

Τεχνικοοικονομική διερεύνηση διεργασιών παραγωγής αδρανών υλικών Technical and economic investigation of aggregates production procedure

Κωνσταντίνος Γ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ¹

Λέξεις κλειδιά: Παραγωγή αδρανών υλικών, ελαχιστοποίηση λεπτόκοκκου υλικού, θραύση, κοσκίνιση, κλειστά κυκλώματα θραύσης κοσκίνισης, βελτιστοποίηση κυκλωμάτων θραύσης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η διαδικασία παραγωγής αδρανών υλικών περιλαμβάνει συνδυασμό μεθόδων ελάττωσης μεγέθους (πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή θραύση) και ταξινόμηση κατά μέγεθος (κοσκίνιση) σε κατάλληλα κοκκομετρικά κλάσματα (διαβαθμίσεις). Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως σχετικώς απλή, εμπεριέχει όμως παραμέτρους, που αξίζει να διερευνώνται κατά περίπτωση ώστε να καθίσταται πλέον αποδοτική και ως εκ τούτου και οικονομική. Σημαντική είναι επίσης η περιβαλλοντική διάσταση των διεργασιών παραγωγής αδρανών υλικών, όσον αφορά στο ποσοστό απόληψης χρήσιμων κλασμάτων υλικού από τη συγκεκριμένη διαδικασία. Επειδή τα μηχανήματα ελάττωσης μεγέθους (θραυστήρες) έχουν την ουσιαστικότερη επίπτωση στις διεργασίες παραγωγής αδρανών υλικών από πλευράς χαρακτηριστικών παραγωγής και κόστους λειτουργίας-συντήρησης, στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια διερεύνησης της επίδρασης του συνδυασμού διαφόρων τύπων θραυστήρων στην ποσοστιαία (% κατά βάρος) κατανομή των παραγόμενων προϊόντων με στόχο τη μείωση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού (<5 mm).

ABSTRACT : During the aggregates production procedures, the co-production of quarry fines (material < 5mm) is a consequence of the extraction (blasting) and the processing of the rock extracted in the crushing-screening plant. The quantities of fines produced depend on the rock type, the amount of fragmentation by blasting and the type of crushing procedure used.

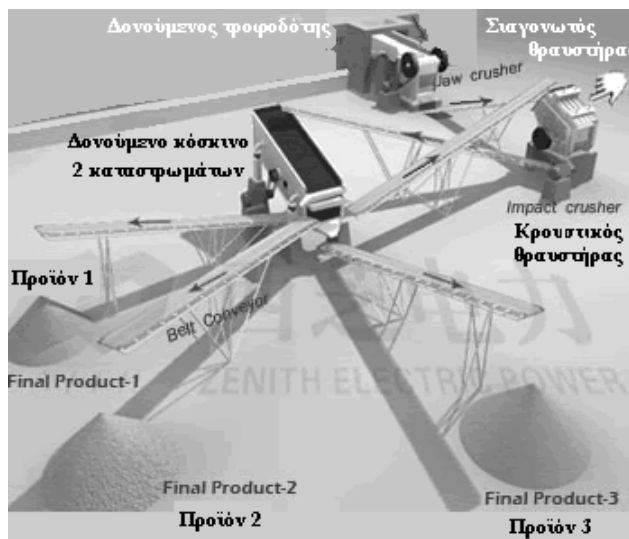
In the present paper, an investigation of the size reduction methodology is made with the aim to reduce the amount of fines produced. This study examines various alternatives replacing the impact crushers with cone as secondary and tertiary crushers. Finally, the whole procedure is evaluated with the help of mass balance calculations of the products and of a preliminary (simplified) economic analysis.

¹ Καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: kostsakg@metal.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διαδικασία παραγωγής αδρανών υλικών (εξόρυξη, θραύση-κοσκίνιση), μαζί με τα εμπορεύσιμα κοκκομετρικά κλάσματα, συμπαράγεται και ένα λεπτόκοκκο κλάσμα (-5 mm), το οποίο δημιουργεί σχετικά προβλήματα διαχείρισης (εμπορευσιμότητα, απόθεση κλπ.). Λεπτόκοκκα αδρανή προκύπτουν κυρίως από τη διαδικασία εξόρυξης, την προδιαλογή του εξορυσσόμενου υλικού και από τις διαδικασίες θραύσης και ταξινόμησης (ξηρή κοσκίνιση) του «καθαρού» υλικού. Τα υλικά αυτά «επιβαρύνει» τη διαδικασία παραγωγής τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική σκοπιά. Απλοποιημένο διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών δίνεται στο **Σχήμα 1**.

Στον **Πίνακα 1** δίνονται τα κατάλληλα μηχανήματα (θραυστήρες) για την παραγωγή αδρανών υλικών και τα όρια εφαρμογής τους κατά στάδιο θραύσης. Επίσης, στο **Σχήμα 2** φαίνεται η ποσοστιαία % διαμόρφωση του κόστους παραγωγής αδρανών υλικών.



Σχήμα 1. Απλοποιημένο διάγραμμα παραγωγής αδρανών υλικών.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

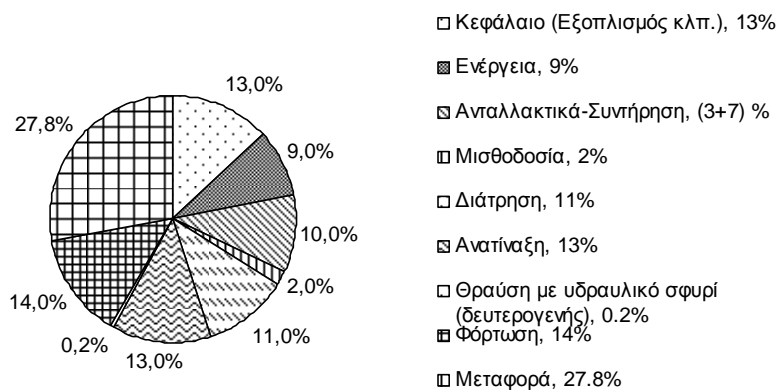
Όπως φαίνεται (**Πίνακας 2**), το ποσοστό του λεπτόκοκκου (-5 mm) υλικού αυξάνει από την πρωτογενή στη δευτερογενή και στα επόμενα στάδια θραύσης και εξαρτάται σημαντικά από το στάδιο θραύσης, τον τύπο μηχανήματος και τον τύπο του πετρώματος.

Επίσης, το ποσοστό του υλικού αυτού στο προϊόν της **πρωτογενούς θραύσης** εξαρτάται σημαντικά από τις διαδικασίες εξόρυξης-ανατίναξης (blasting). Η εξόρυξη ενός πετρώματος χωρίς τη χρήση εκρηκτικών μπορεί να μειώσει

σημαντικά (μέχρι 10-15%) το ποσοστό των λεπτομερών που παράγονται στο στάδιο της πρωτογενούς θραύσης.

Πίνακας 1. Μηχανήματα θραύσης κατά στάδιο θραύσης και μέγεθος τεμαχίων τροφοδοσίας και προϊόντος. Πηγή: www.goodquarry.com (2007) & Σταμπολτζής (1994)

ΣΤΑΔΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	Μηχάνημα θραύσης	Εύρος μεγεθών τεμαχίων τροφοδοσίας, mm	Εύρος μεγεθών τεμαχίων προϊόντος, mm
Πρωτογενής, Primary	Jaw crusher (Σιαγονωτός) Gyratory crusher (Γυροσκοπικός)	700-1000	100-300
Δευτερογενής, Secondary	Cone crusher (Κωνικός) HSI crusher (οριζόντιος κρουστικός) Jaw crusher (σπανίως)	100-250	20-100
Τριτογενής, Tertiary	Cone crusher (Κωνικός) VSI crusher (κατακόρυφος κρουστικός τύπου Barmac)	14-100	10-50
Τεταρτογενής κ.ο.κ., Quaternary	VSI crusher (κατακόρυφος κρουστικός τύπου Barmac) Cone crusher (Κωνικός)	10-40	10-20



Σχήμα 2. Κατά προσέγγιση ποσοστιαία % διαμόρφωση του κόστους παραγωγής αδρανών υλικών (Metso Minerals, 2007).

Πίνακας 2. Ποσοστό (% κατά βάρος) λεπτόκοκκου υλικού (-5 mm) στο προϊόν του θραυστήρα συναρτήσει του σταδίου θραύσης (τύπος μηχανήματος) και του τύπου του πετρώματος (Πηγή: www.goodquarry.com, 2007)

ΣΤΑΔΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	Τύπος πετρώματος	Ποσοστό λεπτομερών (-5 mm) στο προϊόν του θραυστήρα (% κατά βάρος)
Πρωτογενής, Primary	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εκρηξιγενή + Μεταμορφωμένα (Igneous + metamorphic) 2. Ασβεστολιθικό (Limestone) 3. Χαλαζιτικό (Sandstone) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 3 - 6% (Σιαγονωτός) έως 10 - 15% (Γυροσκοπικός) 2. 6 - 7% (Σιαγονωτός) έως 20% (Κρουστικός) 3. 1 - 2% (Σιαγονωτός) έως 15 - 20% (Σιαγονωτός & Γυροσκοπικός)
Δευτερογενής, Secondary	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εκρηξιγενή + Μεταμορφωμένα (Igneous + metamorphic) 2. Ασβεστολιθικό (Limestone) 3. Χαλαζιτικό (Sandstone) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 0 - 23% (Κωνικός) 2. 15 - 25% (Κωνικός) έως <30% (Κρουστικός) 3. 10 - 15% (Κωνικός)
Τριτογενής κ.ο.κ., Tertiary etc.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εκρηξιγενή + Μεταμορφωμένα (Igneous + metamorphic) 2. Ασβεστολιθικό (Limestone) 3. Χαλαζιτικό (Sandstone) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 5 - 30% (Κωνικός) έως 40% (Κρουστικός) 2. <20% (Κρουστικός) έως 40% (Σφυρόμυλος) 3. ~15% (Κωνικός) έως 40% (Κρουστικός)

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η παραγωγή αδρανών υλικών από τη διαδικασία ελάττωσης μεγέθους ασβεστολιθικού υλικού, μέγιστου μεγέθους τεμαχίων 700 mm, για την παραγωγή κατάλληλων κοκκομετρικών κλασμάτων (διαβαθμίσεων) αδρανών υλικών σκυροδέματος με εφαρμογή των παρακάτω τριών διαφορετικών μεθοδολογιών:

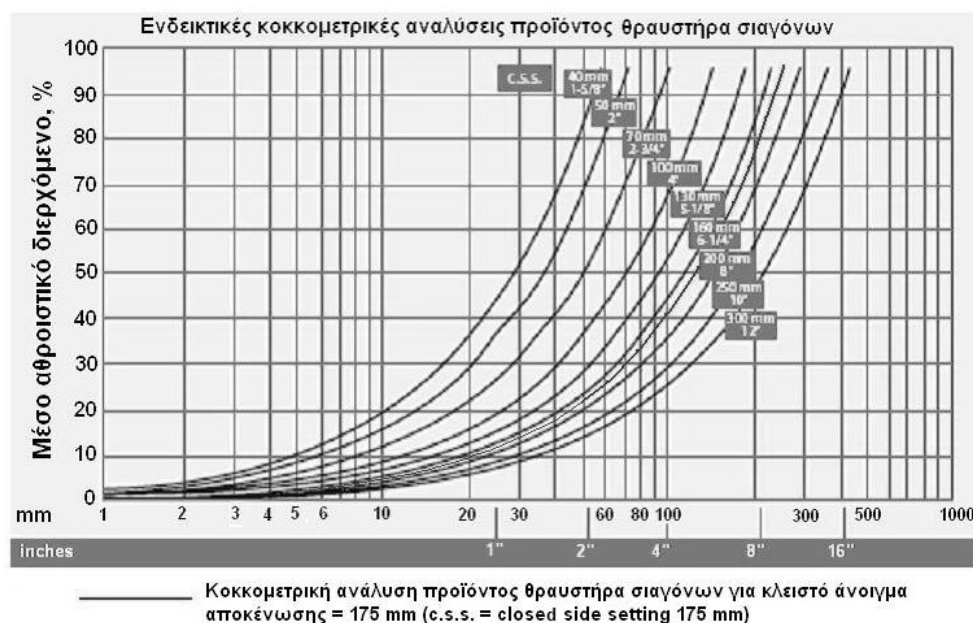
1. Με συνδυασμό **θραυστήρα σιαγόνων** ως πρωτογενή θραυστήρα και με χρησιμοποίηση **κωνικού θραυστήρα** για τη δευτερογενή θραύση
2. Με συνδυασμό **θραυστήρα σιαγόνων** ως πρωτογενή θραυστήρα και με χρησιμοποίηση **κωνικών θραυστήρων** για τη δευτερογενή και τριτογενή θραύση

3. Με συνδυασμό **θραυστήρα σιαγόνων** ως πρωτογενή θραυστήρα και με χρησιμοποίηση **κρουστικού-περιστροφικού** θραυστήρα για τη δευτερογενή θραύση

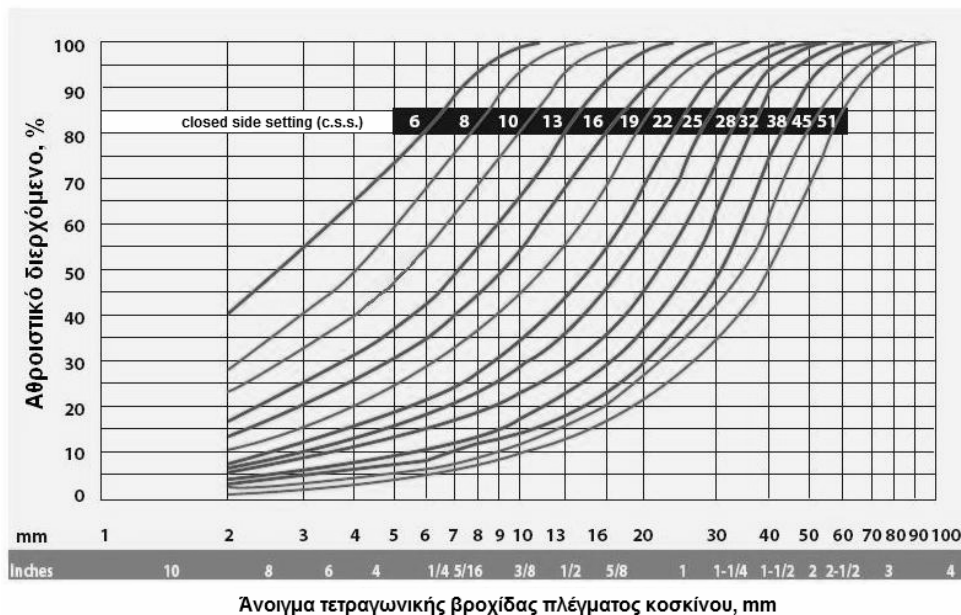
Η δυναμικότητα της εγκατάστασης παραγωγής αδρανών υλικών είναι **500 t/h**. Αυτό σημαίνει ότι, για λειτουργία της μονάδας σε δύο βάρδιες το 24ωρο (14 ώρες), η συνολική ετήσια παραγωγή (300 ημέρες λειτουργίας) είναι **2.100.000 t/χρόνο**

Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων θραύσης που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση των ισοζυγίων των διακινούμενων υλικών και το σχεδιασμό των αντίστοιχων διαγραμμάτων ροής δίνονται στα **Σχήματα 3, 4 και 5**, συναρτήσει των κλειστών ανοιγμάτων αποκένωσής τους (closed side setting, c.s.s.), για τους τρεις τύπους θραυστήρων (σιαγόνων, κωνικός, κρουστικός) που διερευνώνται. Τα σχήματα αυτά κατασκευάστηκαν από δεδομένα της εταιρείας Metso Minerals (2007).

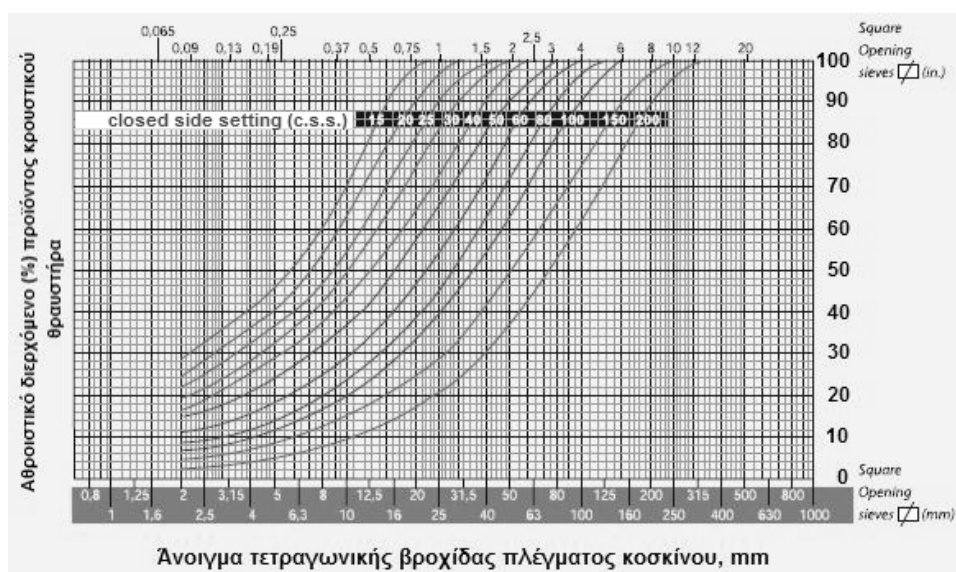
Στο **Σχήμα 6** δίνονται πολωνομικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν κάποιες από τις παραπάνω κοκκομετρικές αναλύσεις και προέκυψαν με κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία Τσακαλάκης (1990a) και Tsakalakis (2006g) δεδομένων από τα **Σχήματα 3, 4 και 5**.



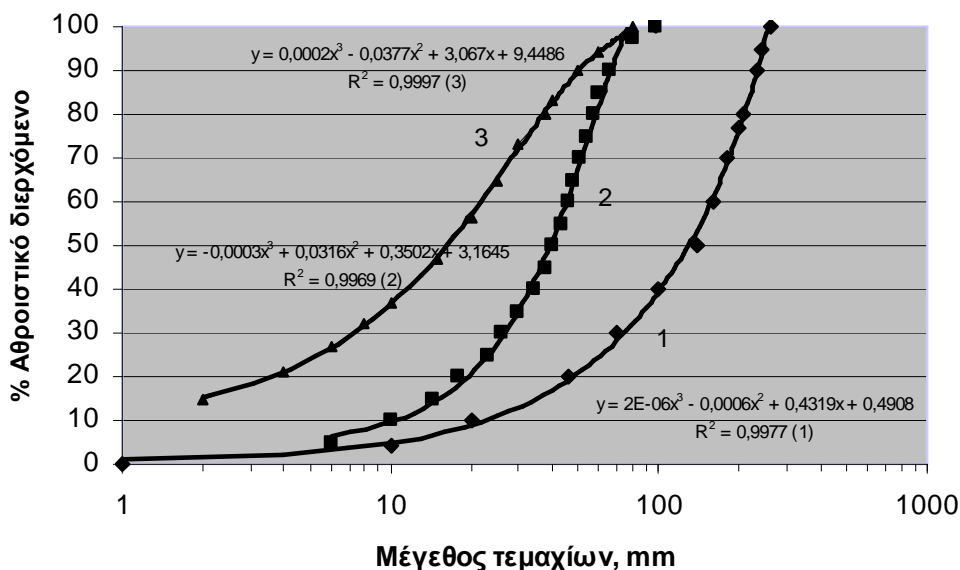
Σχήμα 3. Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων θραυστήρα σιαγόνων συναρτήσει του «κλειστού» ανοίγματος αποκένωσης (Metso, 2007).



Σχήμα 4. Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων κωνικού θραυστήρα συναρτήσει του «κλειστού» ανοίγματος αποκένωσης (Metso, 2007).



Σχήμα 5. Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων κρουστικού θραυστήρα συναρτήσει του «κλειστού» ανοίγματος αποκένωσης (Metso, 2007).

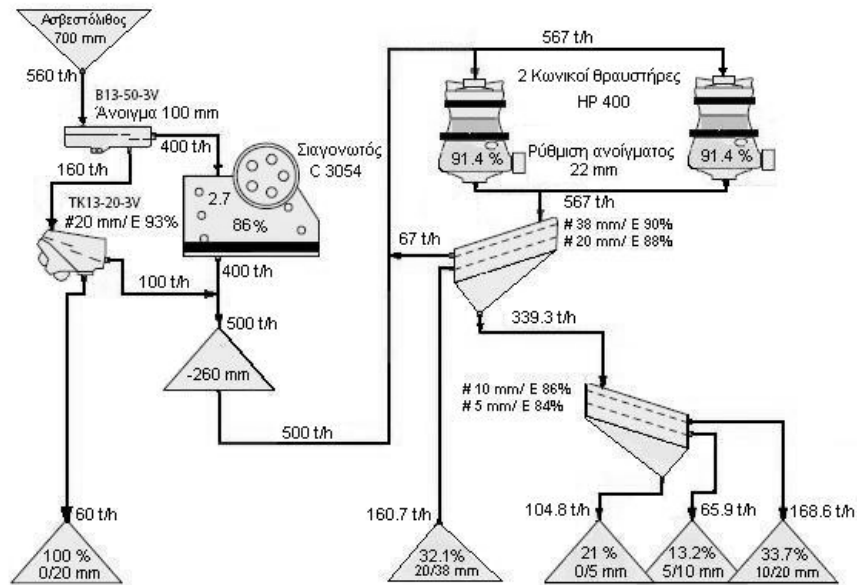


Σχήμα 6. Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων θραύσης (1-Θρ. Σιαγόνων, 2-Θρ. Κωνικός, 3-Θρ. Κρουστικός) και αντίστοιχες μαθηματικές (πολυωνυμικές) συναρτήσεις (Τσακαλάκης, 1990α; Tsakalakis, 2006g).

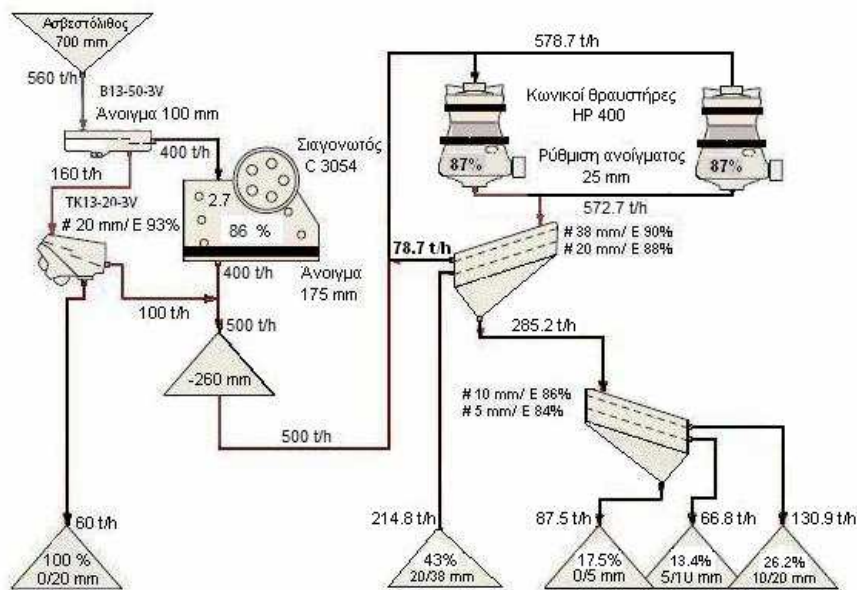
Από την όλη επεξεργασία των δεδομένων διαμορφώνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (**Σχήματα 7, 8, 9, 10, 11 και 12**) για τους δύο τύπους θραυστήρων με τα αντίστοιχα ανοίγματα αποκένωσης, οι παροχές (t/h) υλικών σε κάθε φάση, όπως επίσης και η ποσοστιαία % κατανομή των παραγόμενων προϊόντων (**Πίνακας 3**).

Η ποσοστιαία κατανομή των προϊόντων προέκυψε με χρήση των ενδεικτικών κοκκομετρικών καμπυλών, εφαρμόζοντας τις βασικές αρχές και εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία των κλειστών κυκλωμάτων θραύσης-κοσκίνισης (Τσακαλάκης, 1993b; Τσακαλάκης, 1996c; Tsakalakis, 2000d; Τσακαλάκης, 2001e).

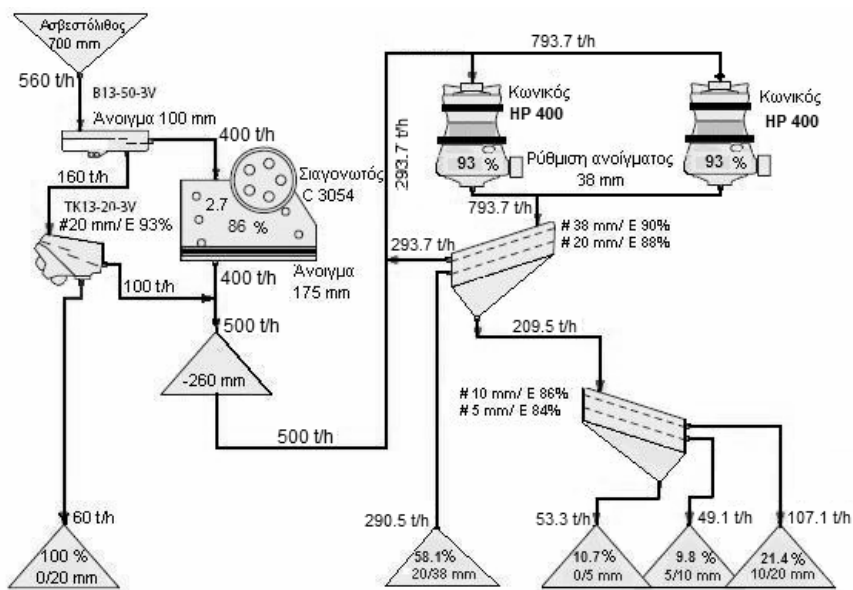
Οι δευτερογενείς θραυστήρες (κωνικοί και κρουστικοί-περιστροφικοί) λειτουργούν σε κλειστό κύκλωμα με κόσκινο ανοίγματος 38 mm για κάθε περίπτωση, τα δε 4 κοκκομετρικά κλάσματα (προϊόντα) προκύπτουν από την ταξινόμηση του διερχόμενου από το κόσκινο των 38 mm υλικού σε κόσκινα ανοιγμάτων 20, 10 και 5 mm με τις αναμενόμενες για κάθε άνοιγμα αποδόσεις κοσκίνισης.



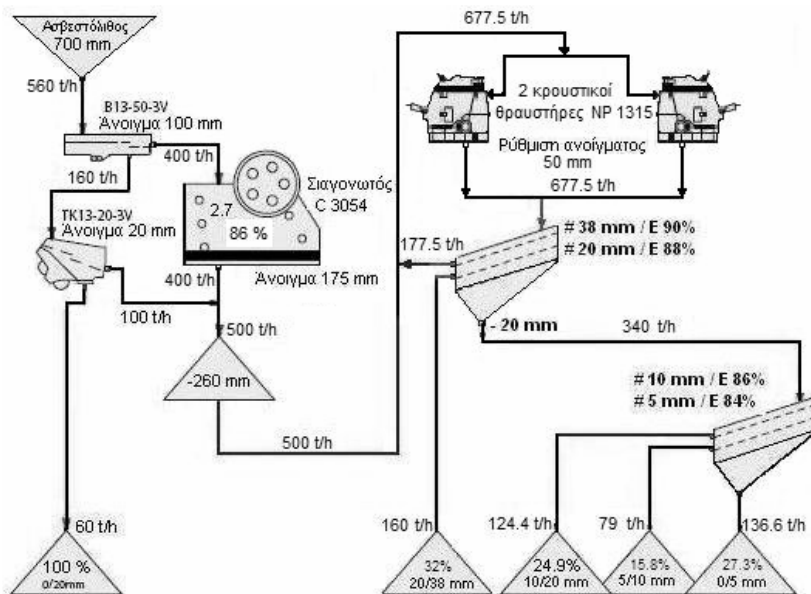
Σχήμα 7. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρα σιαγόνων-κωνικού ανοίγματος αποκένωσης 22 mm).



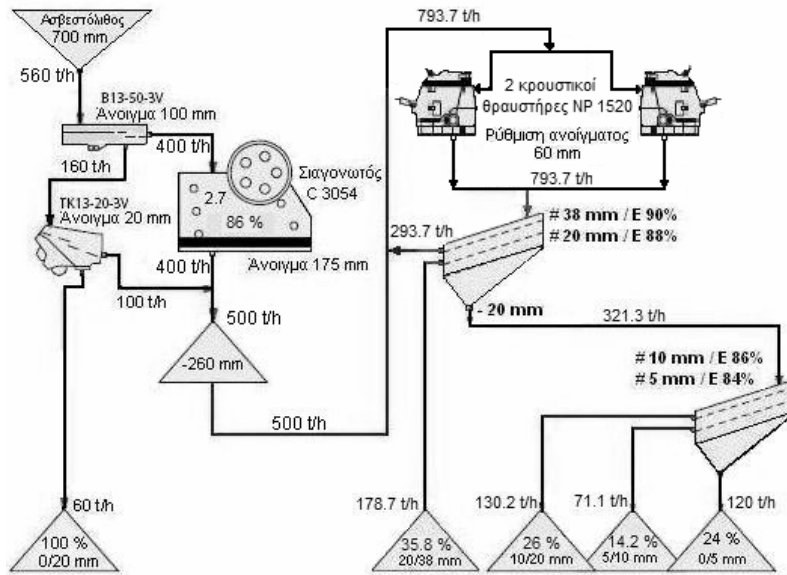
Σχήμα 8. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρα σιαγόνων-κωνικού ανοίγματος αποκένωσης 25 mm).



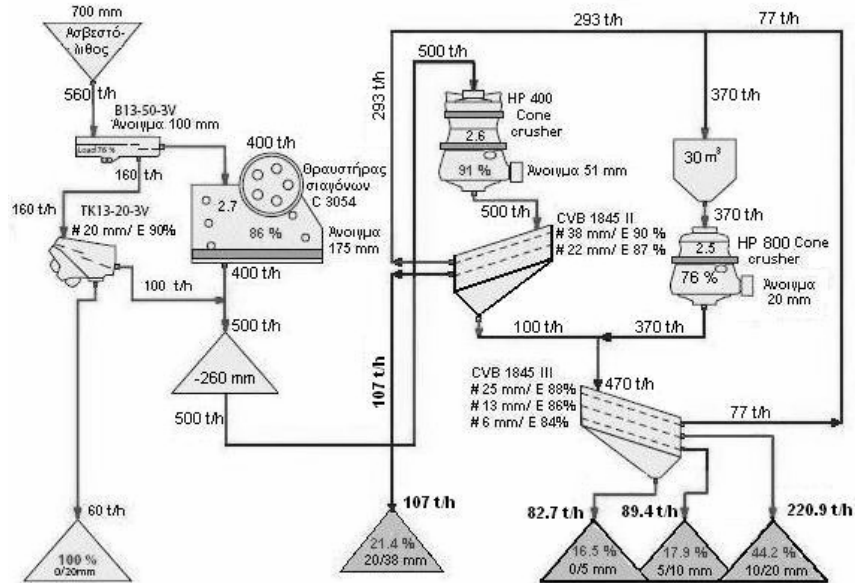
Σχήμα 9. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρα σιαγόνων-κωνικού ανοίγματος αποκένωσης 38 mm).



Σχήμα 10. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρων σιαγόνων και κρουστικού ανοίγματος αποκένωσης 50 mm).



Σχήμα 11. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρων σιαγόνων και κρουστικού ανοίγματος αποκένωσης 60 mm).



Σχήμα 12. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρα σιαγόνων-κωνικών θραυστήρων (τρία στάδια θραύσης, πρωτογενής-δευτερογενής-τριτογενής θραύση).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων προϊόντων κατάτμησης-ταξινόμησης (ποσοστιαία % κατανομή)

ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ 500 t/h	ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ ΣΙΑΓΟΝΩΝ (Άνοιγμα αποκένωσης 175 mm)					
	Α. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ (Κωνικός) c.s.s.: 22, 25 και 38 mm			ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ- ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΗ ΜΕ ΚΩΝΙΚΟΥΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΕΣ	Β. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ (Κρουστικός) c.s.s.: 50 και 60 mm	
Παραγόμενα κοκκομετρικά κλάσματα, Ποσοστό % κατά βάρους	Άνοιγμα 22 mm	Άνοιγμα 25 mm	Άνοιγμα 38 mm		Άνοιγμα 50 mm	Άνοιγμα 60 mm
-38+20 mm	32.1	43	58.1	21.4	32	35.8
-20+10 mm	33.7	26.2	21.4	44.2	24.9	26
-10+5 mm	13.2	13.4	9.8	17.9	15.8	14.2
-5 mm	21	17.5	10.7	16.5	27.3	24.0
ΣΥΝΟΛΟ	100	100	100	100	100	100
c.s.s. (closed side setting): κλειστό άνοιγμα αποκένωσης θραυστήρα						

Διαπιστώνεται ότι, με χρήση κωνικών θραυστήρων στη θέση των κρουστικών-περιστροφικών, το ποσοστό του επί τοις % παραγόμενου λεπτόκοκκου υλικού (-5 mm) είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερο τουλάχιστον κατά 7.5% περίπου από αυτό που παράγεται με χρήση κρουστικών θραυστήρων. Αυτό δικαιολογείται από τον σημαντικά μικρότερο λόγο κατάτμησης των κωνικών έναντι των κρουστικών θραυστήρων. Το αποτέλεσμα αυτό έχει σημαντική επίπτωση στην οικονομικότητα της διεργασίας παραγωγής, εφόσον η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε αύξηση των χρήσιμων προϊόντων περίπου κατά 157.500 t/χρόνο για την ετήσια δυναμικότητα (2.100.000 τόνοι) της μονάδας. Η αύξηση των εσόδων από την πώληση των εμπορεύσιμων προϊόντων (για μέση τιμή πώλησης αδρανών ≈ 4 €/t) αναμένεται να είναι:

$$157.500 \text{ t/χρόνο} \times 4 \text{ € / t} = 630.000 \text{ € / χρόνο}$$

Το αυξημένο κόστος αγοράς των κωνικών έναντι των κρουστικών θραυστήρων αναμένεται να αποσβεστεί σε δύο έως τρία χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης θραύσης.

Αν όμως ληφθεί υπόψη το σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος από την παραγωγή συμπληρωματικού χρήσιμου υλικού, από τη μείωση της εξορυσσόμενης ποσότητας ασβεστολιθικού υλικού, από τη μειωμένη επιφάνεια απόθεσης του λεπτόκοκκου υλικού και από τα μικρότερα έξοδα συντήρησης των κωνικών θραυστήρων έναντι των κρουστικών, γίνεται ακόμη περισσότερο φανερό το όφελος από τη χρήση κωνικών έναντι των κρουστικών θραυστήρων στη διαδικασία παραγωγής αδρανών υλικών. Τα παραπάνω επιβεβαιώνουν τις διαπιστώσεις των Mitchell & Benn (2007) και Τσακαλάκης (2008h).

Οι πρώτοι χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση των κυκλωμάτων παραγωγής αδρανών υλικών και ο δεύτερος διερεύνησε διεξοδικά τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των κυκλωμάτων θραύσης – ταξινόμησης εξετάζοντας πολλές εναλλακτικές περιπτώσεις και συνδυασμούς τόσο μηχανημάτων (θραυστήρες-κόσκινα) όσο και ρυθμίσεών τους.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Metso Minerals, “Crushing and Screening Handbook”, Brochure No. 2051-04-07-CBL/ Tampere (2007)

Mitchell, C., Benn, A., «Quarry Fines Minimisation: Process Optimisation Case Study 4» British Geological Survey & Metso Minerals (UK) Ltd (2007), www.goodquarry.com

Τσακαλάκης, Κ.Γ., "Κατανομές μεγέθους τεμαχίων προϊόντος θραύσης Γυροσκοπικού θραυστήρα βιομηχανικού μεγέθους", Μεταλλειολογικά - Μεταλλουργικά Χρονικά, Τεύχος 75, Μάιος-Αύγουστος (1990a), 41-48

Τσακαλάκης, Κ.Γ., "Κλειστά κυκλώματα θραύσης - κοσκίνισης", Μεταλλειολογικά - Μεταλλουργικά Χρονικά, Τόμος 3, Τεύχος 4 (1993b), 37-45

Τσακαλάκης, Κ.Γ., "Αξιολόγηση και υπολογισμός κλειστών κυκλωμάτων θραύσης με νομογραφήματα", Μεταλλειολογικά - Μεταλλουργικά Χρονικά, Τόμος 6, τεύχος 1 (1996c), 25-36

Tsakalakis, K., “Use of a simplified method to calculate closed crushing circuits”, Minerals Engineering, Vol. 13, No 12 (2000d), pp.1289-1299, Pergamon

Τσακαλάκης, Κ.Γ., "Μελέτη των παραμέτρων σχεδιασμού έμμεσων κλειστών κυκλωμάτων θραύσης", δημοσιεύτηκε στον Τιμητικό Τόμο για τον Καθ. Ι. Παπαγεωργάκη, Αθήνα (2001e), 263-272

Tsakalakis, K.G., «Modelling the Crushing-Sizing Procedure of Industrial Gyratory Crushers», in 11th European Symposium on Comminution, October 9-12, 2006, Budapest, Hungary (2006g)

Τσακαλάκης, Κ.Γ., «Βελτιστοποίηση διεργασιών παραγωγής αδρανών υλικών», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, 21-23 Μαΐου 2008, Τόμος Α', ΤΕΕ (2008) σελ. 113-126.