

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Κωνσταντίνος Γ. Τσακαλάκης

Καθηγητής Ε.Μ.Π. - Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών

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

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 (ομάδες διαφορετικού μεγέθους τεμαχίων).

Η διαδικασία παραγωγής αδρανών υλικών 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, στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια διερεύνησης της επίδρασης διαφόρων τύπων θραυστήρων στην ποσοστιαία (% κατά βάρος) κατανομή των παραγόμενων προϊόντων με στόχο τη μείωση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού (-5 mm).

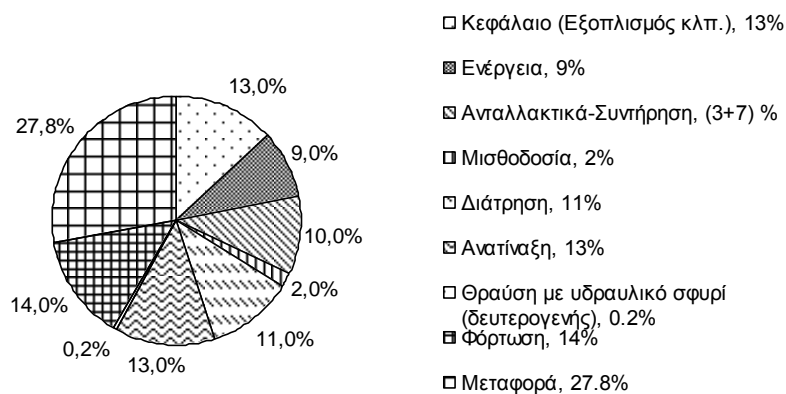
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 σημαντικά προβλήματα διαχείρισης (εμπορευσιμότητα, απόθεση κλπ.). Λεπτόκοκκα αδρανή προκύπτουν κυρίως από 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.

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

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

| ΤΑΔΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ | Μηχάνημα θραύσης | Μέγιστο μέγεθος τεμαχίου τροφοδοσίας, mm | Μέγιστο μέγεθος τεμαχίου 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 |



Εικόνα 1. Διαμόρφωση του κατά προσέγγιση κόστους παραγωγής αδρανών υλικών (Metso Minerals, 2007)

2. 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 τη διαδικασία 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.

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 αδρανών υλικών σκυροδέματος με εφαρμογή των παρακάτω δύο 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 **κρουστικού-περιστροφικού** θραυστήρα για τη δευτερογενή θραύση
3. Η δυναμικότητα της εγκατάστασης παραγωγής αδρανών υλικών είναι **440 t/h**. Αυτό σημαίνει ότι, για λειτουργία της μονάδας σε δύο βάρδιες το 24ωρο (14 ώρες), η συνολική ετήσια παραγωγή (300 ημέρες λειτουργίας) είναι:

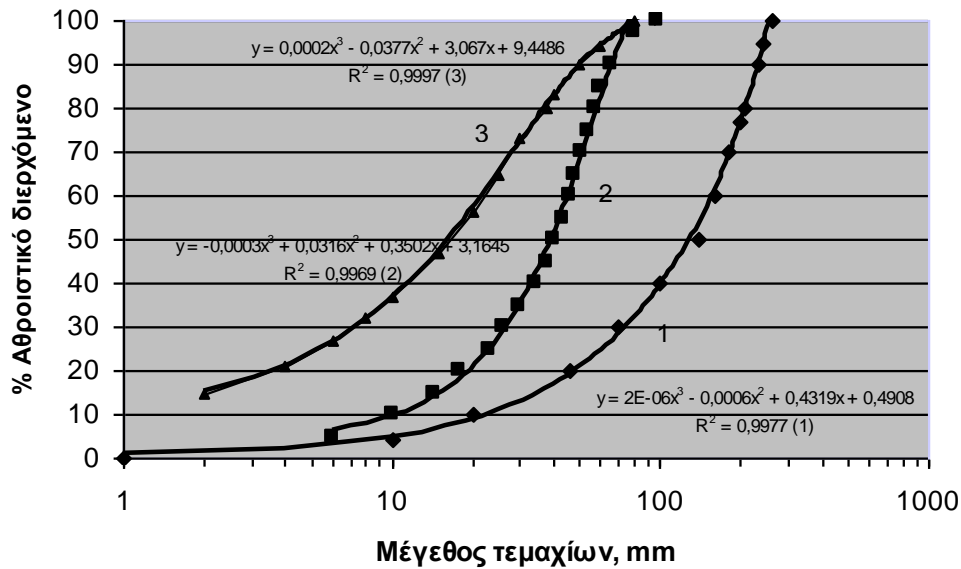
1.848.000 t/χρόνο

Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων θραύσης που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση των ισοζυγίων των διακινούμενων υλικών και το σχεδιασμό των αντίστοιχων διαγραμμάτων ροής δίνονται στην Εικόνα 2. Στην ίδια εικόνα δίνονται οι πολωνυμικές εξισώσεις που περιγράφουν τις κοκκομετρικές αναλύσεις. Στα σχήματα (Εικόνες 3 και 4) δίνονται οι κοκκομετρικές αναλύσεις των προϊόντων, για τους δύο τύπους θραυστήρων (κωνικός, κρουστικός) που διερευνώνται, συναρτήσεως των κλειστών ανοιγμάτων αποκένωσής τους (close side setting, c.s.s.). Τα σχήματα αυτά κατασκευάστηκαν από δεδομένα της εταιρείας Metso Minerals (2007).

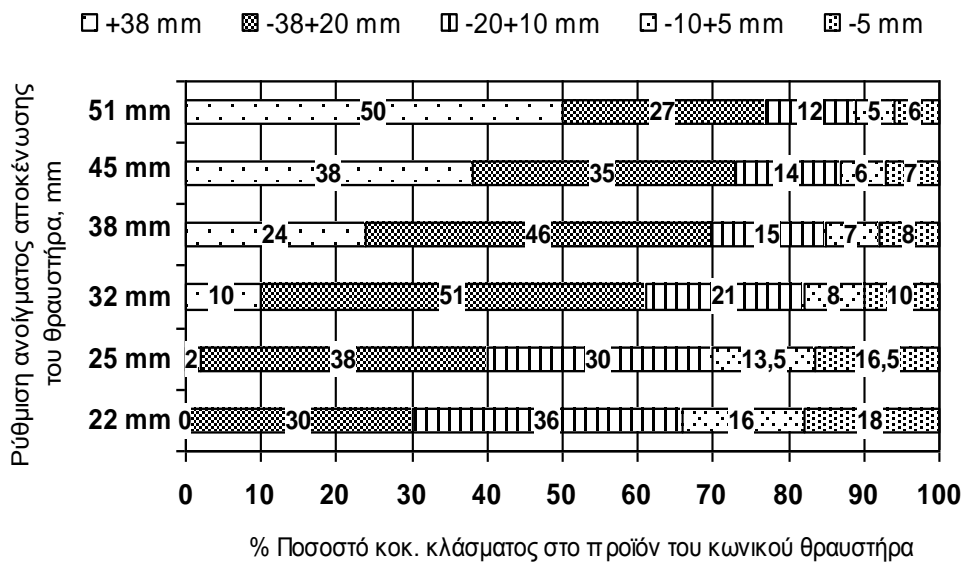
Πίνακας 2. Ποσοστό λεπτομερούς υλικού (-5 mm) στο προϊόν του θραυστήρα (% κατά βάρος) συναρτήσει του σταδίου θραύσης (τύπος μηχανήματος) και του τύπου του πετρώματος

(Πηγή: www.goodquarry.com, 2007)

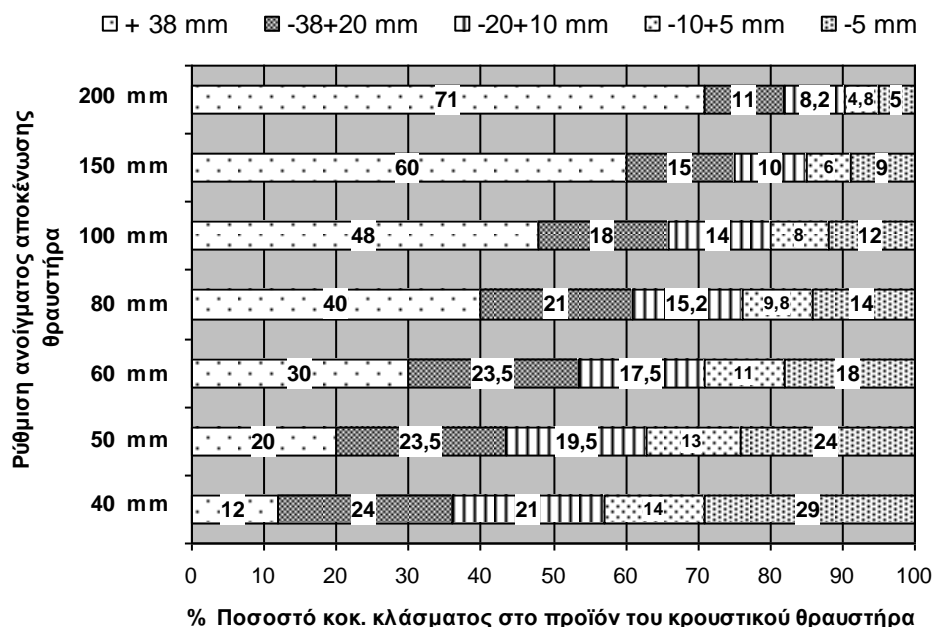
| ΣΤΑΔΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ | Τύπος πετρώματος | Ποσοστό λεπτομερών (-5 mm) στο προϊόν του θραυστήρα (% κατά βάρος) |
|--------------------------------|--|--|
| Πρωτογενής, Primary | <ol style="list-style-type: none"> 1. Εκρηξιγενή + Μεταμορφωμένα (Igneous + metamorphic) 2. Ασβεστολιθικό (Limestone) 3. Χαλαζιτικό (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 | <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) |



Εικόνα 2. Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων θραύσης (1-Θρ. Σιαγόνων, 2-Θρ. Κωνικός, 3-Θρ. Κρουστικός)



Εικόνα 3. Κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντος κωνικού θραυστήρα συναρτήσσει του κλειστού ανοίγματος αποκένωσης.

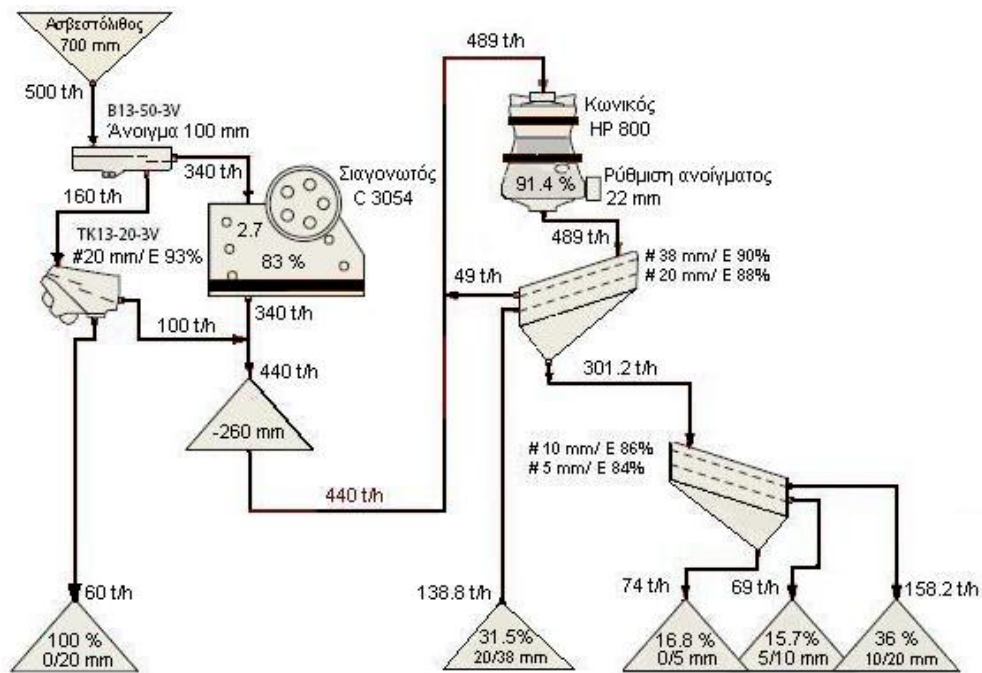


Εικόνα 4. Κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντος κρουστικού θραυστήρα συναρτήσει του κλειστού ανοίγματος αποκένωσης.

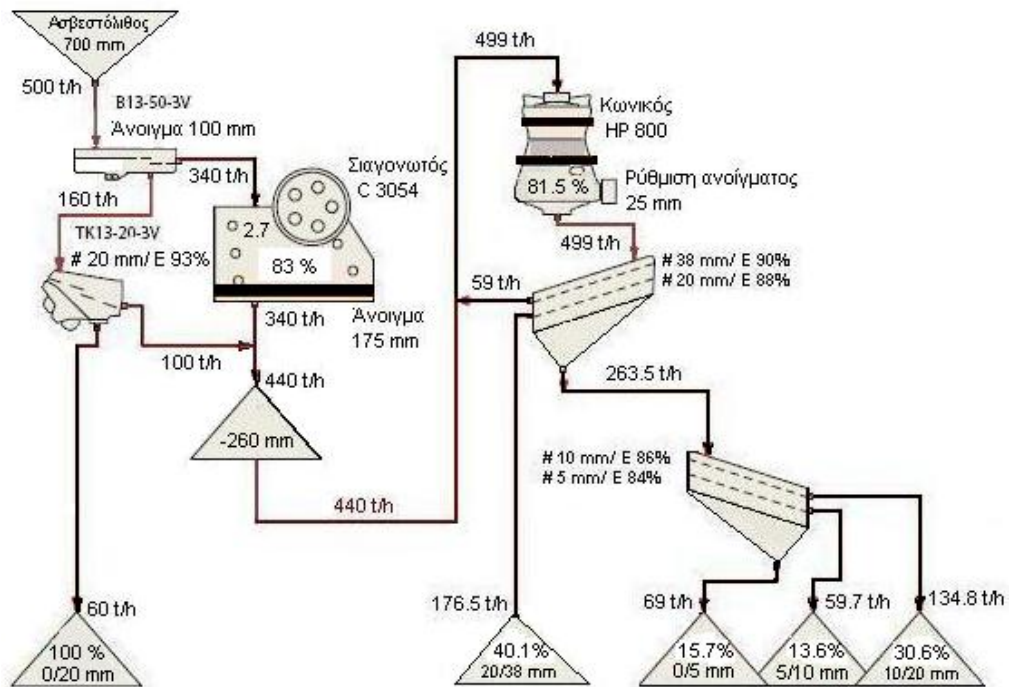
Από την όλη επεξεργασία των δεδομένων διαμορφώνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής παραγωγής αδρανών υλικών για τους δύο τύπους θραυστήρων με τα αντίστοιχα ανοίγματα αποκένωσης, οι παροχές (t/h) διακίνησης υλικών σε κάθε φάση, όπως επίσης και τα παραγόμενα προϊόντα (Στις Εικόνες 5, 6, 7, 8 και 9).

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, 1993; Τσακαλάκης, 1996; Tsakalakis, 2000; Τσακαλάκης, 2001). Οι δευτερογενείς θραυστήρες (κωνικοί και κρουστικοί-περιστροφικοί) λειτουργούν σε κλειστό κύκλωμα με κόσκινο

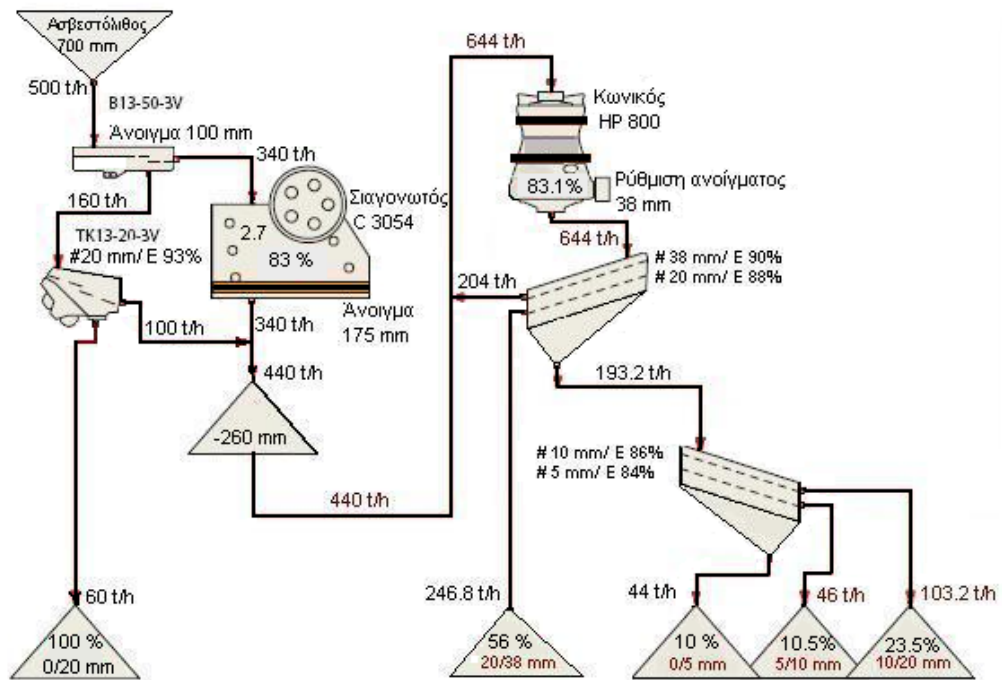
ανοίγματος 38 mm για κάθε περίπτωση, τα δε 4 κοκκομετρικά κλάσματα (προϊόντα) προκύπτουν από την ταξινόμηση του διερχόμενου από το κόσκινο των 38 mm υλικού σε κόσκινα 20, 10 και 5 mm.



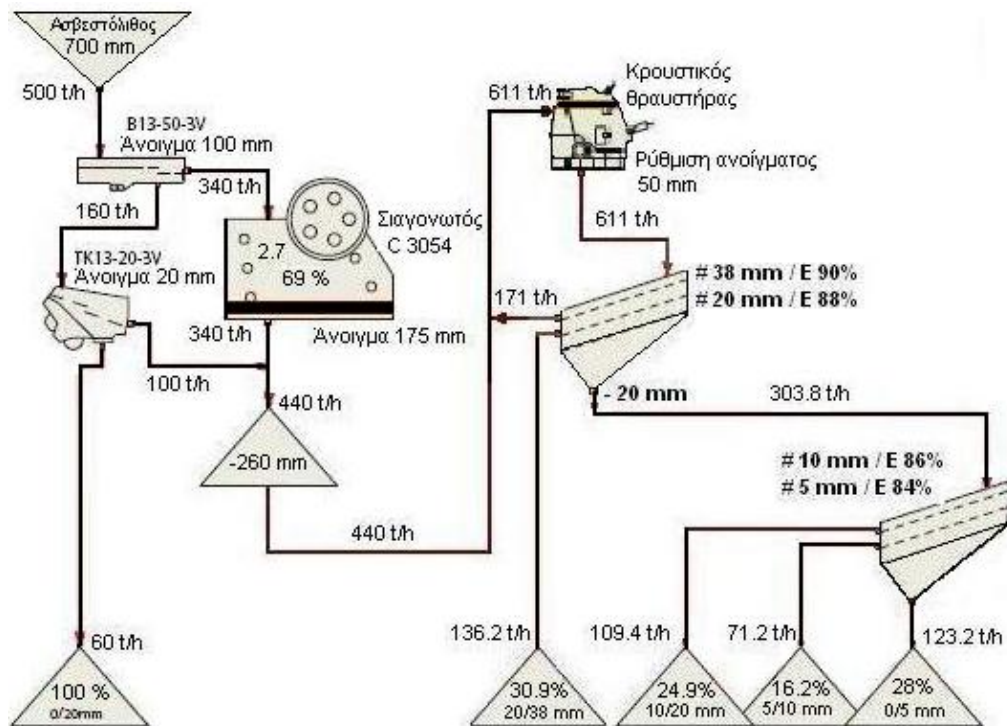
Εικόνα 5. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρα σιαγόνων-κωνικού ανοίγματος αποκένωσης 22 mm).



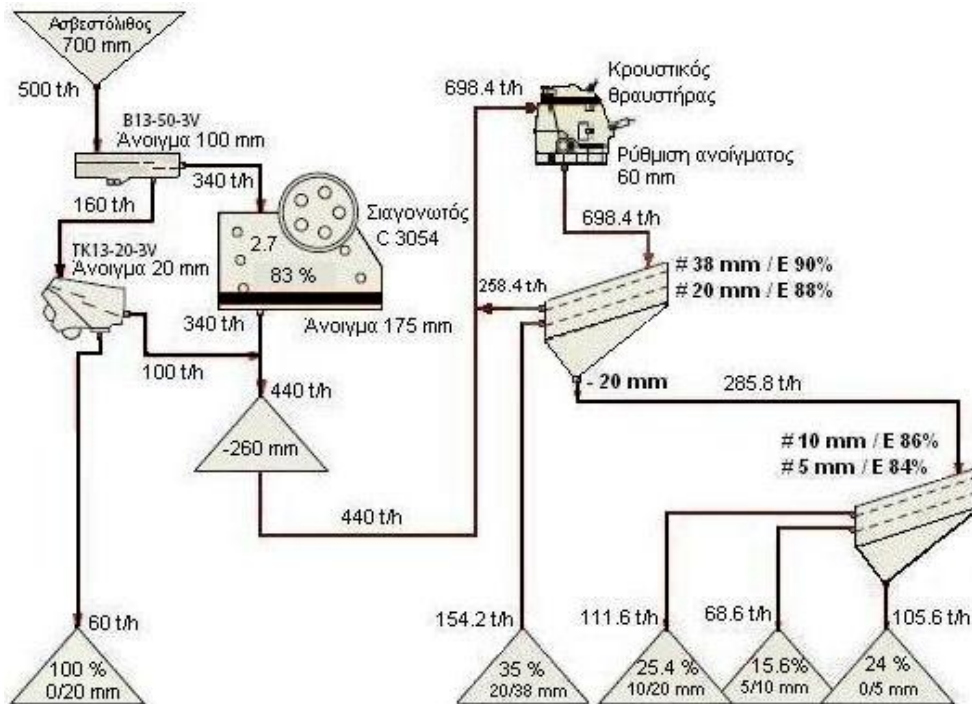
Εικόνα 6. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρα σιαγόνων-κωνικού ανοίγματος αποκένωσης 25 mm).



Εικόνα 7. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρα σιαγόνων-κωνικού ανοίγματος αποκένωσης 38 mm).



Εικόνα 8. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρων σιαγόνων και κρουστικού ανοίγματος αποκένωσης 50 mm).



Εικόνα 9. Διάγραμμα ροής παραγωγής αδρανών υλικών (Συνδυασμός θραυστήρων σιαγόνων και κρουστικού ανοίγματος αποκένωσης 60 mm).

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων προϊόντων κατάτμησης-ταξινόμησης

| ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤ Α ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ 440 t/h | ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ ΣΙΑΓΟΝΩΤΟΣ (Άνοιγμα αποκένωσης 175 mm) | | | | |
|--|---|------------------|------------------|---|------------------|
| | Α. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ (Κωνικός) c.s.s.: 22, 25 και 38 mm | | | Β. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ (Κρουστικός) c.s.s.: 50 και 60 mm | |
| Παραγόμενα κοκκομετρικά κλάσματα, Ποσοστό % κατά βάρος | Άνοιγμα 22 mm | Άνοιγμα 25 mm | Άνοιγμα 38 mm | Άνοιγμα 50 mm | Άνοιγμα 60 mm |
| -38+20 mm | 31.5 | 40.1 | 56 | 30.9 | 35 |
| -20+10 mm | 36 | 30.6 | 23.5 | 24.9 | 25.4 |
| -10+5 mm | 15.7 | 13.6 | 10.5 | 16.2 | 15.6 |
| -5 mm | 16.8 | 15.7 | 10 | 28.0 | 24.0 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| c.s.s. (close 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 κατά τουλάχιστον 8% περίπου από αυτό που παράγεται με χρήση κρουστικών θραυστήρων. Αυτό δικαιολογείται από το 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 κατά σε περίπου 140.000 t/χρόνο. Η αύξηση των εσόδων από την πώληση των εμπορεύσιμων προϊόντων (για τιμή πώλησης αδρανών $\approx 4 \text{ €/t}$) αναμένεται να είναι:

$$140.000 \text{ t / χρόνο} \times 4 \text{ € / t} = 560.000 \text{ € / χρόνο}$$

Το αυξημένο κόστος αγοράς του κωνικού έναντι του κρουστικού θραυστήρα 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 και από τη μειωμένη επιφάνεια απόθεσης του λεπτόκοκκου υλικού, γίνεται ακόμη περισσότερο φανερό το όφελος από τη χρήση κωνικών έναντι των κρουστικών θραυστήρων στη διαδικασία παραγωγής αδρανών υλικών. Αυτό επιβεβαιώνει τις διαπιστώσεις των Mitchell & Benn (2007), οι οποίοι χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση των κυκλωμάτων παραγωγής αδρανών υλικών.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Σταμπολτζής, Γ.Α., «Μηχανική Προπαρασκευή Μεταλλευμάτων Βιομηχανικών Ορυκτών και Πετρωμάτων (Υδροαυτοκαθαρισμός-Κατάτμηση-Ταξινόμηση)», Αθήνα (1994)

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

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

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

Tsakalakis, K., “Use of a simplified method to calculate closed crushing circuits”, Minerals Engineering, Vol. 13, No 12 (2000), 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 (2001), 263-272

Τσακαλάκης, Κ.Γ., Κανάκης Α., «Διερεύνηση κατανομών μεγέθους τεμαχίων επαναλαμβανόμενης απλής θραύσης ψαθυρών υλικών», δημοσιεύτηκε στον τιμητικό Τόμο για τον Ομότιμο Καθηγητή Α.Ζ. Φραγκίσκο, Αθήνα (2005), 105-112

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