

# ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΕ ΤΡΙΒΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Δ.Χ.Τσαματσούλης

*Δρ. Χημικός Μηχανικός, Συντονιστής Ποιότητας, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε.*

Π.Γκρίτζαλη

*Μεταλλειολόγος Μηχανικός, Προϊστάμενος Ποιότητας, ΛΑΤΟΜΕΙΟ ΧΑΛΥΨ*

*Λέξεις κλειδιά:* Αδρανή υλικά, θραύση, άλεση, κινητική, προσομοίωση

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται προσομοίωση της θραύσης σε τριβεία παραγωγής αδρανών ( χαλίκι γαρμπίλι, άμμος) και ανάπτυξη προτύπου κινητικής. Στην παρούσα φάση της μελέτης μελετώνται τα τριβεία ως ανοιχτό κύκλωμα, λαμβάνοντας υπόψη την παροχή τροφοδοσίας και τις κοκκομετρικές τροφοδοσίας και εξαγωγής. Το κινητικό μοντέλο περιλαμβάνει κινητική α! τάξης και συντελεστές κατανομής των θραυσμάτων και μπορεί να αξιοποιηθεί στον καθημερινό έλεγχο των διεργασιών και της ευθραυστότητας των α! υλών, στην παρακολούθηση της παραγωγικότητας ενός τριβείου και στην σύγκριση διαφορετικών μονάδων.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διεργασίες της μείωσης του μεγέθους αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα της παραγωγικής διαδικασίας σε ένα εργοστάσιο ασβεστολιθικών αδρανών. Φυσικά ένα άλλο σημαντικό τμήμα είναι ο διαχωρισμός του προϊόντος της θραύσης με συστοιχία κόσκινων. Λόγω της σημαντικής πολυπλοκότητας που παρουσιάζει μία τέτοιου τύπου μονάδα, καθώς αποτελείται από συστοιχία διαλογέων, σπαστήρων, τριβείων και κόσκινων, πέρα από την συχνά εμπειρική αντιμετώπιση είναι χρήσιμη η ανάπτυξη μαθηματικών προσομοιωτών που να περιγράφουν με επαρκή ακρίβεια τις διεργασίες ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη και η έγκαιρη ενέργεια. Στα πλαίσια αυτά αναπτύσσεται προσομοιωτής της λειτουργίας τριβείου αδρανών υλικών βασισμένο σε κινητική θραύσης και άλεσης. Παραπλήσιο κινητικό πρότυπο έχει ήδη αναπτυχθεί για την διεργασία άλεσης τσιμέντου από τον Τσαματσούλη et al. (2001). Ίδιας μορφής και φιλοσοφίας μοντέλα συναντώνται αρκετά πλατιά στην βιβλιογραφία. ( Deniz (2004), Morozon et al. (1983)) και ως θεμελιωτής μπορεί να θεωρηθεί ο Austin (1996), ο οποίος εισήγαγε αρχές κινητικής χημικών

αντιδράσεων σε φυσικές διεργασίες όπως η θραύση και η άλεση. Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να αξιοποιηθεί:

- Στον καθημερινό έλεγχο των διεργασιών θραύσης, όπου όχι απλώς θα μετράται η κοκκομετρία εισαγωγής και εξαγωγής από τα τριβεία αλλά και η αλεστικότητα τους μέσω του υπολογισμού των αντίστοιχων κινητικών παραμέτρων. Ο έλεγχος της παραγωγής επιβάλλεται πλέον από το πρότυπο EN 12620:2002 και το προτεινόμενο μοντέλο σε ένα πιο λεπτομερή έλεγχο και ρύθμιση. Η προσομοίωση εφαρμόζεται ήδη σε τριβεία των Λατομείων ΧΑΛΥΨ.

- Στην εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης του τριβείου, εάν δηλαδή λειτουργεί ικανοποιητικά ή απαιτείται συντήρηση του π.χ. αλλαγή σφυριών.

- Στη σύγκριση της παραγωγικής ικανότητας διαφορετικών τριβείων για ίδια ποιότητα τροφοδοτούμενου υλικού.

- Στην αξιολόγηση της παραγωγικότητας νέων τριβείων, όταν δοθούν τα αντίστοιχα δεδομένα ώστε να λειτουργήσει η προσομοίωση.

## 2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

Στην παρούσα φάση ανάπτυξης του μαθηματικού προτύπου κάθε τριβείο θεωρείται ως ανοιχτό κύκλωμα και μελετούνται οι κοκκομετρίες στην είσοδο και την έξοδο του και οι αντίστοιχες παροχές. Η πρώτη ύλη αποτελείται από  $N$  κοκκομετρικά κλάσματα,  $w_1, w_2, \dots, w_N$ , όπου  $w_1$  είναι το χονδρότερο κλάσμα. Ως αποτέλεσμα η πρώτη ύλη μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από  $N$  διακριτά συστατικά. Κατά την διάρκεια της άλεσης ο ρυθμός μεταβολής του κλάσματος  $w_i$ , εκφρασμένος με κινητική  $a!$  τάξης, δίνεται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dw_i}{dt} = -S_i * w_i + \sum_{j=1}^{i-1} S_j * b_{ji} * w_j \quad (1)$$

Η λογική της εξίσωσης (1) είναι ότι ο ρυθμός μεταβολής κάθε κοκκομετρικού κλάσματος ισούται με το άθροισμα του ρυθμού απώλειας προς τα λεπτότερα κλάσμα και του ρυθμού συσσώρευσης θραυσμάτων από τα χοντρότερα κλάσματα. Για ένα δεδομένο τριβείο, η ειδική ταχύτητα θραύσης,  $S_i$ , η οποία δίνεται από την εξίσωση (3), εξαρτάται από δυσθραυστότητα της  $a!$  ύλης και την κατάσταση των σφυριών του τριβείου. Οι παράγοντες κατανομής  $b_{ji}$ , του χονδρότερου κλάσματος  $j$  προς το λεπτότερο  $i$ , υπολογίζονται από τους αντίστοιχους αθροιστικούς παράγοντες κατανομής από τη σχέση:

$$B_{ji} = \sum_{k=i}^N b_{jk} \quad (2)$$

Οι παράμετροι  $S_i$  και  $B_{ji}$  συνδέονται με την διάσταση κόκκου με τις σχέσεις (3), (4):

$$S_i = a_1 \cdot \frac{x_i^a}{1 + \left(\frac{x_i}{m_0}\right)^{q_0}} \quad (3)$$

$$B_{ji} = f \cdot \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^g + (1-f) \quad i, j = 1..N \quad (4)$$

Το πρότυπο που περιγράφεται με τις εξισώσεις (3), (4) περιλαμβάνει 6 παραμέτρους προς προσαρμογή με βάση τα πειραματικά σημεία.:  $a$ ,  $a_1$ ,  $m_0$ ,  $q_0$ ,  $f$ ,  $g$ . Από τη σχέση (3) προκύπτει ότι υπάρχει μία διάσταση  $x_{MAX}$  για την οποία παρατηρείται μέγιστη ειδική ταχύτητα και δίνεται από τη σχέση:

$$x_{MAX} = m_0 \cdot \left(\frac{a}{q-a}\right)^{1/q} \quad (5)$$

Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (1) έχει αναλυτική λύση όπου υπεισέρχεται ο χρόνος παραμονής,  $t_{res}$ , που δίνεται από τη σχέση (6):

$$t_{res} = \frac{H_M}{Q} \quad (6)$$

Όπου  $Q$  η παροχή υλικού – εισαγωγής ή εξαγωγής του τριβείου και  $H_M$  το παρακράτημα σε υλικό του τριβείου. Επειδή η τιμή του τελευταίου δεν είναι γνωστή, γίνεται η παραδοχή ότι διατηρείται σταθερό συναρτήσει του επιπέδου τροφοδοσίας και περιλαμβάνεται στον υπολογισμό των ειδικών ταχυτήτων και ειδικότερα στην τιμή του  $a_1$ .

### 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η μοντελοποίηση έγινε με βάση βιομηχανικά στοιχεία ενός τριβείου των λατομείων ΧΑΛΥΨ, τα οποία ελήφθησαν σε διάστημα άνω των 80 ημερών μετά την τοποθέτηση νέων σφυριών. Σε σταθερή τροφοδοσία γίνεται διακοπή της λειτουργίας και λαμβάνονται δείγματα από την εξαγωγή και την εισαγωγή σε μήκος ταινίας ενός μέτρου. Τα δείγματα αυτά ζυγίζονται. Με τον τρόπο αυτό για γνωστή ταχύτητα των ταινιών υπολογίζεται η παροχή εισόδου και εξόδου. Στα ληφθέντα δείγματα ακολουθεί κοκκομετρική ανάλυση στην παρακάτω σειρά κόσκινων: 63 mm, 50 mm,

40 mm, 32 mm, 20 mm, 16 mm, 11.2 mm, 8 mm, 5.6 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm, 0.063 mm όπως προδιαγράφεται από τα EN 933-1, EN 933-2 και υπολογίζονται οι αθροιστικές και διαφορικές κοκκομετρικές κατανομές. Στη διάρκεια του χρονικού διαστήματος που αναφέρθηκε, λήφθηκαν 10 ομάδες πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία τους και τον υπολογισμό των κινητικών παραμέτρων ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

(i) Για κάθε ομάδα υπολογίστηκαν 5 κινητικές παράμετροι για αρχικά σταθερή τιμή του  $q_0$ . Ακολουθήθηκε η τεχνική της μη γραμμικής παλινδρόμησης. Η προσαρμογή έγινε με βάση τα διαφορικά κοκκομετρικά κλάσματα. Για 16 κλάσματα οι βαθμοί ελευθερίας ανά ομάδα δεδομένων είναι  $16-5=11$

(ii) Για όλα τα αποτελέσματα των παραμέτρων διερευνάται εάν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των τιμών της παραμέτρου και στοιχείων λειτουργίας, όπως το επίπεδο παραγωγής σε tn/h ή οι ημέρες λειτουργίας από την τοποθέτηση νέων σφυριών

(iii) Εάν υπάρχει συσχέτιση για μία παράμετρο, τότε αυτή λαμβάνεται υπ' όψη και με μη γραμμική παλινδρόμηση υπολογίζονται ξανά όλες οι παράμετροι. Με τον τρόπο αυτό αυξάνουν οι βαθμοί ελευθερίας του προτύπου διότι μειώνεται ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών.

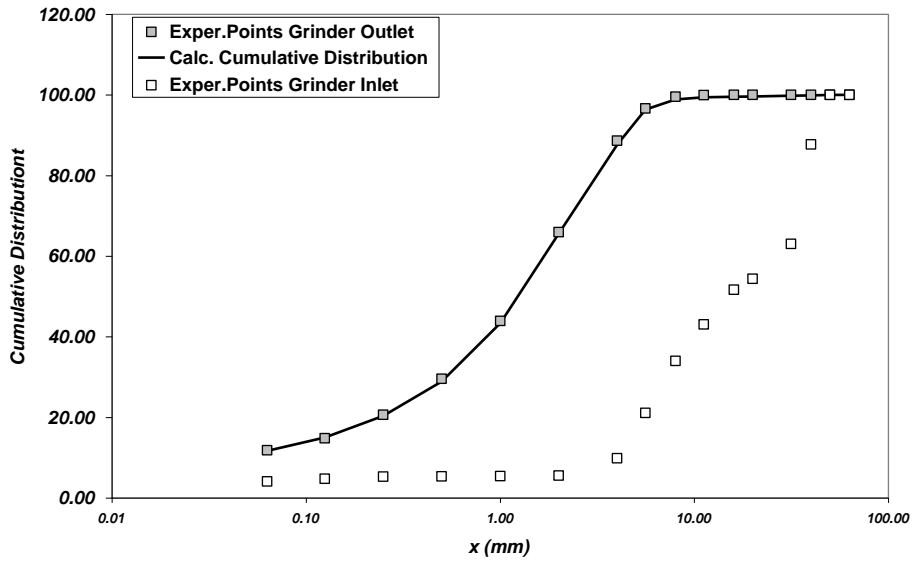
(iv) Επαναλαμβάνεται το βήμα (ii) και αν βρεθεί για κάποια παράμετρο συσχέτιση, υπολογίζεται και επαναλαμβάνεται το βήμα (iii). Παράλληλα ελέγχεται συνεχώς ο συντελεστής συσχέτισης κάθε ομάδας δεδομένων. Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται εφόσον παρατηρούνται επαρκείς συσχετίσεις μεταξύ παραμέτρων και λειτουργικών χαρακτηριστικών και έως ότου οι συντελεστές συσχέτισης όλων των ομάδων δεδομένων παραμένουν ψηλότεροι του 0.99.

#### 4 ΦΥΣΙΚΟ ΝΟΗΜΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

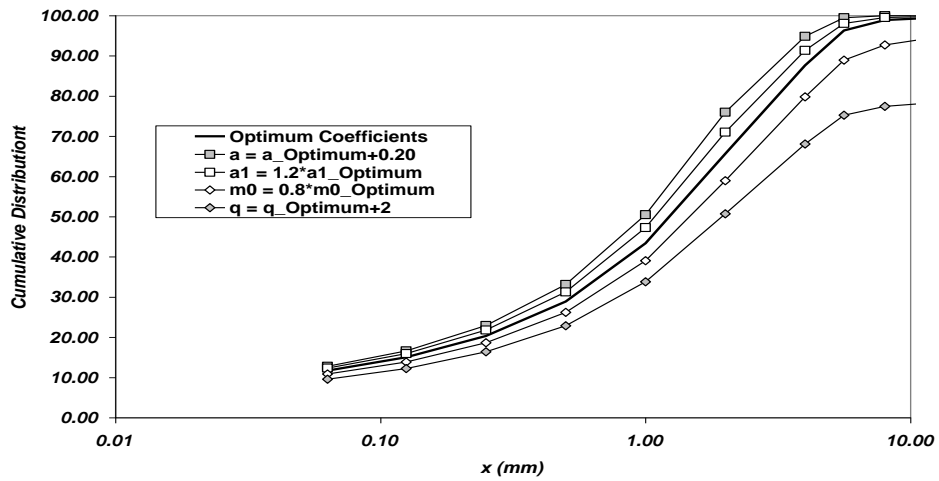
Για να γίνει κατανοητή η επίδραση κάθε κινητικής παραμέτρου στην κοκκομετρία του προϊόντος ακολουθήθηκε η παρακάτω μέθοδος:

(i) Για μια ομάδα πειραματικών τιμών με βάση τις βέλτιστες παραμέτρους υπολογίζεται η αθροιστική κοκκομετρική κατανομή. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 1. Για την συγκεκριμένη ομάδα δεδομένων οι βέλτιστες παράμετροι είναι:  $a=2.19$ ,  $a_1=6.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $m_0=15.9$ ,  $q=3.19$ ,  $f=0.977$ ,  $g=0.825$ . Η προσαρμογή των υπολογιζόμενων τιμών στις πραγματικές είναι επαρκέστατη.

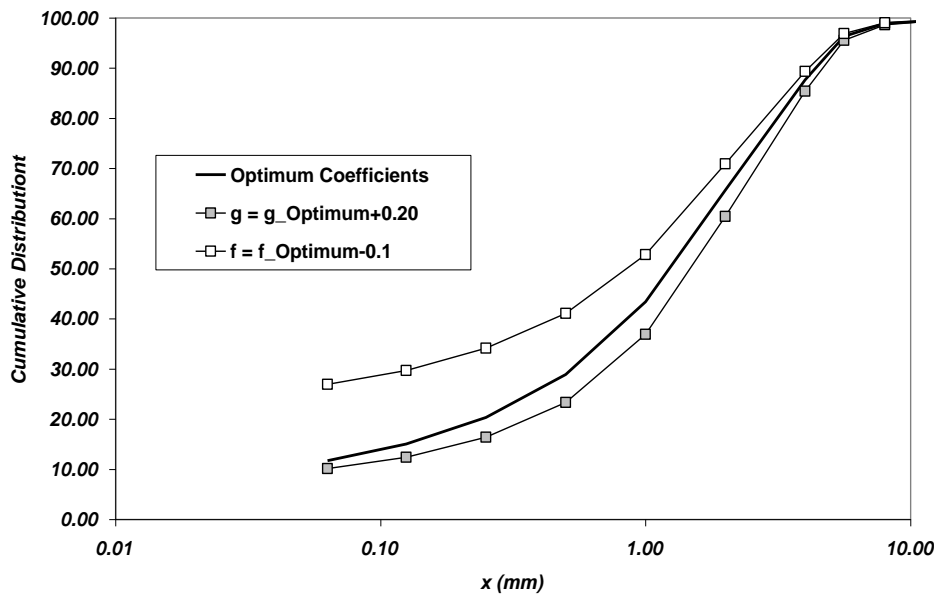
(ii) Στη συνέχεια μεταβάλλεται κάθε παράμετρος με κάποιο συγκεκριμένο βήμα και υπολογίζεται η νέα κοκκομετρική κατανομή. Στα σχήματα 2 και 3 δίνονται οι υπολογιζόμενες κοκκομετρίες όταν μεταβληθεί μια παράμετρος κάθε φορά.



Σχήμα 1. Υπολογιζόμενες και πειραματικές αθροιστικές κοκκομετρικές κατανομές για βέλτιστες παραμέτρους



Σχήμα 2. Υπολογιζόμενες και πειραματικές αθροιστικές κοκκομετρικές κατανομές για μεταβολή των κινητικών παραμέτρων



Σχήμα 3. Υπολογιζόμενες και πειραματικές αθροιστικές κοκκομετρικές κατανομές για μεταβολή των παραμέτρων κατανομής

Από το σχήμα 2 παρατηρείται πως όταν αυξάνει η παράμετρος  $a$ , τότε αυξάνει σημαντικά η λεπτότητα του προϊόντος και μειώνονται ιδιαίτερα τα χονδρόκοκκα κλάσματα. Παραπλήσια είναι η συμπεριφορά όταν αυξάνει η παράμετρος  $a_1$ , όπου παρατηρείται αύξηση της λεπτότητας σε όλο το φάσμα της κοκκομετρίας. Όταν μειώνεται η παράμετρος  $m_0$ , δηλ. μειώνεται η διάσταση όπου παρατηρείται η μέγιστη ειδική ταχύτητα, τότε το προϊόν χοντραίνει σημαντικά στις μεγάλες διαστάσεις αλλά διατηρείται ένα σχετικά υψηλό ποσοστό στις μικρές διαστάσεις. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την μείωση του ποσοστού της άμμου εντός του προϊόντος και την επίσης σημαντική αύξηση της παιπάλης. Αύξηση του εκθέτη  $q$ , έχει ως αποτέλεσμα το προϊόν να είναι σημαντικά πιο χοντρό σε όλο το φάσμα της κοκκομετρίας άρα μεγάλη μείωση της παραγόμενης άμμου. Από το σχήμα 3 παρατηρείται ότι μείωση του συντελεστή  $f$ , έχει ως αποτέλεσμα τα θραύσματα να κατανέμονται περισσότερο προς τα λεπτά κλάσματα και να λαμβάνεται μεγάλο ποσοστό παιπάλης. Αιτία τέτοιας κοκκομετρίας είναι πιθανά όχι μόνο η ποιότητα του υλικού, αλλά και αυξημένοι χρόνοι παραμονής μέσα στο τριβείο. Αυξημένη τιμή του παράγοντα  $g$ , προκαλεί πλέον μονόκκο προϊόν, δηλ. μεγαλύτερο ποσοστό άμμου και μειωμένο ποσοστό παιπάλης επί της άμμου.

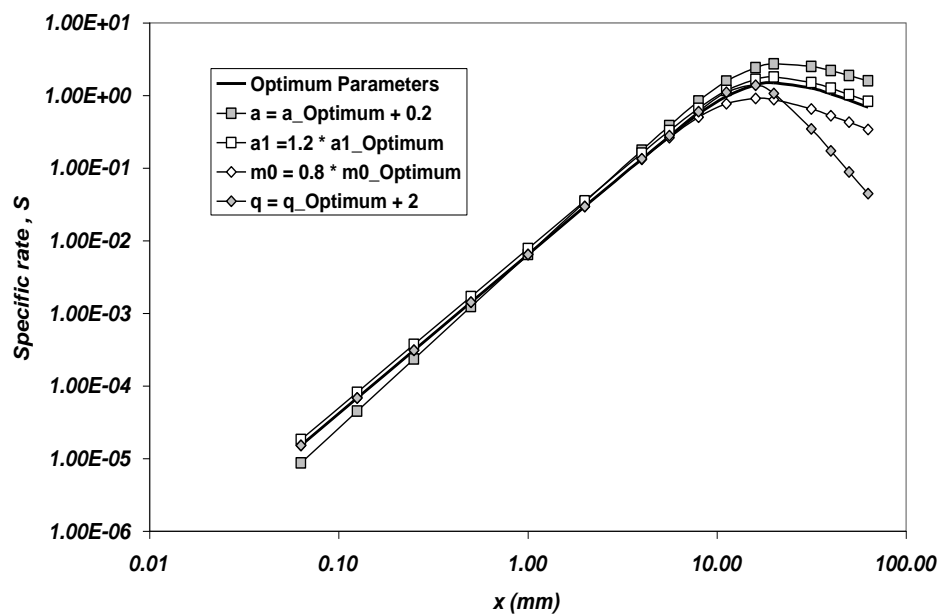
Στο σχήμα 4 δίνονται οι ειδικές ταχύτητες  $S_i$ , που αντιστοιχούν στην μεταβολή των κινητικών παραμέτρων που παρέχουν τις κοκκομετρίες του

σχήματος 2. Με τον τρόπο αυτό γίνεται πιο καθαρή επίδραση κάθε παραμέτρου στους ρυθμούς θραύσης.

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

### 5.1 Τιμές παραμέτρων και συντελεστές συσχέτισης

Με την εφαρμογή των βημάτων 1 έως 4 της παραγράφου 3 για όλες τις ομάδες δεδομένων αποδείχτηκε ότι υπάρχουν παράμετροι όχι ανεξάρτητες μεταξύ τους. αποδείχτηκε ότι:



Σχήμα 4. Ειδικές ταχύτητες θραύσης για μεταβολή των κινητικών παραμέτρων

- (i) Η τιμή της παραμέτρου  $q$ , είναι σταθερή, ανεξάρτητη από την μεταβολή των λειτουργικών παραμέτρων.
- (ii) Η διάσταση  $x_{MAX}$  στην οποία η ειδική ταχύτητα γίνεται μέγιστη, είναι συνάρτηση του χρόνου λειτουργίας,  $t$ , μετά την τοποθέτηση νέων σφυριών. Η συσχέτιση δίνεται από την εκθετική σχέση :

$$x_{MAX} = 10.45 \cdot t^{0.371} \quad (7)$$

- (iii) Η παράμετρος  $m_0$ , υπολογίζεται συναρτήσει των  $a$ ,  $q$ ,  $x_{MAX}$  από τη σχέση (5).

(iv) Η παράμετρος  $a$  είναι συνάρτηση του χρόνου λειτουργίας,  $t$ , μετά την τοποθέτηση νέων σφυριών. Η συσχέτιση δίνεται από την παραβολική σχέση:

$$a = 2.3 - 2 \cdot 10^{-2} \cdot t + 2.3 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \quad (8)$$

Πίνακας 1. Τιμές παραμέτρων του προτύπου

Ημέρες λειτουργίας	A	$a_1 \cdot 10^3$	$m_0$	q	f	g	$x_{MAX}$	$R^2$
6	2.19	6.49	15.9	3.19	0.977	0.825	20.3	0.996
8	2.16	3.94	18.0	3.19	0.974	0.746	22.6	0.993
22	1.97	4.75	28.3	3.19	0.961	0.798	32.9	0.998
32	1.89	5.36	33.6	3.19	0.986	0.732	37.8	0.996
36	1.88	7.91	35.4	3.19	0.991	0.848	39.5	0.996
46	1.86	4.42	39.0	3.19	0.992	0.710	43.3	0.997
54	1.88	6.22	41.0	3.19	1.000	0.799	46.0	0.991
68	1.99	4.19	42.7	3.19	0.968	0.839	50.1	0.996
68	1.99	6.73	42.7	3.19	0.983	0.759	50.1	0.997
82	2.19	2.49	41.97	3.19	0.975	0.838	53.7	0.999

Με τον τρόπο αυτό για συνολικά  $16 \cdot 10 = 160$  πειραματικά σημεία, ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών μειώνεται από μια αρχική τιμή  $6 \cdot 10 = 60$  σε 36. Οι τιμές των παραμέτρων και οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης για κάθε ομάδα πειραματικών σημείων δίνονται στον πίνακα 1.

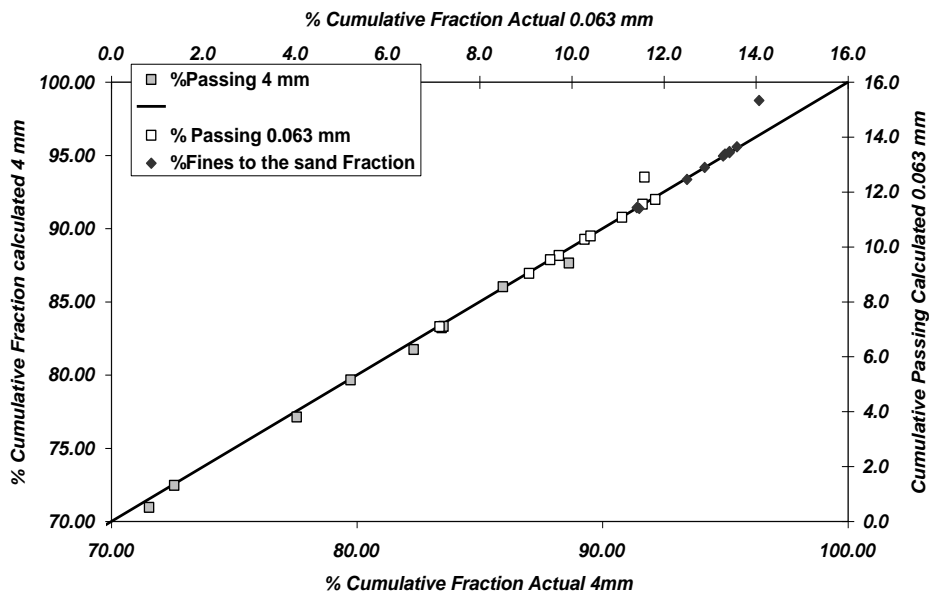
## 5.2 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιζόμενων τιμών

Για να διαπιστωθεί ένα το μοντέλο περιγράφει επαρκώς την διεργασία συγκρίνονται τα παρακάτω πραγματικά και υπολογιζόμενα αποτελέσματα κοκκομετριών εξαγωγής από το τριβείο:

- Αθροιστικό πέρασμα στα 4 mm.
- Αθροιστικό πέρασμα στα 0.063 mm
- Λόγος των δύο παραπάνω ποσοστών, άρα λεπτά επί της άμμου του προϊόντος

Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 5.

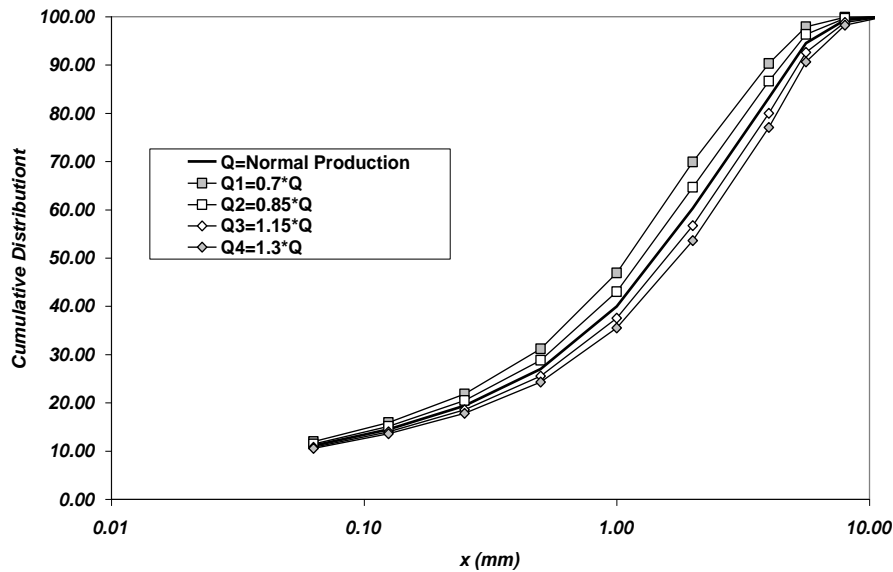




Σχήμα 5. Σύγκριση πειραματικών και υπολογιζόμενων κοκκομετριών

### 5.3 Επίδραση λειτουργικών παραμέτρων στην κοκκομετρία του προϊόντος

Ως βασικές παράμετροι που στην κοκκομετρία του λαμβανόμενου προϊόντος μπορούν να θεωρηθούν η ευθραυστότητα της α! ύλης, η κατάσταση των σφυριών και το επίπεδο τροφοδοσίας. Για ίδιες συνθήκες ποιότητας α! ύλης και κατάστασης του τριβείου θεωρείται μια ομάδα πειραματικών δεδομένων για την οποία ήδη υπολογίστηκαν οι παράμετροι του προτύπου για το δεδομένο μέσο επίπεδο παραγωγής Q (tn/h). Στη συνέχεια θεωρείται τροφοδοσία ίση με  $0.7 \cdot Q$ ,  $0.85 \cdot Q$ ,  $1.15 \cdot Q$ ,  $1.30 \cdot Q$  και υπολογίζονται με βάση την προσομοίωση οι κοκκομετρίες. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 6. από όπου η σημαντική επίδραση που έχει το επίπεδο τροφοδότησης στην κοκκομετρία. Για τροφοδοσία ίση με 70% της μέσης το πέρασμα στα 4 mm αυξάνει από 83.2% σε 90% Ενώ αντίθετα για αύξηση της τροφοδοσίας κατά 30%, το πέρασμα στα 4 mm μειώνεται στο 77%.



Σχήμα 6. Επίδραση του επιπέδου παραγωγής στην κοκκομετρία του προϊόντος

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη περιγράφεται ένας προσομοιωτής της θραύσης και λειοτριβήσης σε τριβείο. Για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής του προσομοιωτή, αποδεικνύεται ότι οι παράμετροι του μαθηματικού προτύπου συνδέονται τόσο με λειτουργικές μεταβλητές όσο και με την ευθραυστότητα της  $\alpha!$  ύλης. Εντός της περιοχής λειτουργίας του ο προσομοιωτής μπορεί να προβλέψει την κοκκομετρική κατανομή του προϊόντος με σημαντική ακρίβεια.

Στην τρέχον στάδιο ανάπτυξης του προτύπου κινητικής τα τριβεία αντιμετωπίζονται ως ανοιχτό κύκλωμα. Μελλοντική ανάπτυξη του μοντέλου μπορεί να οδηγήσει ανάπτυξη προτύπου κινητικής για θραύση αδρανών σε κλειστό κύκλωμα. Επιπλέον για γνωστές κινητικές θραύσης σε διαφορετικά τριβεία, μπορεί να γίνει σύγκριση της παραγωγικότητάς τους και της ποιότητας του λαμβανόμενου προϊόντος.

## 7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Austin, L.G. "Crushing, Grinding and Classification", Kluwer Academic Publishers, (1996).

Deniz, V. "The effect of mill speed on kinetic breakage parameters of clinker and limestone", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 (2004), 1365-1371

Morozov, E.F. & Shumailov, V.K. "Modified solution of the batch grinding equation", *Journal of Mining Science*, Vol. 19 (1992): 43-47

Τσαματσούλης, Δ. Φωτόπουλος, Α. Μαρίνος, Ι. & Παπαγιαννάκος, Ν., "Προσομοίωση άλεσης τσιμέντου σε βιομηχανική κλίμακα με μοντέλο αξονικής διασποράς", *3<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής*, Αθήνα (2001)