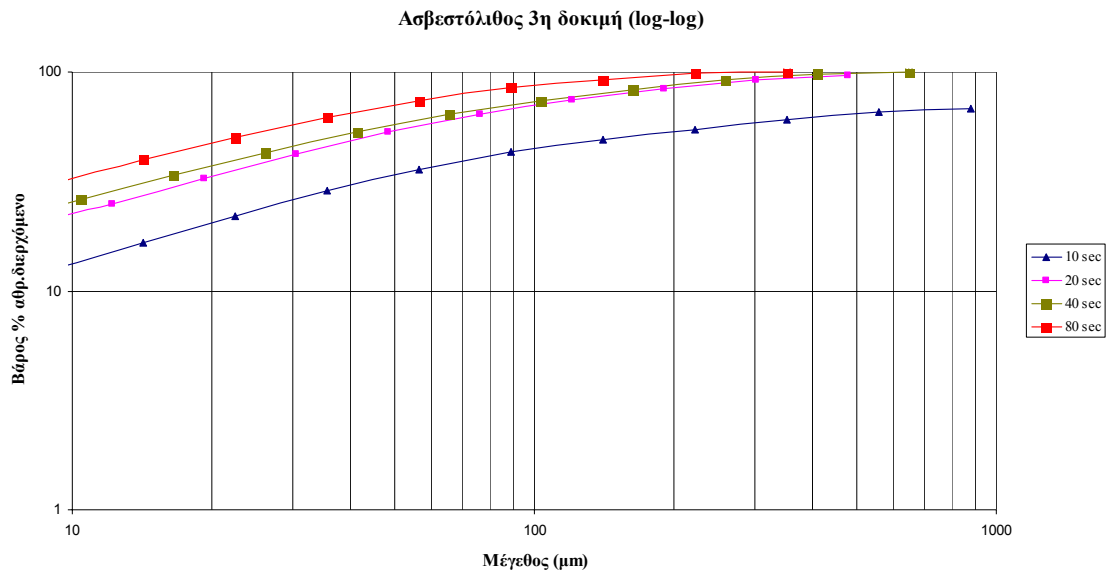
Για τον υπολογισμό των κλίσεων των διαγραμμάτων αυτών παραστήθηκαν γραφικά το αθροιστικώς διερχόμενο βάρος ( $\log$  αθρ. διερχόμενο βάρος %) συναρτήσει του μεγέθους ( $\log$  μέγεθος  $\mu\text{m}$ ). Τα σημεία που έτειναν ασυμπτωτικά προς το 100 παραλήφθηκαν, οπότε από τις ευθείες γραμμές των διαγραμμάτων 5-15 έως και 5-20 υπολογίζονται οι κλίσεις τους. Τα αποτελέσματα (οι κλίσεις) παρουσιάζονται στους πίνακες 5-6 έως και 5-11.



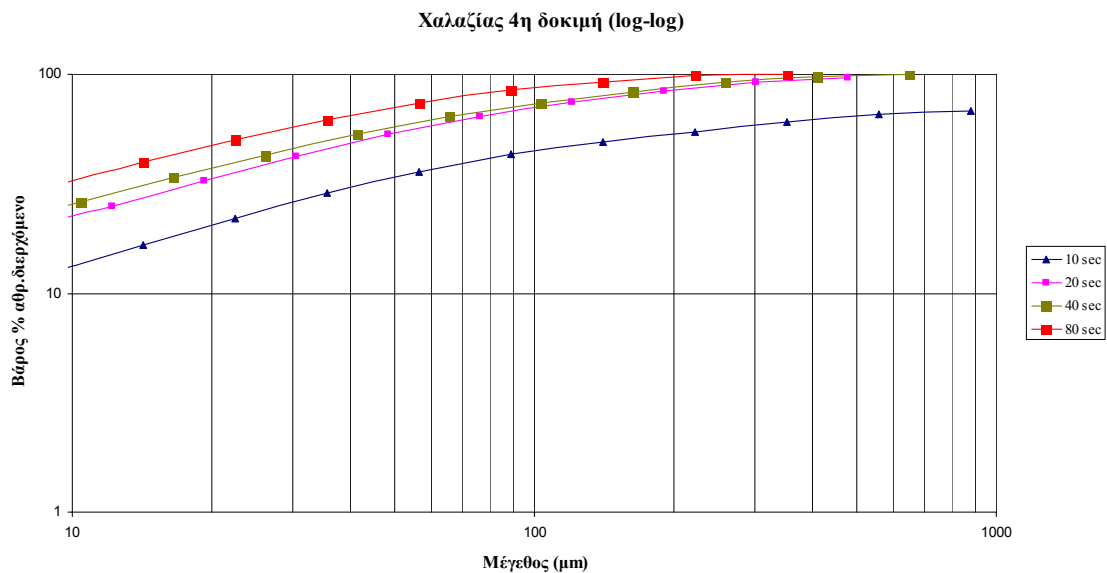
**Διάγραμμα 5-9: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (1<sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log**



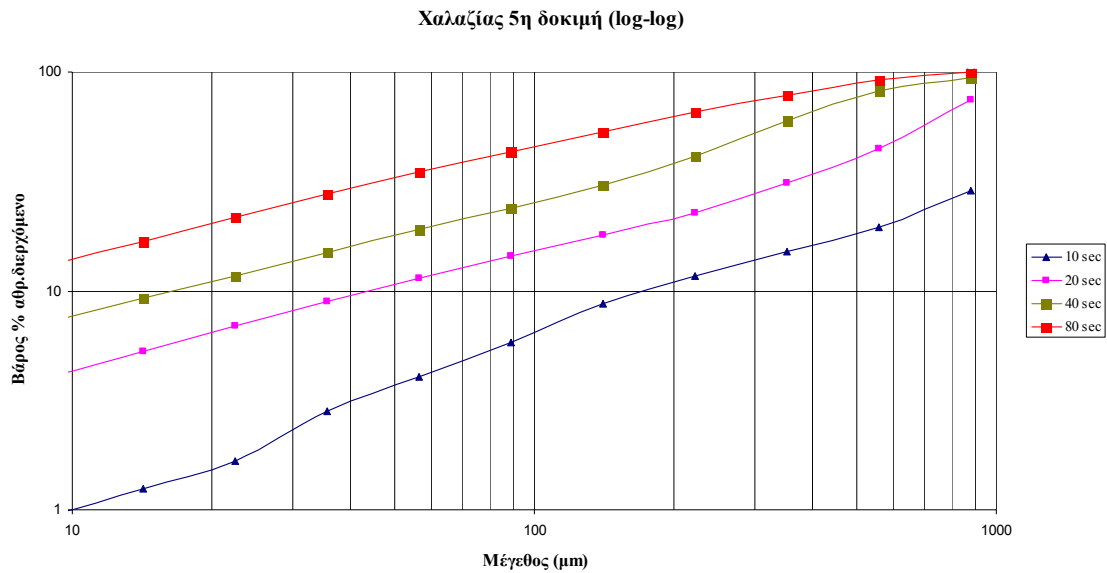
**Διάγραμμα 5-10: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (2<sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log**



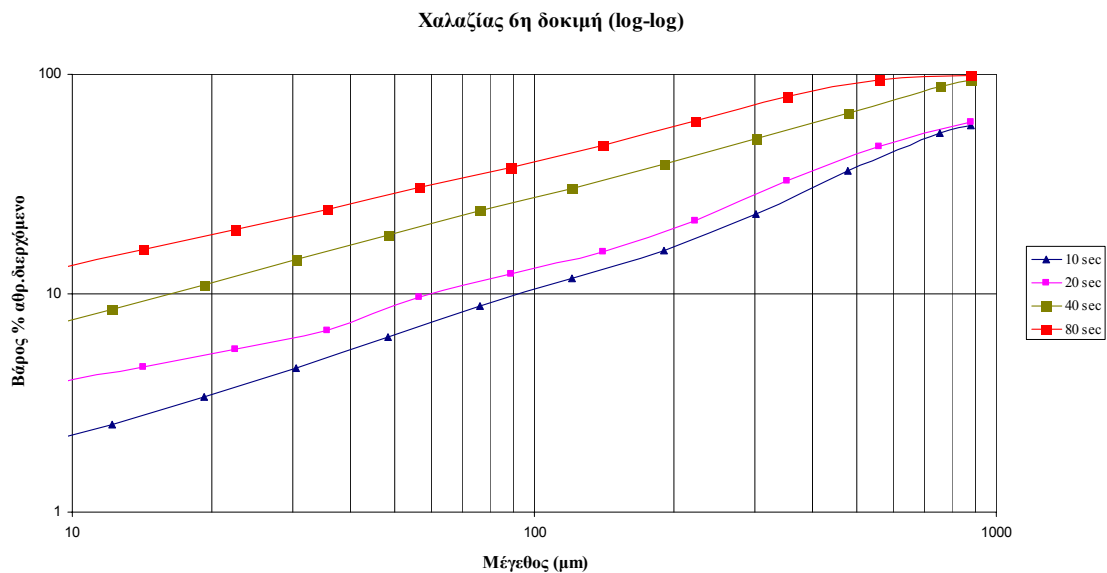
**Διάγραμμα 5-11: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (3<sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log**



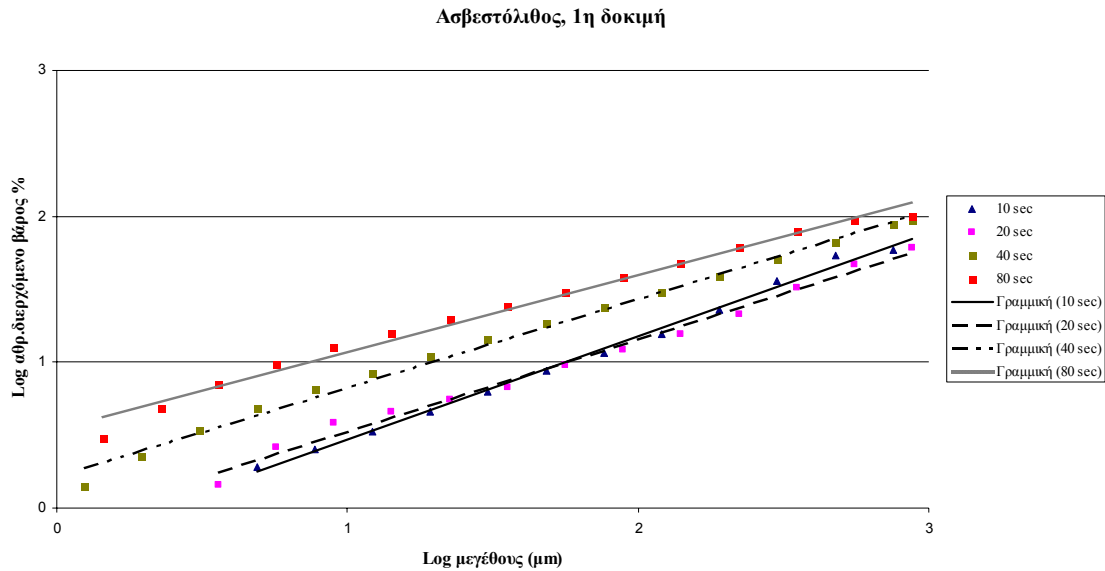
**Διάγραμμα 5-12: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (4<sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log**



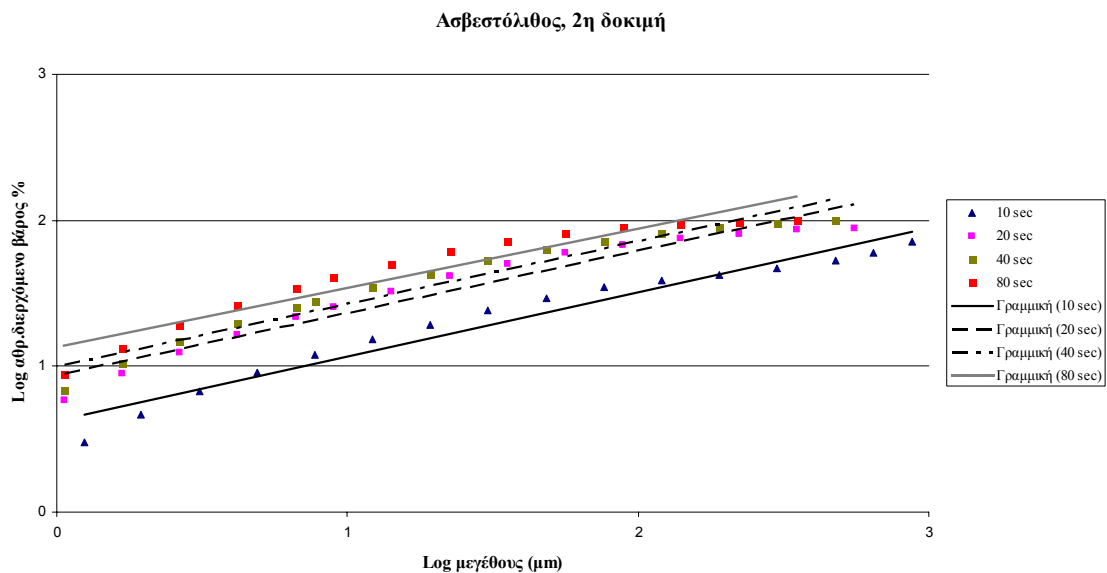
**Διάγραμμα 5-13: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (5<sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log**



**Διάγραμμα 5-14: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (6<sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log**

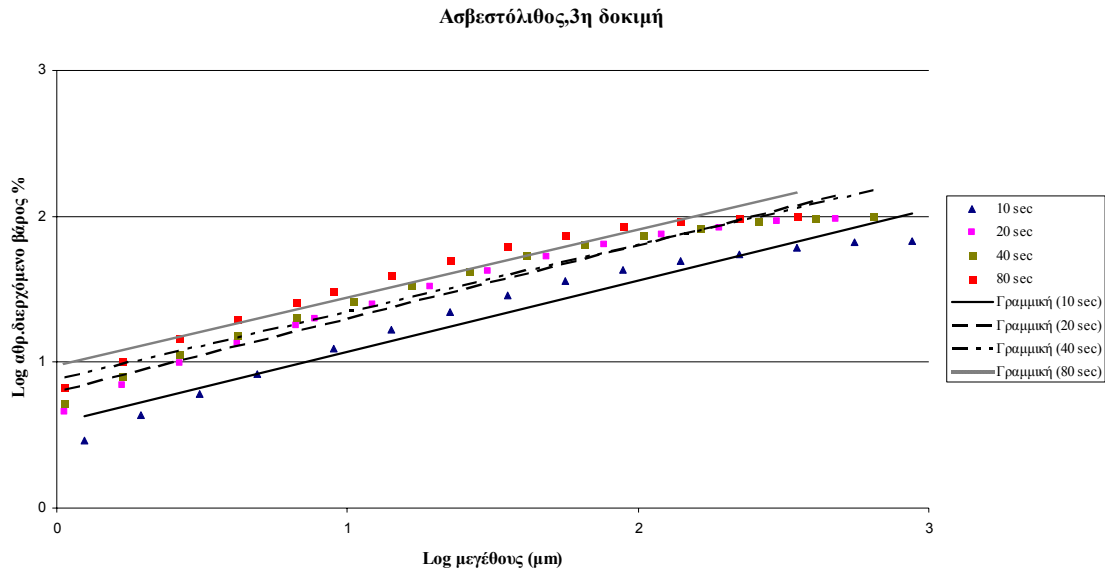


**Διάγραμμα 5-15:** Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του ασβεστόλιθου και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 1<sup>η</sup> δοκιμή

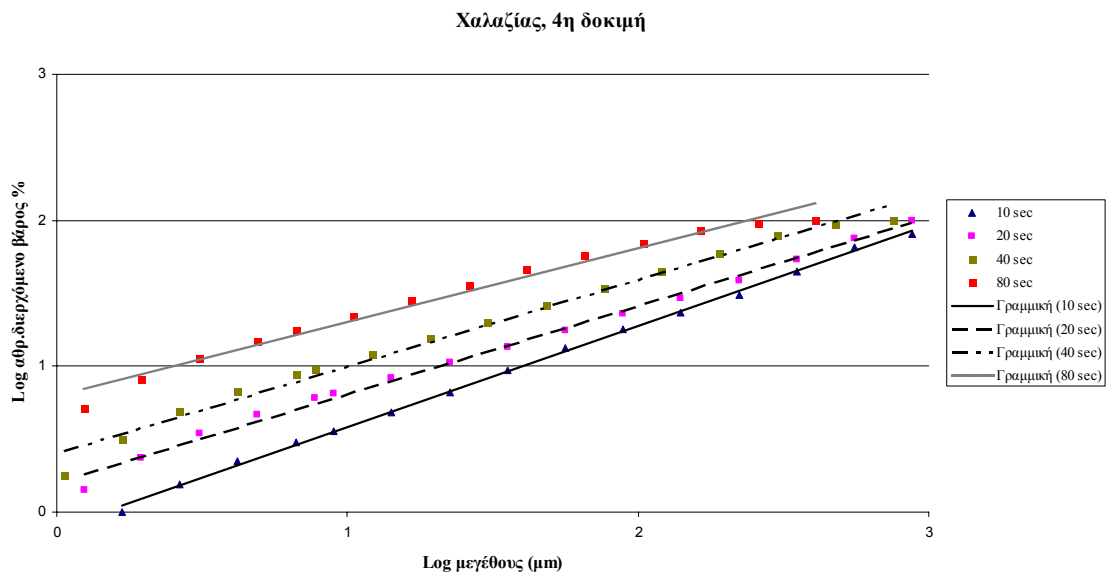


**Διάγραμμα 5-16:** Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του ασβεστόλιθου και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 2<sup>η</sup> δοκιμή

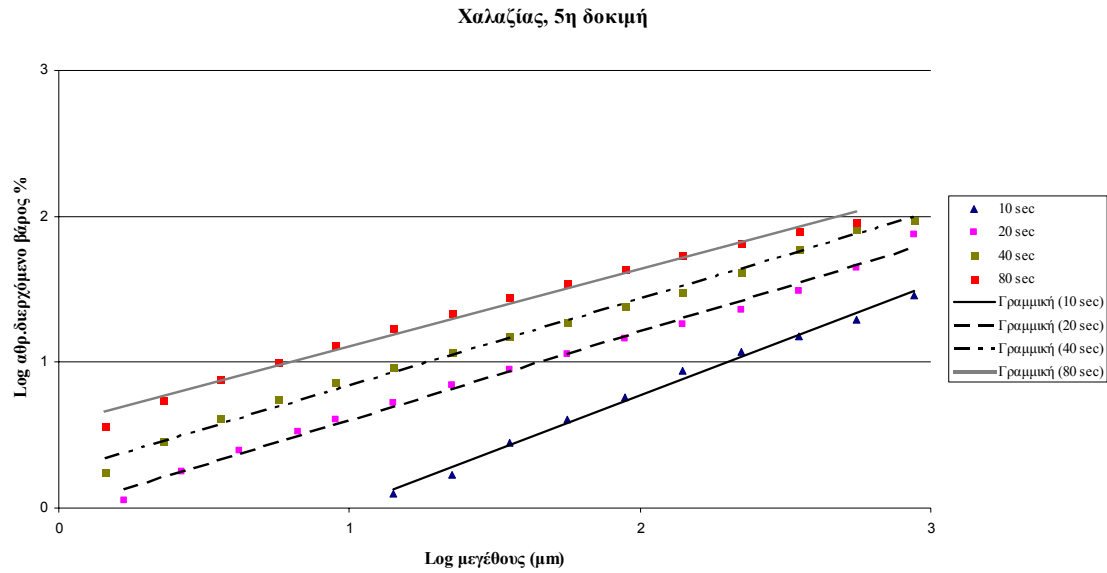




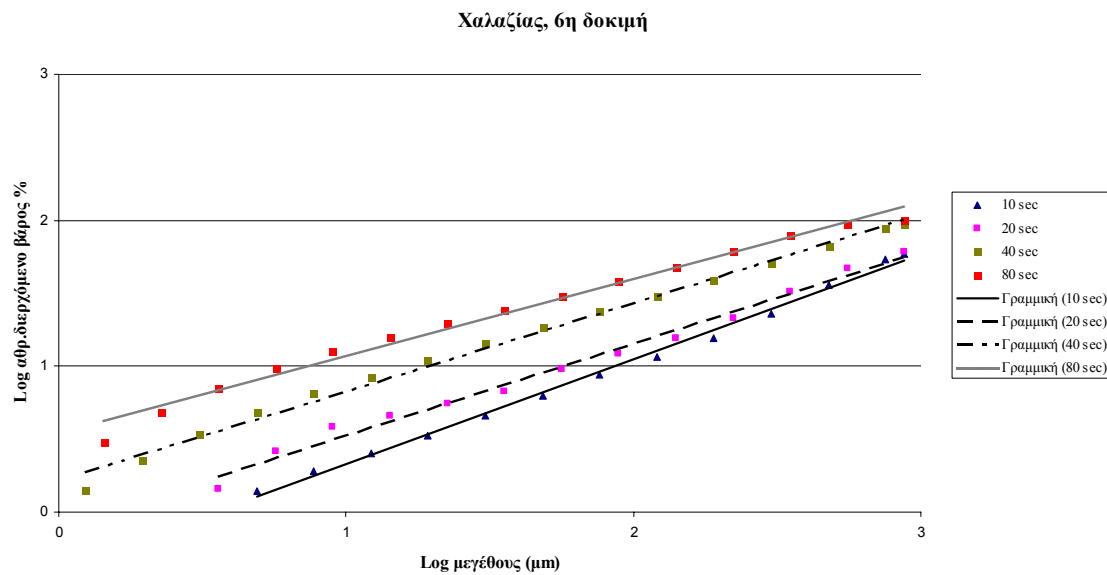
**Διάγραμμα 5-17: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του ασβεστόλιθου και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 3<sup>η</sup> δοκιμή**



**Διάγραμμα 5-18: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του χαλαζία και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 4<sup>η</sup> δοκιμή**



**Διάγραμμα 5-19: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του χαλαζία και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 5<sup>η</sup> δοκιμή**



**Διάγραμμα 5-20: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του χαλαζία και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 6<sup>η</sup> δοκιμή**

**Πίνακας 5-6: Οι σταθερές  $\alpha$  και  $A$  της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον ασβεστόλιθο της 1<sup>ης</sup> δοκιμής**

<b>1η δοκιμή</b>		
<b>Χρόνος λειοτρίβησης (sec)</b>	<b>Κλίση <math>\alpha</math></b>	<b>Σταθερά <math>A</math></b>
10	0,7089	-0,2397
20	0,6322	-0,1106
40	0,6062	0,2197
80	0,5286	0,5388
Μέσος όρος	0,6190	

**Πίνακας 5-7: Οι σταθερές  $\alpha$  και  $A$  της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον ασβεστόλιθο της 2<sup>ης</sup> δοκιμής**

<b>2η δοκιμή</b>		
<b>Χρόνος λειοτρίβησης (sec)</b>	<b>Κλίση <math>\alpha</math></b>	<b>Σταθερά <math>A</math></b>
10	0,4393	0,6289
20	0,4292	0,9347
40	0,4287	1,0010
80	0,4090	1,1270
Μέσος όρος	0,4266	

**Πίνακας 5-8: Οι σταθερές  $\alpha$  και  $A$  της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον ασβεστόλιθο της 3<sup>ης</sup> δοκιμής**

<b>3η δοκιμή</b>		
<b>Χρόνος λειοτρίβησης (sec)</b>	<b>Κλίση <math>\alpha</math></b>	<b>Σταθερά <math>A</math></b>
10	0,4885	0,5823
20	0,5011	0,8003
40	0,4605	0,8819
80	0,4679	0,9768
Μέσος όρος	0,4795	

**Πίνακας 5-9: Οι σταθερές  $\alpha$  και  $A$  της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον χαλαζία της 4<sup>ης</sup> δοκιμής**

4η δοκιμή		
Χρόνος λειοτρίβησης (sec)	Κλίση $\alpha$	Σταθερά $A$
10	0,6909	-0,1076
20	0,6038	0,2030
40	0,5919	0,4055
80	0,5080	0,7936
Μέσος όρος	0,5987	

**Πίνακας 5-10: Οι σταθερές  $\alpha$  και  $A$  της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον χαλαζία της 5<sup>ης</sup> δοκιμής**

5η δοκιμή		
Χρόνος λειοτρίβησης (sec)	Κλίση $\alpha$	Σταθερά $A$
10	0,7593	-0,7476
20	0,6079	-0,0071
40	0,5943	0,2482
80	0,5320	0,5771
Μέσος όρος	0,6234	

**Πίνακας 5-11: Οι σταθερές  $\alpha$  και  $A$  της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον χαλαζία της 6<sup>ης</sup> δοκιμής**

6η δοκιμή		
Χρόνος λειοτρίβησης (sec)	Κλίση $\alpha$	Σταθερά $A$
10	0,7172	-0,3859
20	0,6322	-0,1106
40	0,6062	0,2197
80	0,5286	0,5388
Μέσος όρος	0,6211	

### 5.4.3 Υπολογισμός ενέργειας κατά την λειοτρίβηση

Ο έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα της εγκατάστασης, χρησιμοποιεί ένα μετατροπέα συχνότητας της εταιρίας LENZE. Η διάταξη αυτή είναι ένας σύνθετος μετατροπέας ο οποίος περιλαμβάνει το τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής συχνότητας 50 Hz του δικτύου της Δ.Ε.Η. και το μετατρέπει σε εναλλασσόμενο ρεύμα ελεγχόμενης συχνότητας (Εικόνα 4-7). Η ελεγχόμενη συχνότητα μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 480 Hz. Για κινητήρες όπως αυτός των δοκιμών μας η συχνότητα δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 50 Hz. Ο μετατροπέας συχνότητας (inverter) ελέγχει τον κινητήρα με μεταβολή της παρεχόμενης τάσης και συχνότητας στο πρωτεύων. Ο έλεγχος του κινητήρα με τον τρόπο αυτό δίνει την δυνατότητα να πραγματοποιηθεί κάθε φορά ο απαιτούμενος συνδυασμός ροπής και στροφών με μικρές απώλειες και δυνατότητα ηλεκτρονικού ελέγχου.

Ο έλεγχος του κινητήρα με το συγκεκριμένο inverter έγινε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, δηλαδή με συνδυασμό οθόνης – πληκτρολογίου και ροοστάτη. Με τον ροοστάτη ρυθμίζουμε την συχνότητα εξόδου και με τον συνδυασμό οθόνης – πληκτρολογίου προγραμματίζουμε το inverter και παίρνουμε στην οθόνη την ένδειξη της καταναλισκόμενης ισχύς. Η ένδειξη αυτή εμφανίζεται στην οθόνη σαν ποσοστό %. Αυτό σημαίνει ότι η ένδειξη που δίνει το inverter για την ισχύ του κινητήρα εμφανίζεται σαν ποσοστό της ονομαστικής του ισχύς του (ονομαστική ισχύς inverter = 5,5 kW).

Για τον υπολογισμό της ισχύς που του δακτυλιόμυλου χρειάζεται να μετατραπούν τα ποσοστά % που εμφάνιζε η οθόνη του H/Y, κατά την διάρκεια της εκάστοτε δοκιμής, σε kwatt. Η μετατροπή αυτή γίνεται μέσω της εξίσωσης 5:2. Ο Πίνακας 5-12 δείχνει την καταναλισκόμενη ισχύ, για κάθε δοκιμή, στον δακτυλιόμυλο συναρτήσει και των υπολοίπων παραμέτρων λειτουργίας.

$$P = (x\% \cdot 5,5) - 0,220 \quad (5:2)$$

όπου x%: η ένδειξη που εμφανίζεται στην οθόνη του H/Y και P: η ισχύς σε kwatt.

**Πίνακας 5-12: Ισχύς που απαιτεί ο δακτυλιόμυλος για κάθε δοκιμή ξεχωριστά**

A/A	Αρ.Δοκιμής	Material load (kg)	Ισχύς για κάθε στάδιο (Watt)				r.p.m.
			10 sec	20 sec	40 sec	80 sec	
<b>Ασβεστόλιθος</b>	Δοκιμή 1	0,5871	935	825	660	660	800
	Δοκιμή 2	1,2035	2035	1980	1210	1100	800
	Δοκιμή 3	0,5876	605	440	385	330	500
<b>Χαλαζίας</b>	Δοκιμή 4	0,6603	2035	1980	1980	1925	800
	Δοκιμή 5	1,1935	2805	2640	2585	2530	800
	Δοκιμή 6	0,5871	1100	825	605	605	500

Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διάρκεια λειτουργίας του δακτυλιόμυλου μπορεί τώρα εύκολα να υπολογισθεί μέσω της εξίσωσης 5:3:

$$E = P \times T \quad (5:3)$$

όπου E: η ενέργεια (joule) που καταναλώνεται για την λειοτρίβηση, στον χρόνο T,

P: η ισχύς που απαιτείται και

T: ο χρόνος λειοτρίβησης.

Σύμφωνα με την εξίσωση 5:3 προκύπτουν οι τιμές τις αθροιστικά καταναλισκόμενης ενέργειας για κάθε δοκιμή στον δακτυλιόμυλο στον Πίνακα 5-13.

**Πίνακας 5-13: Κατανάλωση ενέργειας στον δακτυλιόμυλο, αθροιστικά, για κάθε δοκιμή**

Χρόνος	Αθροιστική κατανάλωση ενέργειας στον δακτυλιόμυλο για κάθε δοκιμή (joule)					
sec	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 4	Δοκιμή 5	Δοκιμή 6
10	9350	20350	6050	20350	28050	11000
20	17600	40150	10450	40150	54450	19250
40	30800	64350	18150	79750	106150	31350
80	57200	108350	31350	156750	207350	55550

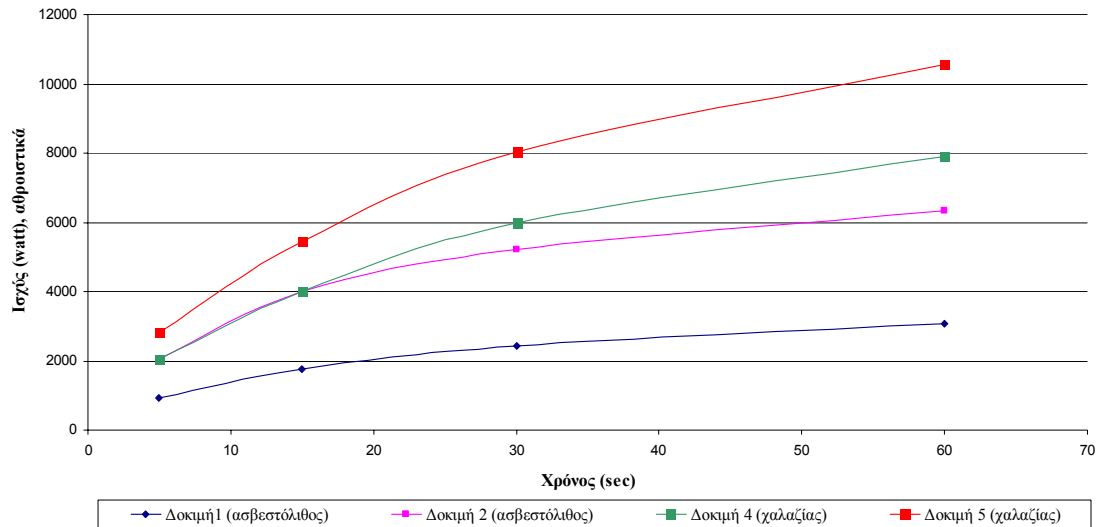
Η ισχύς που απαιτείται για την λειτουργία του δακτυλιόμυλου παρίσταται γραφικά στα διαγράμματα 5-21 και 5-22. Το Διάγραμμα 5-21 παριστά την ισχύ (watt) συναρτήσει του χρόνου για τις δοκιμές 1, 2, 4 και 5 που έγιναν με τον ίδιο ρυθμό περιστροφής, αλλά με διαφορετικό φορτίο. Το Διάγραμμα 5-22 παριστά την ισχύ συναρτήσει του χρόνου για τις δοκιμές 1, 3, 4 και 6 που έγιναν με το ίδιο φορτίο, αλλά με διαφορετικό ρυθμό περιστροφής.

Η ενέργεια που καταναλώνει ο δακτυλιόμυλος για κάθε μία δοκιμή παρίσταται γραφικά στα διαγράμματα 5-23 και 5-24. Το Διάγραμμα 5-23 παριστά την κατανάλωση ενέργειας του δακτυλιόμυλου (joule) συναρτήσει του χρόνου για τις δοκιμές 1, 2, 4 και 5 που έγιναν με τον ίδιο ρυθμό περιστροφής, αλλά με διαφορετικό φορτίο. Το Διάγραμμα 5-24 παριστά την κατανάλωση ενέργειας για τις δοκιμές 1, 3, 4 και 6 που έγιναν με το ίδιο φορτίο, αλλά με διαφορετικό ρυθμό περιστροφής.

Η ειδική ενέργεια του δακτυλιόμυλου, Joule/kg, συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης για κάθε δοκιμή υπολογίστηκε και οι τιμές της αναγράφονται στον

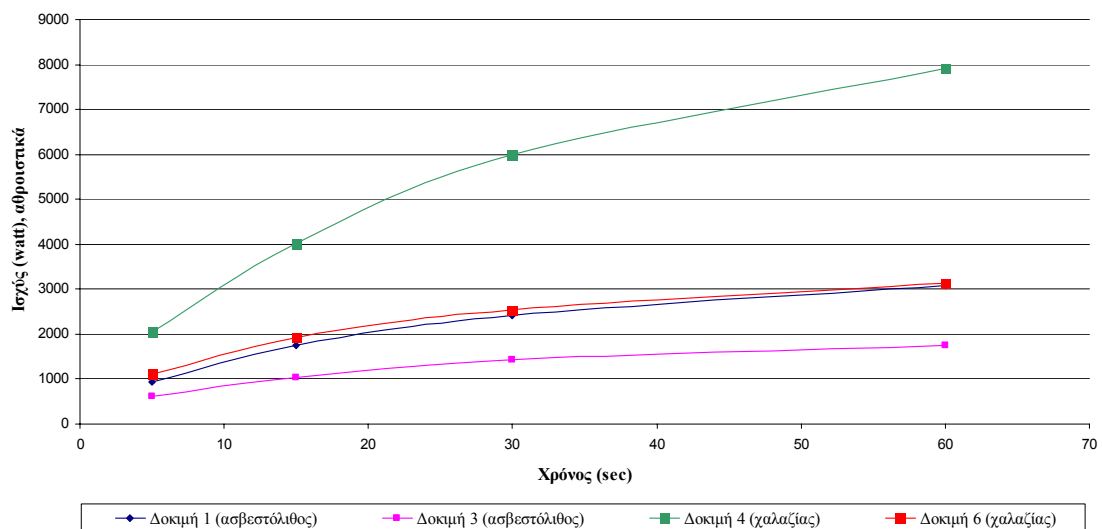
Πίνακας 5-14. Οι καμπύλες τις ειδικής ενέργειας συναρτήσει του χρόνου για τον ασβεστόλιθό παρίσταται γραφικά στο Διάγραμμα 5-25, ενώ για τον χαλαζία στο Διάγραμμα 5-26.

Διάγραμμα ισχύος συναρτήσει του χρόνου, για τον ίδιο ρυθμό περιστροφής (800 r.p.m.)



Διάγραμμα 5-21: Ισχύς του δακτυλιόμυλου (αθροιστική) συναρτήσει του χρόνου για δοκιμές που έγιναν με τον ίδιο ρυθμό περιστροφής

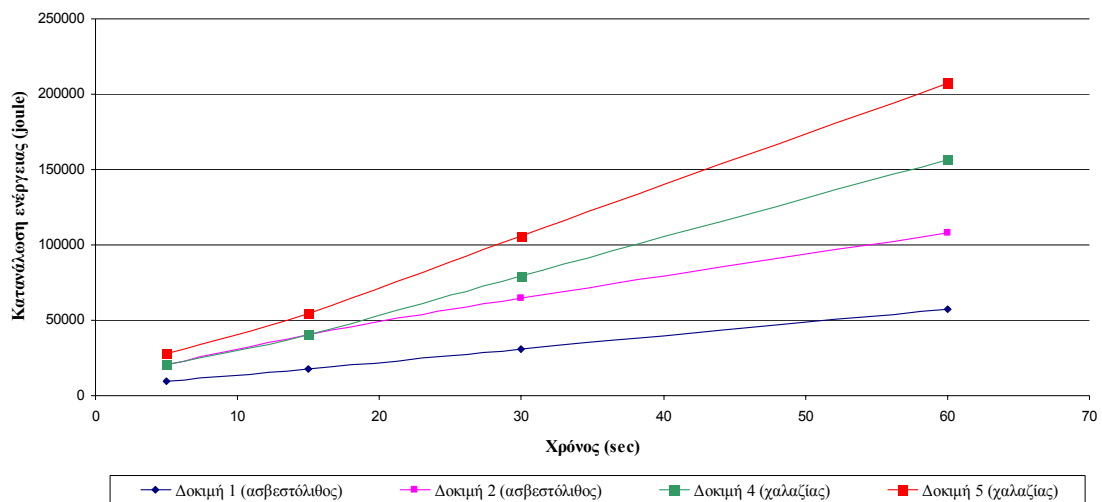
Διάγραμμα ισχύος συναρτήσει του χρόνου, για την ίδια ποσότητα αρχικής τροφοδοσίας (~625 gr)



Διάγραμμα 5-22: Ισχύς του δακτυλιόμυλου (αθροιστική) συναρτήσει του χρόνου για δοκιμές που έγιναν με την ίδια ποσότητα αρχικής τροφοδοσίας (~625 gr)

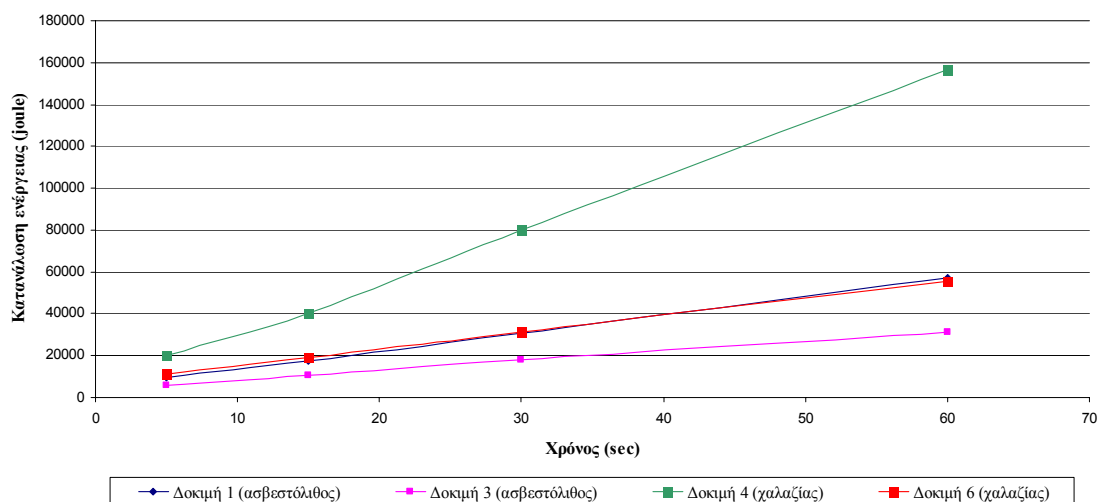
με το ίδιο φορτίο

Διαγραμμα κατανάλωσης ενέργειας του δακτυλιόμυλου, για σταθερό ρυθμό περιστροφής (800 r.p.m.)



Διάγραμμα 5-23: Κατανάλωση ενέργειας στον δακτυλιόμυλο (αθροιστική) συναρτήσει του χρόνου για δοκιμές που έγιναν με τον ίδιο ρυθμό περιστροφής

Διαγραμμα κατανάλωσης ενέργειας του δακτυλιόμυλου, για ίδια ποσότητα υλικού τροφοδοσίας (~625 gr)



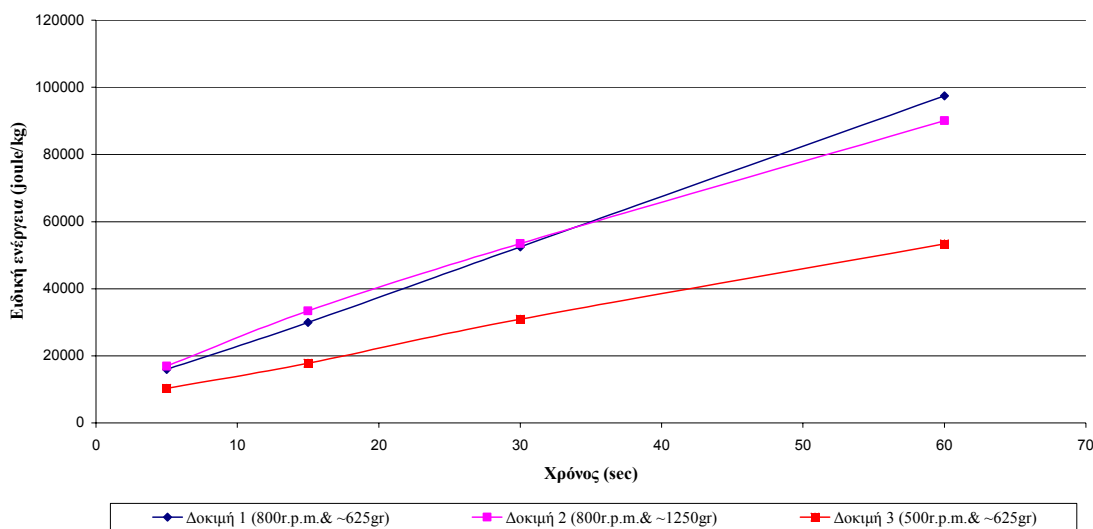


**Διάγραμμα 5-24: Κατανάλωση ενέργειας στον δακτυλιόμυλο (αθροιστική) συναρτήσει του χρόνου για δοκιμές που έγιναν με το ίδιο φορτίο**

**Πίνακας 5-14: Ειδική ενέργεια του δακτυλιόμυλου, σε joule/kg, συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης για κάθε δοκιμή**

	Αθροιστική ειδική ενέργεια (joule/kg)					
sec	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 4	Δοκιμή 5	Δοκιμή 6
10	15926	16909	10296	30819	23502	18736
20	29978	33361	17784	60806	45622	32788
40	52461	53469	30888	120778	88940	53398
80	97428	90029	53353	237392	173733	94618

**Ειδική ενέργεια δακτυλιόμυλου για τις δοκιμές λειοτρίβησης με ασβεστόλιθο**

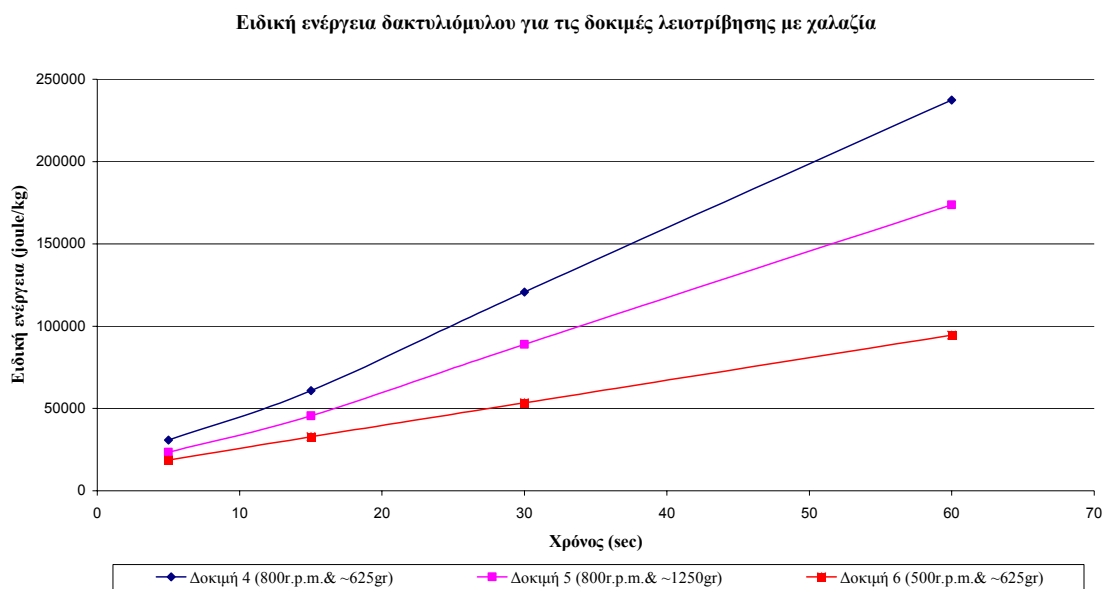


**Διάγραμμα 5-25: Ειδική ενέργεια (joule/kg) συναρτήσει του χρόνου για τις δοκιμές λειοτρίβησης ασβεστόλιθου**

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 5-25, το οποίο αφορά τις δοκιμές λειοτρίβησης του ασβεστόλιθου στον δακτυλιόμυλο, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η 1<sup>η</sup> και η 2<sup>η</sup> δοκιμή απαιτούν περίπου την ίδια ειδική ενέργεια, αν και έγιναν σε διαφορετικές συνθήκες. Η μεν 1<sup>η</sup> δοκιμή έγινε με ρυθμό περιστροφής του δακτυλιόμυλου 800 r.p.m. και με φορτίο ~625 gr, η δε 2<sup>η</sup> δοκιμή έγινε με 800 r.p.m. αλλά με φορτίο διπλάσιο τη 1<sup>ης</sup> δοκιμής, δηλαδή ~1250 gr. Συμπερασματικά καταλήγουμε στο ότι για τον ασβεστόλιθο, ο δακτυλιόμυλος απαιτεί περίπου την ίδια ενέργεια για ανεξαρτήτως του

φορτίου που εισάγεται. Δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για την λειοτρίβηση φαίνεται ότι εξαρτάται από το ρυθμό περιστροφής του δακτυλιόμυλου και όχι από το φορτίο του. Γι' αυτό και η 3<sup>η</sup> δοκιμή η οποία έγινε με τις λιγότερες r.p.m. φαίνεται να είναι η αποδοτικότερη όσο αναφορά την κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό σε σχέση με την 1<sup>η</sup> και την 2<sup>η</sup> δοκιμή.

Αντίθετα για τις δοκιμές λειοτρίβησης του χαλαζία, Διάγραμμα 5-26, παρατηρείται ένας σαφής διαχωρισμός για τις δοκιμές 4, 5 και 6, όσο αναφορά την κατανάλωση ενέργειας στον δακτυλιόμυλο (ειδική ενέργεια), για κάθε μία από αυτές. Η κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό φορτίου φαίνεται αυξημένη για την 4<sup>η</sup> δοκιμή σε σχέση με την 5<sup>η</sup> και 6<sup>η</sup> δοκιμή, παρόλο που η 5<sup>η</sup> είχε μεγαλύτερο φορτίο από την 4<sup>η</sup>. Άρα για την λειοτρίβηση χαλαζία στον δακτυλιόμυλο, φαίνεται ότι οι συνθήκες της 5<sup>ης</sup> δοκιμής είναι αποδοτικότερες όσο αναφορά την κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό. Αντίστοιχα από το ίδιο διάγραμμα οι συνθήκες της 6<sup>ης</sup> δοκιμής φαίνεται να είναι οι αποδοτικότερες όσο αναφορά την κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό σε σχέση με την 4<sup>η</sup> και την 5<sup>η</sup> δοκιμή



**Διάγραμμα 5-26: Ειδική ενέργεια (joule/kg) συναρτήσει του χρόνου για τις δοκιμές λειοτρίβησης χαλαζία**

#### 5.4.4 Λειτουργία θραύσης στον δακτυλιόμυλο (breakage function)

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ένα απλό μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει την διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους των κόκκων στον δακτυλιόμυλο σε batch grinding λειοτριβήσεις. Σκοπός είναι τα αποτελέσματα τα οποία θα προκύψουν από την εργασία αυτή, θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα από διάφορους άλλους μύλους.

Σε batch grinding, όπως αυτή στην παρούσα εργασία, το αρχικό φορτίο έχει αρχική κατανομή κόκκων η οποία αντιστοιχεί στον χρόνο  $t_0 = 0$ , ή στην ενέργεια  $E_0 = 0$  και υπάρχουν αρκετά κλάσματα λειοτριβήσης τα οποία αντιστοιχούν σε διάφορους χρόνους λειοτριβήσης ( $t_{0-j}$ ) ή σε διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα ( $E_{0-j}$ ). Το  $j$  κλάσμα αντιστοιχεί στον χρόνο  $t_j$  και στην ενέργεια  $E_j$  και η μάζα του κλάσματος  $j$  είναι  $M_{j,i}$  [19].

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, το άθροισμα των μαζών των επιμέρους κλασμάτων ισούται με τη μάζα της αρχικής τροφοδοσίας, εξίσωση 5:4.

$$\sum_{i=1}^{n+1} M_{j,i} = M \quad (5:4)$$

Στη θέση της μάζας  $M_{j,i}$  για κάθε κλάσμα μεγέθους  $i$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη μάζα κλάσματος  $w_{j,i} = M_{j,i}/M$ . Έτσι η αρχή διατήρησης τα μάζας εκφράζεται τώρα από την εξίσωση 5:5.

$$\sum_{i=1}^{n+1} w_{j,i} = 1 \quad (5:5)$$

Η κατανομή του μεγέθους κάθε κλάσματος  $j$  μπορεί επίσης να εκφραστεί μέσω της αθροιστικής διερχόμενης μάζας  $P_{j,i}$  ή μέσω της αθροιστικής παραμένουσας μάζας  $R_{j,i}$ . Οι τιμές των  $P_{j,i}$  και  $R_{j,i}$  υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{j,i} = \sum_{i=1}^{n+1} w_{j,i} \quad (5:6)$$

$$R_{j,i} = \sum_1^i w_{j,i} \quad (5:7)$$

Σαν συμπέρασμα από τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

$$P_{j,i} + R_{j,i} = 1, \quad P_{j,i} = 1 \text{ και } R_{j,i} = 0 \quad (5:8)$$

Επίσης ισχύει:

$$w_{j,i} = P_{j,i-1} - P_{j,i} \quad (5:9)$$

$$w_{j,i} = R_{j,i} - R_{j,i-1} \quad (5:10)$$

Έστω  $B_{j,i}$  η μάζα του κλάσματος του υλικού με μέγεθος μεγαλύτερο από  $x_i$  στην αρχική τροφοδοσία το οποίο θραύεται σε μικρότερα από  $x_i$  τεμάχια, κατά την διάρκεια  $j$  της δοκιμής, δηλαδή το  $B_{j,i}$  είναι το παραχθέν βάρος. Από τα παραπάνω προκύπτουν:

$$B_{j,i} = P_{j,i} - P_{0,i} \text{ και } B_{j,0} = 0 \quad (5:11)$$

$$B_{j,i} = R_{0,i} - R_{j,i} \text{ και } B_{j,n+1} = 0 \quad (5:12)$$

Από τα πειραματικά δεδομένα τα οποία εξήχθησαν από τις δοκιμές λειοτρίβησης του ασβεστόλιθου και του χαλαζία στον δακτυλιόμυλο προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες διερχόμενου βάρους σε kg για κάθε μία από τις έξι δοκιμές.

**Πίνακας 5-15: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 1<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης**

Δοκιμή 1η					
Ενέργεια (j/kg)	0	15925,74	29977,86	52461,25	97428,04
Διερχόμενο βάρος (kg)					
d (μm)	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,112	0,575	0,587	0,587	0,587
500	0,098	0,572	0,584	0,587	0,587
354	0,090	0,564	0,575	0,581	0,587
250	0,080	0,528	0,552	0,575	0,587
177	0,073	0,499	0,517	0,564	0,585
125	0,069	0,446	0,481	0,531	0,575
88	0,066	0,429	0,452	0,505	0,564
63	0,062	0,382	0,399	0,476	0,534

**Πίνακας 5-16: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 2<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης**

Δοκιμή 2η					
Ενέργεια (j/kg)	0	16909,02	33361,03	53469,05	90029,08
Διερχόμενο βάρος (kg)					
d (μm)	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,112	0,848	1,071	1,204	1,204
500	0,098	0,818	1,053	1,204	1,204
354	0,090	0,770	1,035	1,179	1,204
250	0,080	0,734	0,987	1,131	1,191
177	0,073	0,686	0,927	1,047	1,167
125	0,069	0,614	0,867	0,981	1,113
88	0,066	0,578	0,806	0,921	1,077
63	0,062	0,518	0,734	0,818	1,011

Πίνακας 5-17: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 3<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης

Δοκιμή 3η					
Ενέργεια (j/kg)	0	10296,12	17784,21	30888,36	53352,62
Διερχόμενο βάρος (kg)					
d (μm)	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,112	0,400	0,552	0,588	0,588
500	0,098	0,382	0,546	0,582	0,588
354	0,090	0,364	0,529	0,564	0,588
250	0,080	0,343	0,494	0,535	0,579
177	0,073	0,311	0,450	0,488	0,558
125	0,069	0,282	0,411	0,444	0,529
88	0,066	0,259	0,382	0,408	0,479
63	0,062	0,226	0,329	0,364	0,452

Πίνακας 5-18: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 4<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης

Δοκιμή 4η					
Ενέργεια (j/kg)	0	30819,32	60805,69	120778,4	237392,1
Διερχόμενο βάρος (kg)					
d (μm)	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,120	0,396	0,561	0,645	0,660
500	0,095	0,248	0,436	0,624	0,660
354	0,079	0,165	0,317	0,558	0,650
250	0,064	0,135	0,248	0,462	0,629
177	0,048	0,112	0,208	0,363	0,558
125	0,037	0,092	0,172	0,293	0,492
88	0,024	0,073	0,149	0,243	0,436
63	0,010	0,059	0,122	0,205	0,376

Πίνακας 5-19: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 5<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης

Δοκιμή 5η					
Ενέργεια (j/kg)	0	23502,30	45622,12	88940,09	173732,7
Διερχόμενο βάρος (kg)					
d (μm)	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,120	0,292	0,824	1,062	1,152
500	0,095	0,239	0,483	0,935	1,074
354	0,079	0,191	0,370	0,716	0,937
250	0,064	0,149	0,292	0,531	0,812
177	0,048	0,119	0,239	0,412	0,698
125	0,037	0,078	0,197	0,328	0,588
88	0,024	0,060	0,172	0,275	0,513
63	0,010	0,048	0,143	0,242	0,442

**Πίνακας 5-20: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 6<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης**

<b>Δοκιμή 6η</b>					
<b>Ενέργεια (j/kg)</b>	0	18736,16	32788,28	53398,06	94617,61
<b>Διερχόμενο βάρος (kg)</b>					
<b>d (μm)</b>	<b>0 sec</b>	<b>10 sec</b>	<b>20 sec</b>	<b>40 sec</b>	<b>80 sec</b>
707	0,120	0,299	0,393	0,493	0,569
500	0,095	0,241	0,323	0,458	0,537
354	0,079	0,153	0,264	0,323	0,464
250	0,064	0,112	0,170	0,261	0,382
177	0,048	0,082	0,129	0,211	0,305
125	0,037	0,066	0,100	0,173	0,250
88	0,024	0,057	0,076	0,153	0,223
63	0,010	0,047	0,059	0,132	0,188

Από τους πίνακες 5-15 έως και 5-20 και από την εξίσωση 5:11 προκύπτουν οι πίνακες παραχθέντος βάρους σε kg για κάθε μία δοκιμή.

**Πίνακας 5-21: Παραχθέν βάρος σε kg για την 1<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης**

<b>ΔΟΚΙΜΗ 1η</b>					
<b>Παραχθέν Βάρος (kg)</b>					
<b>d (μm)</b>	<b>0 sec</b>	<b>10 sec</b>	<b>20 sec</b>	<b>40 sec</b>	<b>80 sec</b>
707	0,000	0,463	0,475	0,475	0,475
500	0,000	0,474	0,486	0,489	0,489
354	0,000	0,473	0,485	0,491	0,497
250	0,000	0,449	0,472	0,496	0,507
177	0,000	0,426	0,444	0,491	0,512
125	0,000	0,378	0,413	0,463	0,507
88	0,000	0,363	0,386	0,439	0,498
63	0,000	0,320	0,337	0,413	0,472

**Πίνακας 5-22: Παραχθέν βάρος σε kg για την 2<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης**

<b>ΔΟΚΙΜΗ 2η</b>					
<b>Παραχθέν Βάρος (kg)</b>					
<b>d (μm)</b>	<b>0 sec</b>	<b>10 sec</b>	<b>20 sec</b>	<b>40 sec</b>	<b>80 sec</b>
707	0,000	0,736	0,959	1,091	1,091
500	0,000	0,720	0,955	1,105	1,105
354	0,000	0,680	0,945	1,089	1,113
250	0,000	0,654	0,907	1,052	1,112
177	0,000	0,613	0,854	0,974	1,095
125	0,000	0,545	0,798	0,912	1,045
88	0,000	0,512	0,741	0,855	1,011
63	0,000	0,455	0,672	0,756	0,949

Πίνακας 5-23: Παραχθέν βάρος σε kg για την 3<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης

		ΔΟΚΙΜΗ 3η			
		Παραχθέν Βάρος (kg)			
d (μm)	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,000	0,287	0,440	0,475	0,475
500	0,000	0,284	0,448	0,484	0,489
354	0,000	0,274	0,439	0,474	0,497
250	0,000	0,263	0,414	0,455	0,499
177	0,000	0,239	0,377	0,415	0,485
125	0,000	0,213	0,343	0,375	0,460
88	0,000	0,193	0,316	0,343	0,413
63	0,000	0,164	0,267	0,302	0,390

Πίνακας 5-24: Παραχθέν βάρος σε kg για την 4<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης

		ΔΟΚΙΜΗ 4η			
		Παραχθέν Βάρος (kg)			
d (μm)	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,000	0,277	0,442	0,525	0,541
500	0,000	0,152	0,340	0,529	0,565
354	0,000	0,086	0,238	0,479	0,572
250	0,000	0,072	0,185	0,399	0,566
177	0,000	0,064	0,160	0,315	0,510
125	0,000	0,055	0,134	0,255	0,455
88	0,000	0,049	0,125	0,219	0,412
63	0,000	0,049	0,112	0,195	0,366

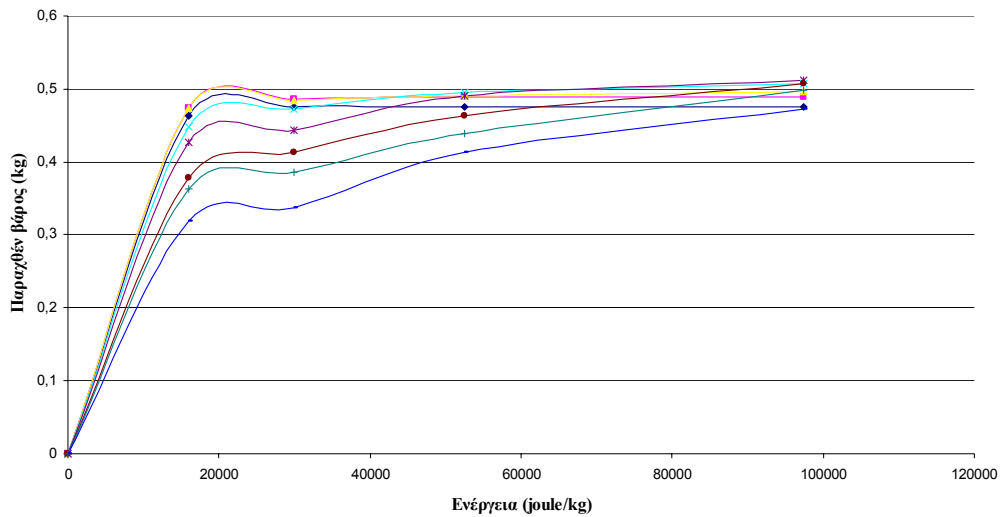
Πίνακας 5-25: Παραχθέν βάρος σε kg για την 5<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης

		ΔΟΚΙΜΗ 5η			
		Παραχθέν Βάρος (kg)			
d (μm)	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,000	0,173	0,704	0,943	1,032
500	0,000	0,143	0,388	0,839	0,979
354	0,000	0,112	0,291	0,637	0,858
250	0,000	0,086	0,229	0,468	0,748
177	0,000	0,071	0,191	0,364	0,650
125	0,000	0,040	0,160	0,291	0,551
88	0,000	0,036	0,148	0,251	0,489
63	0,000	0,038	0,133	0,232	0,431

**Πίνακας 5-26: Παραχθέν βάρος σε kg για την 6<sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης**

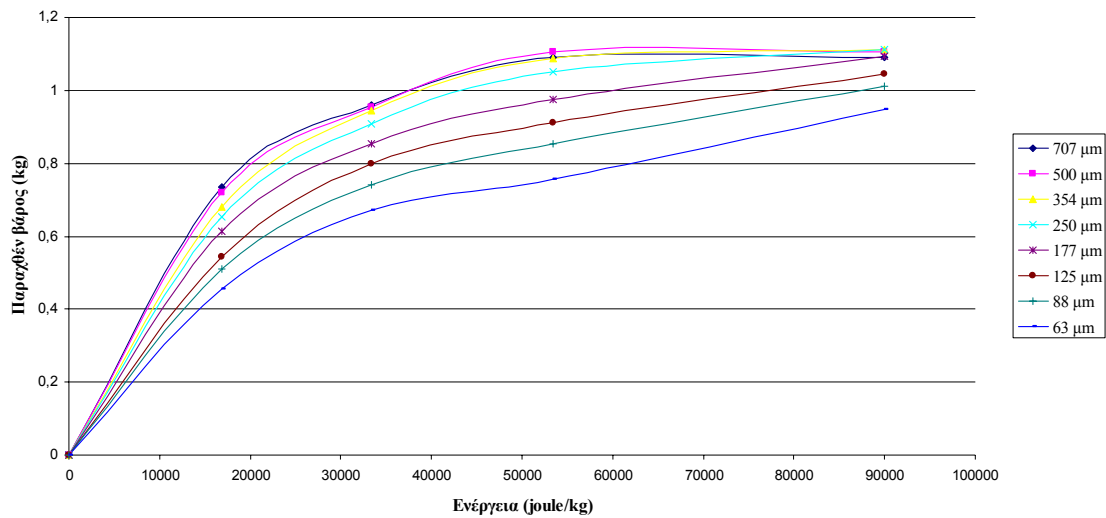
d (μm)	ΔΟΚΙΜΗ 6η				
	Παραχθέν Βάρος (kg)				
	0 sec	10 sec	20 sec	40 sec	80 sec
707	0,000	0,180	0,274	0,373	0,450
500	0,000	0,145	0,228	0,363	0,442
354	0,000	0,074	0,186	0,244	0,385
250	0,000	0,048	0,107	0,198	0,318
177	0,000	0,034	0,081	0,163	0,257
125	0,000	0,029	0,063	0,136	0,212
88	0,000	0,033	0,052	0,129	0,199
63	0,000	0,037	0,049	0,122	0,178

Από τους πίνακες 5-21 έως και 5-26 προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα παραχθέν βάρους σε kg συναρτήσει της ενέργειας για κάθε μία από τις έξι δοκιμές λειοτρίβησης ξεχωριστά.

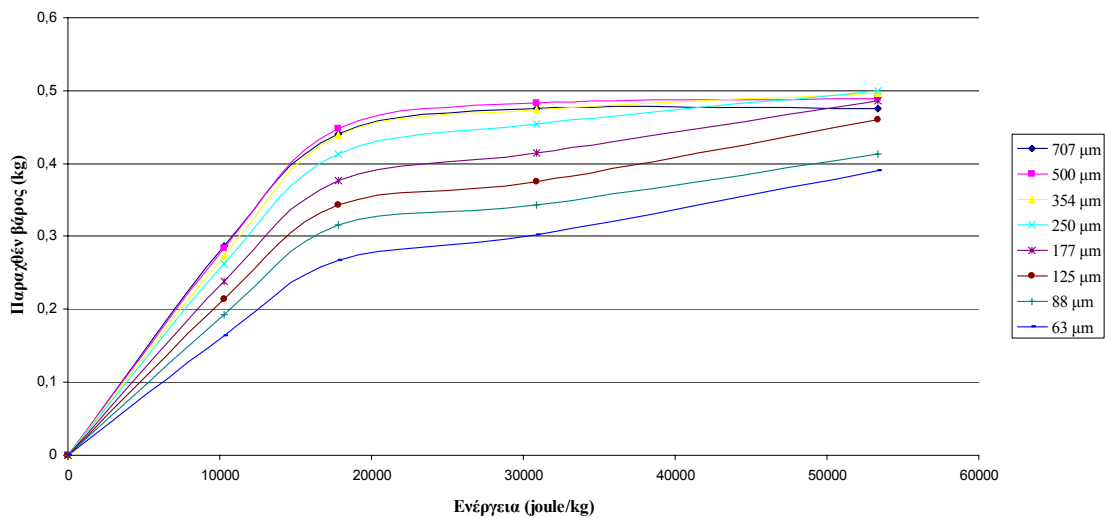
**Διάγραμμα παραχθέντος βάρους, για τον ασβεστόλιθο (Δοκιμή 1)****Διάγραμμα 5-27: Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον ασβεστόλιθο (1<sup>η</sup> δοκιμή)**



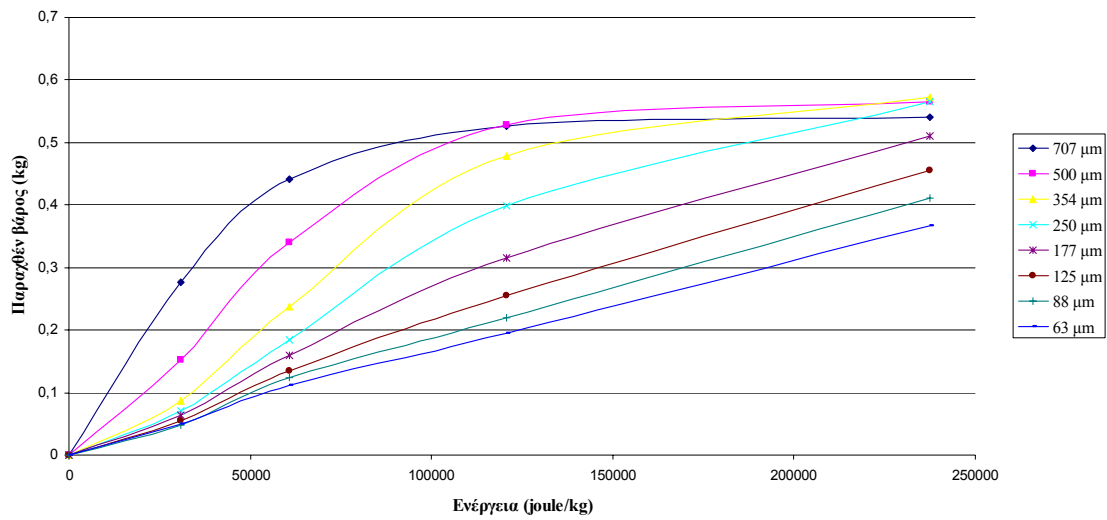
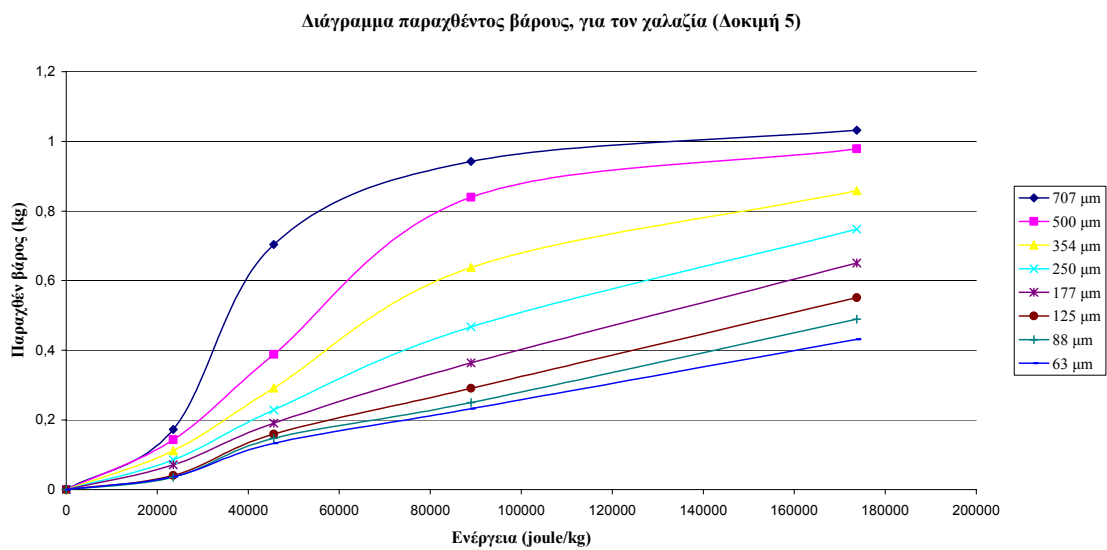
Διάγραμμα παραχθέντος βάρους, για τον ασβεστόλιθο (Δοκιμή 2)

Διάγραμμα 5-28 Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον ασβεστόλιθο (2<sup>η</sup> δοκιμή)

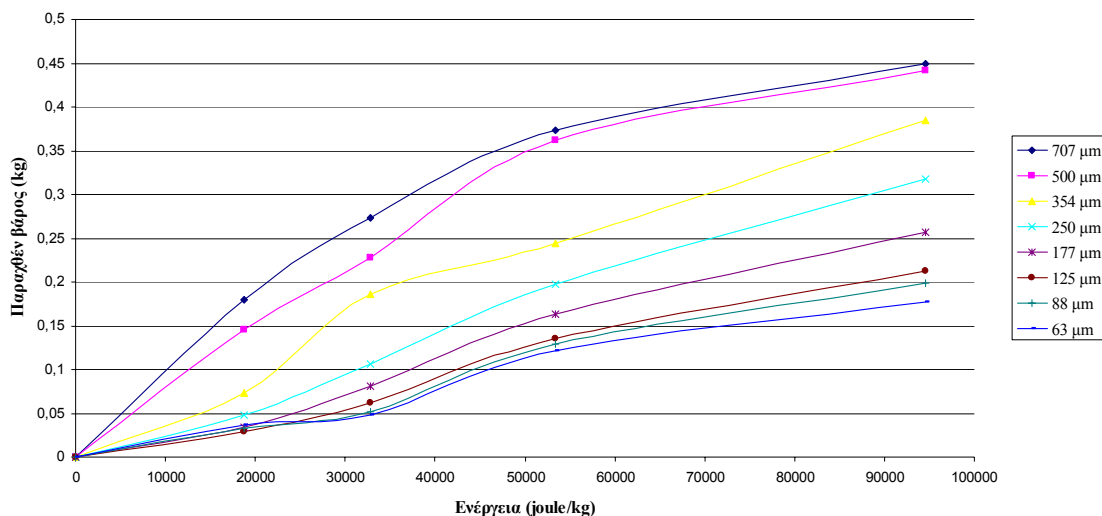
Διάγραμμα παραχθέντος βάρους, για τον ασβεστόλιθο (Δοκιμή 3)

Διάγραμμα 5-29 Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον ασβεστόλιθο (3<sup>η</sup> δοκιμή)

Διάγραμμα παραχθέντος βάρους, για τον χαλαζία (Δοκιμή 4)

Διάγραμμα 5-30 Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον χαλαζία (4<sup>η</sup> δοκιμή)Διάγραμμα 5-31 Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον χαλαζία (5<sup>η</sup> δοκιμή)

Διάγραμμα παραχθέντος βάρους, για τον χαλαζία (Δοκιμή 6)

Διάγραμμα 5-32: Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον χαλαζία (6<sup>η</sup> δοκιμή)

Γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω διαγράμματα ότι η ποσότητα του υλικού που μπορεί να λειοτριβηθεί και να διέλθει ένα συγκεκριμένο μέγεθος  $x$  δεν μπορεί να υπερβαίνει την αρχική ποσότητα της τροφοδοσίας  $M$ . Επίσης ο ρυθμός του παραχθέντος βάρους (κλίση των καμπύλων) είναι μικρότερος για τα μικρότερου μεγέθους κλάσματα. Τα διαγράμματα 5-27 έως 5-32, μπορούν να αναχθούν με μέγιστο τη μονάδα για να είναι ευκολότερη η σύγκριση της παραχθέντος ποσότητας για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα ξεχωριστά. Έτσι προκύπτουν οι πίνακες 5-27 έως και 5-32 παραχθείσας ποσότητας που έχουν αναχθεί με μέγιστο τη μονάδα. Οι τιμές των πινάκων 5-27 έως και 5-32 προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων λειοτρίβησης της εκάστοτε δοκιμής.

Πίνακας 5-27: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 1<sup>η</sup> δοκιμή

	Ενέργεια (joule/kg)	ΔΟΚΙΜΗ 1η							
		707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 sec	15925,74	0,975	0,970	0,953	0,885	0,833	0,745	0,729	0,677
20 sec	29977,86	1,000	0,994	0,976	0,932	0,867	0,815	0,776	0,714
40 sec	52461,25	1,000	1,000	0,988	0,978	0,959	0,913	0,882	0,876
80 sec	97428,04	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Πίνακας 5-28: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 2<sup>η</sup> δοκιμή

	Ενέργεια (joule/kg)	ΔΟΚΙΜΗ 2η							
		707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 sec	16909,02	0,675	0,652	0,611	0,589	0,560	0,522	0,506	0,480
20 sec	33361,03	0,879	0,864	0,849	0,816	0,780	0,764	0,732	0,708
40 sec	53469,05	1,000	1,000	0,978	0,946	0,890	0,873	0,845	0,797
80 sec	90029,08	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Πίνακας 5-29: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 3<sup>η</sup> δοκιμή

	Ενέργεια (joule/kg)	ΔΟΚΙΜΗ 3η							
		707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 sec	10296,12	0,605	0,580	0,551	0,527	0,492	0,464	0,467	0,420
20 sec	17784,21	0,926	0,916	0,882	0,829	0,776	0,745	0,765	0,684
40 sec	30888,36	1,000	0,988	0,953	0,912	0,855	0,815	0,829	0,774
80 sec	53352,62	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Πίνακας 5-30: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 4<sup>η</sup> δοκιμή

	Ενέργεια (joule/kg)	ΔΟΚΙΜΗ 4η							
		707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 sec	30819,32	0,511	0,270	0,151	0,127	0,126	0,121	0,118	0,134
20 sec	60805,69	0,817	0,603	0,417	0,326	0,314	0,296	0,303	0,306
40 sec	120778,43	0,972	0,936	0,838	0,705	0,618	0,561	0,532	0,531
80 sec	237392,09	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

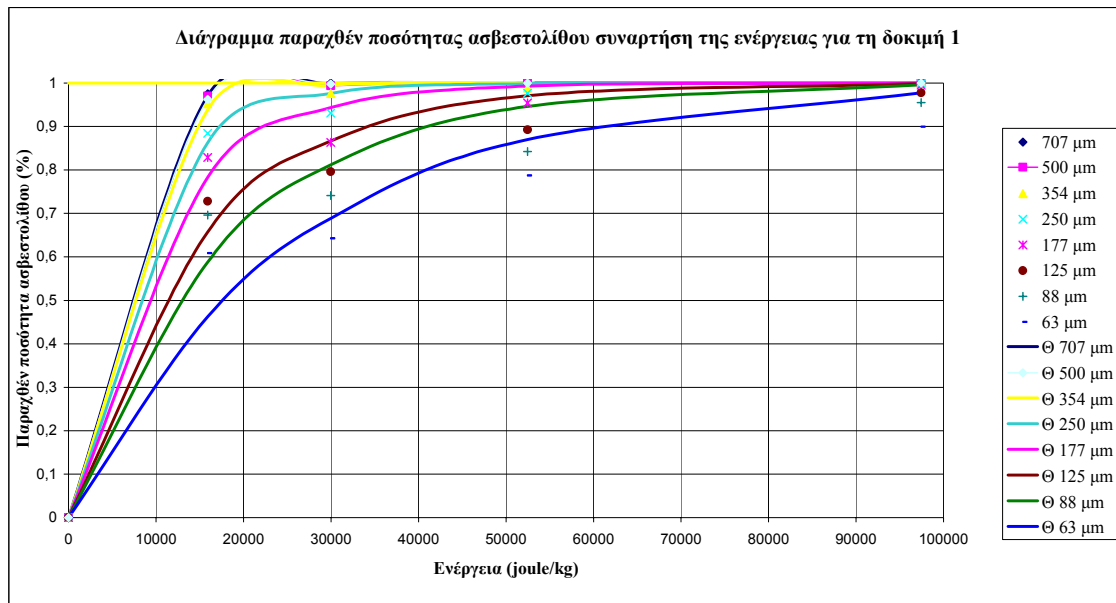
Πίνακας 5-31: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 5<sup>η</sup> δοκιμή

	Ενέργεια (joule/kg)	ΔΟΚΙΜΗ 5η							
		707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 sec	23502,30	0,167	0,146	0,131	0,114	0,110	0,073	0,073	0,087
20 sec	45622,12	0,682	0,396	0,339	0,306	0,293	0,290	0,302	0,308
40 sec	88940,09	0,913	0,857	0,743	0,625	0,560	0,528	0,512	0,538
80 sec	173732,72	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

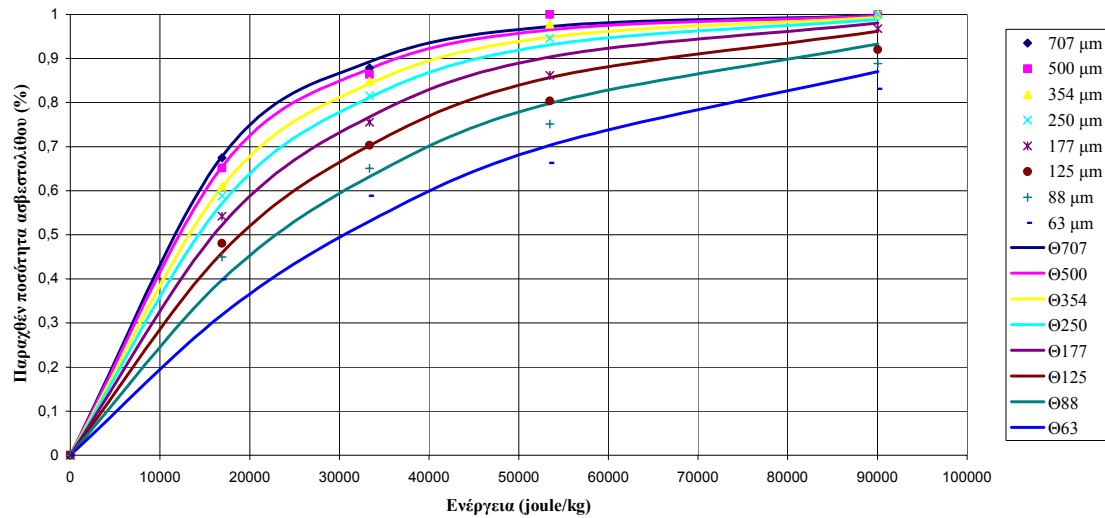
Πίνακας 5-32: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 6<sup>η</sup> δοκιμή

	Ενέργεια (joule/kg)	ΔΟΚΙΜΗ 6η							
		707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 sec	18736,16	0,400	0,329	0,192	0,151	0,133	0,137	0,166	0,207
20 sec	32788,28	0,608	0,515	0,482	0,335	0,316	0,295	0,263	0,273
40 sec	53398,06	0,830	0,821	0,634	0,622	0,635	0,640	0,646	0,686
80 sec	94617,61	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

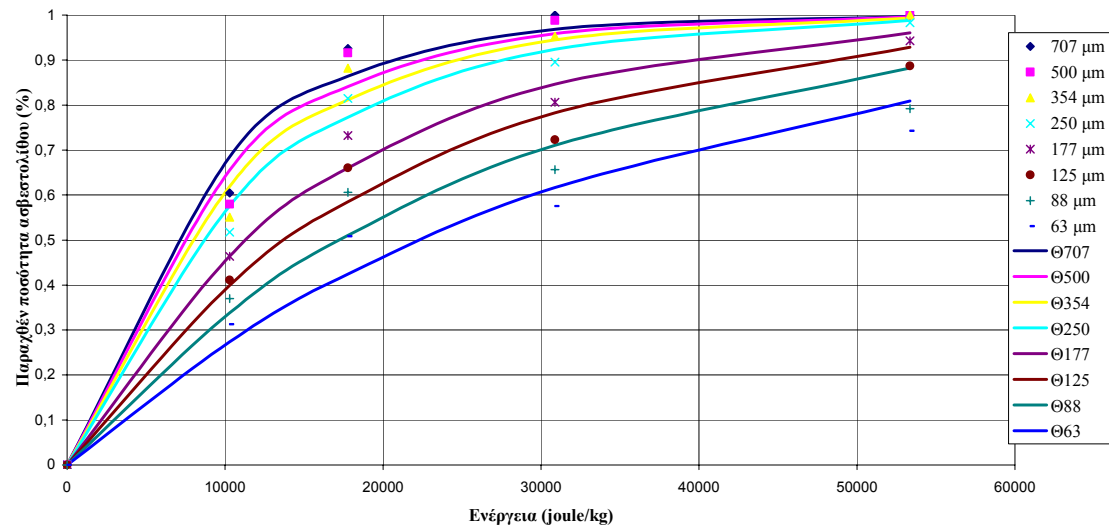
Από τους πίνακες 5-27 έως και 5-32 προκύπτουν τα διαγράμματα παραχθείσας ποσότητας (με μέγιστο τη μονάδα) συναρτήσει της ενέργειας για κάθε μία δοκιμή.

Διάγραμμα 5-33: Παραχθείσα ποσότητα ασβεστολίθου (%) για την 1<sup>η</sup> δοκιμή

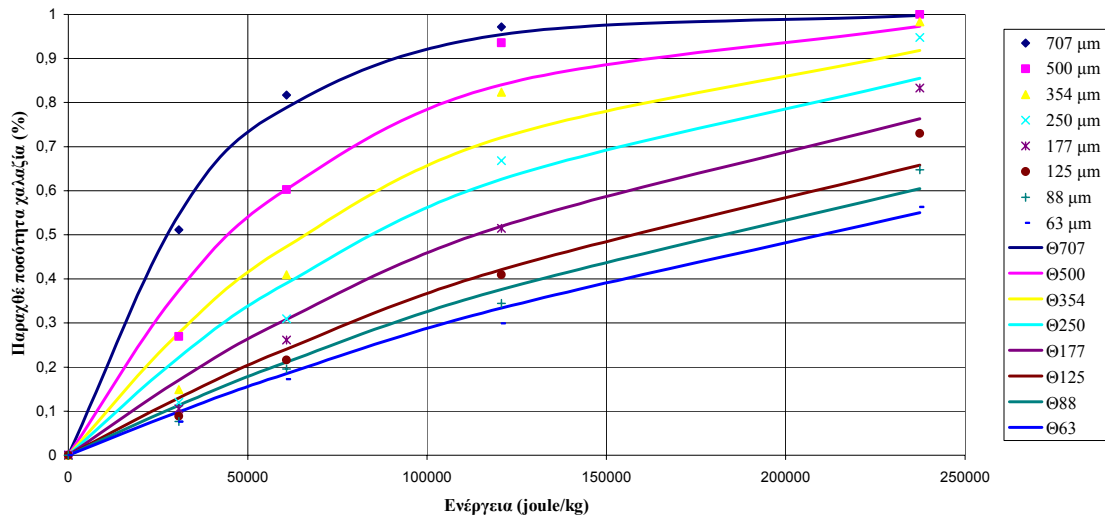
Διάγραμμα παραχθέν ποσότητας ασβεστολίθου συναρτήση της ενέργειας για τη δοκιμή 2

Διάγραμμα 5-34 Παραχθείσα ποσότητα ασβεστολίθου (%) για την 2<sup>η</sup> δοκιμή

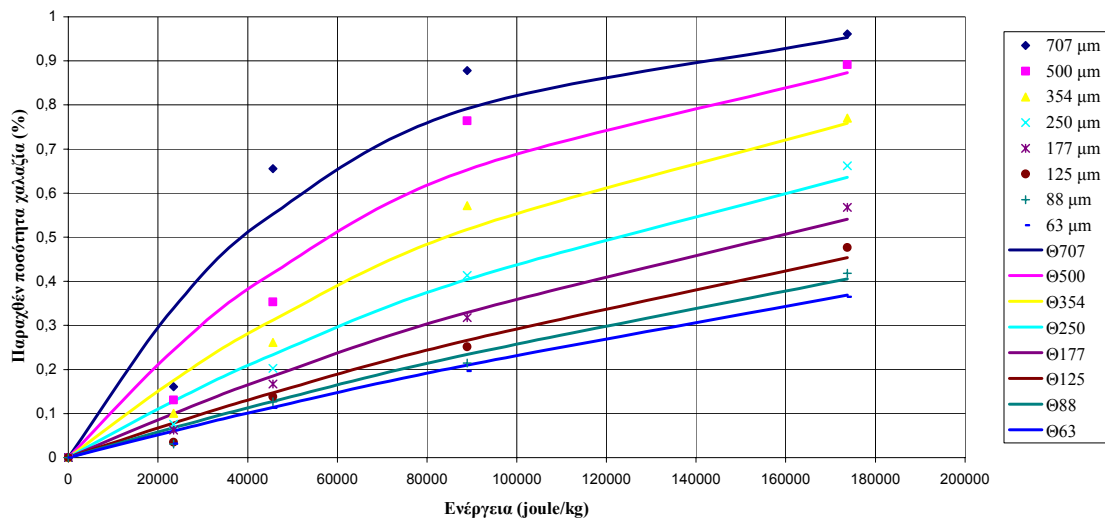
Διάγραμμα παραχθέν ποσότητας ασβεστολίθου συναρτήση της ενέργειας για την δοκιμή 3

Διάγραμμα 5-35 Παραχθείσα ποσότητα ασβεστολίθου (%) για την 3<sup>η</sup> δοκιμή

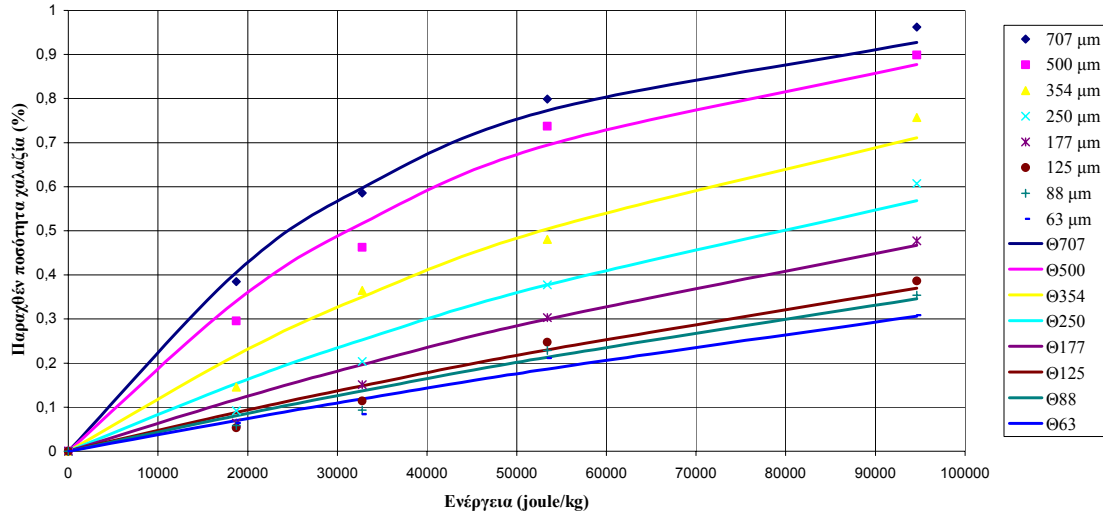
Διάγραμμα παραχθέν ποσότητας χαλαζία συναρτήση της ενέργειας για τη δοκιμή 4

Διάγραμμα 5-36 Παραχθείσα ποσότητα χαλαζία (%) για την 4<sup>η</sup> δοκιμή

Διάγραμμα παραχθέν ποσότητας χαλαζία συναρτήση της ενέργειας για την δοκιμή 5

Διάγραμμα 5-37 Παραχθείσα ποσότητα χαλαζία (%) για την 5<sup>η</sup> δοκιμή

Διάγραμμα παραχθέν ποσότητας χαλαζία συναρτήση της ενέργειας για τη δοκιμή 6

Διάγραμμα 5-38: Παραχθείσα ποσότητα χαλαζία (%) για την 6<sup>η</sup> δοκιμή

Έτσι καταλήγουμε στην εξίσωση 5:13:

$$w_{j,i} = w_{0,i} + B_{j,i-1} - B_{j,i} \quad (5:13)$$

Η εξίσωση 5:13 περιγράφει ότι η μάζα του κλάσματος  $i$  στην  $j$  δοκιμή είναι ίση με τη μάζα της αρχική τροφοδοσία η οποία έχει το ίδιο μέγεθος  $i$ , συν την μάζα κλάσματος μεγαλύτερου μεγέθους του υλικού το οποίο θραύτηκε σε μέγεθος μικρότερο από  $i-1$  κατά την διάρκεια της δοκιμής, μείον την μάζα κλάσματος η οποία θραύτηκε σε μέγεθος μικρότερο από  $i$  κατά την διάρκεια της ίδιας δοκιμής. Για να ισχύει η εξίσωση 5:13, πρέπει το άθροισμα όλων των κλασμάτων να δίνει:

$$\sum_{i=1}^{n+1} w_{j,i} = \sum_{i=1}^{n+1} w_{0,i} + \sum_{i=1}^{n+1} B_{j,i-1} - \sum_{i=1}^{n+1} B_{j,i} \quad (5:14)$$

Από την εξίσωση 5:5 και την 5:14 καταλήγουμε στην εξίσωση 5:15, η οποία ισχύει λόγω του ότι και οι δύο όροι της εξίσωσης είναι μηδενικοί (Εξίσωση 5:11 και 5:12).

$$B_{j,0} = B_{j,n+1} \quad (5:15)$$

Άρα καταλήγουμε στο ότι όσο αναφορά το ισοζύγιο μάζας, η επιλογή της λειτουργίας θραύσης, η οποία δίνει το  $B_{j,i}$ , δεν είναι μεγάλης σημασίας και ο μοναδικός περιορισμός είναι να ταιριάζουν τα πειραματικά δεδομένα με το μαθηματικό μοντέλο. Στην περίπτωση μας το μαθηματικό μοντέλο που επιλέχθηκε είναι το εξής:



$$B_{j,i} = M_{\max,x} (1 - \exp(-k_i \cdot e_j)) \quad (5:16)$$

όπου  $k_i$ , η παράμετρος του ρυθμού λειοτριβήσης που αντιστοιχεί στο μέγεθος  $x_i$  και  $M_{\max,x}$  η μέγιστη παραγόμενη μάζα για κάθε κλάσμα  $x_i$ . Από την εξίσωση 5:16 προκύπτουν οι πίνακες 5-33 έως και 5-38, οι τιμές των οποίων αποτελούν την θεωρητική προσέγγιση του μοντέλου που επιλέχθηκε. Για τον υπολογισμό των τιμών της θεωρητικής προσέγγισης λαμβάνονται αρχικά τυχαίες τιμές για  $k_i$ . Τα πραγματικά  $k_i$  υπολογίζονται μετέπειτα με την βοήθεια του excel όπως περιγράφεται παρακάτω.

**Πίνακας 5-33: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 1<sup>η</sup> δοκιμή**

	ΔΟΚΙΜΗ 1η							
	707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10 sec	0,971	0,962	0,939	0,893	0,795	0,703	0,641	0,567
20 sec	0,999	0,998	0,995	0,985	0,949	0,898	0,855	0,793
40 sec	1,000	1,000	1,000	0,999	0,995	0,982	0,966	0,936
80 sec	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,998	0,994

**Πίνακας 5-34: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 2<sup>η</sup> δοκιμή**

	ΔΟΚΙΜΗ 2η							
	707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 sec	0,74	0,72	0,69	0,62	0,49	0,42	0,40	0,35
20 sec	0,93	0,92	0,90	0,85	0,73	0,66	0,63	0,58
40 sec	0,99	0,98	0,98	0,95	0,88	0,83	0,80	0,75
80 sec	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	0,90

**Πίνακας 5-35: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 3<sup>η</sup> δοκιμή**

	ΔΟΚΙΜΗ 3η							
	707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 sec	0,68	0,66	0,63	0,58	0,50	0,42	0,33	0,26
20 sec	0,86	0,85	0,82	0,78	0,70	0,61	0,50	0,41
40 sec	0,97	0,96	0,95	0,93	0,88	0,81	0,70	0,60
80 sec	1,00	1,00	0,99	0,99	0,97	0,94	0,88	0,79

Πίνακας 5-36: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 4<sup>η</sup> δοκιμή

	ΔΟΚΙΜΗ 4η							
	707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 sec	0,63	0,60	0,54	0,46	0,37	0,30	0,22	0,18
20 sec	0,86	0,84	0,78	0,70	0,60	0,50	0,38	0,32
40 sec	0,98	0,97	0,95	0,91	0,84	0,75	0,62	0,54
80 sec	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,94	0,85	0,78

Πίνακας 5-37: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 5<sup>η</sup> δοκιμή

	ΔΟΚΙΜΗ 5η							
	707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 sec	0,38	0,38	0,35	0,31	0,26	0,23	0,20	0,14
20 sec	0,61	0,61	0,57	0,51	0,44	0,39	0,34	0,26
40 sec	0,84	0,84	0,81	0,75	0,67	0,62	0,56	0,44
80 sec	0,97	0,97	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,68

Πίνακας 5-38: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 6<sup>η</sup> δοκιμή

	ΔΟΚΙΜΗ 6η							
	707 μm	500 μm	354 μm	250 μm	177 μm	125 μm	88 μm	63 μm
0 sec	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 sec	0,43	0,41	0,39	0,31	0,28	0,25	0,22	0,22
20 sec	0,63	0,61	0,58	0,47	0,43	0,40	0,35	0,35
40 sec	0,80	0,78	0,76	0,65	0,60	0,56	0,51	0,50
80 sec	0,94	0,93	0,92	0,84	0,80	0,77	0,72	0,71

Συγκρίνοντας τις μετρούμενες τιμές με τις θεωρητικές οι οποίες προέκυψαν μέσω της εξίσωσης 5:16 χρησιμοποιούμε την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι προκύπτει μία νέα σειρά πινάκων, οι τιμές των οποίων είναι η τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών. Έχοντας υπολογίσει τις τετραγωνικές διαφορές, με  $k_i$  τυχαίες τιμές, καλούμαστε με την βοήθεια του excel και συγκεκριμένα μέσω της εντολής Εργαλεία→Αναζήτηση στόχου, να υπολογίσουμε τις πραγματικές τιμές των  $k_i$  ξεχωριστά για κάθε κλάσμα. Τα  $k_i$  που θέλουμε να υπολογίσουμε πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε η τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για κάθε κλάσμα να είναι η ελάχιστη δυνατή. Στους πίνακες 5-39 έως και 5-44 παρουσιάζονται οι τετραγωνικές διαφορές καθώς και το άθροισμά τους (που είναι το ελάχιστο) για κάθε κλάσμα.

Πίνακας 5-39: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 1<sup>η</sup> δοκιμή

	ΔΟΚΙΜΗ 1η							
	707 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	354 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	177 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	88 $\mu\text{m}$	63 $\mu\text{m}$
0 sec	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10 sec	0,00002	0,00006	0,00020	0,00045	0,00206	0,00501	0,01159	0,02149
20 sec	0,00000	0,00002	0,00034	0,00209	0,00653	0,00500	0,00502	0,00216
40 sec	0,00000	0,00000	0,00014	0,00047	0,00154	0,00612	0,01080	0,00684
80 sec	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00002	0,00045	0,00165	0,00610
<b>Σύνολο</b>	0,00002	0,00007	0,00067	0,00302	0,01014	0,01658	0,02906	0,03660

Πίνακας 5-40: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 2<sup>η</sup> δοκιμή

	ΔΟΚΙΜΗ 2η							
	707 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	354 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	177 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	88 $\mu\text{m}$	63 $\mu\text{m}$
0 sec	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10 sec	0,00001	0,00001	0,00000	0,00031	0,00041	0,00046	0,00275	0,00645
20 sec	0,00021	0,00016	0,00003	0,00002	0,00014	0,00000	0,00036	0,00334
40 sec	0,00077	0,00122	0,00089	0,00022	0,00173	0,00279	0,00222	0,00162
80 sec	0,00001	0,00001	0,00005	0,00012	0,00015	0,00173	0,00191	0,00153
<b>Σύνολο</b>	0,00099	0,00140	0,00097	0,00067	0,00243	0,00497	0,00724	0,01294

Πίνακας 5-41: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 3<sup>η</sup> δοκιμή

	ΔΟΚΙΜΗ 3η							
	707 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	354 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	177 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	88 $\mu\text{m}$	63 $\mu\text{m}$
0 sec	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10 sec	0,00643	0,00566	0,00468	0,00340	0,00000	0,00015	0,00097	0,00150
20 sec	0,00385	0,00564	0,00496	0,00178	0,00519	0,00570	0,00921	0,00701
40 sec	0,00098	0,00085	0,00006	0,00077	0,00162	0,00362	0,00288	0,00173
80 sec	0,00001	0,00002	0,00004	0,00003	0,00031	0,00174	0,00821	0,00441
<b>Σύνολο</b>	0,01127	0,01216	0,00974	0,00599	0,00713	0,01121	0,02127	0,01465

Πίνακας 5-42: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 4<sup>η</sup> δοκιμή

	ΔΟΚΙΜΗ 4η							
	707 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	354 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	177 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	88 $\mu\text{m}$	63 $\mu\text{m}$
0 sec	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10 sec	0,00115	0,01090	0,01660	0,01031	0,00428	0,00173	0,00136	0,00052
20 sec	0,00078	0,00000	0,00405	0,00653	0,00222	0,00061	0,00024	0,00016
40 sec	0,00031	0,00907	0,01079	0,00179	0,00002	0,00013	0,00102	0,00121
80 sec	0,00001	0,00074	0,00420	0,00862	0,00486	0,00510	0,00184	0,00017
<b>Σύνολο</b>	0,00224	0,02071	0,03564	0,02726	0,01138	0,00757	0,00445	0,00206

**Πίνακας 5-43: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 5<sup>η</sup> δοκιμή**

	<b>ΔΟΚΙΜΗ 5η</b>							
	<b>707 μm</b>	<b>500 μm</b>	<b>354 μm</b>	<b>250 μm</b>	<b>177 μm</b>	<b>125 μm</b>	<b>88 μm</b>	<b>63 μm</b>
0 sec	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10 sec	0,03177	0,01288	0,00552	0,00271	0,00142	0,00191	0,00139	0,00081
20 sec	0,01061	0,00431	0,00254	0,00094	0,00034	0,00008	0,00000	0,00000
40 sec	0,00746	0,01234	0,00297	0,00010	0,00013	0,00021	0,00038	0,00018
80 sec	0,00006	0,00032	0,00012	0,00067	0,00070	0,00053	0,00017	0,00001
<b>Σύνολο</b>	<b>0,04990</b>	<b>0,02984</b>	<b>0,01115</b>	<b>0,00441</b>	<b>0,00258</b>	<b>0,00272</b>	<b>0,00194</b>	<b>0,00101</b>

**Πίνακας 5-44: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 6<sup>η</sup> δοκιμή**

	<b>ΔΟΚΙΜΗ 6η</b>							
	<b>707 μm</b>	<b>500 μm</b>	<b>354 μm</b>	<b>250 μm</b>	<b>177 μm</b>	<b>125 μm</b>	<b>88 μm</b>	<b>63 μm</b>
0 sec	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10 sec	0,00043	0,00199	0,00526	0,00380	0,00288	0,00120	0,00048	0,00004
20 sec	0,00014	0,00295	0,00023	0,00239	0,00206	0,00118	0,00192	0,00121
40 sec	0,00069	0,00185	0,00056	0,00000	0,00002	0,00031	0,00024	0,00063
80 sec	0,00121	0,00044	0,00214	0,00153	0,00010	0,00025	0,00006	0,00000
<b>Σύνολο</b>	<b>0,00247</b>	<b>0,00723</b>	<b>0,00818</b>	<b>0,00772</b>	<b>0,00505</b>	<b>0,00293</b>	<b>0,00270</b>	<b>0,00188</b>

Για τα παραπάνω αθροίσματα των τετραγωνικών διαφορών κάθε κλάσματος προκύπτουν τα πραγματικά  $k_i$ , τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 5-45.

**Πίνακας 5-45: Ρυθμός λειοτρίβησης  $K(x)$ , για κάθε κλάσμα**

<b>d (μm)</b>	<b>Ρυθμός λειοτρίβησης <math>K(x)</math></b>							
	<b>707</b>	<b>500</b>	<b>354</b>	<b>250</b>	<b>177</b>	<b>125</b>	<b>88</b>	<b>63</b>
<b>1η Δοκιμή</b>	2,21E-04	2,06E-04	1,75E-04	1,25E-04	9,61E-05	6,73E-05	5,57E-05	3,89E-05
<b>2η Δοκιμή</b>	6,7E-05	6,27E-05	5,55E-05	5E-05	4,37E-05	3,63E-05	3E-05	2,27E-05
<b>3η Δοκιμή</b>	0,000112	0,000103	9,38E-05	8,33E-05	6,06E-05	4,94E-05	4,01E-05	3,11E-05
<b>4η Δοκιμή</b>	2,56E-05	1,52E-05	1,05E-05	8,14E-06	6,07E-06	4,52E-06	3,91E-06	3,36E-06
<b>5η Δοκιμή</b>	1,76E-05	1,19E-05	8,19E-06	5,82E-06	4,48E-06	3,48E-06	2,99E-06	2,64E-06
<b>6η Δοκιμή</b>	2,77E-05	2,22E-05	1,31E-05	8,88E-06	6,66E-06	4,89E-06	4,49E-06	3,86E-06

Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα από τις δοκιμές λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο ο ρυθμός λειοτρίβησης,  $K(x)$ , σχετίζεται με το μέγεθος  $x_i$  μέσω της εξίσωσης 5:17 ως εξής:

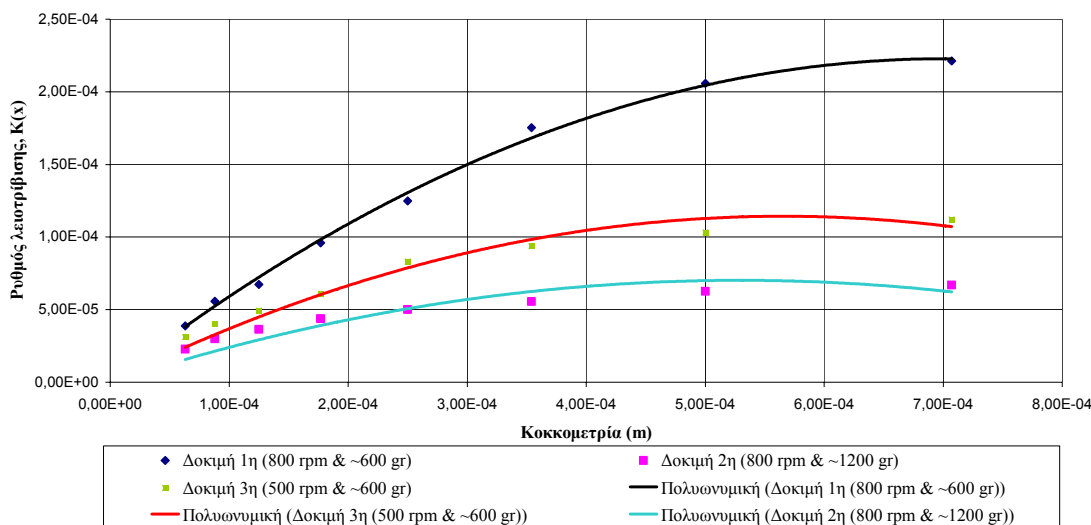
$$k_i = Ax_i^2 + Bx_i \quad (5:17)$$

Ο ρυθμός θραύσης που προέκυψε από την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων, δηλαδή τα  $k_i$  συναρτήσει της κοκκομετρίας  $x_i$ , για κάθε μία από τις δοκιμές λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο παρατίθενται στα διαγράμματα 5-39 και 5-40 και παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 5-46.

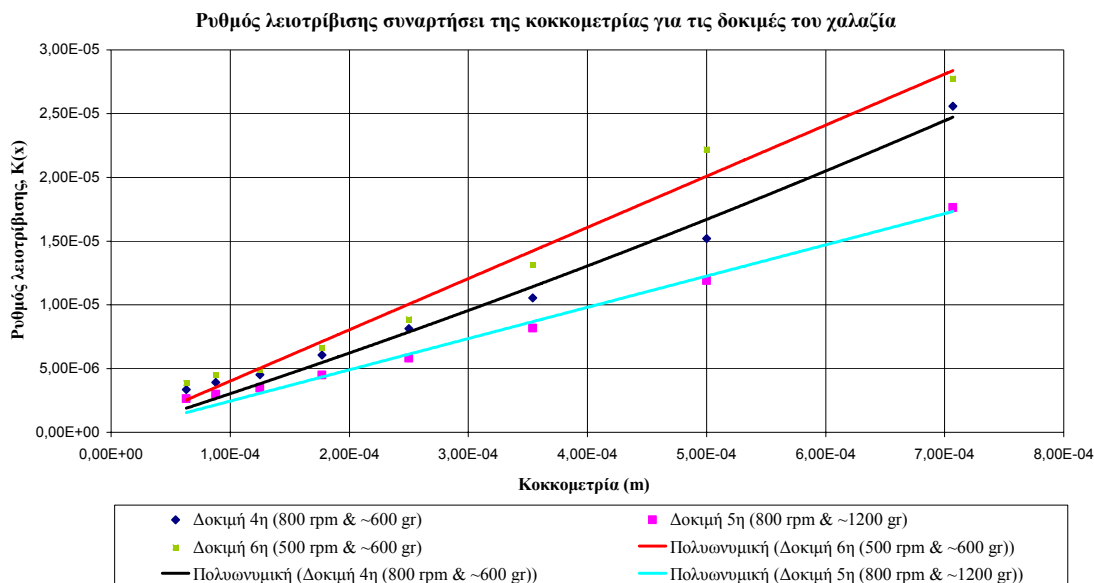
Πίνακας 5-46: Ρυθμός λειοτρίβησης για κάθε μία δοκιμή ξεχωριστά

	$K(x) = Ax^2 + Bx$	R.P.M.	Φορτίο (kg)	Υλικό
1η Δοκιμή	$y = -453,41x^2 + 0,6357x$	800	0,5871	Ασβεστόλιθος
2η Δοκιμή	$y = -250,71x^2 + 0,2653x$	800	1,2035	>>
3η Δοκιμή	$y = -357,73x^2 + 0,4045x$	500	0,5876	>>
4η Δοκιμή	$y = 7,6392x^2 + 0,0296x$	800	0,6603	Χαλαζιάς
5η Δοκιμή	$y = -0,0287x^2 + 0,0245x$	800	1,1935	>>
6η Δοκιμή	$y = -0,1585x^2 + 0,0402x$	500	0,5871	>>

Ρυθμός λειοτρίβησης συναρτήσει της κοκκομετρίας για τις δοκιμές του ασβεστόλιθου

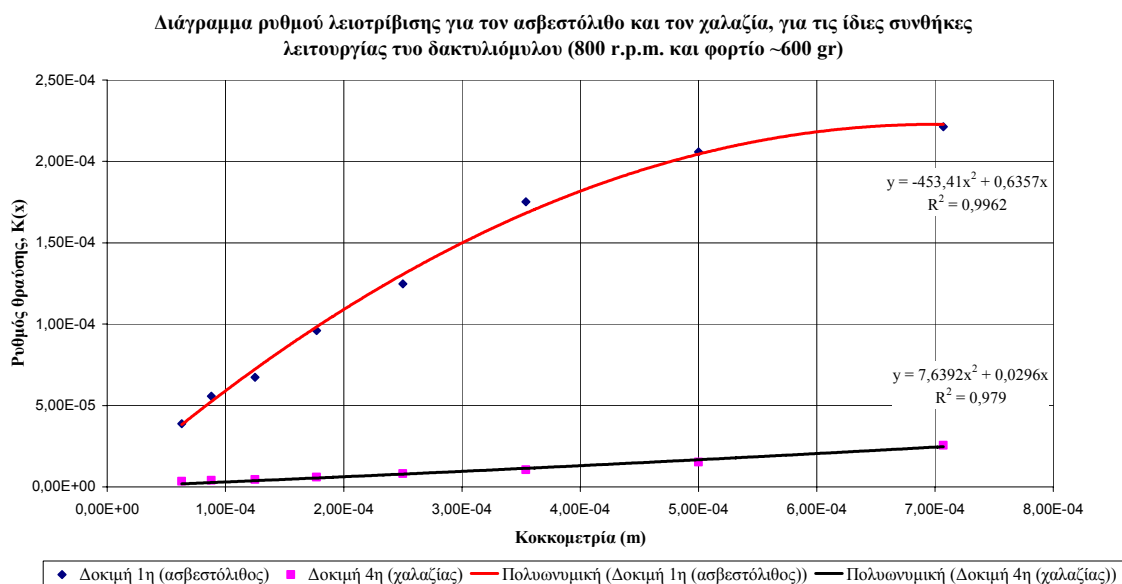
Διάγραμμα 5-39: Ρυθμός λειοτρίβησης για την 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> δοκιμή στον δακτυλιόμυλο (λειοτρίβηση ασβεστόλιθου)

Από το διάγραμμα 5-39 συμπεραίνουμε ότι η 1<sup>η</sup> δοκιμή έχει τον υψηλότερο ρυθμό λειοτρίβησης και από τις τρεις δοκιμές λειοτρίβησης του ασβεστόλιθου για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα. Το ίδιο ισχύει και για την 3<sup>η</sup> δοκιμή της οποίας ο ρυθμός λειοτρίβησης είναι μεγαλύτερος σε σχέση με της 2<sup>ης</sup> για κάθε κλάσμα.



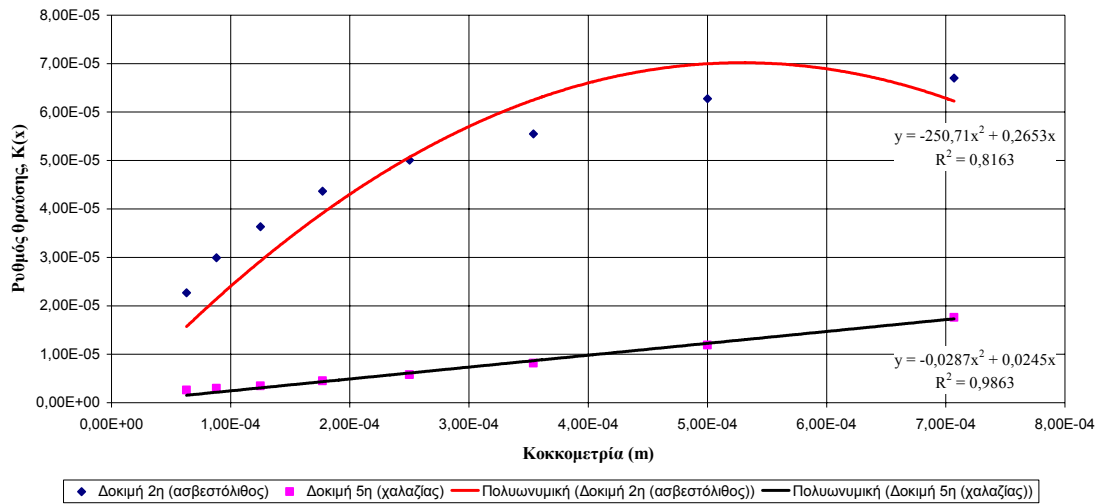
**Διάγραμμα 5-40: Ρυθμός λειοτρίβησης για την 4<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> και 6<sup>η</sup> δοκιμή στον δακτυλιόμυλο (λειοτρίβηση χαλαζία)**

Για τις δοκιμές λειοτρίβησης του χαλαζία η 6<sup>η</sup> δοκιμή έχει τον μεγαλύτερο ρυθμό λειοτρίβησης για όλα τα κλάσματα, ακολουθεί η 4<sup>η</sup> δοκιμή και τέλος η δοκιμή με το μικρότερο ρυθμό λειοτρίβησης είναι η 5<sup>η</sup>. Όσο αναφορά την σύγκριση μεταξύ του ρυθμού λειοτρίβησης του ασβεστόλιθου και του χαλαζία για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας του δακτυλιόμυλου, παρατίθενται τα διαγράμματα 5-41, 5-42 και 5-43.



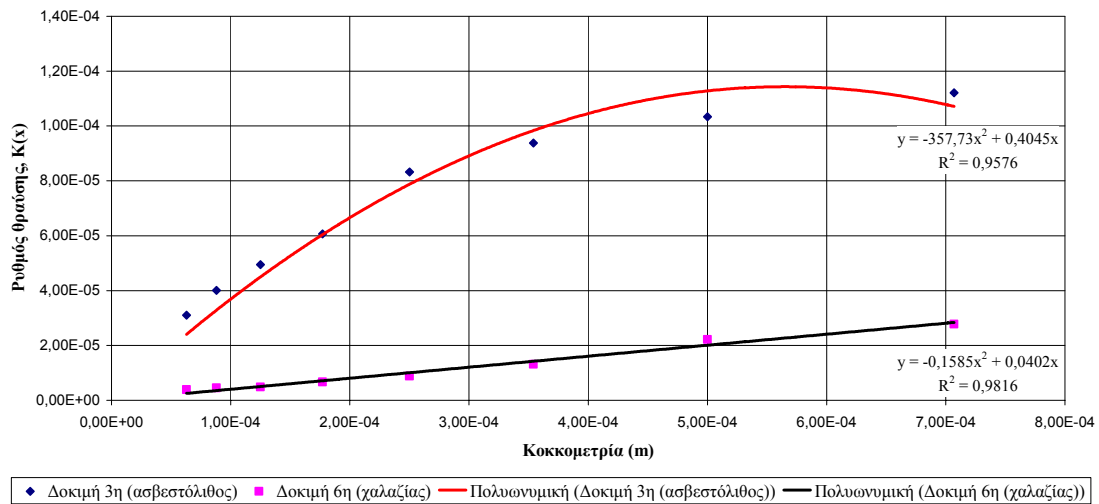
**Διάγραμμα 5-41: Ρυθμός λειοτρίβησης ασβεστόλιθου και χαλαζία για 800 r.p.m. & ~600 gr**

Διάγραμμα ρυθμού λειοτριβίσης για ασβεστόλιθο και χαλαζία για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας του δακτυλίου (800 r.p.m. και φορτίο ~1200 gr)



Διάγραμμα 5-42: Ρυθμός λειοτριβίσης ασβεστόλιθου και χαλαζία για 800 r.p.m. & ~1200 gr

Διάγραμμα ρυθμού λειοτριβίσης για ασβεστόλιθο και χαλαζία για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας του δακτυλίου (500 r.p.m. και φορτίο ~600 gr)



Διάγραμμα 5-43: Ρυθμός λειοτριβίσης ασβεστόλιθου και χαλαζία για 500 r.p.m. & ~600 gr

Από τα διαγράμματα 5-41 έως και 5-43 παρατηρούμε ότι ο ρυθμός λειοτριβίσης του ασβεστόλιθου είναι μεγαλύτερος σε σχέση με του χαλαζία και στις τρεις περιπτώσεις.

Για μεγάλου μεγέθους κόκκους της αρχικής τροφοδοσίας ο υπολογισμός του  $k_i$  είναι ασαφής για δύο κυρίως λόγους. Πρώτον, γιατί τα μεγάλου μεγέθους τεμαχίδια 'εξαφανίζονται' λειοτριβούνται πολύ γρήγορα στον μύλο και ο υπολογισμός του  $k_i$  βασίζεται σε πολύ λίγες μετρήσεις.

Δεύτερον, οι πολύ μεγάλοι κόκκοι μπορούν να υπερβαίνουν το βέλτιστο μέγεθος για λειοτρίβηση και να μην θραύονται άμεσα και να παρουσιάζουν έναν μικρότερο ρυθμό θραύσης. Για κόκκους μικρότερου μεγέθους από ότι τα μεγαλύτερα τεμαχίδια της αρχικής τροφοδοσίας, ο ρυθμός λειοτρίβησης  $k_i$  μπορεί να εκφραστεί από γραμμική εξίσωση:

$$k_i = a \cdot x_i \quad (5:18)$$

Οι τιμές της σταθεράς  $a$  διαφέρουν από μύλο σε μύλο και από υλικό σε υλικό και μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να κατηγοριοποιήσουν τα ορυκτά. Η σταθερά  $a$  είναι ένας δείκτης που περιγράφει την ευκολία με την οποία θραύεται ένα υλικό σε ένα συγκεκριμένο μύλο.

Όσο αναφορά την παράμετρο  $k_i$ , αφού το  $e_j$  είναι σε joule/kg, το  $k_i$  θα είναι σε kg/joule. Διαιρώντας την εξίσωση 5:18 με την πυκνότητα του υλικού, η οποία είναι σε kg/m<sup>3</sup>, έχουμε:

$$\frac{k_i}{\rho} = \frac{a}{\rho} \cdot x_i \quad (5:19)$$

Αντικαθιστώντας  $k_i/\rho = \lambda_i$  και  $\rho/a = \gamma$  έχουμε:

$$x_i = \gamma \cdot \lambda_i \quad (5:20)$$

Οι μονάδες για το  $\lambda_i$  είναι m<sup>3</sup>/joule και για το  $\gamma$  joule/m<sup>2</sup>. Η σταθερά  $\gamma$  έχει διαστάσεις ενέργειας προς επιφάνεια και είναι ίδια για όλα τα μεγέθη του εκάστοτε υλικού και εξαρτάται μόνο από την ποιότητα (δομή και σκληρότητα) του υλικού. Οι τιμές του  $\gamma$  για τις τρεις δοκιμές του ασβεστόλιθου και τις τρεις δοκιμές του χαλαζία στον δακτυλιόμυλο παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-47. Άλλα πειραματικά αποτελέσματα από την λειοτρίβηση υλικών στον εργαστηριακό ραβδόμυλο του εργαστηρίου του Εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης, παρουσιάζονται στον πίνακα 5-47.

**Πίνακας 5-47: Πειραματικές τιμές του ρυθμού λειοτρίβησης και της επιφανειακής τάσης από τις δοκιμές λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο**

Δακτυλιόμυλος					
Υλικό	No Δοκιμής	Συνθήκες (kg / RPM)	$a$ (kg/joule.m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (joule/m <sup>2</sup> )
Ασβεστόλιθος	1η	0.6 / 800	0,6357	2710	4.263
	2η	1.2 / 800	0,4045	2710	6.700
	3η	0.6 / 500	0,2653	2710	10.215
Χαλαζία	4η	0.6 / 800	0,0296	2650	89.527
	5η	1.2 / 800	0,0245	2650	108.163
	6η	0.6 / 500	0,0402	2650	65.920



**Πίνακας 5-48: Πειραματικές τιμές του ρυθμού λειοτριβήσης και της επιφανειακής τάσης από δοκιμές λειοτριβήσης στον εργαστηριακό ραβδόμυλο**

<b>Εργαστηριακός ραβδόμυλος</b>				
<b>Υλικό</b>	<b>Συνθήκες (kg / RPM)</b>	<b>α (kg/joule.m)</b>	<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>γ (joule/m<sup>2</sup>)</b>
Λατερίτης	1.0 / 70	0,36	3900	10.780
Μάρμαρο	1.0 / 70	0,50	2700	5.453
Μαγνησίτης	1.0 / 70	0,26	3060	11.868
Χαλαζίας	1.0 / 70	0,21	2650	12.560

Η συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα όγκου του ραβδόμυλου είναι η εξής:

$$\frac{ΙΣΧΥΣ}{ΟΓΚΟΣ} = \frac{20}{7,6} \frac{watt}{lit} = 2,63 \frac{watt}{lit}$$

Η μέγιστη συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα όγκου του δακτυλιόμυλου για τις δοκιμές που έγιναν είναι η εξής:

$$\frac{ΙΣΧΥΣ}{ΟΓΚΟΣ} = \frac{2800}{9,8} \frac{watt}{lit} = 285,7 \frac{watt}{lit}$$

Η διαφορά όσο αναφορά την συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα όγκου μεταξύ του δακτυλιόμυλου και του εργαστηριακού ραβδόμυλου είναι κάτι παραπάνω από εμφανής. Παρόλα αυτά πρέπει να τονίσουμε ότι η ισχύς ανά μονάδα όγκου σε ένα βιομηχανικό ραβδόμυλο είναι περίπου 15(watt/lit). Η μεγάλη συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα όγκου που παρουσιάζει ο δακτυλιόμυλος είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα όσο αναφορά την λειοτριβήση μικρών κλασμάτων τα οποία ο ραβδόμυλος αδυνατεί να λειοτριβήσει περεταίρω.

## 5.5 Πρόγραμμα πρόβλεψης της κοκκομετρικής κατανομής των προϊόντων λειοτρίβησης του δακτυλιόμυλου

Η ενότητα Α αποτελεί ένα συμπληρωματικό πρόγραμμα σκοπός του οποίου είναι η πρόβλεψη της κοκκομετρικής κατανομής των προϊόντων από την λειοτρίβηση υλικού. Σύμφωνα με αυτό, ο χρήστης αρχικά εισάγει το πλήθος των κοκκομετρικών κλασμάτων και τις τιμές αυτών σε  $\mu\text{m}$ . Μετά χρειάζεται να συμπληρώσει τη δεύτερη στήλη (fraction passing) με το διερχόμενο κλάσμα για κάθε κοκκομετρία.

**TUC Project v2.1**

Program Help

A) Grain distribution B) Grinding simulation

E1 (J/kg): 15926 E2 (J/kg): 29978 E3 (J/kg): 52461

Size ( $\mu\text{m}$ ):	Fraction passing:	K(x):
707	0.704	0.000485267919668
500	0.38	0.000343133
354	0.248	0.000242910668112
250	0.18	0.00017153325
177	0.147	0.000121438667028
125	0.126	8.57583125E-05
88	0.114	6.0372119808E-05
63	0.097	4.3220111508E-05
44.5	0.083	3.0528053493E-05
31.5	0.07	2.1609527877E-05
22.3	0.059	1.529806455828E-05

A: 0.532 B: 0.686 Γ: 0

K(x) type

☐  $Ax^2 + Bx + \Gamma$   
☒  $Ax^2 + Bx$   
☐  $Ax + B$

Compute

Εικόνα 5-4: Ενότητα Α-Πρόβλεψη κοκκομετρικής κατανομής προϊόντων

Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει τον τύπο της εξίσωσης που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ρυθμού λειοτρίβησης,  $K(x)$ , κάθε κλάσματος (Εικόνα 5-4), καθώς και του συντελεστής της συγκεκριμένης εξίσωσης  $A$ ,  $B$  και  $\Gamma$ . Επίσης χρειάζεται να εισαχθούν

και η ενέργειες λειοτριβήσης για κάθε ένα από τα τρία στάδια λειοτριβήσης (E1, E2, E3) σε J/kg. Το πρόγραμμα στην συνέχεια υπολογίζει, μέσω του επιλεγμένου τύπου, το  $K(x)$  για κάθε κλάσμα. Αρχικά το πρόγραμμα υπολογίζει το μέγεθος  $W_i$  για κάθε κλάσμα μέσω της εξίσωσης 5:21,

$$W_i = (1 - P_i) \left( 1 - e^{-k_i \cdot e_i} \right) \quad (5:21)$$

εν συνέχεια υπολογίζει την κοκκομετρική κατανομή των προϊόντων για κάθε μία από τις τρεις ενέργειες λειοτριβήσης μέσω της εξίσωσης 5:22 και στη συνέχεια μας εμφανίζει στις τρεις τελευταίες στήλες τη διερχόμενη μάζα για κάθε κλάσμα η οποία έχει αναχθεί στη μονάδα μέσω της εξίσωσης 5:23.

$$P_{i,T_i} = W_i + P_i \quad (5:22)$$

$$Mass\_in\_mill\_finer(\%) = \frac{P_{i,T_i}}{M} \quad (5:23)$$

όπου M: η συνολική μάζα του υλικού (material load).

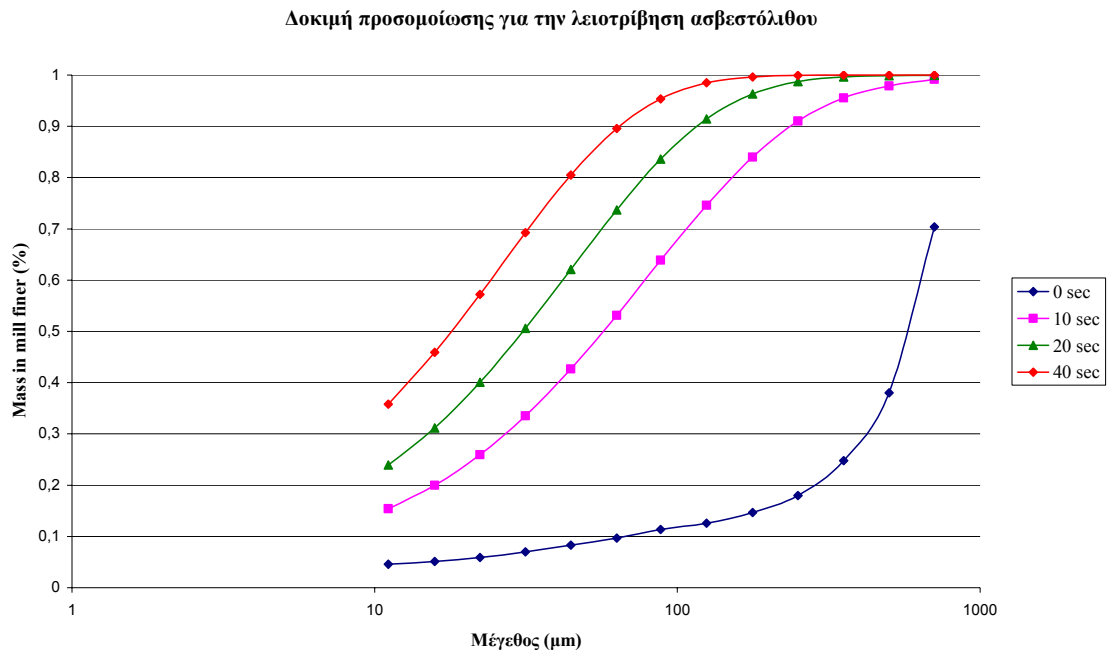
### 5.5.1 Αποτελέσματα

Με βάση το παραπάνω πρόγραμμα έγιναν δύο δοκιμές πρόβλεψης της κοκκομετρικής κατανομής των προϊόντων λειοτριβήσης. Στην πρώτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα μετρήσεις από την 1<sup>η</sup> πειραματική δοκιμή λειοτριβήσης ασβεστόλιθου και στην δεύτερη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά αποτελέσματα από την 4<sup>η</sup> πειραματική δοκιμή λειοτριβήσης χαλαζία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

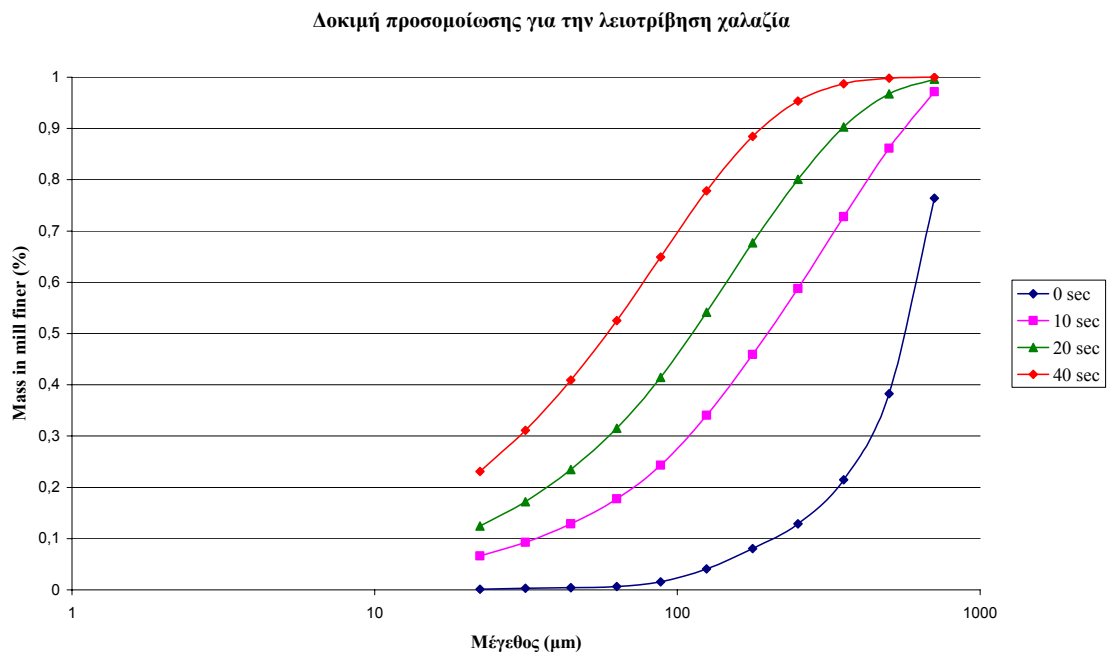
**Πίνακας 5-49: Πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές προσομοίωσης**

Ασβεστόλιθος 1ης δοκιμής		Χαλαζίας 4ης δοκιμής	
Size (μm)	Fraction passing	Size (μm)	Fraction passing
707	0,704	707	0,764
500	0,380	500	0,383
354	0,248	354	0,215
250	0,180	250	0,129
177	0,147	177	0,081
125	0,126	125	0,041
88	0,114	88	0,015
63	0,097	63	0,007
44,5	0,083	44,5	0,005
31,5	0,070	31,5	0,003
22,3	0,059	22,3	0,002
15,8	0,051		
11,1	0,046		

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται γραφικά στα διαγράμματα



**Διάγραμμα 5-44: Αποτελέσματα προσομοίωσης λειοτρίβησης ασβεστόλιθου στον δακτυλιόμυλο**



**Διάγραμμα 5-45: Αποτελέσματα προσομοίωσης λειοτρίβησης χαλαζία στον δακτυλιόμυλο**

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο, η οθόνη του Η/Υ έδειχνε συνεχώς την ένδειξη ισχύος που απαιτούσε ο δακτυλιόμυλος την εκάστοτε χρονική στιγμή. Έτσι έγιναν τρεις σημαντικές παρατηρήσεις:

- Η απαιτούμενη, από τον δακτυλιόμυλο, ισχύς έφτανε την μέγιστη τιμή της κατά την έναρξη της εκάστοτε δοκιμής, και σταδιακά μειωνόταν μέχρι που σταθεροποιούνταν σε μία τιμή μέχρι το τέλος της δοκιμής.
- Η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας του κεντρικού άξονα, για την ίδια ποσότητα υλικού μέσα στον δακτυλιόμυλο.
- Η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται με την αύξηση της ποσότητας του προς λειοτρίβηση υλικού, για την ίδια γωνιακή ταχύτητα του κεντρικού άξονα.

Η τελευταία παρατήρηση σε συνδυασμό με την εξίσωση 4:15 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής αντίστασης στην κύλιση  $\alpha$ , εξαρτάται από τον όγκο του προς λειοτρίβηση υλικού, δηλαδή από το πάχος του κατανεμημένου υλικού στην εσωτερική περιφέρεια του δακτυλιόμυλου και όχι από την γωνιακή ταχύτητα. Αυτό αποδεικνύεται από την εξίσωση 4:21, από την οποία προκύπτει το διάγραμμα 4-4.

Όλα τα εξαρτήματα του δακτυλιόμυλου έχουν απλές γεωμετρικές μορφές, συγκεκριμένα είναι κυλινδρικές ράβδοι ή κύλινδροι και το κόστος απόκτησής του ή κατασκευής τους είναι πολύ χαμηλό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το κόστος κατασκευής και συντήρησης του να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, το οποίο σε συνδυασμό με την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (η οποία ρυθμίζεται μέσω των κατασκευαστικών παραμέτρων) καθιστούν τον δακτυλιόμυλο κατάλληλο για βιομηχανικές εφαρμογές.

Η θεωρητική ανάλυση αποδεικνύει ότι η χρήση κυκλικών δακτυλίων αντί ενός ενιαίου οδηγεί σε λειοτριβήσεις με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και σε προϊόντα με αυξημένο ποσοστό λεπτομερών κλασμάτων. Η ρύθμιση των παραμέτρων σχεδιασμού του δακτυλιόμυλου και των συνθηκών λειτουργίας του, συναρτήσκει των χαρακτηριστικών του εκάστοτε υλικού, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος. Ο βαθμός απόδοσης της λειοτρίβησης βελτιώνεται αυξάνοντας την ενεργή επιφάνεια ανά μονάδα όγκου του δακτυλιόμυλου και παράλληλα μειώνει το κόστος ανά μονάδα χρόνου και όγκου.

Σημείο αναφοράς αποτελεί επίσης και η ‘προσαρμοστικότητα’ του δακτυλιόμυλου στις ανάγκες λειοτρίβησης του εκάστοτε υλικού. Η μεταβολή του λόγου ορθών προς διατμητικών δυνάμεων ρυθμίζεται μέσω της γωνίας σχεδιασμού  $\theta$ . Η ρύθμιση της γωνίας  $\theta$  επιτυγχάνεται με την

αλλαγή των υφιστάμενων δακτυλίων, με άλλων διαφορετικής διαμέτρου ( $r_o$ ) και πάχους ( $r_i$ ). Ένας άλλος τρόπος ρύθμισης της  $\theta$  είναι μεταβάλλοντας την απόσταση των συνδετικών ράβδων  $l$  ή το πάχος τους  $r$ . Οι μεταβολές που αναφέρθηκαν ρυθμίζουν την τιμή της γωνίας  $\theta$  σύμφωνα με την εξίσωση (4:1). Ο βέλτιστος συνδυασμός των δυνάμεων  $P$  και  $T$ , έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη λειοτρίβηση των μικρότερων κλασμάτων του υλικού, όσο αναφορά την κατανομή της κοκκομετρίας καθώς και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας για την συγκεκριμένη διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό μέσω της γωνίας σχεδιασμού  $\theta$ , υπάρχει η δυνατότητα βελτιστοποίησης της λειτουργίας του δακτυλιόμυλου, δηλαδή ρύθμισης των τάσεων (ορθών και διατμητικών) που ασκούν οι δακτύλιοι στο υλικό κατά την λειοτρίβηση. Ουσιαστικά ο δακτυλιόμυλος δύναται να λειοτριβήσει υλικά με διαφορετικές ορυκτολογικές ιδιότητες έχοντας σε όλες τις περιπτώσεις υψηλό βαθμό απόδοσης, εφόσον ρυθμιστεί κατάλληλα και σύμφωνα με την θεωρητική ανάλυση.

Η περιγραφή του φαινομένου της λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο έγινε με την βοήθεια ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο συνδέει την ενέργεια με τον ρυθμό λειοτρίβησης ως εξής:

$$W_i = (1 - P_i) \left( 1 - e^{-k_i \cdot e_i} \right)$$

$$W_i = R_i \left( 1 - e^{-k_i \cdot e_i} \right)$$

όπου  $W_i$ : το παραγόμενο κλάσμα,  $P_i$ : το διερχόμενο κλάσμα,  $R_i$ : το παραμένον κλάσμα,  $k_i$ : ο ρυθμός λειοτρίβησης και  $e_i$ : η ενέργεια (j/kg).

Ο ρυθμός λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο επηρεάζεται από δύο παραμέτρους οι οποίες είναι ο ρυθμός περιστροφής και το φορτίο του μύλου. Όσο αναφορά τον ρυθμό λειοτρίβησης του ασβεστόλιθου, που περιγράφεται στο Διάγραμμα 5-39 φαίνεται ξεκάθαρα ότι είναι μεγαλύτερος για την 1<sup>η</sup> δοκιμή, δηλαδή τον μεγαλύτερο ρυθμό λειοτρίβησης τον έχει η δοκιμή με τον μεγαλύτερο ρυθμό περιστροφής (800 r.p.m.) και το μικρότερο φορτίο (~600 gr). Άρα συμπεραίνουμε ότι (όσο αναφορά τον ασβεστόλιθο) για δοκιμές με ίδιο φορτίο, μεγαλύτερο ρυθμό λειοτρίβησης έχει η δοκιμή με τον μεγαλύτερο ρυθμό περιστροφής. Αν συγκρίνουμε, στο ίδιο διάγραμμα, την 1<sup>η</sup> και την 2<sup>η</sup> δοκιμή συμπεραίνουμε ότι για δοκιμές που έχουν τον ίδιο ρυθμό περιστροφής, μεγαλύτερο ρυθμό λειοτρίβησης έχει αυτή η οποία έχει το μικρότερο φορτίο. Συγκρίνοντας την 3<sup>η</sup> με την 2<sup>η</sup> δοκιμή και λαμβάνοντας υπ' όψην όλα τα παραπάνω καταλήγουμε στο ότι, όσο αναφορά τον ασβεστόλιθο, ο ρυθμός λειοτρίβησης εξαρτάται περισσότερο από το φορτίο και αυξάνεται με τη μείωσή του. Όσο αναφορά τον ρυθμό λειοτρίβησης του χαλαζία στον δακτυλιόμυλο, που περιγράφεται στο Διάγραμμα 5-40, υπάρχει μία διαφοροποίηση του ρυθμού λειοτρίβησης σε σχέση με τον ρυθμό λειοτρίβησης του ασβεστόλιθου. Παρατηρούμε η δοκιμή με το μεγαλύτερο ρυθμό λειοτρίβησης είναι η 6<sup>η</sup> δοκιμή δηλαδή η δοκιμή με το μικρότερο φορτίο και το μικρότερο ρυθμό περιστροφής. Αν συγκρίνουμε την 6<sup>η</sup> με την 4<sup>η</sup> δοκιμή βλέπουμε ότι έχουν το ίδιο φορτίο (~600 gr) αλλά η 6<sup>η</sup> έχει μικρότερο ρυθμό περιστροφής σε σχέση με την 4<sup>η</sup>. Άρα καταλήγουμε στο ότι όσο αναφορά τον χαλαζία ο ρυθμός

λειτουργίβησης είναι αντιστρόφως ανάλογος του ρυθμού περιστροφής όπως στις περιπτώσεις όπου το φορτίο είναι το ίδιο (6<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> δοκιμή), δηλαδή ο ρυθμός λειτουργίβησης είναι μεγαλύτερος για την δοκιμή που έχει μικρότερο ρυθμό περιστροφής. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην αυξημένη σκληρότητα που παρουσιάζει ο χαλαζίας σαν υλικό σε σχέση με τον ασβεστόλιθο και γι' αυτό φαίνεται να μην ευνοείται ο υψηλός ρυθμός περιστροφής κατά την λειτουργίβησή του.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν όσο αναφορά την κατανάλωση ενέργειας δείχνει ότι ο δακτυλιόμυλος, στις δοκιμές λειτουργίβησης που πραγματοποιήθηκαν έχει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα αποτελέσματα λειτουργίβησης στον ραβδόμυλο. Η διαφορά όμως στην κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των δύο μύλων δεν είναι όμως πραγματική αφού για τον μεν δακτυλιόμυλο η καταγραφή της παρεχόμενης ισχύος γινόταν στην οθόνη του H/Y, ενώ για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας στον ραβδόμυλο είχε ληφθεί στους υπολογισμούς η καθαρή ισχύς. Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα η καταναλισκόμενη ενέργεια στον ραβδόμυλο είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρουσιάζεται.

Το πλεονέκτημα το δακτυλιόμυλου έναντι του ραβδόμυλου είναι η αυξημένη συγκέντρωση ισχύος που παρουσιάζει ανά μονάδα όγκου του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένας δακτυλιόμυλος μικρού όγκου να αντικαθιστά πολύ μεγαλύτερους, σε όγκο, ραβδόμυλους. Επίσης η μεγάλη συγκέντρωση ισχύς δίνει την ικανότητα στον δακτυλιόμυλο να είναι αποτελεσματικότερος για λειτουργίβησεις σε μικρά κλάσματα όπου οι συμβατικοί μύλοι κυλιόμενου φορτίου (ραβδόμυλος, σφαιρόμυλος) χρειάζονται πολύ περισσότερο χρόνο, τόσο που η λειτουργίβηση να καθίσταται πρακτικά αδύνατη. Ο περιορισμός του ραβδόμυλου όσο αναφορά την ισχύ που μπορεί να δεχτεί, οφείλεται στην κρίσιμη συχνότητας περιστροφής του, πέρα από την οποία το υλικό δεν λειτουργεί αλλά απλά περιστρέφεται μαζί με το κέλυφός του.

Η συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα όγκου του ραβδόμυλου είναι η εξής:

$$\frac{ΙΧΥΣ}{ΟΓΚΟΣ} = \frac{20 \text{ watt}}{7,6 \text{ lit}} = 2,63 \frac{\text{watt}}{\text{lit}}$$

Η μέγιστη συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα όγκου του δακτυλιόμυλου για τις δοκιμές που έγιναν είναι η εξής:

$$\frac{ΙΧΥΣ}{ΟΓΚΟΣ} = \frac{2800 \text{ watt}}{9,8 \text{ lit}} = 285,7 \frac{\text{watt}}{\text{lit}}$$

Η διαφορά όσο αναφορά την συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα όγκου μεταξύ του δακτυλιόμυλου και του εργαστηριακού ραβδόμυλου είναι κάτι παραπάνω από εμφανής. Παρόλα αυτά πρέπει να τονίσουμε ότι η ισχύς ανά μονάδα όγκου σε ένα βιομηχανικό ραβδόμυλο είναι περίπου 15(watt/lit). Ακόμα και σ' αυτή τη περίπτωση η διαφορά μεταξύ του δακτυλιόμυλου και του ραβδόμυλου είναι μεγάλη.

Γενικά παρατηρείται ότι οι έρευνες όσο αναφορά τις μηχανές λειοτρίβησης επικεντρώνονται σε μύλους οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα όγκου. Ο λόγος είναι ότι οι μύλοι αυτοί απαιτούν μικρότερο χώρο και κυρίως είναι αποτελεσματικότεροι για λειοτριβήσεις σε μικρά κλάσματα όπου οι συμβατικοί μύλοι κυλιόμενου φορτίου αδυνατούν να φέρουν εις πέρας. Λαμβάνοντας υπ' όψη όλα τα παραπάνω συμπεράσματα καταλήγουμε στο ότι ο δακτυλιόμυλος αποτελεί μία αξιόλογη εναλλακτική λύση όσο αναφορά τις μηχανές λειοτρίβησης για την συνεχώς αυξανόμενη τάση παραγωγής κονιαμάτων με χαμηλό κόστος.



## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Η. Σταμπολιάδης (2001). Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων, Χανιά
- [2] Wendehorst, R. (1975). Dipl.-Ing. Reinhard Wendehorst Baustoffkunde, Hannover
- [3] E. Stamboliadis (2004). Energy-size relationship in batch grinding, case studies of marble and quartz, Int. Min.Proc. Symposium, Cesme, Turkey
- [4] Η. Σταμπολιάδης (2001). Μηχανική των τεμαχιδίων, Χανιά
- [5] Ζ. Αγιουτάντης (2002). Μηχανική πετρωμάτων, Χανιά
- [6] Β.Α. Πετράκης (2004). Σχέση ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την λειοτρίβηση ψαθυρών υλικών, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
- [7] P.R. Rittinger, (1867). Lehrbuch der Aufbereitungskunde, Berlin
- [8] F. Kick, (1885). Das Gesetz der proportionalen widerstande und seine. Anwendung, Arthur Felix, Leiozig
- [9] F.C. Bond, (1952). The third theory of comminution, Trans. AIME, Mining Eng
- [10] R.J. Charles (1957). Energy – size reduction relationships in comminution, Trans. AIME, Mining Eng
- [11] E. Stamboliadis (1996). The relationship of energy and particle size in comminution, Mining and Metallurgical Annals, vol.6(2)
- [12] Σ.Ι. Τσιμπούκης (1995). Μελέτη θραύσης και λειοτρίβησης ψαθυρών υλικών, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
- [13] Η. Σταμπολιάδης (2000). Σχέση ενέργειας και μεγέθους τεμαχίων κατά την κατάτμηση, 3<sup>ο</sup> Συνέδριο Ορυκτού Πλούτου, Τόμος Β, Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος, Αθήνα
- [14] V. Spitas, P. Makris, M. Founti, (1999). A novel dry pulverizer for low cost production of powders, to appear in Particulate Sci. and Techn: an Int. J., Taylor & Francis
- [15] D.W. Fuerstenau and P.C. Kapur, (1994). A new approach to assessing the grindability of solids and the energy efficiency of grinding mills, Minerals and Metallurgical Processing, vol 11
- [16] K. Hamada, S. Yamamoto, M. Nagao and M. Senna, (1996). Measurement of the compressive force caused by the grinding ring in a multi-ring media mill, Chem. Eng. Sci. of Japan
- [17] P. Makris (1995). Optimale Konstruktion Von Feinstzerkleinerungs-maschinen, Proceedings of ICED 95, ed. V. Hubka, Praha

[18] E. Th. Stamboliadis (2004). Energy distribution in comminution. A new approach to the laws of Rittinger, Bond and Kick, C.M.Q. vol 43, No 2, pp 249-258

[19] E. Th. Stamboliadis (2004). Application of computer assisted mathematical analysis for the interpretation of mineral grinding data, 1<sup>st</sup> Int.Conf. “From scientific computing to computational engineering”, Athens

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 4-1: Μεταλλικός κύλινδρος–Σύνδεση δακτυλιόμυλου με ηλεκτροκινητήρα μέσω ιμάντα .....	15
Εικόνα 4-2: Μεταλλικό πλαίσιο-συνδετικές ράβδοι με δακτυλίους και βραχίονες.....	16
Εικόνα 4-3: Υπολογισμός των γεωμετρικών παραμέτρων του δακτυλιόμυλου .....	25
Εικόνα 4-4: Υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται στους κόκκους.....	26
Εικόνα 4-5: Υπολογισμός παραμέτρων που ‘αξιολογούν’ την απόδοση του δακτυλιόμυλου .....	27
Εικόνα 4-6: Σύστημα κινητήρα – ιμάντα και δακτυλιόμυλου .....	39
Εικόνα 4-7: Μετατροπέας συχνότητας της LENZE (frequency inverter) .....	40
Εικόνα 5-1: Εργαστηριακός θραυστήρας με σιαγόνες τύπου FRITSCH pulverisette 1 .....	41
Εικόνα 5-2: Εργαστηριακός ραβδόμυλος τύπου Sepor .....	43
Εικόνα 5-3: Ο κοκκομετρικός αναλυτής Mastersizer S της Malvern .....	44
Εικόνα 5-4: Ενότητα Α-Πρόβλεψη κοκκομετρικής κατανομής προϊόντων .....	92

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για μερικά πετρώματα .....	5
Σχήμα 2-2: Γραμμικά ελαστικό υλικό (α), τέλεια ελαστικό υλικό (b) και τέλεια ελαστικό με υστέρηση (c).....	6
Σχήμα 4-1: Τρισδιάστατη τομή του δακτυλιόμυλου .....	15
Σχήμα 4-2: Δυνάμεις που ασκούνται σε κόκκους κατά την λειοτρίβηση, στον δακτυλιόμυλο.....	20
Σχήμα 4-3: Επίπεδο επαφής σε συμβατικό μύλο και στον δακτυλιόμυλο.....	31
Σχήμα 4-4: Αύξηση του αριθμού των δακτυλίων .....	32
Σχήμα 4-5: On line μεταβολή της γωνίας $\theta$ , μέσω αλλαγής της απόστασης των συνδετικών ράβδων ( $l$ ) .....	33
Σχήμα 4-6: Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σωματίδιο κατά την λειοτρίβηση στον δακτυλιόμυλο ...	34
Σχήμα 4-7: Ομοιόμορφα κατανεμημένο υλικό στην περιφέρεια του δακτυλιόμυλου με πάχος $h$ .....	35
Σχήμα 4-8: Δυνάμεις $P'$ και $T'$ που ασκεί το υλικό στο δακτύλιο .....	36

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4-1: Συντελεστής δύναμης $f$ , συναρτήσει της γωνίας σχεδιασμού $\theta'$ , για διάφορες τιμές του συντελεστή αντίστασης στην κύλιση $\alpha$ .....	28
Διάγραμμα 4-2: Λόγος ορθών προς διατμητικών δυνάμεων ( $f$ ), συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης $\alpha$ .....	29
Διάγραμμα 4-3: Βαθμός απόδοσης $\eta$ , συναρτήσει της γωνίας σχεδιασμού $\theta^0$ .....	29
Διάγραμμα 4-4: Συντελεστής αντίστασης στην κύλιση $\alpha$ , συναρτήσει του πάχους του υλικού $h$ .....	37
Διάγραμμα 4-5: Βαθμός πλήρωσης συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης στην κύλιση $\alpha$ .....	38
Διάγραμμα 5-1: Κοκκομετρική κατανομή τροφοδοσίας ασβεστόλιθου .....	48
Διάγραμμα 5-2: Κοκκομετρική κατανομή τροφοδοσίας χαλαζία .....	49
Διάγραμμα 5-3: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (1 <sup>η</sup> Δοκιμή) .....	50
Διάγραμμα 5-4: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (2 <sup>η</sup> Δοκιμή) .....	51
Διάγραμμα 5-5: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (3 <sup>η</sup> Δοκιμή) .....	51
Διάγραμμα 5-6: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (4 <sup>η</sup> Δοκιμή) .....	52
Διάγραμμα 5-7: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (5 <sup>η</sup> Δοκιμή) .....	52
Διάγραμμα 5-8: Καμπύλες της αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης (6 <sup>η</sup> Δοκιμή) .....	53
Διάγραμμα 5-9: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (1 <sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log .....	55
Διάγραμμα 5-10: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (2 <sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log .....	55
Διάγραμμα 5-11: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του ασβεστόλιθου (3 <sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log .....	56
Διάγραμμα 5-12: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (4 <sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log .....	56

Διάγραμμα 5-13: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (5 <sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log .....	57
Διάγραμμα 5-14: Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής του διερχόμενου βάρους του χαλαζία (6 <sup>η</sup> Δοκιμή) για διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης με συντεταγμένες log-log .....	57
Διάγραμμα 5-15: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του ασβεστόλιθου και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 1 <sup>η</sup> δοκιμή .....	58
Διάγραμμα 5-16: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του ασβεστόλιθου και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 2 <sup>η</sup> δοκιμή .....	58
Διάγραμμα 5-17: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του ασβεστόλιθου και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 3 <sup>η</sup> δοκιμή .....	59
Διάγραμμα 5-18: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του χαλαζία και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 4 <sup>η</sup> δοκιμή .....	59
Διάγραμμα 5-19: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του χαλαζία και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 5 <sup>η</sup> δοκιμή .....	60
Διάγραμμα 5-20: Σημεία του log αθρ. διερχόμενου βάρους % σε συνάρτηση με το log μέγεθος του χαλαζία και οι γραμμικές τους προσεγγίσεις για την 6 <sup>η</sup> δοκιμή .....	60
Διάγραμμα 5-21: Ισχύς του δακτυλιόμυλου (αθροιστική) συναρτήσει του χρόνου για δοκιμές που έγιναν με τον ίδιο ρυθμό περιστροφής.....	65
Διάγραμμα 5-22: Ισχύς του δακτυλιόμυλου (αθροιστική) συναρτήσει του χρόνου για δοκιμές που έγιναν με το ίδιο φορτίο .....	65
Διάγραμμα 5-23: Κατανάλωση ενέργειας στον δακτυλιόμυλο (αθροιστική) συναρτήσει του χρόνου για δοκιμές που έγιναν με τον ίδιο ρυθμό περιστροφής .....	66
Διάγραμμα 5-24: Κατανάλωση ενέργειας στον δακτυλιόμυλο (αθροιστική) συναρτήσει του χρόνου για δοκιμές που έγιναν με το ίδιο φορτίο.....	66
Διάγραμμα 5-25: Ειδική ενέργεια (joule/kg) συναρτήσει του χρόνου για τις δοκιμές λειοτρίβησης ασβεστόλιθου .....	67
Διάγραμμα 5-26: Ειδική ενέργεια (joule/kg) συναρτήσει του χρόνου για τις δοκιμές λειοτρίβησης χαλαζία.....	68
Διάγραμμα 5-27: Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον ασβεστόλιθο (1 <sup>η</sup> δοκιμή) .....	74
Διάγραμμα 5-28 Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον ασβεστόλιθο (2 <sup>η</sup> δοκιμή) .....	75

Διάγραμμα 5-29 Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον ασβεστόλιθο (3 <sup>η</sup> δοκιμή)	75
Διάγραμμα 5-30 Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον χαλαζία (4 <sup>η</sup> δοκιμή).....	76
Διάγραμμα 5-31 Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον χαλαζία (5 <sup>η</sup> δοκιμή).....	76
Διάγραμμα 5-32: Παραχθέν βάρος συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για τον χαλαζία (6 <sup>η</sup> δοκιμή)....	77
Διάγραμμα 5-33: Παραχθείσα ποσότητα ασβεστόλιθου (%) για την 1 <sup>η</sup> δοκιμή .....	79
Διάγραμμα 5-34 Παραχθείσα ποσότητα ασβεστόλιθου (%) για την 2 <sup>η</sup> δοκιμή.....	80
Διάγραμμα 5-35 Παραχθείσα ποσότητα ασβεστόλιθου (%) για την 3 <sup>η</sup> δοκιμή.....	80
Διάγραμμα 5-36 Παραχθείσα ποσότητα χαλαζία (%) για την 4 <sup>η</sup> δοκιμή .....	81
Διάγραμμα 5-37 Παραχθείσα ποσότητα χαλαζία (%) για την 5 <sup>η</sup> δοκιμή .....	81
Διάγραμμα 5-38: Παραχθείσα ποσότητα χαλαζία (%) για την 6 <sup>η</sup> δοκιμή .....	82
Διάγραμμα 5-39: Ρυθμός λειοτρίβησης για την 1 <sup>η</sup> , 2 <sup>η</sup> και 3 <sup>η</sup> δοκιμή στον δακτυλιόμυλο (λειοτρίβηση ασβεστόλιθου).....	87
Διάγραμμα 5-40: Ρυθμός λειοτρίβησης για την 4 <sup>η</sup> , 5 <sup>η</sup> και 6 <sup>η</sup> δοκιμή στον δακτυλιόμυλο (λειοτρίβηση χαλαζία) .....	88
Διάγραμμα 5-41: Ρυθμός λειοτρίβησης ασβεστόλιθου και χαλαζία για 800 r.p.m. & ~600 gr.....	88
Διάγραμμα 5-42: Ρυθμός λειοτρίβησης ασβεστόλιθου και χαλαζία για 800 r.p.m. & ~1200 gr.....	89
Διάγραμμα 5-43: Ρυθμός λειοτρίβησης ασβεστόλιθου και χαλαζία για 500 r.p.m. & ~600 gr.....	89
Διάγραμμα 5-44: Αποτελέσματα προσομοίωσης λειοτρίβησης ασβεστόλιθου στον δακτυλιόμυλο....	94
Διάγραμμα 5-45: Αποτελέσματα προσομοίωσης λειοτρίβησης χαλαζία στον δακτυλιόμυλο .....	94

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Στάδια κατάτμησης, μεγέθη τεμαχιδίων τροφοδοσίας και προϊόντων .....	11
Πίνακας 3-1: Οι κυριότερες μέθοδοι προσδιορισμού μεγέθους των σωματιδίων .....	12
Πίνακας 4-1: Μεγέθη – Σύμβολα – Μονάδες.....	18
Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικό άνοιγμα αποκένωσης δ για κάθε θέση του εργαστηριακού σπαστήρα με σιαγόνες.....	42
Πίνακας 5-2: Χαρακτηριστικά εργαστηριακού ραβδόμυλου .....	43
Πίνακας 5-3:Μεταβολή παραμέτρων ανά δοκιμή ξηρής λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο.....	46

Πίνακας 5-4: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης για τον ασβεστόλιθο .....	48
Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης για τον χαλαζία .....	49
Πίνακας 5-6: Οι σταθερές $\alpha$ και $A$ της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον ασβεστόλιθο της 1 <sup>ης</sup> δοκιμής.....	61
Πίνακας 5-7: Οι σταθερές $\alpha$ και $A$ της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον ασβεστόλιθο της 2 <sup>ης</sup> δοκιμής.....	61
Πίνακας 5-8: Οι σταθερές $\alpha$ και $A$ της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον ασβεστόλιθο της 3 <sup>ης</sup> δοκιμής.....	61
Πίνακας 5-9: Οι σταθερές $\alpha$ και $A$ της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον χαλαζία της 4 <sup>ης</sup> δοκιμής .....	62
Πίνακας 5-10: Οι σταθερές $\alpha$ και $A$ της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον χαλαζία της 5 <sup>ης</sup> δοκιμής .....	62
Πίνακας 5-11: Οι σταθερές $\alpha$ και $A$ της εξίσωσης G.G.S. (Gates Gaudin Schuhman) για τον χαλαζία της 6 <sup>ης</sup> δοκιμής .....	62
Πίνακας 5-12: Ισχύς που απαιτεί ο δακτυλιόμυλος για κάθε δοκιμή ξεχωριστά .....	63
Πίνακας 5-13: Κατανάλωση ενέργειας στον δακτυλιόμυλο, αθροιστικά, για κάθε δοκιμή .....	64
Πίνακας 5-14: Ειδική ενέργεια του δακτυλιόμυλου, σε joule/kg, συναρτήσει του χρόνου λειοτρίβησης για κάθε δοκιμή.....	67
Πίνακας 5-15: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 1 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης .....	70
Πίνακας 5-16: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 2 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης .....	70
Πίνακας 5-17: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 3 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης .....	71
Πίνακας 5-18: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 4 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης .....	71
Πίνακας 5-19: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 5 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης .....	71
Πίνακας 5-20: Διερχόμενο βάρος σε kg για την 6 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης .....	72
Πίνακας 5-21: Παραχθέν βάρος σε kg για την 1 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης.....	72
Πίνακας 5-22: Παραχθέν βάρος σε kg για την 2 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης.....	72
Πίνακας 5-23: Παραχθέν βάρος σε kg για την 3 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης.....	73
Πίνακας 5-24: Παραχθέν βάρος σε kg για την 4 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης.....	73
Πίνακας 5-25: Παραχθέν βάρος σε kg για την 5 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης.....	73
Πίνακας 5-26: Παραχθέν βάρος σε kg για την 6 <sup>η</sup> δοκιμή λειοτρίβησης.....	74

Πίνακας 5-27: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 1 <sup>η</sup> δοκιμή.....	77
Πίνακας 5-28: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 2 <sup>η</sup> δοκιμή.....	78
Πίνακας 5-29: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 3 <sup>η</sup> δοκιμή.....	78
Πίνακας 5-30: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 4 <sup>η</sup> δοκιμή.....	78
Πίνακας 5-31: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 5 <sup>η</sup> δοκιμή.....	78
Πίνακας 5-32: Παραχθείσα ποσότητα με αναγωγή στη μονάδα για την 6 <sup>η</sup> δοκιμή.....	79
Πίνακας 5-33: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 1 <sup>η</sup> δοκιμή.....	83
Πίνακας 5-34: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 2 <sup>η</sup> δοκιμή.....	83
Πίνακας 5-35: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 3 <sup>η</sup> δοκιμή.....	83
Πίνακας 5-36: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 4 <sup>η</sup> δοκιμή.....	84
Πίνακας 5-37: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 5 <sup>η</sup> δοκιμή.....	84
Πίνακας 5-38: Τιμές θεωρητικής προσέγγισης για την 6 <sup>η</sup> δοκιμή.....	84
Πίνακας 5-39: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 1 <sup>η</sup> δοκιμή .....	85
Πίνακας 5-40: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 2 <sup>η</sup> δοκιμή .....	85
Πίνακας 5-41: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 3 <sup>η</sup> δοκιμή .....	85
Πίνακας 5-42: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 4 <sup>η</sup> δοκιμή .....	85
Πίνακας 5-43: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 5 <sup>η</sup> δοκιμή .....	86
Πίνακας 5-44: Τετραγωνική διαφορά των θεωρητικών μείων των πειραματικών τιμών για την 6 <sup>η</sup> δοκιμή .....	86
Πίνακας 5-45: Ρυθμός λειοτρίβησης $K(x)$ , για κάθε κλάσμα.....	86
Πίνακας 5-46: Ρυθμός λειοτρίβησης για κάθε μία δοκιμή ξεχωριστά.....	87
Πίνακας 5-47: Πειραματικές τιμές του ρυθμού λειοτρίβησης και της επιφανειακής τάσης από τις δοκιμές λειοτρίβησης στον δακτυλιόμυλο.....	90
Πίνακας 5-48: Πειραματικές τιμές του ρυθμού λειοτρίβησης και της επιφανειακής τάσης από δοκιμές λειοτρίβησης στον εργαστηριακό ραβδόμυλο .....	91



Πίνακας 5-49: Πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές προσομοίωσης .....	93
--	----

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Κώδικας 'CMain.vb

'Description:

Imports System

Imports System.Threading

Imports System.Globalization

Public Class CMain

Public Shared Sub Main()

'Set the project culture to neutral

Thread.CurrentThread.CurrentCulture = New  
CultureInfo(CultureInfo.InvariantCulture.LCID)

Thread.CurrentThread.CurrentUICulture = New  
CultureInfo(CultureInfo.InvariantCulture.LCID)

Console.WriteLine("Loading main form...")

System.Windows.Forms.Application.Run(New CMainForm)

Console.WriteLine("Press ENTER to continue...")

'Console.ReadLine()

End Sub

End Class

Public Class CGeometry

Public Function ComputeLamda(ByVal bigR As Double, ByVal smallR As Double, ByVal r0  
As Double, ByVal ri As Double, ByVal Theta As Double) As Double

Dim Lamda As Double

Lamda = Math.Pow((bigR - r0), 2) + Math.Pow((ri - smallR), 2) - (Math.Cos(Theta)  
\* 2 \* (bigR - r0) \* (ri - smallR))

Lamda = Math.Sqrt(Lamda)

Return Lamda

End Function

Public Function ComputeTheta(ByVal bigR As Double, ByVal smallR As Double, ByVal r0  
As Double, ByVal ri As Double, ByVal Lamda As Double) As Double

Dim Theta As Double

Theta = Math.Pow((bigR - r0), 2) + Math.Pow((ri - smallR), 2) - Math.Pow(Lamda,  
2)

Theta = Theta / (2 \* (bigR - r0) \* (ri - smallR))

Theta = Math.Acos(Theta)

Return Theta

End Function

```
Public Function ComputeF(ByVal smallR As Double, ByVal ri As Double, ByVal Theta As Double, ByVal Lamda As Double) As Double
```

```
    Dim F As Double
```

```
    F = Math.Sin(Theta) * (ri - smallR)
```

```
    F = F / Lamda
```

```
    F = Math.Asin(F)
```

```
    Return F
```

```
End Function
```

```
Public Function ComputeX(ByVal F As Double, ByVal Theta As Double) As Double
```

```
    Dim X As Double
```

```
    X = (Math.PI / 2) - F - Theta
```

```
    Return X
```

```
End Function
```

```
End Class
```

```
Public Class CRingForce
```

```
    Public Sub New()
```

```
    End Sub
```

```
    Public m_greekm As Double
```

```
    Public m_T As Double
```

```
    Public m_P As Double
```

```
    Public m_Tf As Double
```

```
    Public m_bigF As Double
```

```
    Public Function ComputeT( _
```

```
        ByVal Omega As Double, _
```

```
        ByVal bigR As Double, _
```

```
        ByVal smallR As Double, _
```

```
        ByVal ri As Double, _
```

```
        ByVal r0 As Double, _
```

```
        ByVal smallm As Double, _
```

```
        ByVal greekm As Double, _
```

```
        ByVal smalla As Double, _
```

```
        ByVal Theta As Double _
```

```
    ) As Double
```

```
    Dim T As Double
```

```
    T = smallm * Math.Pow(Omega, 2) * (bigR - r0) * smalla * (Math.Sin(Theta) - greekm * Math.Cos(Theta))
```

```
    T = T / r0 * (Math.Sin(Theta) - greekm * Math.Cos(Theta)) _
```

```
    + smalla * (Math.Cos(Theta) + greekm * Math.Sin(Theta)) _
```

```

        - greekm * ri
    Me.m_T = T
    Return T
End Function

Public Function ComputeP( _
    ByVal Omega As Double, _
    ByVal bigR As Double, _
    ByVal smallR As Double, _
    ByVal ri As Double, _
    ByVal r0 As Double, _
    ByVal smallm As Double, _
    ByVal greekm As Double, _
    ByVal smalla As Double, _
    ByVal Theta As Double _
) As Double
    Dim P As Double
    P = smallm * Math.Pow(Omega, 2) * (bigR - r0) * _
        r0 * (Math.Sin(Theta) - greekm * Math.Cos(Theta)) - _
        greekm * ri
    P = P / r0 * (Math.Sin(Theta) - greekm * Math.Cos(Theta)) _
        + smalla * (Math.Cos(Theta) + greekm * Math.Sin(Theta)) _
        - greekm * ri
    Me.m_P = P
    Return P
End Function

Public ReadOnly Property smallF() As Double
    Get
        Return m_P / m_T
    End Get
End Property

Public Function ComputeBigF( _
    ByVal Omega As Double, _
    ByVal bigR As Double, _
    ByVal smallR As Double, _
    ByVal ri As Double, _
    ByVal r0 As Double, _
    ByVal smallm As Double, _

```

```

ByVal greekm As Double, _
ByVal smalla As Double, _
ByVal Theta As Double _
) As Double
    Dim bigF As Double
    bigF = smallm * Math.Pow(Omega, 2) * smalla * (bigR - r0)
    bigF = bigF / r0 * (Math.Sin(Theta) - greekm * Math.Cos(Theta)) _
    + smalla * (Math.Cos(Theta) + greekm * Math.Sin(Theta)) _
    - greekm * ri
    Return bigF
End Function
Public Function ComputeTf() As Double
    Return Me.m_greekm * Me.m_bigF
End Function
End Class
Public Class CEfficiency
    Public m_M As Double
    Public m_N As Double
    Public m_Vs As Double
    Public m_Nf As Double
    Public m_Nnet As Double
    Public m_H As Double
    Public Function ComputeM(ByVal Omega As Double, _
        ByVal bigR As Double, _
        ByVal smallR As Double, _
        ByVal ri As Double, _
        ByVal r0 As Double, _
        ByVal smallm As Double, _
        ByVal greekm As Double, _
        ByVal smalla As Double, _
        ByVal Theta As Double, _
        ByVal greekF As Double, _
        ByVal Lamda As Double _
    ) As Double
        Dim M As Double
        M = smallm * Math.Pow(Omega, 2) * smalla * (bigR - r0) * _
        (Lamda * Math.Sin(greekF + Theta) - Lamda * Math.Cos(greekF + Theta) + greekm
* smallR)

```

```
M = M / r0 * (Math.Sin(Theta) - greekm * Math.Cos(Theta)) _  
+ smalla * (Math.Cos(Theta) + greekm * Math.Sin(Theta)) _  
- greekm * ri  
Return M  
End Function  
Public Function ComputeN(ByVal M As Double, ByVal Omega As Double) As Double  
Return M * Omega  
End Function  
Public Function ComputeVs(ByVal Omega As Double, _  
ByVal bigR As Double, _  
ByVal ri As Double, _  
ByVal r0 As Double _  
) As Double  
Return Omega * bigR * (ri / r0)  
End Function  
Public Function ComputeNf(ByVal Tf As Double, ByVal Vs As Double) As Double  
Return Tf * Vs  
End Function  
Public Function ComputeNnet(ByVal N As Double, ByVal Nf As Double) As Double  
Return N - Nf  
End Function  
Public Function ComputeH(ByVal N As Double, ByVal Nf As Double) As Double  
Return 1 - (Nf / N)  
End Function  
End Class
```

**Κώδικας 'CMainForm.vb**

'Description:

Imports System.Windows.Forms

Imports System.Collections

Public Class CMainForm

Inherits System.Windows.Forms.Form

#Region " Windows Form Designer generated code "

Public Sub New()

MyBase.New()

'This call is required by the Windows Form Designer.

InitializeComponent()

'Add any initialization after the InitializeComponent() call

End Sub

'Form overrides dispose to clean up the component list.

Protected Overloads Overrides Sub Dispose(ByVal disposing As Boolean)

If disposing Then

If Not (components Is Nothing) Then

components.Dispose()

End If

End If

MyBase.Dispose(disposing)

End Sub

'Required by the Windows Form Designer

Private components As System.ComponentModel.IContainer

'NOTE: The following procedure is required by the Windows Form Designer

'It can be modified using the Windows Form Designer.

'Do not modify it using the code editor.

Friend WithEvents TabControl2 As System.Windows.Forms.TabControl

Friend WithEvents tabPage4 As System.Windows.Forms.TabPage

Friend WithEvents xpGradientPanel5 As SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel

Friend WithEvents label16 As System.Windows.Forms.Label

Friend WithEvents label15 As System.Windows.Forms.Label

Friend WithEvents label14 As System.Windows.Forms.Label

Friend WithEvents label13 As System.Windows.Forms.Label

Friend WithEvents label10 As System.Windows.Forms.Label

Friend WithEvents label9 As System.Windows.Forms.Label

Friend WithEvents Label8 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label7 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtsmallr As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents txtRi As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label4 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label3 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtR0 As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents txtBigR As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label2 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label1 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents TabControl1 As System.Windows.Forms.TabControl  
Friend WithEvents tabPage1 As System.Windows.Forms.TabPage  
Friend WithEvents XpGradientPanel2 As SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel  
Friend WithEvents Label18 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label17 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label12 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label11 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label5 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtLamda As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label6 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtTheta As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents GroupBox1 As System.Windows.Forms.GroupBox  
Friend WithEvents btnCompute As System.Windows.Forms.Button  
Friend WithEvents rdbLamda As System.Windows.Forms.RadioButton  
Friend WithEvents rdbTheta As System.Windows.Forms.RadioButton  
Friend WithEvents tabPage2 As System.Windows.Forms.TabPage  
Friend WithEvents XpGradientPanel3 As SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel  
Friend WithEvents Label66 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label67 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtGreekR As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label68 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label63 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label64 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtBeff As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label65 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents btnRingForces As System.Windows.Forms.Button  
Friend WithEvents Label42 As System.Windows.Forms.Label



Friend WithEvents Label43 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtTf As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label44 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label39 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label40 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtBigF As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label41 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label37 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtSmallf As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label38 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label33 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label34 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtP As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label35 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label28 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label31 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtT As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label32 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label29 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtGreekm As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label30 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label25 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label26 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtSmalla As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label27 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label22 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label23 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtOmega As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label24 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label19 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label20 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtSmallm As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label21 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents tabPage3 As System.Windows.Forms.TabPage  
Friend WithEvents XpGradientPanel4 As SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel  
Friend WithEvents Label62 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label54 As System.Windows.Forms.Label

Friend WithEvents txtH As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label55 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label56 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label57 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtNnet As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label58 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label59 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label60 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtNf As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label61 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label50 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label51 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtVs As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label52 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label47 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label48 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtN As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label49 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label36 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label45 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtM As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents Label46 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents tabPage5 As System.Windows.Forms.TabPage  
Friend WithEvents XpGradientPanel6 As SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel  
Friend WithEvents MenuBar1 As TD.SandBar.MenuBar  
Friend WithEvents MenuItem1 As TD.SandBar.MenuItem  
Friend WithEvents MenuItem1 As TD.SandBar.MenuItem  
Friend WithEvents MenuItem5 As TD.SandBar.MenuItem  
Friend WithEvents MenuItem2 As TD.SandBar.MenuItem  
Friend WithEvents XpGradientPanel1 As SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel  
Friend WithEvents groupBox2 As System.Windows.Forms.GroupBox  
Friend WithEvents Label53 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label69 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents Label70 As System.Windows.Forms.Label  
Friend WithEvents txtT3 As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents txtT2 As System.Windows.Forms.TextBox  
Friend WithEvents txtT1 As System.Windows.Forms.TextBox

```
Friend WithEvents btnCompute2 As System.Windows.Forms.Button
Friend WithEvents Label71 As System.Windows.Forms.Label
Friend WithEvents Label72 As System.Windows.Forms.Label
Friend WithEvents Label73 As System.Windows.Forms.Label
Friend WithEvents txtG As System.Windows.Forms.TextBox
Friend WithEvents txtB As System.Windows.Forms.TextBox
Friend WithEvents txtA As System.Windows.Forms.TextBox
Friend WithEvents rbn3 As System.Windows.Forms.RadioButton
Friend WithEvents rbn2 As System.Windows.Forms.RadioButton
Friend WithEvents rbn1 As System.Windows.Forms.RadioButton
Friend WithEvents Label74 As System.Windows.Forms.Label
Friend WithEvents lstK As System.Windows.Forms.ListBox
Friend WithEvents lstT1 As System.Windows.Forms.ListBox
Friend WithEvents lstT2 As System.Windows.Forms.ListBox
Friend WithEvents lstT3 As System.Windows.Forms.ListBox
Friend WithEvents TextBox1 As System.Windows.Forms.TextBox
Friend WithEvents Label75 As System.Windows.Forms.Label
Friend WithEvents Label76 As System.Windows.Forms.Label
Friend WithEvents TextBox2 As System.Windows.Forms.TextBox
<System.Diagnostics.DebuggerStepThrough(> Private Sub InitializeComponent()
    Me.TabControl2 = New System.Windows.Forms.TabControl
    Me.TabPage5 = New System.Windows.Forms.TabPage
    Me.XpGradientPanel6 = New SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel
    Me.Label76 = New System.Windows.Forms.Label
    Me.TextBox2 = New System.Windows.Forms.TextBox
    Me.Label75 = New System.Windows.Forms.Label
    Me.TextBox1 = New System.Windows.Forms.TextBox
    Me.Label74 = New System.Windows.Forms.Label
    Me.lstT3 = New System.Windows.Forms.ListBox
    Me.lstT2 = New System.Windows.Forms.ListBox
    Me.lstT1 = New System.Windows.Forms.ListBox
    Me.lstK = New System.Windows.Forms.ListBox
    Me.Label71 = New System.Windows.Forms.Label
    Me.Label72 = New System.Windows.Forms.Label
    Me.Label73 = New System.Windows.Forms.Label
    Me.txtG = New System.Windows.Forms.TextBox
    Me.txtB = New System.Windows.Forms.TextBox
```

```
Me.txtA = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label70 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label69 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label53 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtT3 = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.txtT2 = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.txtT1 = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.GroupBox2 = New System.Windows.Forms.GroupBox
Me.btnCompute2 = New System.Windows.Forms.Button
Me.rbn3 = New System.Windows.Forms.RadioButton
Me.rbn2 = New System.Windows.Forms.RadioButton
Me.rbn1 = New System.Windows.Forms.RadioButton
Me.TabPage4 = New System.Windows.Forms.TabPage
Me.XpGradientPanel5 = New SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel
Me.Label16 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label15 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label14 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label13 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label10 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label9 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label8 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label7 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtsmallr = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.txtRi = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label4 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label3 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtR0 = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.txtBigR = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label2 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label1 = New System.Windows.Forms.Label
Me.TabControl1 = New System.Windows.Forms.TabControl
Me.TabPage1 = New System.Windows.Forms.TabPage
Me.XpGradientPanel2 = New SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel
Me.Label18 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label17 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label12 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label11 = New System.Windows.Forms.Label
```

Me.Label5 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtLamda = New System.Windows.Forms.TextBox  
Me.Label6 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtTheta = New System.Windows.Forms.TextBox  
Me.GroupBox1 = New System.Windows.Forms.GroupBox  
Me.btnCompute = New System.Windows.Forms.Button  
Me.rdbLamda = New System.Windows.Forms.RadioButton  
Me.rdbTheta = New System.Windows.Forms.RadioButton  
Me.TabPage2 = New System.Windows.Forms.TabPage  
Me.XpGradientPanel3 = New SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel  
Me.Label66 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label67 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtGreekR = New System.Windows.Forms.TextBox  
Me.Label68 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label63 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label64 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtBeff = New System.Windows.Forms.TextBox  
Me.Label65 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.btnRingForces = New System.Windows.Forms.Button  
Me.Label42 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label43 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtTf = New System.Windows.Forms.TextBox  
Me.Label44 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label39 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label40 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtBigF = New System.Windows.Forms.TextBox  
Me.Label41 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label37 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtSmallf = New System.Windows.Forms.TextBox  
Me.Label38 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label33 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label34 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtP = New System.Windows.Forms.TextBox  
Me.Label35 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label28 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.Label31 = New System.Windows.Forms.Label  
Me.txtT = New System.Windows.Forms.TextBox

```
Me.Label32 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label29 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtGreekm = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label30 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label25 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label26 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtSmalla = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label27 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label22 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label23 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtOmega = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label24 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label19 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label20 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtSmallm = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label21 = New System.Windows.Forms.Label
Me.TabPage3 = New System.Windows.Forms.TabPage
Me.XpGradientPanel4 = New SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel
Me.Label62 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label54 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtH = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label55 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label56 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label57 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtNnet = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label58 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label59 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label60 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtNf = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label61 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label50 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label51 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtVs = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label52 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label47 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label48 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtN = New System.Windows.Forms.TextBox
```

```
Me.Label49 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label36 = New System.Windows.Forms.Label
Me.Label45 = New System.Windows.Forms.Label
Me.txtM = New System.Windows.Forms.TextBox
Me.Label46 = New System.Windows.Forms.Label
Me.MenuBar1 = New TD.SandBar.MenuBar
Me.MenuBarItem1 = New TD.SandBar.MenuBarItem
Me.MenuButtonItem1 = New TD.SandBar.MenuButtonItem
Me.MenuBarItem5 = New TD.SandBar.MenuBarItem
Me.MenuButtonItem2 = New TD.SandBar.MenuButtonItem
Me.XpGradientPanel1 = New SteepValley.Windows.Forms.XPGradientPanel
Me.TabControl2.SuspendLayout()
Me.TabPage5.SuspendLayout()
Me.XpGradientPanel6.SuspendLayout()
Me.GroupBox2.SuspendLayout()
Me.TabPage4.SuspendLayout()
Me.XpGradientPanel5.SuspendLayout()
Me.TabControl1.SuspendLayout()
Me.TabPage1.SuspendLayout()
Me.XpGradientPanel2.SuspendLayout()
Me.GroupBox1.SuspendLayout()
Me.TabPage2.SuspendLayout()
Me.XpGradientPanel3.SuspendLayout()
Me.TabPage3.SuspendLayout()
Me.XpGradientPanel4.SuspendLayout()
Me.XpGradientPanel1.SuspendLayout()
Me.SuspendLayout()
,
'TabControl2
,
Me.TabControl2.Controls.Add(Me.TabPage5)
Me.TabControl2.Controls.Add(Me.TabPage4)
Me.TabControl2.Dock = System.Windows.Forms.DockStyle.Fill
Me.TabControl2.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!)
Me.TabControl2.ItemSize = New System.Drawing.Size(60, 18)
Me.TabControl2.Location = New System.Drawing.Point(0, 22)
Me.TabControl2.Name = "TabControl2"
```

```
Me.TabControl2.SelectedIndex = 0
Me.TabControl2.Size = New System.Drawing.Size(730, 634)
Me.TabControl2.TabIndex = 30
,
'TabPage5
,
Me.TabPage5.Controls.Add(Me.XpGradientPanel6)
Me.TabPage5.Location = New System.Drawing.Point(4, 22)
Me.TabPage5.Name = "TabPage5"
Me.TabPage5.Size = New System.Drawing.Size(722, 608)
Me.TabPage5.TabIndex = 1
Me.TabPage5.Text = " A) Grain distribution "
,
'XpGradientPanel6
,
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.txtG)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.txtB)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.txtA)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label76)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.TextBox2)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label75)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.TextBox1)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label74)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.lstT3)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.lstT2)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.lstT1)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.lstK)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label71)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label72)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label73)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label70)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label69)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.Label53)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.txtT3)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.txtT2)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.txtT1)
Me.XpGradientPanel6.Controls.Add(Me.GroupBox2)
```



```

Me.XpGradientPanel6.Dock = System.Windows.Forms.DockStyle.Fill
Me.XpGradientPanel6.Location = New System.Drawing.Point(0, 0)
Me.XpGradientPanel6.Name = "XpGradientPanel6"
Me.XpGradientPanel6.Size = New System.Drawing.Size(722, 608)
Me.XpGradientPanel6.TabIndex = 0
,

'Label76
,

Me.Label76.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label76.Location = New System.Drawing.Point(104, 88)
Me.Label76.Name = "Label76"
Me.Label76.Size = New System.Drawing.Size(112, 23)
Me.Label76.TabIndex = 22
Me.Label76.Text = "Passing (kg):"
Me.Label76.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'TextBox2
,

Me.TextBox2.Location = New System.Drawing.Point(104, 112)
Me.TextBox2.Multiline = True
Me.TextBox2.Name = "TextBox2"
Me.TextBox2.ScrollBars = System.Windows.Forms.ScrollBars.Vertical
Me.TextBox2.Size = New System.Drawing.Size(104, 184)
Me.TextBox2.TabIndex = 21
Me.TextBox2.Text = "0.119665" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "0.09532172" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "0.078637" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "0.0635934" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "0.047866" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "0.0372671" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "0.023933" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "0.01018" & _
"862"
,

'Label75
,

Me.Label75.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label75.Location = New System.Drawing.Point(8, 88)
Me.Label75.Name = "Label75"

```

```

Me.Label75.Size = New System.Drawing.Size(72, 23)
Me.Label75.TabIndex = 20
Me.Label75.Text = "Size (μm):"
Me.Label75.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'TextBox1
,
Me.TextBox1.Location = New System.Drawing.Point(8, 112)
Me.TextBox1.Multiline = True
Me.TextBox1.Name = "TextBox1"
Me.TextBox1.ScrollBars = System.Windows.Forms.ScrollBars.Vertical
Me.TextBox1.Size = New System.Drawing.Size(80, 184)
Me.TextBox1.TabIndex = 19
Me.TextBox1.Text = "707" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "500" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "354" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "250" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "177" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "125" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "88" & Microsoft.VisualBasic.ChrW(13) &
Microsoft.VisualBasic.ChrW(10) & "63"
,
'Label74
,
Me.Label74.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label74.Location = New System.Drawing.Point(240, 88)
Me.Label74.Name = "Label74"
Me.Label74.Size = New System.Drawing.Size(96, 23)
Me.Label74.TabIndex = 18
Me.Label74.Text = "K(x):"
Me.Label74.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'IstT3
,
Me.IstT3.ItemHeight = 16
Me.IstT3.Location = New System.Drawing.Point(608, 112)
Me.IstT3.Name = "IstT3"
Me.IstT3.ScrollAlwaysVisible = True
Me.IstT3.Size = New System.Drawing.Size(104, 180)

```

```
Me.lstT3.TabIndex = 17
',

'lstT2
',

Me.lstT2.ItemHeight = 16
Me.lstT2.Location = New System.Drawing.Point(496, 112)
Me.lstT2.Name = "lstT2"
Me.lstT2.ScrollAlwaysVisible = True
Me.lstT2.Size = New System.Drawing.Size(104, 180)
Me.lstT2.TabIndex = 16
',

'lstT1
',

Me.lstT1.ItemHeight = 16
Me.lstT1.Location = New System.Drawing.Point(384, 112)
Me.lstT1.Name = "lstT1"
Me.lstT1.ScrollAlwaysVisible = True
Me.lstT1.Size = New System.Drawing.Size(104, 180)
Me.lstT1.TabIndex = 15
',

'lstK
',

Me.lstK.ItemHeight = 16
Me.lstK.Location = New System.Drawing.Point(240, 112)
Me.lstK.Name = "lstK"
Me.lstK.ScrollAlwaysVisible = True
Me.lstK.Size = New System.Drawing.Size(136, 180)
Me.lstK.TabIndex = 14
',

'Label71
',

Me.Label71.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label71.Location = New System.Drawing.Point(136, 488)
Me.Label71.Name = "Label71"
Me.Label71.Size = New System.Drawing.Size(24, 16)
Me.Label71.TabIndex = 13
Me.Label71.Text = "Γ:"
```

```
Me.Label71.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'Label72
,

Me.Label72.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label72.Location = New System.Drawing.Point(136, 448)
Me.Label72.Name = "Label72"
Me.Label72.Size = New System.Drawing.Size(24, 16)
Me.Label72.TabIndex = 12
Me.Label72.Text = "B:"
Me.Label72.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'Label73
,

Me.Label73.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label73.Location = New System.Drawing.Point(136, 408)
Me.Label73.Name = "Label73"
Me.Label73.Size = New System.Drawing.Size(24, 16)
Me.Label73.TabIndex = 11
Me.Label73.Text = "A:"
Me.Label73.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'txtG
,

Me.txtG.Location = New System.Drawing.Point(152, 488)
Me.txtG.Name = "txtG"
Me.txtG.Size = New System.Drawing.Size(96, 22)
Me.txtG.TabIndex = 10
Me.txtG.Text = "0.0000117"
,

'txtB
,

Me.txtB.Location = New System.Drawing.Point(152, 448)
Me.txtB.Name = "txtB"
Me.txtB.Size = New System.Drawing.Size(96, 22)
Me.txtB.TabIndex = 9
Me.txtB.Text = "0.6118"
```

```
,  
  
'txtA  
,  
  
Me.txtA.Location = New System.Drawing.Point(152, 408)  
Me.txtA.Name = "txtA"  
Me.txtA.Size = New System.Drawing.Size(96, 22)  
Me.txtA.TabIndex = 8  
Me.txtA.Text = "-445.27"  
,  
  
'Label70  
,  
  
Me.Label70.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label70.Location = New System.Drawing.Point(616, 56)  
Me.Label70.Name = "Label70"  
Me.Label70.Size = New System.Drawing.Size(72, 23)  
Me.Label70.TabIndex = 7  
Me.Label70.Text = "T3 (sec):"  
Me.Label70.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
  
'Label69  
,  
  
Me.Label69.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label69.Location = New System.Drawing.Point(512, 56)  
Me.Label69.Name = "Label69"  
Me.Label69.Size = New System.Drawing.Size(72, 23)  
Me.Label69.TabIndex = 6  
Me.Label69.Text = "T2 (sec):"  
Me.Label69.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
  
'Label53  
,  
  
Me.Label53.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label53.Location = New System.Drawing.Point(392, 56)  
Me.Label53.Name = "Label53"  
Me.Label53.Size = New System.Drawing.Size(72, 23)  
Me.Label53.TabIndex = 5  
Me.Label53.Text = "T1 (sec):"
```

```
Me.Label53.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'txtT3
,

Me.txtT3.Location = New System.Drawing.Point(616, 80)
Me.txtT3.Name = "txtT3"
Me.txtT3.Size = New System.Drawing.Size(72, 22)
Me.txtT3.TabIndex = 4
Me.txtT3.Text = "80"
,

'txtT2
,

Me.txtT2.Location = New System.Drawing.Point(504, 80)
Me.txtT2.Name = "txtT2"
Me.txtT2.Size = New System.Drawing.Size(72, 22)
Me.txtT2.TabIndex = 3
Me.txtT2.Text = "40"
,

'txtT1
,

Me.txtT1.Location = New System.Drawing.Point(392, 80)
Me.txtT1.Name = "txtT1"
Me.txtT1.Size = New System.Drawing.Size(72, 22)
Me.txtT1.TabIndex = 2
Me.txtT1.Text = "20"
,

'GroupBox2
,

Me.GroupBox2.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.GroupBox2.Controls.Add(Me.btnCompute2)
Me.GroupBox2.Controls.Add(Me.rbn3)
Me.GroupBox2.Controls.Add(Me.rbn2)
Me.GroupBox2.Controls.Add(Me.rbn1)
Me.GroupBox2.Location = New System.Drawing.Point(320, 376)
Me.GroupBox2.Name = "GroupBox2"
Me.GroupBox2.Size = New System.Drawing.Size(280, 152)
Me.GroupBox2.TabIndex = 1
```

```
Me.GroupBox2.TabStop = False
Me.GroupBox2.Text = "K(x) type"
,

'btnCompute2
,

Me.btnCompute2.BackColor = System.Drawing.SystemColors.Control
Me.btnCompute2.Location = New System.Drawing.Point(160, 64)
Me.btnCompute2.Name = "btnCompute2"
Me.btnCompute2.Size = New System.Drawing.Size(96, 32)
Me.btnCompute2.TabIndex = 3
Me.btnCompute2.Text = "Compute"
,

'rbn3
,

Me.rbn3.Location = New System.Drawing.Point(24, 104)
Me.rbn3.Name = "rbn3"
Me.rbn3.TabIndex = 2
Me.rbn3.Text = "Ax + B"
,

'rbn2
,

Me.rbn2.Location = New System.Drawing.Point(24, 72)
Me.rbn2.Name = "rbn2"
Me.rbn2.TabIndex = 1
Me.rbn2.Text = "Ax^2 + Bx"
,

'rbn1
,

Me.rbn1.Checked = True
Me.rbn1.Location = New System.Drawing.Point(24, 40)
Me.rbn1.Name = "rbn1"
Me.rbn1.Size = New System.Drawing.Size(128, 24)
Me.rbn1.TabIndex = 0
Me.rbn1.TabStop = True
Me.rbn1.Text = "Ax^2 + Bx + Γ"
,

'TabPage4
```

```
,  
  
Me.TabPage4.Controls.Add(Me.XpGradientPanel5)  
Me.TabPage4.Controls.Add(Me.TabControl1)  
Me.TabPage4.Location = New System.Drawing.Point(4, 22)  
Me.TabPage4.Name = "TabPage4"  
Me.TabPage4.Size = New System.Drawing.Size(722, 608)  
Me.TabPage4.TabIndex = 0  
Me.TabPage4.Text = " B) Grinding simulation "  
  
,  
  
'XpGradientPanel5  
,  
  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label16)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label15)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label14)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label13)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label10)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label9)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label8)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label7)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.txtsmallr)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.txtRi)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label4)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label3)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.txtR0)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.txtBigR)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label2)  
Me.XpGradientPanel5.Controls.Add(Me.Label1)  
Me.XpGradientPanel5.Dock = System.Windows.Forms.DockStyle.Fill  
Me.XpGradientPanel5.Location = New System.Drawing.Point(0, 0)  
Me.XpGradientPanel5.Name = "XpGradientPanel5"  
Me.XpGradientPanel5.Size = New System.Drawing.Size(722, 184)  
Me.XpGradientPanel5.TabIndex = 29  
  
,  
  
'Label16  
,  
  
Me.Label16.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label16.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
```



```
Me.Label16.Location = New System.Drawing.Point(576, 120)
Me.Label16.Name = "Label16"
Me.Label16.Size = New System.Drawing.Size(40, 23)
Me.Label16.TabIndex = 41
Me.Label16.Text = "(mm)"
Me.Label16.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
'
'Label15
'
Me.Label15.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label15.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label15.Location = New System.Drawing.Point(576, 48)
Me.Label15.Name = "Label15"
Me.Label15.Size = New System.Drawing.Size(40, 23)
Me.Label15.TabIndex = 40
Me.Label15.Text = "(mm)"
Me.Label15.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
'
'Label14
'
Me.Label14.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label14.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label14.Location = New System.Drawing.Point(296, 120)
Me.Label14.Name = "Label14"
Me.Label14.Size = New System.Drawing.Size(40, 23)
Me.Label14.TabIndex = 39
Me.Label14.Text = "(mm)"
Me.Label14.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
'
'Label13
'
Me.Label13.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label13.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label13.Location = New System.Drawing.Point(296, 48)
Me.Label13.Name = "Label13"
```

```
Me.Label13.Size = New System.Drawing.Size(40, 23)
Me.Label13.TabIndex = 38
Me.Label13.Text = "(mm)"
Me.Label13.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
'
'Label10
'
Me.Label10.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label10.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label10.Location = New System.Drawing.Point(432, 96)
Me.Label10.Name = "Label10"
Me.Label10.Size = New System.Drawing.Size(120, 23)
Me.Label10.TabIndex = 37
Me.Label10.Text = "Inner ring radius"
Me.Label10.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
'
'Label9
'
Me.Label9.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label9.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label9.Location = New System.Drawing.Point(152, 96)
Me.Label9.Name = "Label9"
Me.Label9.Size = New System.Drawing.Size(120, 23)
Me.Label9.TabIndex = 36
Me.Label9.Text = "Outer ring radius"
Me.Label9.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
'
'Label8
'
Me.Label8.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label8.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label8.Location = New System.Drawing.Point(432, 24)
Me.Label8.Name = "Label8"
Me.Label8.Size = New System.Drawing.Size(120, 23)
Me.Label8.TabIndex = 35
```

```
Me.Label8.Text = "Rod radius"
Me.Label8.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'Label7
,
Me.Label7.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label7.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label7.Location = New System.Drawing.Point(152, 24)
Me.Label7.Name = "Label7"
Me.Label7.Size = New System.Drawing.Size(120, 23)
Me.Label7.TabIndex = 34
Me.Label7.Text = "Inner mill radius"
Me.Label7.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'txtsmallr
,
Me.txtsmallr.Location = New System.Drawing.Point(432, 48)
Me.txtsmallr.Name = "txtsmallr"
Me.txtsmallr.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtsmallr.TabIndex = 33
Me.txtsmallr.Text = "8.0"
,
'txtRi
,
Me.txtRi.Location = New System.Drawing.Point(432, 120)
Me.txtRi.Name = "txtRi"
Me.txtRi.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtRi.TabIndex = 32
Me.txtRi.Text = "16.2"
,
'Label4
,
Me.Label4.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label4.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label4.Location = New System.Drawing.Point(408, 48)
Me.Label4.Name = "Label4"
```

```
Me.Label4.Size = New System.Drawing.Size(24, 16)
Me.Label4.TabIndex = 31
Me.Label4.Text = "r:"
Me.Label4.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
'
'Label3
'
Me.Label3.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label3.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label3.Location = New System.Drawing.Point(400, 120)
Me.Label3.Name = "Label3"
Me.Label3.Size = New System.Drawing.Size(32, 16)
Me.Label3.TabIndex = 30
Me.Label3.Text = "ri:"
Me.Label3.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
'
'txtR0
'
Me.txtR0.Location = New System.Drawing.Point(152, 120)
Me.txtR0.Name = "txtR0"
Me.txtR0.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtR0.TabIndex = 27
Me.txtR0.Text = "22.1"
'
'txtBigR
'
Me.txtBigR.Location = New System.Drawing.Point(152, 48)
Me.txtBigR.Name = "txtBigR"
Me.txtBigR.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtBigR.TabIndex = 26
Me.txtBigR.Text = "81.7"
'
'Label2
'
Me.Label2.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label2.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
```

```
Me.Label2.Location = New System.Drawing.Point(112, 120)
Me.Label2.Name = "Label2"
Me.Label2.Size = New System.Drawing.Size(40, 16)
Me.Label2.TabIndex = 29
Me.Label2.Text = "r0:"
Me.Label2.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
'
'Label1
'
Me.Label1.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label1.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label1.Location = New System.Drawing.Point(120, 48)
Me.Label1.Name = "Label1"
Me.Label1.Size = New System.Drawing.Size(32, 16)
Me.Label1.TabIndex = 28
Me.Label1.Text = "R:"
Me.Label1.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
'
'TabControl1
'
Me.TabControl1.Controls.Add(Me.TabPage1)
Me.TabControl1.Controls.Add(Me.TabPage2)
Me.TabControl1.Controls.Add(Me.TabPage3)
Me.TabControl1.Dock = System.Windows.Forms.DockStyle.Bottom
Me.TabControl1.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.TabControl1.ItemSize = New System.Drawing.Size(93, 21)
Me.TabControl1.Location = New System.Drawing.Point(0, 184)
Me.TabControl1.Name = "TabControl1"
Me.TabControl1.SelectedIndex = 0
Me.TabControl1.Size = New System.Drawing.Size(722, 424)
Me.TabControl1.TabIndex = 28
'
'TabPage1
'
Me.TabPage1.Controls.Add(Me.XpGradientPanel2)
Me.TabPage1.Location = New System.Drawing.Point(4, 25)
```

```
Me.TabPage1.Name = "TabPage1"
Me.TabPage1.Size = New System.Drawing.Size(714, 395)
Me.TabPage1.TabIndex = 0
Me.TabPage1.Text = " 1. Geometry "
'
'XpGradientPanel2
'

Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.Label18)
Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.Label17)
Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.Label12)
Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.Label11)
Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.Label5)
Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.txtLamda)
Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.Label6)
Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.txtTheta)
Me.XpGradientPanel2.Controls.Add(Me.GroupBox1)
Me.XpGradientPanel2.Dock = System.Windows.Forms.DockStyle.Fill
Me.XpGradientPanel2.Location = New System.Drawing.Point(0, 0)
Me.XpGradientPanel2.Name = "XpGradientPanel2"
Me.XpGradientPanel2.Size = New System.Drawing.Size(714, 395)
Me.XpGradientPanel2.TabIndex = 0
'
'Label18
'

Me.Label18.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label18.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label18.Location = New System.Drawing.Point(576, 104)
Me.Label18.Name = "Label18"
Me.Label18.Size = New System.Drawing.Size(48, 23)
Me.Label18.TabIndex = 27
Me.Label18.Text = "(mm)"
Me.Label18.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
'
'Label17
'

Me.Label17.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
```

```
Me.Label17.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label17.Location = New System.Drawing.Point(304, 104)  
Me.Label17.Name = "Label17"  
Me.Label17.Size = New System.Drawing.Size(56, 23)  
Me.Label17.TabIndex = 26  
Me.Label17.Text = "degrees"  
Me.Label17.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
'Label12  
,  
  
Me.Label12.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label12.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label12.Location = New System.Drawing.Point(160, 80)  
Me.Label12.Name = "Label12"  
Me.Label12.Size = New System.Drawing.Size(88, 23)  
Me.Label12.TabIndex = 21  
Me.Label12.Text = "Design angle"  
Me.Label12.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
'Label11  
,  
  
Me.Label11.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label11.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label11.Location = New System.Drawing.Point(440, 80)  
Me.Label11.Name = "Label11"  
Me.Label11.Size = New System.Drawing.Size(88, 23)  
Me.Label11.TabIndex = 20  
Me.Label11.Text = "Arm length"  
Me.Label11.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
'Label5  
,  
  
Me.Label5.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label5.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label5.Location = New System.Drawing.Point(128, 104)
```

```
Me.Label5.Name = "Label5"
Me.Label5.Size = New System.Drawing.Size(32, 16)
Me.Label5.TabIndex = 11
Me.Label5.Text = "θ:"
Me.Label5.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,
'txtLamda
,
Me.txtLamda.Location = New System.Drawing.Point(440, 104)
Me.txtLamda.Name = "txtLamda"
Me.txtLamda.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtLamda.TabIndex = 14
Me.txtLamda.Text = ""
,
'Label6
,
Me.Label6.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label6.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label6.Location = New System.Drawing.Point(416, 104)
Me.Label6.Name = "Label6"
Me.Label6.Size = New System.Drawing.Size(24, 16)
Me.Label6.TabIndex = 13
Me.Label6.Text = "Ι:"
Me.Label6.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,
'txtTheta
,
Me.txtTheta.Location = New System.Drawing.Point(160, 104)
Me.txtTheta.Name = "txtTheta"
Me.txtTheta.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtTheta.TabIndex = 12
Me.txtTheta.Text = "82.9"
,
'GroupBox1
,
Me.GroupBox1.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.GroupBox1.Controls.Add(Me.btnCompute)
```



```
Me.GroupBox1.Controls.Add(Me.rdbLamda)
Me.GroupBox1.Controls.Add(Me.rdbTheta)
Me.GroupBox1.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.GroupBox1.Location = New System.Drawing.Point(240, 192)
Me.GroupBox1.Name = "GroupBox1"
Me.GroupBox1.Size = New System.Drawing.Size(272, 112)
Me.GroupBox1.TabIndex = 15
Me.GroupBox1.TabStop = False
Me.GroupBox1.Text = "Select"
,
'btnCompute
,
Me.btnCompute.BackColor = System.Drawing.SystemColors.Control
Me.btnCompute.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.btnCompute.Location = New System.Drawing.Point(152, 44)
Me.btnCompute.Name = "btnCompute"
Me.btnCompute.Size = New System.Drawing.Size(96, 32)
Me.btnCompute.TabIndex = 0
Me.btnCompute.Text = "Compute"
,
'rdbLamda
,
Me.rdbLamda.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.rdbLamda.Location = New System.Drawing.Point(32, 72)
Me.rdbLamda.Name = "rdbLamda"
Me.rdbLamda.TabIndex = 1
Me.rdbLamda.Text = "Compute l"
,
'rdbTheta
,
Me.rdbTheta.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.rdbTheta.Location = New System.Drawing.Point(32, 24)
Me.rdbTheta.Name = "rdbTheta"
Me.rdbTheta.TabIndex = 0
Me.rdbTheta.Text = "Compute θ"
```

```
,  
  
"TabPage2"  
,  
  
Me.TabPage2.Controls.Add(Me.XpGradientPanel3)  
Me.TabPage2.Location = New System.Drawing.Point(4, 25)  
Me.TabPage2.Name = "TabPage2"  
Me.TabPage2.Size = New System.Drawing.Size(714, 395)  
Me.TabPage2.TabIndex = 1  
Me.TabPage2.Text = " 2. RingForces "  
,  
  
"XpGradientPanel3"  
,  
  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label66)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label67)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtGreekR)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label68)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label63)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label64)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtBeff)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label65)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.btnRingForces)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label42)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label43)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtTf)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label44)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label39)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label40)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtBigF)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label41)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label37)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtSmallf)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label38)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label33)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label34)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtP)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label35)  
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label28)
```

```

Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label31)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtT)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label32)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label29)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtGreekm)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label30)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label25)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label26)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtSmalla)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label27)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label22)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label23)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtOmega)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label24)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label19)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label20)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.txtSmallm)
Me.XpGradientPanel3.Controls.Add(Me.Label21)
Me.XpGradientPanel3.Dock = System.Windows.Forms.DockStyle.Fill
Me.XpGradientPanel3.Location = New System.Drawing.Point(0, 0)
Me.XpGradientPanel3.Name = "XpGradientPanel3"
Me.XpGradientPanel3.Size = New System.Drawing.Size(714, 395)
Me.XpGradientPanel3.TabIndex = 0
,

'Label66
,

Me.Label66.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label66.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label66.Location = New System.Drawing.Point(216, 72)
Me.Label66.Name = "Label66"
Me.Label66.Size = New System.Drawing.Size(56, 23)
Me.Label66.TabIndex = 66
Me.Label66.Text = "(kg/m^3)"
Me.Label66.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'Label67
,

```

```
Me.Label67.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label67.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label67.Location = New System.Drawing.Point(72, 48)
Me.Label67.Name = "Label67"
Me.Label67.Size = New System.Drawing.Size(128, 23)
Me.Label67.TabIndex = 65
Me.Label67.Text = "Density"
Me.Label67.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'txtGreekR
,
Me.txtGreekR.Location = New System.Drawing.Point(72, 72)
Me.txtGreekR.Name = "txtGreekR"
Me.txtGreekR.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtGreekR.TabIndex = 63
Me.txtGreekR.Text = "7800"
,
'Label68
,
Me.Label68.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label68.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label68.Location = New System.Drawing.Point(32, 72)
Me.Label68.Name = "Label68"
Me.Label68.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label68.TabIndex = 64
Me.Label68.Text = "ρ:"
Me.Label68.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,
'Label63
,
Me.Label63.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label63.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label63.Location = New System.Drawing.Point(216, 136)
Me.Label63.Name = "Label63"
Me.Label63.Size = New System.Drawing.Size(40, 23)
```

```
Me.Label63.TabIndex = 62
Me.Label63.Text = "(mm)"
Me.Label63.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'Label64
,
Me.Label64.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label64.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label64.Location = New System.Drawing.Point(72, 112)
Me.Label64.Name = "Label64"
Me.Label64.Size = New System.Drawing.Size(128, 23)
Me.Label64.TabIndex = 61
Me.Label64.Text = "Length"
Me.Label64.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'txtBeff
,
Me.txtBeff.Location = New System.Drawing.Point(72, 136)
Me.txtBeff.Name = "txtBeff"
Me.txtBeff.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtBeff.TabIndex = 59
Me.txtBeff.Text = "450"
,
'Label65
,
Me.Label65.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label65.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label65.Location = New System.Drawing.Point(16, 136)
Me.Label65.Name = "Label65"
Me.Label65.Size = New System.Drawing.Size(56, 24)
Me.Label65.TabIndex = 60
Me.Label65.Text = "Beff:"
Me.Label65.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,
'btnRingForces
,
```

```
Me.btnRingForces.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.btnRingForces.Location = New System.Drawing.Point(312, 152)  
Me.btnRingForces.Name = "btnRingForces"  
Me.btnRingForces.Size = New System.Drawing.Size(112, 88)  
Me.btnRingForces.TabIndex = 58  
Me.btnRingForces.Text = "Compute >>"  
,  
  
'Label42  
,  
  
Me.Label42.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label42.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label42.Location = New System.Drawing.Point(648, 352)  
Me.Label42.Name = "Label42"  
Me.Label42.Size = New System.Drawing.Size(32, 23)  
Me.Label42.TabIndex = 57  
Me.Label42.Text = "(N)"  
Me.Label42.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
  
'Label43  
,  
  
Me.Label43.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label43.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label43.Location = New System.Drawing.Point(504, 328)  
Me.Label43.Name = "Label43"  
Me.Label43.Size = New System.Drawing.Size(136, 23)  
Me.Label43.TabIndex = 56  
Me.Label43.Text = "Friction force on rod"  
Me.Label43.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
  
'txtTf  
,  
  
Me.txtTf.Location = New System.Drawing.Point(504, 352)  
Me.txtTf.Name = "txtTf"  
Me.txtTf.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)  
Me.txtTf.TabIndex = 54
```

```
Me.txtTf.Text = ""  
,  
  
'Label44  
,  
  
Me.Label44.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label44.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label44.Location = New System.Drawing.Point(464, 352)  
Me.Label44.Name = "Label44"  
Me.Label44.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)  
Me.Label44.TabIndex = 55  
Me.Label44.Text = "Tf."  
Me.Label44.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight  
,  
  
'Label39  
,  
  
Me.Label39.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label39.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label39.Location = New System.Drawing.Point(648, 288)  
Me.Label39.Name = "Label39"  
Me.Label39.Size = New System.Drawing.Size(24, 23)  
Me.Label39.TabIndex = 53  
Me.Label39.Text = "(N)"  
Me.Label39.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
  
'Label40  
,  
  
Me.Label40.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label40.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label40.Location = New System.Drawing.Point(504, 264)  
Me.Label40.Name = "Label40"  
Me.Label40.Size = New System.Drawing.Size(192, 23)  
Me.Label40.TabIndex = 52  
Me.Label40.Text = "Normal force on connecting rod"  
Me.Label40.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,
```

```
'txtBigF
,

Me.txtBigF.Location = New System.Drawing.Point(504, 288)
Me.txtBigF.Name = "txtBigF"
Me.txtBigF.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtBigF.TabIndex = 50
Me.txtBigF.Text = ""
,

'Label41
,

Me.Label41.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label41.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label41.Location = New System.Drawing.Point(464, 288)
Me.Label41.Name = "Label41"
Me.Label41.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label41.TabIndex = 51
Me.Label41.Text = "F:"
Me.Label41.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,

'Label37
,

Me.Label37.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label37.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label37.Location = New System.Drawing.Point(504, 200)
Me.Label37.Name = "Label37"
Me.Label37.Size = New System.Drawing.Size(128, 23)
Me.Label37.TabIndex = 48
Me.Label37.Text = "Milling force factor"
Me.Label37.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'txtSmallf
,

Me.txtSmallf.Location = New System.Drawing.Point(504, 224)
Me.txtSmallf.Name = "txtSmallf"
Me.txtSmallf.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtSmallf.TabIndex = 46
```



```
Me.txtSmallf.Text = ""
,

'Label38
,

Me.Label38.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label38.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label38.Location = New System.Drawing.Point(464, 224)
Me.Label38.Name = "Label38"
Me.Label38.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label38.TabIndex = 47
Me.Label38.Text = "f."
Me.Label38.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,

'Label33
,

Me.Label33.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label33.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label33.Location = New System.Drawing.Point(648, 160)
Me.Label33.Name = "Label33"
Me.Label33.Size = New System.Drawing.Size(32, 23)
Me.Label33.TabIndex = 45
Me.Label33.Text = "(N)"
Me.Label33.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'Label34
,

Me.Label34.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label34.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label34.Location = New System.Drawing.Point(504, 136)
Me.Label34.Name = "Label34"
Me.Label34.Size = New System.Drawing.Size(128, 23)
Me.Label34.TabIndex = 44
Me.Label34.Text = "Compressive force"
Me.Label34.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
```

```
'txtP
,

Me.txtP.Location = New System.Drawing.Point(504, 160)
Me.txtP.Name = "txtP"
Me.txtP.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtP.TabIndex = 42
Me.txtP.Text = ""
,

'Label35
,

Me.Label35.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label35.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label35.Location = New System.Drawing.Point(464, 160)
Me.Label35.Name = "Label35"
Me.Label35.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label35.TabIndex = 43
Me.Label35.Text = "P:"
Me.Label35.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,

'Label28
,

Me.Label28.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label28.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label28.Location = New System.Drawing.Point(648, 96)
Me.Label28.Name = "Label28"
Me.Label28.Size = New System.Drawing.Size(32, 23)
Me.Label28.TabIndex = 41
Me.Label28.Text = "(N)"
Me.Label28.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'Label31
,

Me.Label31.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label31.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label31.Location = New System.Drawing.Point(504, 72)
```

```
Me.Label31.Name = "Label31"
Me.Label31.Size = New System.Drawing.Size(112, 23)
Me.Label31.TabIndex = 40
Me.Label31.Text = "Shear force"
Me.Label31.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'txtT
,
Me.txtT.Location = New System.Drawing.Point(504, 96)
Me.txtT.Name = "txtT"
Me.txtT.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtT.TabIndex = 38
Me.txtT.Text = ""
,
'Label32
,
Me.Label32.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label32.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label32.Location = New System.Drawing.Point(464, 96)
Me.Label32.Name = "Label32"
Me.Label32.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label32.TabIndex = 39
Me.Label32.Text = "T:"
Me.Label32.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,
'Label29
,
Me.Label29.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label29.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label29.Location = New System.Drawing.Point(72, 304)
Me.Label29.Name = "Label29"
Me.Label29.Size = New System.Drawing.Size(192, 23)
Me.Label29.TabIndex = 37
Me.Label29.Text = "Ring/rod friction coefficient"
Me.Label29.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
```

```
'txtGreekm
,

Me.txtGreekm.Location = New System.Drawing.Point(72, 328)
Me.txtGreekm.Name = "txtGreekm"
Me.txtGreekm.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtGreekm.TabIndex = 35
Me.txtGreekm.Text = "0.2"
,

'Label30
,

Me.Label30.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label30.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label30.Location = New System.Drawing.Point(32, 328)
Me.Label30.Name = "Label30"
Me.Label30.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label30.TabIndex = 36
Me.Label30.Text = "μ:"
Me.Label30.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,

'Label25
,

Me.Label25.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label25.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label25.Location = New System.Drawing.Point(216, 264)
Me.Label25.Name = "Label25"
Me.Label25.Size = New System.Drawing.Size(40, 23)
Me.Label25.TabIndex = 34
Me.Label25.Text = "(mm)"
Me.Label25.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'Label26
,

Me.Label26.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label26.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label26.Location = New System.Drawing.Point(72, 240)
```

```
Me.Label26.Name = "Label26"
Me.Label26.Size = New System.Drawing.Size(192, 23)
Me.Label26.TabIndex = 33
Me.Label26.Text = "Coefficient of rolling resistance"
Me.Label26.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'txtSmalla
,
Me.txtSmalla.Location = New System.Drawing.Point(72, 264)
Me.txtSmalla.Name = "txtSmalla"
Me.txtSmalla.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtSmalla.TabIndex = 31
Me.txtSmalla.Text = "2.4"
,
'Label27
,
Me.Label27.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label27.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label27.Location = New System.Drawing.Point(32, 264)
Me.Label27.Name = "Label27"
Me.Label27.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label27.TabIndex = 32
Me.Label27.Text = "α:"
Me.Label27.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,
'Label22
,
Me.Label22.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label22.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label22.Location = New System.Drawing.Point(216, 200)
Me.Label22.Name = "Label22"
Me.Label22.Size = New System.Drawing.Size(64, 23)
Me.Label22.TabIndex = 30
Me.Label22.Text = "(r.p.m.)"
Me.Label22.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
```

```
'Label23
,

Me.Label23.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label23.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label23.Location = New System.Drawing.Point(72, 176)
Me.Label23.Name = "Label23"
Me.Label23.Size = New System.Drawing.Size(144, 23)
Me.Label23.TabIndex = 29
Me.Label23.Text = "Shaft velocity"
Me.Label23.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'txtOmega
,

Me.txtOmega.Location = New System.Drawing.Point(72, 200)
Me.txtOmega.Name = "txtOmega"
Me.txtOmega.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtOmega.TabIndex = 27
Me.txtOmega.Text = "620"
,

'Label24
,

Me.Label24.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label24.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label24.Location = New System.Drawing.Point(32, 200)
Me.Label24.Name = "Label24"
Me.Label24.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label24.TabIndex = 28
Me.Label24.Text = "ω:"
Me.Label24.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,

'Label19
,

Me.Label19.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label19.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label19.Location = New System.Drawing.Point(648, 32)
```

```
Me.Label19.Name = "Label19"
Me.Label19.Size = New System.Drawing.Size(32, 23)
Me.Label19.TabIndex = 26
Me.Label19.Text = "(kg)"
Me.Label19.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'Label20
,
Me.Label20.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label20.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label20.Location = New System.Drawing.Point(504, 8)
Me.Label20.Name = "Label20"
Me.Label20.Size = New System.Drawing.Size(112, 23)
Me.Label20.TabIndex = 25
Me.Label20.Text = "Ring mass"
Me.Label20.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'txtSmallm
,
Me.txtSmallm.Location = New System.Drawing.Point(504, 32)
Me.txtSmallm.Name = "txtSmallm"
Me.txtSmallm.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtSmallm.TabIndex = 23
Me.txtSmallm.Text = ""
,
'Label21
,
Me.Label21.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label21.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label21.Location = New System.Drawing.Point(464, 32)
Me.Label21.Name = "Label21"
Me.Label21.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label21.TabIndex = 24
Me.Label21.Text = "m:"
Me.Label21.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,
```

```
'TabPage3
,

Me.TabPage3.Controls.Add(Me.XpGradientPanel4)
Me.TabPage3.Location = New System.Drawing.Point(4, 25)
Me.TabPage3.Name = "TabPage3"
Me.TabPage3.Size = New System.Drawing.Size(714, 395)
Me.TabPage3.TabIndex = 2
Me.TabPage3.Text = " 3. Efficiency "
,

'XpGradientPanel4
,

Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label62)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label54)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.txtH)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label55)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label56)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label57)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.txtNnet)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label58)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label59)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label60)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.txtNf)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label61)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label50)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label51)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.txtVs)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label52)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label47)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label48)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.txtN)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label49)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label36)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label45)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.txtM)
Me.XpGradientPanel4.Controls.Add(Me.Label46)
Me.XpGradientPanel4.Dock = System.Windows.Forms.DockStyle.Fill
Me.XpGradientPanel4.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif",
9.75!, System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
```



```
Me.XpGradientPanel4.Location = New System.Drawing.Point(0, 0)
Me.XpGradientPanel4.Name = "XpGradientPanel4"
Me.XpGradientPanel4.Size = New System.Drawing.Size(714, 395)
Me.XpGradientPanel4.TabIndex = 0
,
'Label62
,
Me.Label62.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label62.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label62.Location = New System.Drawing.Point(568, 248)
Me.Label62.Name = "Label62"
Me.Label62.Size = New System.Drawing.Size(56, 23)
Me.Label62.TabIndex = 66
Me.Label62.Text = "%"
Me.Label62.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'Label54
,
Me.Label54.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label54.Location = New System.Drawing.Point(424, 224)
Me.Label54.Name = "Label54"
Me.Label54.Size = New System.Drawing.Size(88, 23)
Me.Label54.TabIndex = 64
Me.Label54.Text = "Efficiency"
Me.Label54.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'txtH
,
Me.txtH.Location = New System.Drawing.Point(424, 248)
Me.txtH.Name = "txtH"
Me.txtH.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtH.TabIndex = 62
Me.txtH.Text = ""
,
'Label55
,
Me.Label55.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
```

```
Me.Label55.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label55.Location = New System.Drawing.Point(384, 248)  
Me.Label55.Name = "Label55"  
Me.Label55.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)  
Me.Label55.TabIndex = 63  
Me.Label55.Text = "η:"  
Me.Label55.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight  
,  
'Label56  
,  
  
Me.Label56.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label56.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label56.Location = New System.Drawing.Point(568, 184)  
Me.Label56.Name = "Label56"  
Me.Label56.Size = New System.Drawing.Size(56, 23)  
Me.Label56.TabIndex = 61  
Me.Label56.Text = "(Watt)"  
Me.Label56.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
'Label57  
,  
  
Me.Label57.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label57.Location = New System.Drawing.Point(424, 160)  
Me.Label57.Name = "Label57"  
Me.Label57.Size = New System.Drawing.Size(120, 23)  
Me.Label57.TabIndex = 60  
Me.Label57.Text = "Net milling power"  
Me.Label57.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
'txtNnet  
,  
  
Me.txtNnet.Location = New System.Drawing.Point(424, 184)  
Me.txtNnet.Name = "txtNnet"  
Me.txtNnet.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)  
Me.txtNnet.TabIndex = 58  
Me.txtNnet.Text = ""
```

```
,  
'Label58  
,  
  
Me.Label58.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label58.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label58.Location = New System.Drawing.Point(360, 184)  
Me.Label58.Name = "Label58"  
Me.Label58.Size = New System.Drawing.Size(64, 24)  
Me.Label58.TabIndex = 59  
Me.Label58.Text = "Nnet:"  
Me.Label58.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight  
,  
'Label59  
,  
  
Me.Label59.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label59.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label59.Location = New System.Drawing.Point(568, 120)  
Me.Label59.Name = "Label59"  
Me.Label59.Size = New System.Drawing.Size(56, 23)  
Me.Label59.TabIndex = 57  
Me.Label59.Text = "(Watt)"  
Me.Label59.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
'Label60  
,  
  
Me.Label60.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label60.Location = New System.Drawing.Point(424, 96)  
Me.Label60.Name = "Label60"  
Me.Label60.Size = New System.Drawing.Size(144, 23)  
Me.Label60.TabIndex = 56  
Me.Label60.Text = "Frictional power loss"  
Me.Label60.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
'txtNf  
,  
  
Me.txtNf.Location = New System.Drawing.Point(424, 120)
```

```
Me.txtNf.Name = "txtNf"
Me.txtNf.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtNf.TabIndex = 54
Me.txtNf.Text = ""
'
'Label61
'
Me.Label61.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label61.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label61.Location = New System.Drawing.Point(384, 120)
Me.Label61.Name = "Label61"
Me.Label61.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)
Me.Label61.TabIndex = 55
Me.Label61.Text = "Nf:"
Me.Label61.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
'
'Label50
'
Me.Label50.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label50.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label50.Location = New System.Drawing.Point(288, 248)
Me.Label50.Name = "Label50"
Me.Label50.Size = New System.Drawing.Size(48, 23)
Me.Label50.TabIndex = 53
Me.Label50.Text = "(m/s)"
Me.Label50.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
'
'Label51
'
Me.Label51.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label51.Location = New System.Drawing.Point(144, 224)
Me.Label51.Name = "Label51"
Me.Label51.Size = New System.Drawing.Size(112, 23)
Me.Label51.TabIndex = 52
Me.Label51.Text = "Sliding velocity"
Me.Label51.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
```

```
,  
  
'txtVs  
,  
  
Me.txtVs.Location = New System.Drawing.Point(144, 248)  
Me.txtVs.Name = "txtVs"  
Me.txtVs.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)  
Me.txtVs.TabIndex = 50  
Me.txtVs.Text = ""  
,  
  
'Label52  
,  
  
Me.Label52.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label52.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label52.Location = New System.Drawing.Point(88, 248)  
Me.Label52.Name = "Label52"  
Me.Label52.Size = New System.Drawing.Size(56, 24)  
Me.Label52.TabIndex = 51  
Me.Label52.Text = "Vs:"  
Me.Label52.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight  
,  
  
'Label47  
,  
  
Me.Label47.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label47.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label47.Location = New System.Drawing.Point(288, 184)  
Me.Label47.Name = "Label47"  
Me.Label47.Size = New System.Drawing.Size(56, 23)  
Me.Label47.TabIndex = 49  
Me.Label47.Text = "(Watt)"  
Me.Label47.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
  
'Label48  
,  
  
Me.Label48.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label48.Location = New System.Drawing.Point(144, 160)  
Me.Label48.Name = "Label48"
```

```
Me.Label48.Size = New System.Drawing.Size(88, 23)
Me.Label48.TabIndex = 48
Me.Label48.Text = "Milling power"
Me.Label48.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,
'txtN
,

Me.txtN.Location = New System.Drawing.Point(144, 184)
Me.txtN.Name = "txtN"
Me.txtN.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)
Me.txtN.TabIndex = 46
Me.txtN.Text = ""
,

'Label49
,

Me.Label49.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label49.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label49.Location = New System.Drawing.Point(96, 184)
Me.Label49.Name = "Label49"
Me.Label49.Size = New System.Drawing.Size(48, 24)
Me.Label49.TabIndex = 47
Me.Label49.Text = "N:"
Me.Label49.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight
,

'Label36
,

Me.Label36.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent
Me.Label36.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 9.75!,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))
Me.Label36.Location = New System.Drawing.Point(288, 120)
Me.Label36.Name = "Label36"
Me.Label36.Size = New System.Drawing.Size(48, 23)
Me.Label36.TabIndex = 45
Me.Label36.Text = "(Nm)"
Me.Label36.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft
,

'Label45
```

```
,  
  
Me.Label45.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label45.Location = New System.Drawing.Point(144, 96)  
Me.Label45.Name = "Label45"  
Me.Label45.Size = New System.Drawing.Size(152, 23)  
Me.Label45.TabIndex = 44  
Me.Label45.Text = "Shaft torsional moment"  
Me.Label45.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleLeft  
,  
  
'txtM  
,  
  
Me.txtM.Location = New System.Drawing.Point(144, 120)  
Me.txtM.Name = "txtM"  
Me.txtM.Size = New System.Drawing.Size(144, 22)  
Me.txtM.TabIndex = 42  
Me.txtM.Text = ""  
,  
  
'Label46  
,  
  
Me.Label46.BackColor = System.Drawing.Color.Transparent  
Me.Label46.Font = New System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 15.75!,  
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, CType(161, Byte))  
Me.Label46.Location = New System.Drawing.Point(104, 120)  
Me.Label46.Name = "Label46"  
Me.Label46.Size = New System.Drawing.Size(40, 24)  
Me.Label46.TabIndex = 43  
Me.Label46.Text = "M:"  
Me.Label46.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.MiddleRight  
,  
  
'MenuBar1  
,  
  
Me.MenuBar1.Guid = New System.Guid("994743c9-e59c-47a4-bf7e-eeafd93af7da")  
Me.MenuBar1.Items.AddRange(New TD.SandBar.ToolBarItemBase()  
{Me.MenuBarItem1, Me.MenuBarItem5})  
Me.MenuBar1.Location = New System.Drawing.Point(0, 0)  
Me.MenuBar1.Name = "MenuBar1"  
Me.MenuBar1.OwnerForm = Me  
Me.MenuBar1.Size = New System.Drawing.Size(730, 22)
```

```
Me.MenuBar1.TabIndex = 29
Me.MenuBar1.Text = "MenuBar1"
'
'MenuBarItem1
'
Me.MenuBarItem1.Items.AddRange(New TD.SandBar.ToolbarItemBase()
{Me.MenuButtonItem1})
Me.MenuBarItem1.Text = "&Program"
'
'MenuButtonItem1
'
Me.MenuButtonItem1.Text = "Exit"
'
'MenuBarItem5
'
Me.MenuBarItem5.Items.AddRange(New TD.SandBar.ToolbarItemBase()
{Me.MenuButtonItem2})
Me.MenuBarItem5.Text = "&Help"
'
'MenuButtonItem2
'
Me.MenuButtonItem2.Text = "About"
'
'XpGradientPanel1
'
Me.XpGradientPanel1.Controls.Add(Me.TabControl2)
Me.XpGradientPanel1.Controls.Add(Me.MenuBar1)
Me.XpGradientPanel1.Dock = System.Windows.Forms.DockStyle.Fill
Me.XpGradientPanel1.Location = New System.Drawing.Point(0, 0)
Me.XpGradientPanel1.Name = "XpGradientPanel1"
Me.XpGradientPanel1.Size = New System.Drawing.Size(730, 656)
Me.XpGradientPanel1.TabIndex = 0
'
'CMainForm
'
Me.AutoScaleBaseSize = New System.Drawing.Size(5, 13)
Me.ClientSize = New System.Drawing.Size(730, 656)
Me.Controls.Add(Me.XpGradientPanel1)
```



```
Me.FormBorderStyle = System.Windows.Forms.FormBorderStyle.FixedSingle
Me.MaximizeBox = False
Me.Name = "CMainForm"
Me.StartPosition = System.Windows.Forms.FormStartPosition.CenterScreen
Me.Text = "TUC Project v2.1"
Me.TabControl2.ResumeLayout(False)
Me.TabPage5.ResumeLayout(False)
Me.XpGradientPanel6.ResumeLayout(False)
Me.GroupBox2.ResumeLayout(False)
Me.TabPage4.ResumeLayout(False)
Me.XpGradientPanel5.ResumeLayout(False)
Me.TabControl1.ResumeLayout(False)
Me.TabPage1.ResumeLayout(False)
Me.XpGradientPanel2.ResumeLayout(False)
Me.GroupBox1.ResumeLayout(False)
Me.TabPage2.ResumeLayout(False)
Me.XpGradientPanel3.ResumeLayout(False)
Me.TabPage3.ResumeLayout(False)
Me.XpGradientPanel4.ResumeLayout(False)
Me.XpGradientPanel1.ResumeLayout(False)
Me.ResumeLayout(False)

End Sub

#End Region

Private Sub CMainForm_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load
    Me.rdbLamda.Checked = True

End Sub

Private Sub rdbTheta_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles rdbTheta.CheckedChanged
    'Me.txtTheta.Enabled = False
    Me.txtTheta.Text = ""
    'Me.txtLamda.Enabled = True

End Sub

Private Sub rdbLamda_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles rdbLamda.CheckedChanged
    'Me.txtLamda.Enabled = False
    Me.txtLamda.Text = ""
    'Me.txtTheta.Enabled = True
```

```

End Sub

Private Sub btnCompute_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnCompute.Click
    Dim g As New CGeometry
    Dim bExit As Boolean = False
    '
    'Check Rs
    If Not CheckR(Double.Parse(Me.txtsmallr.Text), Double.Parse(Me.txtBigR.Text))
Then
        MessageBox.Show("False input: Rod radius (r) should be less than the mill
radius (R)", "False input", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        bExit = True
    End If
    If Not CheckR(Double.Parse(Me.txtRi.Text), Double.Parse(Me.txtBigR.Text)) Then
        MessageBox.Show("False input: Inner ring radius (ri) should be less than the
mill radius (R)", "False input", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        bExit = True
    End If
    If Not CheckR(Double.Parse(Me.txtR0.Text), Double.Parse(Me.txtBigR.Text)) Then
        MessageBox.Show("False input: Outer ring radius (r0) should be less than
the mill radius (R)", "False input", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        bExit = True
    End If
    If bExit = True Then
        Exit Sub
    End If
    If Me.rdbTheta.Checked = True Then
        If Me.CheckInputTheta() = True Then
            '
            'Check Lamda value
            If Me.MinLamda(Double.Parse(Me.txtLamda.Text),
Double.Parse(Me.txtsmallr.Text), Double.Parse(Me.txtRi.Text), Double.Parse(Me.txtR0.Text),
Double.Parse(Me.txtBigR.Text)) = False Then
                MessageBox.Show("False input: Arm length (l) out of
bounds", "False input", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
                bExit = True
            End If
            If Me.MaxLamda(Double.Parse(Me.txtLamda.Text),
Double.Parse(Me.txtsmallr.Text), Double.Parse(Me.txtRi.Text), Double.Parse(Me.txtR0.Text),
Double.Parse(Me.txtBigR.Text)) = False Then

```

```

        MessageBox.Show("False input: Arm length (l) out of
bounds", "False input", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        bExit = True
    End If
    If bExit = True Then
        Exit Sub
    End If
    Me.txtTheta.Text =
(g.ComputeTheta(Double.Parse(Me.txtBigR.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtsmallr.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtR0.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtLamda.Text) * 180 / Math.PI).ToString
    End If
Else
    If Me.CheckInputLamda Then
        If Double.Parse(Me.txtTheta.Text) < 0.0 OrElse
Double.Parse(Me.txtTheta.Text) > 180.0 Then
            MessageBox.Show("False input: Design angle (θ) out of
bounds", "False input", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
            bExit = True
        End If
        If bExit = True Then
            Exit Sub
        End If
        Me.txtLamda.Text =
Math.Round(g.ComputeLamda(Double.Parse(Me.txtBigR.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtsmallr.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtR0.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000, (Double.Parse(Me.txtTheta.Text) * Math.PI / 180)) * 1000,
1).ToString
    End If
End If

End Sub

,

,

Public Function CheckRs(ByVal smallR As Double, ByVal ri As Double, ByVal r0 As
Double, ByVal bigR As Double) As Boolean
    If smallR < ri AndAlso ri < r0 AndAlso r0 < bigR Then
        Return True
    End If
    Return False

```

End Function

,  
,

Public Function CheckR(ByVal r As Double, ByVal bigR As Double) As Boolean

    If r < bigR Then  
        Return True  
    End If  
    Return False

End Function

\*\*\*\*\*

Public Function CheckInputTheta() As Boolean

    If CheckInput(Me.txtBigR.Text) = True AndAlso \_  
    CheckInput(Me.txtR0.Text) = True AndAlso \_  
    CheckInput(Me.txtRi.Text) = True AndAlso \_  
    CheckInput(Me.txtsmallr.Text) = True AndAlso \_  
    CheckInput(Me.txtLamda.Text) = True Then  
        Return True  
    Else  
        Return False  
    End If

End Function

Public Function CheckInputLamda() As Boolean

    If CheckInput(Me.txtBigR.Text) = True AndAlso \_  
    CheckInput(Me.txtR0.Text) = True AndAlso \_  
    CheckInput(Me.txtRi.Text) = True AndAlso \_  
    CheckInput(Me.txtsmallr.Text) = True AndAlso \_  
    CheckInput(Me.txtTheta.Text) = True Then  
        Return True  
    Else  
        Return False  
    End If

End Function

```

Private Function CheckInput(ByVal sInput As String) As Boolean
    'Check for white spaces or empty string
    If sInput.StartsWith(" ") OrElse sInput.Equals(String.Empty) _
    OrElse sInput.EndsWith(" ") Then
        Console.WriteLine("false input...")
        Return False
    End If
    Return True
End Function

'*****

Private Function MinLamda(ByVal lamda As Double, ByVal smallR As Double, ByVal ri As
Double, ByVal r0 As Double, ByVal bigR As Double) As Boolean
    If lamda < (bigR - r0 - ri + smallR) Then
        'Console.WriteLine("Min l: {0}", bigR - r0 - ri + smallR)
        Return False
    End If
    Return True
End Function

Private Function MaxLamda(ByVal lamda As Double, ByVal smallR As Double, ByVal ri
As Double, ByVal r0 As Double, ByVal bigR As Double) As Boolean
    If lamda > Math.Sqrt(Math.Pow((bigR - r0), 2) + Math.Pow((ri - smallR), 2)) Then
        'Console.WriteLine("Max l: {0}", Math.Sqrt(Math.Pow((bigR - r0), 2) +
Math.Pow((ri - smallR), 2)))
        Return False
    End If
    Return True
End Function

'*****

Private Sub btnRingForces_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnRingForces.Click
    Dim g As New CGeometry
    Dim Ring As New CRingForce
    Dim ef As New CEfficiency
    If Me.CheckInputLamda AndAlso Me.CheckInputTheta Then
        ,
        "NEW CODE"
        Me.txtSmallm.Text = Math.Round((Math.PI *
(Double.Parse(Me.txtBeff.Text) / 1000) * Double.Parse(Me.txtGreekR.Text) _

```

```

        * ((Double.Parse(Me.txtR0.Text) / 1000) * (Double.Parse(Me.txtR0.Text) /
1000) - (Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000) * (Double.Parse(Me.txtRi.Text)) / 1000)), 2).ToString
    Dim Omega As Double
    Omega = Me.RPMTToRadPerSec(Integer.Parse(Me.txtOmega.Text))
    ""NEW CODE""
    ,

    Ring.m_greekm = Double.Parse(Me.txtGreekm.Text)
    '*

    'txtT
    Ring.m_T = Ring.ComputeT(Omega, Double.Parse(Me.txtBigR.Text) /
1000, Double.Parse(Me.txtsmallr.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtR0.Text) / 1000, _
    Double.Parse(Me.txtSmallm.Text), Double.Parse(Me.txtGreekm.Text),
Double.Parse(Me.txtSmalla.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtTheta.Text))
    Me.txtT.Text = Math.Round(Ring.m_T, 1).ToString
    '*

    'txtP
    Ring.m_P = Ring.ComputeP(Omega, Double.Parse(Me.txtBigR.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtsmallr.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtR0.Text) / 1000, _
    Double.Parse(Me.txtSmallm.Text), Double.Parse(Me.txtGreekm.Text),
Double.Parse(Me.txtSmalla.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtTheta.Text))
    Me.txtP.Text = Math.Round(Ring.m_P, 1).ToString
    '*

    'txtBigF
    Ring.m_bigF = Ring.ComputeBigF(Omega, Double.Parse(Me.txtBigR.Text)
/ 1000, Double.Parse(Me.txtsmallr.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtR0.Text) / 1000, _
    Double.Parse(Me.txtSmallm.Text), Double.Parse(Me.txtGreekm.Text),
Double.Parse(Me.txtSmalla.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtTheta.Text))
    Me.txtBigF.Text = Math.Round(Ring.m_bigF, 1).ToString
    ,

    'txtTf
    Ring.m_Tf = Ring.ComputeTf()
    Me.txtTf.Text = Math.Round(Ring.m_Tf, 1).ToString
    ,

    'txtSmallf
    Me.txtSmallf.Text = Math.Round(Ring.smallF, 2).ToString

```

```

        Dim gF As Double = g.ComputeF(Double.Parse(Me.txtsmallr.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtTheta.Text),
Double.Parse(Me.txtLamda.Text) / 1000)
        '*
        ,

        ef.m_M = ef.ComputeM(Omega, Double.Parse(Me.txtBigR.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtsmallr.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtR0.Text) / 1000, _
        Double.Parse(Me.txtSmallm.Text), Double.Parse(Me.txtGreekm.Text),
Double.Parse(Me.txtSmalla.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtTheta.Text), gF,
Double.Parse(Me.txtLamda.Text) / 1000)
        Me.txtM.Text = Math.Round(ef.m_M, 3).ToString()
        '*
        ,

        ef.m_N = ef.ComputeN(ef.m_M, Omega)
        Me.txtN.Text = Math.Round(ef.m_N, 0).ToString()
        '*
        ,

        ef.m_Vs = ef.ComputeVs (Omega, Double.Parse(Me.txtBigR.Text) / 1000,
Double.Parse(Me.txtRi.Text) / 1000, Double.Parse(Me.txtR0.Text) / 1000)
        Me.txtVs.Text = Math.Round(ef.m_Vs, 2).ToString()
        ,
        ,

        Dim tempTf As Double = Double.Parse(Me.txtTf.Text)
        ef.m_Nf = ef.ComputeNf(tempTf, ef.m_Vs)
        Me.txtNf.Text = Math.Round(ef.m_Nf, 0).ToString()
        ,
        ,

        ef.m_Nnet = ef.ComputeNnet(ef.m_N, ef.m_Nf)
        Me.txtNnet.Text = Math.Round(ef.m_Nnet, 0).ToString()
        ,
        ,

        ef.m_H = ef.ComputeH(ef.m_N, ef.m_Nf)
        Me.txtH.Text = Math.Round(ef.m_H * 100, 1).ToString

    End If
End Sub

```

```
Public Function RPMToRadPerSec(ByVal rpm As Integer) As Double
    Return (2 * Math.PI * rpm) / 60
End Function

Private Sub MenuItem1_Activate(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MenuItem1.Activate
    Application.Exit()
End Sub

Private Sub MenuItem2_Activate(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MenuItem2.Activate
    Dim output As String
    output = output.Format("ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ" + vbCrLf + _
        "Ανάλυση Παραμέτρων ενός Νέου Δακτυλιόμυλου" + vbCrLf + vbCrLf + vbCrLf +
        "Σκανδαλάκης Αντώνης, Α.Μ.: 2000020035" + vbCrLf + vbCrLf + vbCrLf + vbCrLf + _
        "Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης" + vbCrLf + _
        "Ακαδημαϊκό έτος 2004-2005")
    MessageBox.Show(output, "About", MessageBoxButtons.OK,
    MessageBoxIcon.Information)
End Sub

Private Sub btnCompute2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnCompute2.Click
    Dim d As Double
    'Xn
    Dim XList As New ArrayList
    TextboxToArrayList(Me.TextBox1, XList)
    'Print XList
    '
    Console.WriteLine()
    Console.WriteLine("XList:")
    For Each d In XList
        Console.WriteLine(d)
    Next

    'XList.Add(707)
    'XList.Add(500)
    'XList.Add(354)
    'XList.Add(250)
    'XList.Add(177)
    'XList.Add(125)
    'XList.Add(88)
```



```
'XList.Add(63)
'Pn
Dim PList As New ArrayList
TextboxToArrayList(Me.TextBox2, PList)
'Print PList
'
Console.WriteLine()
Console.WriteLine("PList:")
For Each d In PList
    Console.WriteLine(d)
Next
'PList.Add(0.1121655)
'PList.Add(0.2103861)
'PList.Add(0.3007248)
'PList.Add(0.38051388)
'PList.Add(0.45326988)
'PList.Add(0.52184241)
'PList.Add(0.58762596)
'PList.Add(0.64971108)

'PList.Add(0.119665)
'PList.Add(0.09532172)
'PList.Add(0.078637)
'PList.Add(0.0635934)
'PList.Add(0.047866)
'PList.Add(0.0372671)
'PList.Add(0.023933)
'PList.Add(0.01018862)
If PList.Count.Equals(XList.Count).Equals(False) Then
    MessageBox.Show("Check Xn and Pn elements...", "False input...",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information)
Exit Sub
End If
'Kn
Dim KList As New ArrayList
'Wn, Pn for T = T1
Dim WListT1 As New ArrayList
Dim PListT1 As New ArrayList
```

```
'Wn, Pn for T = T2
Dim WListT2 As New ArrayList
Dim PListT2 As New ArrayList
'Wn, Pn for T = T3
Dim WListT3 As New ArrayList
Dim PListT3 As New ArrayList
Dim eq As New CEquation
'Compute KList
,

'K(x) = Ax^2 + Bx + Γ
If Me.rbn1.Checked = True Then
    For Each d In XList
        KList.Add(eq.K1(Double.Parse(Me.txtA.Text),
Double.Parse(Me.txtB.Text), Double.Parse(Me.txtG.Text), d / 1000000))
    Next
End If
'K(x) = Ax^2 + Bx
If Me.rbn2.Checked = True Then
    For Each d In XList
        KList.Add(eq.K2(Double.Parse(Me.txtA.Text),
Double.Parse(Me.txtB.Text), d / 1000000))
    Next
End If
'K(x) = Ax + B
If Me.rbn3.Checked = True Then
    For Each d In XList
        KList.Add(eq.K3(Double.Parse(Me.txtA.Text),
Double.Parse(Me.txtB.Text), d / 1000000))
    Next
End If
'Print KList
,

Console.WriteLine()
Console.WriteLine("KList:")
For Each d In KList
    Console.WriteLine(d)
Next
```

```

        Dim i As Integer
        'Compute WListT1
        ,
        For i = 0 To XList.Count - 1
            WListT1.Add(eq.W(CType(PList.Item(i), Double), CType(KList.Item(i),
Double), Double.Parse(Me.txtT1.Text)))
        Next
        'Compute WListT2
        ,
        For i = 0 To XList.Count - 1
            WListT2.Add(eq.W(CType(PList.Item(i), Double), CType(KList.Item(i),
Double), Double.Parse(Me.txtT2.Text)))
        Next
        'Compute WListT3
        ,
        For i = 0 To XList.Count - 1
            WListT3.Add(eq.W(CType(PList.Item(i), Double), CType(KList.Item(i),
Double), Double.Parse(Me.txtT3.Text)))
        Next
        'Compute PListT1
        ,
        For i = 0 To XList.Count - 1
            PListT1.Add(CType(WListT1.Item(i), Double) + CType(PList.Item(i),
Double))
        Next
        'Compute PListT2
        ,
        For i = 0 To XList.Count - 1
            PListT2.Add(CType(WListT2.Item(i), Double) + CType(PList.Item(i),
Double))
        Next
        'Compute PListT3
        ,
        For i = 0 To XList.Count - 1
            PListT3.Add(CType(WListT3.Item(i), Double) + CType(PList.Item(i),
Double))
        Next
        'Print PListT1
        ,

```

```
        Console.WriteLine()
        Console.WriteLine("PListT1:")
        For Each d In PListT1
            Console.WriteLine(d)
        Next
        'Print PListT2
        '
        Console.WriteLine()
        Console.WriteLine("PListT2:")
        For Each d In PListT2
            Console.WriteLine(d)
        Next
        'Print PListT3
        '
        Console.WriteLine()
        Console.WriteLine("PListT3:")
        For Each d In PListT3
            Console.WriteLine(d)
        Next
        Console.WriteLine()
        Console.WriteLine("-----")
        Console.WriteLine()
        Me.lstK.Items.Clear()
        Me.lstT1.Items.Clear()
        Me.lstT2.Items.Clear()
        Me.lstT3.Items.Clear()
        Me.ArraylistToListbox(KList, Me.lstK)
        Me.ArraylistToListbox(PListT1, Me.lstT1, 3)
        Me.ArraylistToListbox(PListT2, Me.lstT2, 3)
        Me.ArraylistToListbox(PListT3, Me.lstT3, 3)
    End Sub

    Public Sub ArraylistToListbox(ByVal arr As ArrayList, ByVal lst As ListBox)
        Dim d As Double
        For Each d In arr
            lst.Items.Add(d)
        Next
    End Sub
```

```

Public Sub ArrayListToListbox(ByVal arr As ArrayList, ByVal lst As ListBox, ByVal n As
Integer)
    Dim d As Double
    For Each d In arr
        lst.Items.Add(Math.Round(d, n))
    Next
End Sub

Public Sub TextboxToArrayList(ByVal txt As TextBox, ByVal arr As ArrayList)
    Try
        Dim d As Double
        Dim s As String
        arr.Clear()
        For Each s In txt.Lines
            If (Not s.Equals(String.Empty)) AndAlso (s <> vbCrLf) Then
                arr.Add(Double.Parse(s))
            End If
        Next
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show(ex.ToString, "False input...", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Information)
    End Try
End Sub

End Class
'
'

Public Class CEquation
    'K(x) = Ax^2 + Bx + Γ
    Public Function K1(ByVal Alpha As Double, ByVal Beta As Double, ByVal Gamma As
Double, ByVal Xn As Double) As Double
        Return Alpha * Math.Pow(Xn, 2) + Beta * Xn + Gamma
    End Function
    'K(x) = Ax^2 + Bx
    Public Function K2(ByVal Alpha As Double, ByVal Beta As Double, ByVal Xn As Double)
As Double
        Return Alpha * Math.Pow(Xn, 2) + Beta * Xn
    End Function
    'K(x) = Ax + B
    Public Function K3(ByVal Alpha As Double, ByVal Beta As Double, ByVal Xn As Double)
As Double

```

```
        Return Alpha * Xn + Beta
    End Function
    'Wn = ( 1 - Pn ) * ( 1 - e ^ (-Kn * T) )
    Public Function W(ByVal Pn As Double, ByVal Kn As Double, ByVal T As Double) As
Double
        Return (1 - Pn) * (1 - Math.Exp(-Kn * T))
    End Function
End Class
```

**Κοκκομετρικές κατανομές προϊόντων λειοτρίβησης δακτυλιόμυλου**

Αρ. Δοκιμής	Χρόνος (sec)	Βάρος κλάσματος (gr)		Συνολικό Βάρος	Βάρος (%) διερχόμενο επί του συνόλου
		-0,710	0,710		
Δ1	10	14,0	0,3	14,3	97,90
Δ1	20	12,1	0,0	12,1	100,00
Δ1	40	10,7	0,0	10,7	100,00
Δ2	10	21,3	8,7	30,0	71,00
Δ2	20	47,2	6,3	53,5	88,22
Δ2	40	16,3	0,0	16,3	100,00
Δ3	10	8,6	4,0	12,6	68,25
Δ3	20	8,0	0,3	8,3	96,39
Δ3	40	12,4	0,0	12,4	100,00
Δ4	10	23,3	5,5	28,8	80,90
Δ4	20	33,6	0,2	33,8	99,41
Δ4	40	8,2	0,1	8,3	98,80
Δ5	10	10,4	26,0	36,4	28,57
Δ5	20	21,2	7,1	28,3	74,91
Δ5	40	31,4	1,9	33,3	94,29
Δ6	10	13,4	8,0	21,4	62,62
Δ6	20	9,1	4,9	14,0	65,00
Δ6	40	10,5	0,6	11,1	94,59

Δοκιμή 1 (10 sec)		Under (%) τελικό	Δοκιμή 1 (20 sec)		Under (%) τελικό
Size high (μm)	Under (%)		Size high (μm)	Under (%)	
0,07	0,01	0,0098	0,07	0,01	0,01
0,11	0,11	0,1077	0,11	0,12	0,12
0,17	0,41	0,4014	0,17	0,47	0,47
0,27	1,04	1,0182	0,27	1,21	1,21
0,42	1,98	1,9385	0,42	2,33	2,33
0,67	3,30	3,2308	0,67	3,94	3,94
1,06	5,21	5,1007	1,06	6,26	6,26
1,68	7,91	7,7441	1,68	9,50	9,50
2,65	11,58	11,3371	2,65	13,75	13,75
4,19	16,41	16,0657	4,19	19,09	19,09
6,63	22,47	21,9986	6,63	25,59	25,59
9,00	27,10	26,5315	7,72	27,99	27,99
14,22	34,92	34,1874	12,21	35,79	35,79
22,49	44,00	43,0769	19,31	44,57	44,57
35,56	54,21	53,0727	30,53	54,18	54,18
56,23	64,62	63,2643	48,27	63,84	63,84
88,91	73,96	72,4084	76,32	74,52	74,52
140,58	81,94	80,2210	120,67	82,99	82,99
222,28	90,26	88,3664	190,80	91,30	91,30
351,46	97,84	95,7874	301,68	97,02	97,02
477,01	100,00	97,9021	477,01	100,00	100,00

Δοκιμή 1 (40 sec)		Under (%) τελικό	Δοκιμή 1 (80 sec)	
Size high (μm)	Under (%)		Size high (μm)	Under (%)
0,07	0,00	0,00	0,07	0,01
0,11	0,07	0,07	0,11	0,10
0,17	0,36	0,36	0,17	0,52
0,27	1,18	1,18	0,27	1,66
0,42	2,55	2,55	0,42	3,50
0,67	4,67	4,67	0,67	6,16
1,06	7,87	7,87	1,06	9,93
1,68	12,30	12,30	1,68	15,19
2,65	17,83	17,83	2,65	22,16
4,19	24,35	24,35	4,19	30,91
6,63	32,07	32,07	6,63	41,15
9,00	37,83	37,83	10,48	52,03
14,22	47,26	47,26	16,57	63,09
22,49	57,51	57,51	26,20	74,15
35,56	68,13	68,13	41,43	84,60
56,23	78,27	78,27	65,51	92,93
88,91	86,66	86,66	103,58	97,64
140,58	93,02	93,02	163,77	99,52
222,28	97,98	97,98	258,95	100,00
351,46	100,00	100,00		

Δοκιμή 2 (10 sec)	Under (%)	Δοκιμή 2 (20 sec)	Under (%)
-------------------	-----------	-------------------	-----------



Size high (μm)	Under (%)	τελικό	Size high (μm)	Under (%)	τελικό
0,13	0,01	0,0071	0,07	0,01	0,0088
0,20	0,12	0,0852	0,11	0,08	0,0706
0,31	0,57	0,4047	0,17	0,34	0,3000
0,49	1,31	0,9301	0,27	1,01	0,8911
0,78	2,32	1,6472	0,42	2,12	1,8704
1,24	3,65	2,5915	0,67	3,9	3,4407
1,95	5,35	3,7985	1,06	6,58	5,8052
3,09	7,62	5,4102	1,68	10,09	8,9018
4,88	10,74	7,6254	2,65	14,14	12,4749
9,00	16,36	11,6156	4,19	18,75	16,5421
14,22	21,34	15,1514	6,63	24,41	21,5356
22,49	27,14	19,2694	9	28,95	25,5409
35,56	33,94	24,0974	14,22	37,02	32,6606
56,23	42,30	30,0330	22,49	46,64	41,1478
88,91	51,02	36,2242	35,56	57,24	50,4996
140,58	60,53	42,9763	56,23	67,73	59,7543
222,28	71,45	50,7295	88,91	76,96	67,8974
351,46	80,93	57,4603	140,58	84,48	74,5319
555,71	91,99	65,3129	222,28	91,33	80,5753
878,67	100,00	71,0000	351,46	97,44	85,9658
			555,71	100	88,2243

Δοκιμή 2 (40 sec)		Under (%) τελικό	Δοκιμή 2 (80 sec)	
Size high (μm)	Under (%)		Size high (μm)	Under (%)
0,07	0,01	0,01	0,07	0,01
0,11	0,12	0,12	0,11	0,09
0,17	0,47	0,47	0,17	0,45
0,27	1,22	1,22	0,27	1,44
0,42	2,39	2,39	0,42	3,02
0,67	4,17	4,17	0,67	5,36
1,06	6,81	6,81	1,06	8,74
1,68	10,40	10,40	1,68	13,39
2,65	14,72	14,72	2,65	19,27
4,19	19,72	19,72	4,19	26,30
6,63	25,60	25,60	6,63	34,48
7,72	27,78	27,78	9,00	40,43
12,21	34,95	34,95	14,22	50,00
19,31	43,22	43,22	22,49	60,47
30,53	52,63	52,63	35,56	71,44
48,27	62,56	62,56	56,23	81,77
76,32	71,83	71,83	88,91	89,43
120,67	81,75	81,75	140,58	94,54
190,80	89,76	89,76	222,28	98,48
301,68	96,24	96,24	351,46	100,00
477,01	100,00	100,00		

Δοκιμή 3 (10 sec)	Under (%)	Δοκιμή 3 (20 sec)	Under (%)
-------------------	-----------	-------------------	-----------

Size high (μm)	Under (%)	τελικό	Size high (μm)	Under (%)	τελικό
0,08	0,01	0,0068	0,07	0,01	0,0096
0,13	0,10	0,0683	0,11	0,07	0,0675
0,20	0,36	0,2457	0,17	0,30	0,2892
0,31	0,88	0,6006	0,27	0,85	0,8193
0,49	1,64	1,1194	0,42	1,70	1,6386
0,78	2,73	1,8633	0,67	2,94	2,8337
1,24	4,29	2,9281	1,06	4,75	4,5783
1,95	6,33	4,3205	1,68	7,21	6,9494
3,09	8,84	6,0337	2,65	10,25	9,8795
4,88	12,06	8,2314	4,19	13,95	13,4458
9,00	18,09	12,3471	6,63	18,67	17,9952
14,22	24,32	16,5994	7,72	20,51	19,7687
22,49	32,32	22,0597	12,21	25,97	25,0313
35,56	41,99	28,6598	19,31	34,07	32,8386
56,23	52,74	35,9971	30,53	43,97	42,3807
88,91	63,22	43,1502	48,27	55,23	53,2337
140,58	72,21	49,2862	76,32	66,78	64,3663
222,28	80,15	54,7056	120,67	77,53	74,7277
351,46	88,97	60,7256	190,80	87,31	84,1542
555,71	96,73	66,0221	301,68	95,56	92,1060
878,67	100,00	68,2540	477,01	100,00	96,3855

Δοκιμή 3 (40 sec)		Under (%) τελικό	Δοκιμή 3 (80 sec)	
Size high (μm)	Under (%)		Size high (μm)	Under (%)
0,07	0,01	0,01	0,07	0,01
0,11	0,11	0,11	0,11	0,08
0,17	0,40	0,40	0,17	0,39
0,27	1,00	1,00	0,27	1,18
0,42	1,92	1,92	0,42	2,41
0,67	3,27	3,27	0,67	4,18
1,06	5,27	5,27	1,06	6,74
1,68	7,98	7,98	1,68	10,19
2,65	11,32	11,32	2,65	14,44
4,19	15,31	15,31	4,19	19,51
6,63	20,23	20,23	6,63	25,80
10,48	26,27	26,27	9,00	30,81
16,57	33,63	33,63	14,22	39,69
26,20	42,45	42,45	22,49	50,30
41,43	53,54	53,54	35,56	62,09
65,51	64,13	64,13	56,23	73,90
103,58	74,17	74,17	88,91	84,45
163,77	83,34	83,34	140,58	92,69
258,95	92,30	92,30	222,28	98,27
409,45	98,17	98,17	351,46	100,00
647,41	100,00	100,00		

Δοκιμή 4 (10 sec)	Under (%)	Δοκιμή 4 (20 sec)	Under (%)
-------------------	-----------	-------------------	-----------

Size high (μm)	Under (%)	τελικό	Size high (μm)	Under (%)	τελικό
0,17	0,01	0,0081	0,20	0,01	0,0099
0,27	0,06	0,0485	0,31	0,11	0,1093
0,42	0,17	0,1375	0,49	0,34	0,3380
0,67	0,37	0,2993	0,78	0,75	0,7456
1,06	0,71	0,5744	1,24	1,42	1,4116
1,68	1,24	1,0032	1,95	2,37	2,3560
2,65	1,93	1,5614	3,09	3,50	3,4793
4,19	2,74	2,2167	4,88	4,71	4,6821
6,63	3,69	2,9853	7,72	6,08	6,0440
9,00	4,45	3,6002	9,00	6,57	6,5311
14,22	5,96	4,8218	14,22	8,32	8,2708
22,49	8,21	6,6421	22,49	10,64	10,5770
35,56	11,57	9,3605	35,56	13,69	13,6090
56,23	16,33	13,2114	56,23	17,71	17,6052
88,91	22,15	17,9200	88,91	22,87	22,7347
140,58	28,68	23,2029	140,58	29,59	29,4149
222,28	37,99	30,7350	222,28	38,84	38,6102
351,46	54,53	44,1163	351,46	54,46	54,1378
555,71	80,52	65,1429	555,71	75,96	75,5105
878,67	100,00	80,9028	878,67	100,00	99,4083

Δοκιμή 4 (40 sec)		Under (%) τελικό	Δοκιμή 4 (80 sec)	
Size high (μm)	Under (%)		Size high (μm)	Under (%)
0,11	0,01	0,01	0,08	0,01
0,17	0,05	0,05	0,13	0,09
0,27	0,17	0,17	0,20	0,32
0,42	0,40	0,40	0,31	0,77
0,67	0,88	0,87	0,49	1,52
1,06	1,81	1,79	0,78	2,90
1,68	3,22	3,18	1,24	5,18
2,65	4,94	4,88	1,95	8,14
4,19	6,80	6,72	3,09	11,39
6,63	8,87	8,76	4,88	14,86
7,72	9,63	9,51	6,63	17,47
12,21	12,23	12,08	10,48	22,11
19,31	15,63	15,44	16,57	28,13
30,53	20,31	20,07	26,20	36,03
48,27	26,53	26,21	41,43	45,92
76,32	34,40	33,99	65,51	57,56
120,67	44,97	44,43	103,58	70,51
190,80	60,21	59,48	163,77	84,36
301,68	79,72	78,76	258,95	96,14
477,01	94,73	93,59	409,45	100,00
754,23	100,00	98,80		

Δοκιμή 5 (10 sec)	Under (%)	Δοκιμή 5 (20 sec)	Under (%)
-------------------	-----------	-------------------	-----------

Size high (μm)	Under (%)	τελικό	Size high (μm)	Under (%)	τελικό
0,27	0,01	0,0029	0,27	0,02	0,0150
0,42	0,09	0,0257	0,42	0,14	0,1049
0,67	0,26	0,0743	0,67	0,42	0,3146
1,06	0,49	0,1400	1,06	0,85	0,6367
1,68	0,88	0,2514	1,68	1,52	1,1387
2,65	1,40	0,4000	2,65	2,36	1,7679
4,19	2,02	0,5771	4,19	3,33	2,4946
6,63	2,75	0,7857	6,63	4,50	3,3710
9,00	3,31	0,9457	9,00	5,40	4,0452
14,22	4,36	1,2457	14,22	7,05	5,2813
22,49	5,87	1,6771	22,49	9,23	6,9143
35,56	9,83	2,8086	35,56	11,92	8,9295
56,23	14,25	4,0714	56,23	15,22	11,4016
88,91	20,24	5,7829	88,91	19,32	14,4729
140,58	30,52	8,7200	140,58	24,14	18,0837
222,28	41,08	11,7371	222,28	30,52	22,8630
351,46	52,65	15,0429	351,46	41,40	31,0134
555,71	68,79	19,6543	555,71	59,66	44,6923
878,67	100,00	28,5714	878,67	100,00	74,9117

Δοκιμή 5 (40 sec)		Under (%) τελικό	Δοκιμή 5 (80 sec)	
Size high (μm)	Under (%)		Size high (μm)	Under (%)
0,15	0,01	0,01	0,06	0,01
0,23	0,05	0,05	0,09	0,07
0,36	0,17	0,16	0,15	0,21
0,58	0,43	0,41	0,23	0,43
0,91	0,96	0,91	0,36	0,73
1,44	1,84	1,74	0,58	1,24
2,28	3,01	2,84	0,91	2,18
3,60	4,36	4,11	1,44	3,64
5,69	5,91	5,57	2,28	5,46
9,00	7,72	7,28	3,60	7,56
14,22	9,85	9,29	5,69	10,04
22,49	12,47	11,76	9,00	13,09
35,56	15,85	14,95	14,22	16,89
56,23	20,17	19,02	22,49	21,75
88,91	25,38	23,93	35,56	27,83
140,58	32,25	30,41	56,23	35,04
222,28	43,60	41,11	88,91	43,40
351,46	63,48	59,86	140,58	53,45
555,71	87,46	82,47	222,28	65,45
878,67	100,00	94,29	351,46	78,73
			555,71	91,86
			878,67	100,00

Δοκιμή 6 (10 sec)		Under (%) τελικό	Δοκιμή 6 (20 sec)		Under (%) τελικό
Size high (μm)	Under (%)		Size high (μm)	Under (%)	
0,20	0,01	0,0058	0,23	0,01	0,0060
0,31	0,08	0,0467	0,36	0,12	0,0726
0,49	0,21	0,1225	0,58	0,34	0,2056
0,78	0,41	0,2392	0,91	0,64	0,3871
1,24	0,71	0,4142	1,44	1,05	0,6351
1,95	1,14	0,6650	2,28	1,63	0,9859
3,09	1,71	0,9975	3,60	2,38	1,4395
4,88	2,41	1,4058	5,69	4,29	2,5948
7,72	3,28	1,9133	9,00	6,35	3,8407
12,21	4,33	2,5258	14,22	7,58	4,5847
19,31	5,76	3,3600	22,49	9,17	5,5464
30,53	7,82	4,5617	35,56	11,15	6,7440
48,27	10,83	6,3175	56,23	15,83	9,5746
76,32	14,95	8,7208	88,91	20,27	12,2601
120,67	19,97	11,6492	140,58	25,56	15,4597
190,80	26,92	15,7033	222,28	35,37	21,3931
301,68	39,55	23,0708	351,46	53,90	32,6008
477,01	61,98	36,1550	555,71	77,37	46,7964
754,23	92,41	53,9058	878,67	100,00	60,4839
878,67	100,00	58,3333			

Δοκιμή 6 (40 sec)		Under (%) τελικό	Δοκιμή 6 (80 sec)		Under (%) τελικό
Size high (μm)	Under (%)		Size high (μm)	Under (%)	
0,20	0,01	0,0094	0,09	0,01	0,0099
0,31	0,14	0,1317	0,15	0,07	0,0696
0,49	0,42	0,3950	0,23	0,23	0,2286
0,78	0,85	0,7995	0,36	0,54	0,5367
1,24	1,50	1,4109	0,58	1,02	1,0137
1,95	2,41	2,2668	0,91	1,80	1,7889
3,09	3,62	3,4050	1,44	3,05	3,0312
4,88	5,09	4,7876	2,28	4,86	4,8300
7,72	6,85	6,4431	3,60	7,17	7,1257
12,21	8,94	8,4089	5,69	9,84	9,7793
19,31	11,66	10,9673	9,00	12,75	12,6713
30,53	15,20	14,2970	14,22	15,92	15,8217
48,27	19,69	18,5203	22,49	19,64	19,5188
76,32	25,21	23,7124	35,56	24,38	24,2295
120,67	31,98	30,0802	56,23	30,51	30,3217
190,80	41,15	38,7054	88,91	37,95	37,7157
301,68	54,02	50,8109	140,58	47,62	47,3260
477,01	70,73	66,5282	222,28	61,63	61,2496
754,23	93,35	87,8045	351,46	80,11	79,6155
878,67	100,00	94,0594	555,71	94,89	94,3043
			878,67	100	99,3827

