

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Τομέας Εκμετάλλευσης Ορυκτών-Εργαστήριο Εμπλουτισμού
Μεταλλευμάτων και Βιομηχανικών Ορυκτών**



**Προσομοίωση και Δυνατότητα Βελτιστοποίησης Εργοστασίου
Εμπλουτισμού Μεταλλεύματος Cu-Zn της Δομινικανής Δημοκρατίας**

Διπλωματική Εργασία

Αλεξόπουλος Γ. Ηλίας

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Ευάγγελος Πετράκης, Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)

Δρ. Κωνσταντίνος Κορνίτσας, Καθηγητής

Δρ. Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής

Χανιά

Δεκέμβριος, 2024

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων και Βιομηχανικών Ορυκτών της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Ευάγγελου Πετράκη.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η προσομοίωση κι η διερεύνηση της δυνατότητας βελτιστοποίησης εργοστασίου εμπλουτισμού μεταλλεύματος Cu-Zn της Δομινικανής Δημοκρατίας. Η εργασία εντάσσεται, κατά ένα μέρος, στα προβλήματα που εξετάζει η *Μηχανική των Τεμαχιδίων* ή *Μηχανική Προπαρασκευή* κι ο *Εμπλουτισμός των Μεταλλευμάτων*. Οι μεν διεργασίες που περιγράφει η Μηχανική των Τεμαχιδίων, αφορούν την κατάτμηση, την ταξινόμηση σε κοκκομετρικά μεγέθη, τον διαχωρισμό ρευστών από στερεά και τη συσσωμάτωση αυτών, οι δε διεργασίες που περιγράφει ο Εμπλουτισμός των Μεταλλευμάτων αφορούν τον διαχωρισμό των ορυκτών που συνυπάρχουν σε ένα μέταλλευμα, κυρίως μέσω των διαφορετικών φυσικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν οι διάφορες ορυκτολογικές φάσεις.

Για τη μελέτη της εμπλουτισσιμότητας του μεταλλεύματος Cu-Zn, εξετάστηκαν οι παραπάνω διεργασίες, διακριτά η μια από την άλλη, ερευνώντας τις βέλτιστες μεθόδους και συνθήκες που βρίσκουν εφαρμογή σε θειούχα μεταλλεύματα, όπως είναι αυτό του Cerro de Maimón, της Δομινικανής Δημοκρατίας. Επομένως, το δεύτερο μέρος αποτελεί, αφενός το κατά πόσο αυτό το εργοστάσιο εμπλουτισμού είναι αποδοτικό κι οικονομικά συμφέρον να τεθεί σε λειτουργία, ελέγχοντας τη διατήρηση των ισοζυγίων μάζας κι αφετέρου τις προτάσεις βελτιστοποίησης του συνολικού κυκλώματος σε βάθος χρόνου.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θεωρώ χρέος μου να αναγνωρίσω τη συμβολή όλων εκείνων που συνέβαλαν για την επίτευξη των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πρωτίστως, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ευάγγελο Πετράκη, για την εμπιστοσύνη που έδειξε να μου αναθέσει το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για το χρόνο που διέθεσε όλο αυτό το διάστημα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα και τον Καθηγητή κ. Μιχαήλ Γαλετάκη, μέλη της εξεταστικής επιτροπής, για την αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας και τη συνεργασία.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και συναδέλφους μου Μανιουδάκη Ειρήνη, Καρανάσιο Νίκο, Μπινιάρη Δημήτρη, Ντάλιο Βασίλη, για όλα αυτά τα χρόνια που περάσαμε εντός της σχολής, καθώς και τα άτομα με τα οποία διατηρήσαμε επαφές όλα αυτά τα χρόνια, Κατράκη Νάνσυ-φοιτήτρια Οινολογίας, Νικολαΐδου Εύα-Πολιτικό Μηχανικό, Ανδριανό Αντώνη-Οικονομολόγο Ναυτιλιακών και Κοσμά Παναγιώτη-Θεολόγο.

Τέλος, αντί ευχαριστηρίου, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία, στην οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξη, κατανόηση και υπομονή που

έδειξε, καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων και που χωρίς αυτή, τίποτα δε θα γινόταν πραγματικότητα.

Ηλίας Αλεξόπουλος

Δεκέμβριος, 2024

«(...) το στοιχείο δε προϋπάρχει του συνόλου, δεν είναι μήτε προγενέστερο μήτε μεταγενέστερο, δεν είναι τα στοιχεία που καθορίζουν το σύνολο, αλλά το σύνολο που καθορίζει τα στοιχεία: η γνώση του όλου και των νόμων του, του συνόλου και της δομής του, δε μπορεί να συναχθεί από τη γνώση των επιμέρους στοιχείων που το απαρτίζουν: αυτό σημαίνει πως μπορεί κανείς να κοιτάζει ένα κομμάτι παζλ επί τρεις μέρες και να νομίζει πως ξέρει τα πάντα για το σχήμα και το χρώμα του, χωρίς να έχει τη παραμικρή πρόοδο: το μόνο που μετράει είναι η δυνατότητα σύνδεσης αυτού το κομματιού με άλλα κομμάτια (...) τα δυο θαυμαστά ενωμένα κομμάτια έχουν γίνει τώρα ένα, το οποίο με τη σειρά του, είναι μια νέα πηγή λαθών, δισταγμών, σύγχυσης και αναμονής»

Ζωή-Οδηγίες Χρήσεως, Georges Perec

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	ii
Ευχαριστίες	ii
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Κατάλογος Πινάκων	ix
Κατάλογος Κύριων Συμβόλων	ix
Περίληψη.....	12
Abstract	13
Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή.....	14
1.1. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	15
1.2. Εύρος κι Ανάπτυξη της Διπλωματικής Εργασίας	15
Κεφάλαιο 2-Βασικές Αρχές-Έννοιες και Μαθηματική Περιγραφή Διεργασιών.....	17
2.1. Ισοζύγια Μαζών και Περιεκτικότητων.....	17
2.2. Βαθμός Διαχωρισμού	18
2.3. Ισοζύγια Μάζας Διακινούμενων Στερεών	20
2.4. Αξιολόγηση Λειτουργίας Ταξινομητών	21
2.5. Περιγραφή της Κατάτμησης σε Μύλους.....	22
2.6. Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης	26
2.7. Περιγραφή της Επίπλευσης.....	28
Κεφάλαιο 3-Μεταλλείο Cerro de Maimón της Δομινικανής Δημοκρατίας.....	30
3.1. Γενικές Πληροφορίες	30
3.2. Κοιτασματολογικά Χαρακτηριστικά και Μεταλλοφορία	31
3.3. Ορυκτοί Πόροι κι Αποθέματα	33
3.4. Περιγραφή των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας	36
Κεφάλαιο 4-Προσομοίωση Εργοστασίου Θειούχου Μεταλλεύματος με τη Χρήση του Λογισμικού MODSIM™.....	39
4.1. Εισαγωγή Δεδομένων	40
4.1.1. Ορισμός των Δεδομένων του Συστήματος.....	40
4.1.2. Ορισμός των Κατηγοριών Ποιότητας.....	42
4.1.3. Ορισμός των Δεδομένων στις Ροές Τροφοδοσίας	43
4.1.4. Ορισμός της Κατανομής στις Κατηγορίες Ποιότητας	44
4.1.5. Επιλογή των Δεδομένων Εξόδου του Λογισμικού	45
4.1.6. Ορισμός της Διαθέσιμης Κοκκομετρικής Κατανομής.....	46
4.2. Σχεδιασμός Εργοστασίου και Μοντελοποίηση των Μονάδων	48
4.2.1. Εισαγωγή των Μονάδων και Σχεδιασμός των Ρευμάτων.....	48
4.2.2. Επιλογή και Μοντελοποίηση των Λειτουργικών Μονάδων.....	50
4.2.2.1. Μοντελοποίηση Σιαγονωτού Σπαστήρα.....	53

4.2.2.2. Μοντελοποίηση Κοσκίνου Μονού Καταστρώματος.....	54
4.2.2.3. Μοντελοποίηση Κωνικού Σπαστήρα	54
4.2.2.4. Μοντελοποίηση Σφαιρόμυλων	55
4.2.2.5. Μοντελοποίηση Υδροκυκλώνων.....	56
4.2.2.6. Μοντελοποίηση Κελιού, Συστοιχιών και Στήλης Επίπλευσης	58
4.2.2.7. Μοντελοποίηση Παχυντών και Μηχανών Διήθησης	60
4.2.2.8. Μοντελοποίηση Ταινοδρόμων, Σωρού και Δεξαμενών	60
4.3. Εκτέλεση της Προσομοίωσης.....	61
4.4. Τμηματική Παρουσίαση του Εργοστασίου Εμπλουτισμού και Συνοδευτικοί Υπολογισμοί	65
4.4.1. Κύκλωμα Θραύσης-Κοσκίνισης.....	65
4.4.2. Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης I	66
4.4.2.1. Ισοζύγιο στη Δεύτερη Δεξαμενή του Κυκλώματος Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης I κι Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού.....	67
4.4.2.2. Υπολογισμός Κυκλοφορούντος Φορτίου στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης I.....	68
4.4.2.3. Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης I.....	69
4.4.3. Κύκλωμα Επίπλευσης I.....	70
4.4.4. Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II.....	72
4.4.4.1. Ισοζύγιο στη Δεξαμενή του Κυκλώματος Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II κι Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού.....	73
4.4.4.2. Υπολογισμός Κυκλοφορούντος Φορτίου στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II.....	74
4.4.4.3. Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II.....	75
4.4.5. Κύκλωμα Επίπλευσης II	76
4.4.6. Κύκλωμα Επίπλευσης III.....	77
4.4.7. Κυκλώματα Αφυδάτωσης I, II και III	79
4.4.7.1. Ανάκτηση Νερού από τα Κυκλώματα Αφυδάτωσης του Εργοστασίου ...	80
4.5. Σχολιασμός της Προσομοίωσης	81
4.5.1. Αναλύσεις στα Ρεύματα του Διαγράμματος Ροής	81
4.5.2. Διαγράμματα που Εξάγονται από την Προσομοίωση.	82
4.5.2.1. Αξιολόγηση Λειτουργίας Υδροκυκλώνων	85
4.5.3. Υπολογισμοί Βάσει των Τελικών Προϊόντων του Εργοστασίου	87
Κεφάλαιο 5-Βελτιστοποίηση με Βάση τις Υπάρχουσες Συνθήκες του Διαγράμματος Ροής του Εργοστασίου Εμπλουτισμού	89
5.1. Περιγραφή της Βελτιστοποίησης και Προσομοίωσή της	89
5.1.1. Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού στην Έκτη Δεξαμενή του Κυκλώματος Επίπλευσης III	91

5.2. Βελτιώσεις που Προκύπτουν από τη Νέα Προσομοίωση.....	94
5.2.1. Υπολογισμοί Βάσει των Νέων Τελικών Προϊόντων του Εργοστασίου.....	94
5.2.2. Συγκριτική Αξιολόγηση Παραγόμενων Τελικών Συμπυκνωμάτων	95
Κεφάλαιο 6-Συμπεράσματα.....	98
6.1. Απόρροιες της Διπλωματικής Εργασίας.....	98
6.2. Εναλλακτική Πρόταση για Βελτιστοποίηση.....	99
Βιβλιογραφία.....	100
Ελληνική.....	100
Ξενόγλωσση	101
Λογισμικά	104
Παραρτήματα	105
Παράρτημα Α-Χαρακτηρισμός του Μεταλλεύματος	105
Α.1. Χημική Σύνθεση Κύριων Ορυκτολογικών Φάσεων Μεταλλεύματος.....	105
Α.2. Ανηγμένη Συμμετοχή Κύριων Ορυκτολογικών Φάσεων με Βάση τις Πρόσφατες Τιμές του Head Grade.....	105
Παράρτημα Β-Διαγράμματα Ροής Εταιρείας CORMIDOM	106
Παράρτημα Γ-Εμβόλιμες Μοντελοποιήσεις	107
Γ.1. Μοντελοποίηση Κελιού, Συστοιχιών και Στήλης Επίπλευσης (Συνέχεια)	107
Γ.2. Ορισμός των Δεδομένων στις Ροές Νερού.....	110
Παράρτημα Δ-Αρχεία Ιδιοτήτων Ρευμάτων	111
Δ.1. Αρχεία από την Προσομοίωση που Έλαβε Χώρα στο Κεφάλαιο 4.....	111
Δ.2. Αρχεία Τελικών Προϊόντων από τη Βελτιστοποιημένη Προσομοίωση	119
Παράρτημα Ε-Ένθετοι Υπολογισμοί των Αναλύσεων Λειτουργικής Απόδοσης.....	120
Ε.1. Υπολογισμοί για -90 μm στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης Ι.....	120
Ε.2. Υπολογισμοί για -25 μm στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης ΙΙ	121
Παράρτημα ΣΤ-Συμπληρωματικές Σημειώσεις και Σχόλια.....	122
ΣΤ.1. Μετατροπή Nm^3/h σε Am^3/h	122
ΣΤ.2. Ανακυκλώσεις Νερού στα Διαγράμματα Ροής που Σχεδιάστηκαν	122

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Τυπική καμπύλη ανάκτησης-ποιότητας (Wills & Napier-Munn, 2006).	19
Σχήμα 2.2: Τυπικό διάγραμμα πραγματικής (Real) κι ιδανικής (Ideal) κατανομής στο χονδρό προϊόν (Wills & Napier-Munn, 2006).	21
Σχήμα 2.3: Τυπικό διάγραμμα της ενεργειακής-ειδικής συνάρτησης επιλογής συναρτήσει του μεγέθους των τεμαχιδίων (King, 2001).	24
Σχήμα 2.4: Εμπειρική αθροιστική συνάρτηση θραύσης συναρτήσει του μεγέθους (Ipek et al., 2005).	26
Σχήμα 3.1: Χάρτης της Δομινικανής Δημοκρατίας με την τοποθεσία του μεταλλείου Cerro de Maimón (Hudson Institute of Mineralogy, n.d.).	30
Σχήμα 3.2: Βαθμίδες υπαίθριας εκμετάλλευσης του μεταλλείου Cerro de Maimón (Perilya Limited, n.d.).	31
Σχήμα 3.3: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του κοιτάσματος (Perilya Limited, n.d.).	31
Σχήμα 3.4: Λεπτομερής τομή των μεταλλοφόρων επιπέδων του κοιτάσματος, προβαλλόμενη κατά τη διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Andreu et al., 2015).	32
Σχήμα 3.5: Σχηματική απεικόνιση του αποσαθρωμένου προφίλ του κοιτάσματος, σε αντιπαράβολή με φωτογραφία πεδίου από τη φάση της αποκάλυψής του. Κάθε βαθμίδα έχει ύψος 5 m, ενώ τα υψόμετρα είναι ορθομετρικά, δηλαδή από τη μέση στάθμη της θάλασσας (Andreu et al., 2015).	33
Σχήμα 3.6: Εγκαταστάσεις επεξεργασίας του μεταλλείου. Στα αριστερά βρίσκεται το εργοστάσιο εμπλουτισμού του οξειδωμένου μεταλλεύματος και στα δεξιά αυτό του θειούχου (Perilya Limited, n.d.).	37
Σχήμα 4.1: Συμπληρωμένη φόρμα των δεδομένων του συστήματος.	41
Σχήμα 4.2: Συμπληρωμένη φόρμα των κατηγοριών ποιότητας.	42
Σχήμα 4.3: Συμπληρωμένη φόρμα κοκκομετρικής κατανομής και παροχής της ροής τροφοδοσίας.	44
Σχήμα 4.4: Συμπληρωμένη φόρμα της κατανομής των κατηγοριών ποιότητας.	45
Σχήμα 4.5: Συμπληρωμένη φόρμα των δεδομένων εξόδου.	46
Σχήμα 4.6: Κύκλωμα προπαρασκευής εξορυγμένου μεταλλεύματος.	47
Σχήμα 4.7: Συμπληρωμένη φόρμα κοκκομετρικής κατανομής της πρωτογενούς τροφοδοσίας του πρωτογενή σφαιρόμυλου στο έβδομο ρεύμα του διαγράμματος ροής.	48
Σχήμα 4.8: Το μενού επιλογής (Select Menu) των διαθέσιμων διεργασιών του Flowsheet Editor. Σε αυτό απεικονίζεται η επιλογή της λειτουργικής μονάδας ενός παχυντή, για τη διεργασία της αφυδάτωσης.	49
Σχήμα 4.9: Αναπαράσταση του διαγράμματος ροής του εργοστασίου εμπλουτισμού Cu-Zn, της εταιρείας CORMIDOM, στο περιβάλλον του MODSIM™.	51
Σχήμα 4.10: Παράθυρο των επιλεγμένων μονάδων του διαγράμματος ροής, για την πρόσβαση στις φόρμες συμπλήρωσης των επιθυμητών μοντέλων.	53
Σχήμα 4.11: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου CRSH, για τον σιαγονωτό σπαστήρα.	54
Σχήμα 4.12: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου SCRΝ, για το κόσκινο.	54
Σχήμα 4.13: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου SHHD, για τον κωνικό σπαστήρα.	55
Σχήμα 4.14: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου HFMI, για τον πρωτογενή σφαιρόμυλο.	56
Σχήμα 4.15: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου HFMI, για τον δευτερογενή σφαιρόμυλο.	56
Σχήμα 4.16: Τροποποιημένο νομόγραμμα επιλογής μεγέθους υδροκυκλώνων με βάση τη μέθοδο της Metso (Metso Limited, 2011).	57
Σχήμα 4.17: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου CYCA, για τον πρώτο υδροκυκλώνα.	58
Σχήμα 4.18: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου CYCA, για τον δεύτερο υδροκυκλώνα.	58
Σχήμα 4.19: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για το πρώτο κελί επίπλευσης.	60
Σχήμα 4.20: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου THIC, για τον πρώτο παχυντή.	60
Σχήμα 4.21: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου FILT, για την πρώτη μηχανή διήθησης.	60
Σχήμα 4.22: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου MIXR, για όλες τις μονάδες στις οποίες έχει επιλεγθεί.	61
Σχήμα 4.23: Πρόσβαση στις ιδιότητες των ροών (Stream Properties).	61

Σχήμα 4.24: Προσομοιωμένο διάγραμμα ροής του εργοστασίου του θείουχου μεταλλεύματος, με έμφαση των ετικετών, στη στοιχειακή ανάλυση του Cu.....	63
Σχήμα 4.25: Προσομοιωμένο διάγραμμα ροής του εργοστασίου του θείουχου μεταλλεύματος, με έμφαση των ετικετών, στη στοιχειακή ανάλυση του Zn.....	64
Σχήμα 4.26: Το κύκλωμα θραύσης-κοσκίνισης στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.....	65
Σχήμα 4.27: Το κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης I στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.....	66
Σχήμα 4.28: Το κύκλωμα επίπλευσης I στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.	70
Σχήμα 4.29: Το κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης II στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου. ..	72
Σχήμα 4.30: Το κύκλωμα επίπλευσης II στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.	76
Σχήμα 4.31: Το κύκλωμα επίπλευσης III στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.....	78
Σχήμα 4.32: Τα κυκλώματα αφυδάτωσης I, II και III στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.....	79
Σχήμα 4.33: Κοκκομετρικές κατανομές της τροφοδοσίας και του προϊόντος του κυκλώματος θραύσης-κοσκίνισης.....	83
Σχήμα 4.34: Κοκκομετρικές κατανομές στις εισόδους και στις εξόδους του κυκλώματος λειοτρίβησης-ταξινόμησης I.	84
Σχήμα 4.35: Κοκκομετρικές κατανομές στις εισόδους και στις εξόδους του κυκλώματος λειοτρίβησης-ταξινόμησης II.	85
Σχήμα 4.36: Πρόσβαση στις καμπύλες διαχωρισμού των υδροκυκλώνων.....	85
Σχήμα 4.37: Διάγραμμα κατανομής στο χονδρό α) για τον πρώτο υδροκυκλώνα και β) για τον δεύτερο υδροκυκλώνα.....	86
Σχήμα 5.1: Εστίαση στις διατάξεις των ρευμάτων α) πριν και β) μετά τις βελτιωτικές αλλαγές. .	90
Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα κύρια κυκλώματα ενδιαφέροντος α) πριν και β) μετά τις βελτιωτικές αλλαγές με έμφαση των ετικετών, στη στοιχειακή ανάλυση του Cu.....	92
Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα κύρια κυκλώματα ενδιαφέροντος α) πριν και β) μετά τις βελτιωτικές αλλαγές με έμφαση των ετικετών, στη στοιχειακή ανάλυση του Zn.	93
Σχήμα 5.4: Σύγκριση της περιεκτικότητας και της ανάκτησης α) για το συμπύκνωμα του χαλκού και β) για το συμπύκνωμα του ψευδαργύρου, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης. Προέλευση ιδέας διαγραμμάτων (Han et al., 2021).....	96
Σχήμα 5.5: Σύγκριση της ορυκτολογικής σύστασης του τελικού συμπυκνώματος χαλκού, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης.	96
Σχήμα 5.6: Σύγκριση της ορυκτολογικής σύστασης του τελικού συμπυκνώματος ψευδαργύρου, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης.	97
Σχήμα 5.7: Σύγκριση του βαθμού διαχωρισμού του εργοστασίου εμπλουτισμού, ως προς την παραγωγή τελικών συμπυκνωμάτων, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης. ..	97
Σχήμα B.1: Διάγραμμα ροής του κυκλώματος θραύσης-κοσκίνισης, της εταιρείας CORMIDOM S.A.S.....	106
Σχήμα B.2: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας θείουχου μεταλλεύματος, της εταιρείας CORMIDOM S.A.S.....	106
Σχήμα Γ.1.1: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την πρώτη συστοιχία επίπλευσης.	107
Σχήμα Γ.1.2: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για τη δεύτερη συστοιχία επίπλευσης. ...	107
Σχήμα Γ.1.3: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την τρίτη συστοιχία επίπλευσης.	107
Σχήμα Γ.1.4: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την τέταρτη συστοιχία επίπλευσης...	108
Σχήμα Γ.1.5: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την πέμπτη συστοιχία επίπλευσης.	108
Σχήμα Γ.1.6: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την έκτη συστοιχία επίπλευσης.	108
Σχήμα Γ.1.7: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KILC, για τη στήλη επίπλευσης.	109
Σχήμα Γ.1.8: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την έβδομη συστοιχία επίπλευσης....	109
Σχήμα Γ.1.9: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την όγδοη συστοιχία επίπλευσης.	109
Σχήμα Γ.2.1: Χαρακτηρισμός της επίδοσης της ταξινόμησης ενός υδροκυκλώνα, με βάση την περιεκτικότητα κατ' όγκο του πολφού της τροφοδοσίας του (Metso Limited, 2011).....	110
Σχήμα Γ.2.2: Συμπληρωμένη φόρμα, για την προσθήκη νερού στο Ρεύμα 53.	110
Σχήμα Γ.2.3: Συμπληρωμένη φόρμα, για τη προσθήκη νερού στο Ρεύμα 54.	110
Σχήμα Γ.2.4: Συμπληρωμένη φόρμα, για την προσθήκη νερού στο Ρεύμα 37.	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Κριτήρια χαρακτηρισμού της ταξινόμησης (Heidelberg Cement AG, 2012).....	22
Πίνακας 3.1: Ορυκτοί πόροι της οξειδωμένης ζώνης του κοιτάσματος Cerro de Maimón (Roos et al., 2007).	35
Πίνακας 3.2: Ορυκτοί πόροι της θειούχας ζώνης του κοιτάσματος Cerro de Maimón (Roos et al., 2007).	35
Πίνακας 3.3: Αποθέματα του οξειδωμένου μεταλλεύματος (Roos et al., 2007).....	35
Πίνακας 3.4: Αποθέματα του θειούχου μεταλλεύματος (Roos et al., 2007).	35
Πίνακας 3.5: Ετήσια παραγωγή κύριων μετάλλων του μεταλλείου Cerro de Maimón, από τον Δεκέμβριο του 2008 μέχρι το διάστημα Ιανουαρίου-Οκτωβρίου του 2018 (Redwood, 2019).....	36
Πίνακας 4.1: Εκτιμώμενη κοκκομετρική κατανομή της τροφοδοσίας του εργοστασίου.....	43
Πίνακας 4.2: Κοκκομετρική κατανομή πρωτογενούς τροφοδοσίας του πρωτογενή σφαιρόμυλου (Δεδομένα CORMIDOM S.A.S., 2023).....	47
Πίνακας 4.3: Μοντέλα μονάδων που διατίθενται στη βιβλιοθήκη MODSIM™ κι εξυπηρετούν την παρούσα προσομοίωση (King, 2000).....	52
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης των Mazzinghy et al. (2015).	55
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος θραύσης-κοσκίνισης.....	65
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος λειοτρίβησης-ταξινόμησης I.....	66
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος επίπλευσης I	70
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος λειοτρίβησης-ταξινόμησης II.....	72
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος επίπλευσης II.	76
Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος επίπλευσης III.	78
Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα των κυκλωμάτων αφυδάτωσης I, II και III.....	80
Πίνακας 4.12: Συγκεντρωτική παρουσίαση στοιχειακών αναλύσεων, που προέκυψαν από την αυτοψία στο εργοστάσιο (Plant Survey) και την προσομοίωση στο MODSIM™.	81
Πίνακας 4.13: Ποσότητες και περιεκτικότητες της αρχικής τροφοδοσίας και των τελικών προϊόντων του εργοστασίου εμπλουτισμού, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση.	87
Πίνακας 5.1: Ποσότητες και περιεκτικότητες της αρχικής τροφοδοσίας και των τελικών προϊόντων του εργοστασίου εμπλουτισμού, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του βελτιωμένου διαγράμματος ροής.	94
Πίνακας Α.1.1: Υπολογισμός μοριακής μάζας των ορυκτολογικών φάσεων.	105

Κατάλογος Κύριων Συμβόλων

B_{ij} : Εμπειρική αθροιστική συνάρτηση θραύσης των Austin-Luckie [%]
 b_{ij} : κλάσμα θραυσμένης μάζας τάξης j , που εμφανίζεται στην τάξη i στο μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού [%]
 C : Μάζα ή παροχή μάζας συμπυκνώματος στο ισοζύγιο μαζών και περιεκτικότητων [t], [t/h]
 CL : Κυκλοφορούν φορτίο [t/h]
 CLR : Λόγος κυκλοφορούντος φορτίου [%]
 $CPRF$: Ρυθμός παραγωγής λεπτών τεμαχιδίων, από κύκλωμα λειοτρίβησης με ταξινομητή στην εξίσωση ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [t/h]

CSE : Απόδοση ταξινόμησης συστήματος στην εξίσωση ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [%]
 c : Περιεκτικότητα σε χρήσιμο ορυκτό ή στοιχείο στο συμπύκνωμα [%]
 c_{max} : Στοιχειομετρική περιεκτικότητα του χρήσιμου στοιχείου στο καθαρό ορυκτό [%]
 D : Περιεκτικότητα σε στερεά [%]
 D' : Αραίωση [-]
 d_{25}, d_{50}, d_{75} : Στατιστικές παράμετροι σε διάγραμμα κοκκομετρικής κατανομής [mm]
 d_i : Μεγέθη τεμαχιδίων τάξης i στην εξίσωση Rajamani-Herbst [mm]
 d_1 : Μέγεθος αναφοράς στην εξίσωση Rajamani-Herbst [mm]

EMP: Αποτελεσματική ή ενεργής ισχύς μύλου στην εξίσωση ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [kW]

j: τάξη μεγέθους, στο μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού [-]

i: τάξη μεγέθους, στο μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού, επόμενη της *j* [-]

J: Ανάκτηση μάζας χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου στο απόρριμμα [%]

F: Μάζα ή παροχή μάζας τροφοδοσίας στο ισοζύγιο μαζών και περιεκτικότητας [t], [t/h]

F: Μάζα ή παροχή μάζας τροφοδοσίας στο ισοζύγιο διακινούμενων στερεών [t], [t/h]

FR: Παροχή τροφοδοσίας κυκλώματος λειοτρίβησης με ταξινομητή, στην εξίσωση του ρυθμού παραγωγής λεπτών τεμαχιδίων (CPRF) της ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [t/h]

F_W: Ποσότητα φρέσκου νερού [t/h]

f: Περιεκτικότητα σε χρήσιμο ορυκτό ή στοιχείο στην τροφοδοσία [%]

f: Περιεκτικότητα στερεών τροφοδοσίας [%]

f': Αραίωση σε τροφοδοσία [-]

GC_{conc}: Περιεκτικότητα σύνδρομου ορυκτού στο συμπύκνωμα [%]

GC_{Feed}: Περιεκτικότητα σύνδρομου ορυκτού στην τροφοδοσία [%]

S_i, S_j: Ρυθμοί θραύσης στις τάξεις *i* και *j* στο μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού [sec⁻¹], [min⁻¹]

S₁^E: Ενεργειακή-ειδική συνάρτηση επιλογής για μέγεθος αναφοράς *d*₁ στην εξίσωση Rajamani-Herbst [t/kWh]

S_i^E: Ειδική συνάρτηση επιλογής μεγέθους *i* στις εξισώσεις Herbst-Fuerstenau και Rajamani-Herbst [t/kWh]

Sh: οξύτητα διαχωρισμού [-]

T: Μάζα ή παροχή μάζας απορρίμματος στο ισοζύγιο μαζών και περιεκτικότητας [t], [t/h]

TMP: Ολική ισχύς του μύλου, στις εξισώσεις ενεργούς και απολεσμένης ισχύος του μύλου και στην εξίσωση ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [kW]

t: Περιεκτικότητα σε χρήσιμο ορυκτό ή στοιχείο στο απόρριμμα [t]

t_i: Χρονικά διαστήματα που χωρίζεται η επίπλευση στις εξισώσεις Garcia-Zuñiga και Klimpel [sec], [min]

U: Μάζα ή παροχή μάζας απορροής στο ισοζύγιο διακινούμενων στερεών [t], [t/h]

u: Περιεκτικότητα στερεών απορροής [%]

u': Αραίωση σε απορροή [-]

Y: Μάζα ή παροχή μάζας υπερχειλίσσης στο ισοζύγιο διακινούμενων στερεών [t], [t/h]

y: Περιεκτικότητα στερεών υπερχειλίσσης [%]

y': Αραίωση σε υπερχειλίσση [-]

K: Λόγος συγκέντρωσης [-]

k: Μέγιστο μέγεθος κόκκου της κατανομής GGS [m]

k₁: Σταθερά ρυθμού επίπλευσης στην εξίσωση Garcia-Zuñiga [sec⁻¹], [min⁻¹]

k₂: Σταθερά ρυθμού επίπλευσης στην εξίσωση Klimpel [sec⁻¹], [min⁻¹]

M: Μάζα στερεών για δοκιμές batch [kg]

M_S: Μάζα ή παροχή μάζας στερεών [t], [t/h]

M: Μάζα ή παροχή μάζας ενδιάμεσου προϊόντος στο ισοζύγιο μαζών και περιεκτικότητας [t], [t/h]

M_W: Μάζα ή παροχή μάζας νερού [t], [t/h]

MGE: Απόδοση λειοτρίβησης μύλου στην εξίσωση ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [(t/kWh)/(g/rev)]

m: Συντελεστής ομοιομορφίας κατανομής GGS [-]

ny: Περιεκτικότητα σε χρήσιμο ορυκτό ή στοιχείο στο ενδιάμεσο προϊόν [%]

m_i(t), m_j(t): Μάζες τεμαχιδίων, που περιέχονται στις τάξεις μεγέθους *i* και *j* αντίστοιχα, μετά από χρόνο λειοτρίβησης *t*, στο μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού [kg]

n: Τάξεις μεγέθους που χωρίζεται η μάζα *M*, στο μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού [-]

OG: Ευθραυστότητα υλικού στην εξίσωση ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [g/rev]

P: Ποσοστό του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους μεγέθους *x* της κατανομής GGS [m]

P: Ισχύς κινητήρα μύλου [hp], [kW]

P_{Feed}: Κλάσμα μάζας λεπτών τεμαχιδίων στην έξοδο του κυκλώματος λειοτρίβησης με ταξινομητή, στην εξίσωση του ρυθμού παραγωγής λεπτών τεμαχιδίων (CPRF) της ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [%]

P_{Product}: Κλάσμα μάζας λεπτών τεμαχιδίων στην είσοδο του κυκλώματος λειοτρίβησης με ταξινομητή, στην εξίσωση του ρυθμού παραγωγής λεπτών τεμαχιδίων (CPRF) της ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [%]

P₈₀: Μέγεθος από το οποίο διέρχεται το 80% του υπό ταξινόμηση υλικού [m]

R: Ανάκτηση μάζας χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου στο συμπύκνωμα [%]

R_{Discharge}: Κλάσμα μάζας χονδρών τεμαχιδίων στην έξοδο του μύλου, στην εξίσωση της απόδοσης ταξινόμησης του συστήματος (CSE) [%]

R_{Feed} : Κλάσμα μάζας χονδρών τεμαχιδίων στην είσοδο του μύλου, στην εξίσωση της απόδοσης ταξινόμησης του συστήματος (CSE) [%]

R_m : Ανάκτηση μάζας χρήσιμου ορυκτού στο συμπύκνωμα [%]

R_g : Ανάκτηση μάζας σύνδρομου ορυκτού στο συμπύκνωμα [%]

R_f : Κλάσμα μάζας λεπτών τεμαχιδίων που πηγαίνουν σε απορροή υδροταξινομητή [%]

R_∞ : Μέγιστο θεωρητικό ποσοστό μάζας του χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου, που ανακτάται για θεωρητικά άπειρο χρόνο επίπλευσης στις εξισώσεις Garcia-Zuñiga και Klimpel [%]

$R(t_i)$: Αθροιστικό ποσοστό μάζας χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου στις εξισώσεις Garcia-Zuñiga και Klimpel [%]

$SGRC$: Ειδικός ρυθμός θραύσης χονδρών τεμαχιδίων στην εξίσωση ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης [t/kWh]

$WOMP$: Απολεσμένη ισχύς μύλου στην ανάλυση λειτουργικής απόδοσης [kW]

WR : Ανάκτηση νερού [t/h]

x : Μεγέθη κόκκων κατανομής GGS [mm]

x_j : Μέγιστο μέγεθος τεμαχιδίων στην εμπειρική αθροιστική συνάρτηση θραύσης των Austin-Luckie [mm]

x_{i-1} : Μεγέθη κόκκων τάξεων i στην εμπειρική αθροιστική συνάρτηση θραύσης των Austin-Luckie [mm]

Y : Ανάκτηση μάζας στερεών [%]

η : Βαθμός διαχωρισμού [%]

ζ_1, ζ_2 : Παράμετροι στην εξίσωση Rajamani-Herbst [-]

τ : Ολική διάρκεια της επίπλευσης [sec], [min]

β, γ, φ_j : Παράμετροι εμπειρικής αθροιστικής συνάρτησης των Austin-Luckie [-]

δ, φ_j, x_1 : Βοηθητικές παράμετροι εμπειρικής αθροιστικής συνάρτησης των Austin-Luckie [-,-,mm]

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση ενός εργοστασίου εμπλουτισμού της Δομινικανής Δημοκρατίας, το οποίο επεξεργάζεται θειούχο μετάλλευμα και παράγει τελικά συμπυκνώματα χαλκού και ψευδαργύρου. Μέσω του λογισμικού MODSIM™, επιχειρείται αρχικά να αναπαραχθεί, όσο πιο πιστά γίνεται σε πραγματικές συνθήκες, μια αντιπροσωπευτική εκδοχή του εργοστασίου αυτού και κατόπιν προτείνονται κι εφαρμόζονται αλλαγές για τη βελτίωσή του.

Η προσομοίωση περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του διαγράμματος ροής του εργοστασίου και τη μαθηματική μοντελοποίηση της τροφοδοσίας, καθώς και των μηχανημάτων (λειτουργικές μονάδες), που στηρίχθηκαν στις πληροφορίες που παραχώρησε η εταιρεία CORMIDOM S.A.S. και σε βιβλιογραφικές πηγές. Από την εκτέλεση της προσομοίωσης, αυτού του διαγράμματος ροής, εξάγονται αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται τμηματικά στα αντίστοιχα διακεκριμένα διαδοχικά κυκλώματα. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, γίνονται υπολογισμοί που αφορούν τις λειτουργικές μονάδες και τα κυκλώματα του διαγράμματος ροής, όπως επίσης υπολογίζονται χρήσιμοι δείκτες αξιολόγησης του βαθμού επιτυχίας του διαχωρισμού. Η αρχική τροφοδοσία έχει 2.38% Cu, 2.59% Zn και 27.03% Fe. Οι ποιότητες των τελικών συμπυκνωμάτων, μετά την προσομοίωση, ήταν 16.75% Cu, 8.1% Zn και 33.12% Fe στο συμπίκνωμα του χαλκού και 2.05% Cu, 45.38% Zn και 14.11% Fe στο συμπίκνωμα του ψευδαργύρου.

Η βελτιστοποίηση γίνεται στο ήδη υπάρχον κατασκευασμένο διάγραμμα ροής, με ανακατεύθυνση των ρευμάτων, του απορρίμματος και του συμπυκνώματος, του τελευταίου σταδίου επίπλευσης του εργοστασίου. Από την εκτέλεση αυτής της προσομοίωσης υπολογίστηκαν εκ νέου οι ποιότητες των τελικών προϊόντων, καθώς κι οι αντίστοιχοι δείκτες αξιολόγησης. Οι ποιότητες των νέων τελικών συμπυκνωμάτων, ήταν 18.43% Cu, 8.42% Zn και 32% Fe στο τελικό συμπίκνωμα του χαλκού και 1.84% Cu, 46.1% Zn και 13.72% Fe στο τελικό συμπίκνωμα του ψευδαργύρου.

Με βάση τους δείκτες των τελικών προϊόντων του εργοστασίου, γίνεται συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των δύο (2) εκδοχών που προσομοιώθηκαν. Η συγκριτική αξιολόγηση, ανέδειξε τα προτερήματα των βελτιωτικών αλλαγών που εφαρμόστηκαν, καθώς παρατηρήθηκαν:

- ❖ Ταυτόχρονη αύξηση στις περιεκτικότητες των χρήσιμων στοιχείων στα τελικά τους συμπυκνώματα (+1.68% Cu στο τελικό συμπίκνωμα του χαλκού και +0.72% Zn στο τελικό συμπίκνωμα του ψευδαργύρου),
- ❖ Αύξηση 1.69% στην ανάκτηση του Zn στο τελικό του συμπίκνωμα, και
- ❖ Ταυτόχρονη αύξηση των βαθμών διαχωρισμού του εργοστασίου και για τα δύο (2) συμπυκνώματα (+0.81% στο συμπίκνωμα του χαλκού και +1.72% στο συμπίκνωμα του ψευδαργύρου).

Λέξεις Κλειδιά: MODSIM™; Μαθηματική Μοντελοποίηση; Προσομοίωση; Βελτιστοποίηση; Δομινικανή Δημοκρατία; Μεταλλείο Cerro de Maimón; Θειούχο Μέταλλευμα Cu-Zn; Μηχανική Προπαρασκευή; Εμπλουτισμός Μεταλλευμάτων; Σχεδιασμός Εργοστασίων Εμπλουτισμού; Κατάτμηση; Ταξινόμηση; Επίπλευση; Αφυδάτωση.

Abstract

This present thesis examines the simulation of a mineral processing plant in the Dominican Republic, which is processing sulfide ore and produces Cu and Zn concentrates. Using the software MODSIM™, a representative version of this plant is reproduced, in its actual operating conditions (as much as possible) and then changes are proposed and implement to optimize it.

The simulation includes the design of the plant's flowsheet and the mathematical modeling of the extracted feed (run of mine) and the plant's machinery (units). The design and the mathematical modeling are based on the information/data provided by CORMIDOM S.A.S., as well as on scientific sources and studies. The results of this flowsheet version are obtained by running the simulation and are presented by circuit sections. Based on simulation results, relevant calculations in units and circuits are presented, while useful indicators for assessing the success of separation are also calculated. CORMIDOM's run of mine head grade is 2.38% Cu, 2.59% Zn and 27.03% Fe. The simulation gave a grade of 16.75% Cu, 8.1% Zn and 33.12% Fe at copper final concentrate and a grade of 2.05% Cu, 45.38% Zn and 14.11% Fe at zinc final concentrate.

Optimization is applied on the existing version of the flowsheet, by redirecting the concentrate and the tail of the plant's last stage of flotation. By running the optimized flowsheet, the software calculated the new final concentrate grades and from those results the corresponding assessing indicators recalculated. From this simulation a grade of 18.43% Cu, 8.42% Zn and 32% Fe at copper final concentrate and a grade of 1.84% Cu, 46.1% Zn and 13.72% Fe at zinc final concentrate, were obtained

A benchmarking is made between the two (2) simulated versions, using the calculated indicators, which refer to the final products of the plant. The benchmarking highlighted the advantages of the improved version, as the following were observed:

- ❖ Simultaneous increase in the contents of useful elements in their own final concentrates (+1.68% Cu at copper final concentrate and +0.72% Zn at zinc final concentrate),
- ❖ 1.69% increase in recovery of Zn in its final concentrate, and
- ❖ Simultaneous increase in plant's separation efficiencies for both concentrates (+0.81% for copper concentrate and +1.72% for zinc concentrate).

Keywords: MODSIM™; Mathematical Modeling; Simulation; Optimization; Dominican Republic; Cerro de Maimón Mine; Cu-Zn Sulfide Ore; Mechanical Preparation; Mineral Processing; Ore Dressing Plant Design; Comminution; Classification; Froth Flotation; Dewatering.

Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή

Στη φύση, τα μεταλλικά ορυκτά οικονομικού ενδιαφέροντος, δεν βρίσκονται σε αποδεδειγμένους κόκκους (τεμαχίδια) έτοιμα προς μεταλλουργική επεξεργασία, για την παραλαβή των προϊόντων (μέταλλα ή ενώσεις μετάλλων). Αντιθέτως, συνυπάρχουν με πολλές ορυκτολογικές φάσεις, οι οποίες στο σύνολό τους συνθέτουν έναν γεωλογικό σχηματισμό, ο οποίος καταλαμβάνει συγκεκριμένο γεωμετρικό χώρο και καλείται μεταλλοφόρο κοίτασμα (*Ore Deposit*). Επομένως, εξ ορισμού, μετάλλευμα (*Ore*) είναι ειδικός τύπος πετρώματος, στη σύνθεση του οποίου περιλαμβάνονται, τόσο τα μεταλλοφόρα ορυκτά (*Ore Minerals*) για τα οποία γίνεται η εκμετάλλευση κι ο εμπλουτισμός, όσο και τα σύνδρομα ορυκτά (*Gangue*), τα οποία είναι συνήθως μη μεταλλικά ορυκτά (π.χ. ασβεστίτης, χαλαζίας κλπ.) ή και μεταλλικά ορυκτά (π.χ. σιδηροπυρίτης). Τα σύνδρομα ορυκτά, που συνοδεύουν τα ορυκτά οικονομικού ενδιαφέροντος, στην περίπτωση που δεν έχουν κάποια αξία, αποτελούν το ανεπιθύμητο υλικό του μεταλλεύματος, το οποίο ονομάζεται στείρο ή άγονο (*Waste*) κι απορρίπτεται.

Η απομάκρυνση του ανεπιθύμητου συνδρόμου ορυκτού, για την αύξηση της συγκέντρωσης του χρήσιμου περιεχομένου, με έναν οικονομικά βιώσιμο τρόπο, αποτελεί τον θεμέλιο λίθο της μεταλλευτικής τεχνολογίας που καλείται Εμπλουτισμός των Μεταλλευμάτων (*Mineral Processing*). Η μεγαλύτερη πρόκληση για έναν μελετητή που ασχολείται με τον εμπλουτισμό, είναι να παράγει υψηλής ποιότητας συμπυκνώματα, με στόχο τη μέγιστη ανάκτηση του χρήσιμου συστατικού από το μετάλλευμα (Gupta & Denis, 2006).

Ο Σχεδιασμός Εργοστασίων Εμπλουτισμού (*Mineral Processing Plant Design* ή *Ore Dressing Plant Design*), απαιτεί τη μελέτη της εκάστοτε διεργασίας, που θα λαμβάνει χώρα, ξεχωριστά. Συνεπώς, ο σχεδιασμός ενός εργοστασίου εμπλουτισμού, είναι συνάρτηση των παρακάτω σταδίων (Prasad, 1969):

- ❖ Διάγραμμα ροής (*Processing Plant Flowsheet*), το οποίο καθορίζεται έπειτα από εντατικές εργαστηριακές έρευνες και δοκιμές σε πρόδρομες εγκαταστάσεις (*Pilot Plants*).
- ❖ Αναγωγή από ημι-βιομηχανική κλίμακα σε βιομηχανική (*Scale Up*), η οποία γίνεται με βάση τις εμπειρικές εκτιμήσεις των μελετητών και μηχανικών, ώστε να γίνουν οι κατάλληλοι υπολογισμοί μηχανημάτων κι η τελική επιλογή εξοπλισμού, ανάλογα με τις ανάγκες των μεθόδων εμπλουτισμού.
- ❖ Διάταξη του εργοστασίου (*Plant Layout*), η οποία αναφέρεται στη σχεδίαση και στην κατασκευή των εγκαταστάσεων, εντός του διαθέσιμου χώρου του μεταλλείου. Η βέλτιστη επιλογή γεωγραφικής θέσης του εργοστασίου εμπλουτισμού, πρέπει να περιορίζεται γύρω και κοντά σε αυτό (Φραγκίσκος, 2001).

Η τελική απόφαση που προκύπτει από τα προηγούμενα στάδια, πρέπει να οδηγεί στον σχεδιασμό ενός εργοστασίου εμπλουτισμού, που εξασφαλίζει (Stanley, 1987):

- ❖ Ικανότητα υλοποίησης, για προβλεπόμενη χωρητικότητα κι απόδοση, εντός προϋπολογισμού.

- ❖ Ελαχιστοποίηση των κεφαλαιουχικών δαπανών και μεγιστοποίηση, για μεγάλο χρονικό διάστημα, των μακροπρόθεσμων κερδών.
- ❖ Άμεση αναγνώριση κι επίλυση των προβλημάτων που διακόπτουν την παραγωγική διαδικασία και διασφάλιση της έγκαιρης θέσης σε επαναλειτουργία του εργοστασίου. Οι καθυστερήσεις, στην επανέναρξη της παραγωγής, μπορεί να αποδειχθούν εξαιρετικά δαπανηρές, αφού οδηγούν σε απώλεια κέρδους εξαιτίας της απώλειας παραγωγής.

1.1. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Με τη χρήση του λογισμικού MODSIM™, μελετάται η προσομοίωση και διερευνάται η δυνατότητα βελτιστοποίησης του εργοστασίου εμπλουτισμού Cu-Zn, του μεταλλείου Cerro de Maimón της Δομινικανής Δημοκρατίας.

1.2. Εύρος κι Ανάπτυξη της Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία, χωρίζεται σε έξι (6) επιμέρους κεφάλαια:

- ❖ Στο **Κεφάλαιο 1**, αποτελεί την εισαγωγή της παρούσας εργασίας, στην οποία περιγράφονται, η αναγκαιότητα ύπαρξης κι εφαρμογής του Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων, καθώς και τα στάδια κι οι στόχοι που αφορούν τον Σχεδιασμό Εργοστασίων Εμπλουτισμού. Επίσης, περιγράφεται συνοπτικά ο σκοπός του θέματος της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζεται περιληπτικά η ανάπτυξή του.
- ❖ Στο **Κεφάλαιο 2**, παρουσιάζονται θεμελιώδεις ορισμοί κι έννοιες του Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων, με συνοδεία των μαθηματικών τους εκφράσεων. Επίσης, περιγράφονται οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι υπολογισμών, καθώς κι η μαθηματική απόδοση της κατάτμησης σε μύλους και της επίπλευσης.
- ❖ Στο **Κεφάλαιο 3**, γίνεται μια εκτενής περιγραφή του μεταλλείου Cerro de Maimón της Δομινικανής Δημοκρατίας, που περιλαμβάνει κοιτασματολογικά χαρακτηριστικά του υποβάθρου της περιοχής, στοιχεία μεταλλευτικής έρευνας στα οποία στηρίχθηκε ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος και πληροφορίες των εγκαταστάσεων επεξεργασίας του μεταλλεύματος, σε αντιπαραβολή με την ετήσια παραγωγή τους.
- ❖ Στο **Κεφάλαιο 4**, με τη χρήση του λογισμικού MODSIM™, γίνεται η εισαγωγή των διαθέσιμων δεδομένων της εταιρείας CORMIDOM S.A.S., ο σχεδιασμός του εργοστασίου, οι μοντελοποιήσεις των λειτουργικών μονάδων, η προσομοίωση του τελικού διαγράμματος ροής κι η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ειδικότερα, σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται τμηματική παρουσίαση των διάφορων διαδοχικών κυκλωμάτων του διαγράμματος ροής και παρουσιάζονται χρήσιμοι υπολογισμοί.
- ❖ Στο **Κεφάλαιο 5**, γίνεται περιγραφή κι εφαρμογή της βελτιστοποίησης, στο υπάρχον κατασκευασμένο διάγραμμα ροής του εργοστασίου, επανάληψη σημαντικών υπολογισμών με βάση τα νέα αποτελέσματα και σχολιασμό της συγκριτικής αξιολόγησης, που προκύπτει μεταξύ των δύο εκδοχών προσομοίωσης.

- ❖ Στο **Κεφάλαιο 6**, γίνεται λόγος για τα συμπεράσματα, που προκύπτουν από τη διπλωματική εργασία, ανασκόπηση με βάση τις πορείες και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ενώ παρουσιάζεται κι εναλλακτική πρόταση βελτιστοποίησης.

Τέλος, παρατίθενται σε όλη την έκταση της διπλωματικής εργασίας, οι αγγλικές ορολογίες, καθώς κι οι συντμήσεις τους (όπου κρίνεται απαραίτητο), βασικών εννοιών, ορισμών και μεγεθών, ώστε να υπάρχει πλήρης ενημέρωση και σαφήνεια, χωρίς συγχύσεις. Επίσης, παρατίθενται υποσημειώσεις που περιλαμβάνουν επισημάνσεις, πληροφορίες και συνοπτικό θεωρητικό υπόβαθρο.

Κεφάλαιο 2-Βασικές Αρχές-Έννοιες και Μαθηματική Περιγραφή Διεργασιών

2.1. Ισοζύγια Μαζών και Περιεκτικότητων

Σε όλες τις διαδικασίες διαχωρισμού ή εμπλουτισμού, καθίσταται απαραίτητη η γνώση της κατανομής των προϊόντων. Η μαθηματική έκφραση των αποτελεσμάτων του διαχωρισμού, εξυπηρετεί τη συσχέτιση των προϊόντων μιας μεθόδου, με την τροφοδοσία (Wills & Napier-Munn, 2006; Σταμπολιάδης, 2008a).

Έστω, F (*Feed*) η μάζα ή η παροχή της τροφοδοσίας, C (*Concentrate*) η μάζα ή η παροχή του συμπυκνώματος και T (*Tailing*) η μάζα ή η παροχή του απορρίμματος, ανά μονάδα χρόνου, τότε το ισοζύγιο μάζας, είναι:

$$F = C + T \quad (2.1)$$

Αντιστοίχως, εάν καθοριστούν, με βάση τις χημικές αναλύσεις, οι αντίστοιχες περιεκτικότητες (%) f , c και t , σε κάποιο χρήσιμο ορυκτό ή στοιχείο, το ισοζύγιο του ορυκτού ή του στοιχείου αυτού, είναι:

$$F * f = C * c + T * t \quad (2.2)$$

Εάν, από τη διαδικασία παράγονται κι ενδιάμεσα προϊόντα M (*Middling*), περιεκτικότητας (%) m στο χρήσιμο ορυκτό ή στοιχείο, οι Εξισώσεις 2.1 και 2.2, μετασχηματίζονται, ως:

$$F = C + M + T \quad (2.3)$$

$$F * f = C * c + M * m + T * t \quad (2.4)$$

Στο σημείο αυτό, ορίζεται ο λόγος συγκέντρωσης K , ο οποίος αναφέρεται στους απαιτούμενους τόνους (t) τροφοδοσίας F , για την παραγωγή ενός (1) τόνου (t) συμπυκνώματος C , κι εξ ορισμού:

$$K = \frac{F}{C} \xrightarrow{\text{Από Εξισώσεις 2.1 και 2.2}} K = \frac{c - t}{f - t} \quad (2.5)$$

ενώ, ο αντίστροφος του λόγου συγκέντρωσης πολλαπλασιασμένος επί εκατό, αναφέρεται στο ποσοστό (%) της μάζας της αρχικής τροφοδοσίας F , που πήγε στο τελικό συμπύκνωμα C , το οποίο καλείται ανάκτηση μάζας στερεών Y (*Mass Recovery* ή *Yield*), κι επομένως:

$$Y = \frac{C}{F} * 100 \xrightarrow{\text{Από Εξισώσεις 2.1 και 2.2}} Y = \frac{f - t}{c - t} * 100 \quad (2.6)$$

Από την Εξίσωση 2.2, προκύπτει ότι:

$$1 = \frac{C * c}{F * f} + \frac{T * t}{F * f} \leftrightarrow 100 = \left(\frac{C * c}{F * f} * 100 \right) + \left(\frac{T * t}{F * f} * 100 \right) \quad (2.7)$$

Επομένως, ορίζονται ως:

(α) Ανάκτηση R (*Recovery*), το εκατοστιαίο ποσοστό (%) μάζας του χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου που πήγε στο προϊόν του συμπυκνώματος και δίνεται ως:

$$R = \frac{C * c}{F * f} * 100 \xrightarrow{\text{Από Εξίσωση 2.6}} R = \frac{(f - t) * c}{(c - t) * f} * 100 \quad (2.8)$$

(β) Απώλεια J (*Junk*), το εκατοστιαίο ποσοστό (%) μάζας του χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου που πήγε στο προϊόν του απορρίμματος και δίνεται ως:

$$J = \frac{T * t}{F * f} * 100 \xrightarrow{\text{Από Εξισώσεις 2.1 και 2.2}} J = \frac{(c - f) * t}{(c - t) * f} * 100 \quad (2.9)$$

2.2. Βαθμός Διαχωρισμού

Η ποιότητα του συμπυκνώματος σε χρήσιμο στοιχείο κι η ανάκτηση του χρήσιμου ορυκτού σε αυτό αποτελούν χρήσιμους (μεταλλουργικούς) δείκτες στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας μιας διεργασίας (ή ενός συνόλου διεργασιών) στο να παράγει (τελικό) συμπύκνωμα (Wills & Napier-Munn, 2006).

Η σχέση μεταξύ της ποιότητας και της ανάκτησης, μπορεί να περιγράψει τον βαθμό επιτυχίας μιας διεργασίας, οποιασδήποτε φύσης (Özcan, 2022). Αυτή η αξιολόγηση της επιτυχίας ενός διαχωρισμού καλείται βαθμός διαχωρισμού η (*Separation Efficiency-SE*) κι ορίζεται ως (Schulz, 1970):

$$\eta = R_m - R_g \quad (2.10)$$

όπου,

R_m : ανάκτηση του χρήσιμου ορυκτού στο συμπύκνωμα, σε επί τοις εκατό (%)

R_g : η ανάκτηση του σύνδρομου ορυκτού στο συμπύκνωμα, σε επί τοις εκατό (%).

Έστω, σε αυτή την περίπτωση, τα f , c και t δεν παριστάνουν τις ορυκτολογικές αναλύσεις, αλλά τις χημικές και πως c_{max} είναι η στοιχειομετρική περιεκτικότητα (%) του χρήσιμου στοιχείου στο καθαρό ορυκτό.

Η ανάκτηση του χρήσιμου ορυκτού στο συμπύκνωμα, όπως προκύπτει κι από την Εξίσωση 2.8, είναι:

$$R_m = \frac{(f - t) * c}{(c - t) * f} * 100 \xrightarrow{\text{Από Εξίσωση 2.6}} R_m = \frac{Y * c}{f} \quad (2.11)$$

με,

c/f : ο λόγος εμπλουτισσιμότητας (*Enrichment Ratio*), που είναι ο λόγος της περιεκτικότητας του χρήσιμου στοιχείου στο συμπύκνωμα προς την περιεκτικότητα του χρήσιμου στοιχείου στην τροφοδοσία.

Η περιεκτικότητα του σύνδρομου ορυκτού στο συμπύκνωμα, είναι:

$$GC_{Conc.} = 100 - \frac{c}{c_{max}} * 100 = \frac{c_{max} - c}{c_{max}} * 100 \quad (2.12)$$

κι αντίστοιχα η περιεκτικότητα του σύνδρομου ορυκτού στην τροφοδοσία, είναι:

$$GC_{Feed} = 100 - \frac{f}{c_{max}} * 100 = \frac{c_{max} - f}{c_{max}} * 100 \quad (2.13)$$

Από τις Εξισώσεις 2.6, 2.8, 2.12 και 2.13, η ανάκτηση του σύνδρομου ορυκτού στο συμπύκνωμα, είναι:

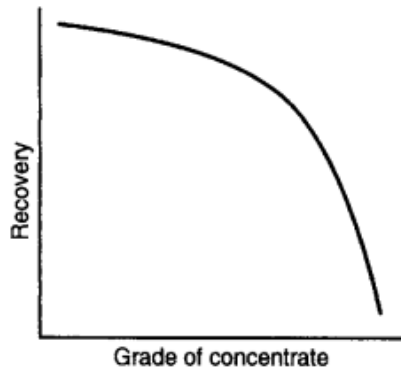
$$R_g = \frac{Y * GC_{conc.}}{GC_{Feed}} * 100 = \frac{Y * (c_{max} - c)}{c_{max} - f} * 100 \quad (2.14)$$

Έκτοτε, ο βαθμός διαχωρισμού, όπως προκύπτει από τις Εξισώσεις 2.10, 2.11 και 2.14, είναι:

$$\eta = R_m - R_g = \frac{Y * c}{f} * 100 - \frac{Y * (c_{max} - c)}{c_{max} - f} * 100 = \frac{Y * c_{max} * (c - f)}{(c_{max} - f) * f} * 100 \quad (2.15)$$

Κατ' επέκταση, ο βαθμός διαχωρισμού είναι ο λόγος της μεταφοράς της μεταλλευτικής αξίας που επιτεύχθηκε κατά τον διαχωρισμό, προς τη μεταφορά που θα είχε επιτευχθεί, εάν ο διαχωρισμός ήταν τέλειος (Σταμπολιάδης, 2008a).

Ο βαθμός διαχωρισμού, είναι ένας μη οικονομικός δείκτης, ο οποίος είναι χρήσιμος στη σύγκριση, της τελικής απόκρισης, μεταξύ διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας (Wills & Napier-Munn, 2006). Ουσιαστικά χαρακτηρίζει την εκλεκτικότητα μιας διεργασίας διαχωρισμού (π.χ. η προσθήκη ενός αντιδραστηρίου βοήθησε καθόλου;) ή ενός συνόλου διεργασιών που συνεργάζονται (π.χ. η συγκεκριμένη διάταξη και λειτουργία των μονάδων επεξεργασίας, έχει αποτελεσματικότητα;) (Majumder, 2018). Αποτελεί το κατευθυντήριο εργαλείο, για την επιλογή των ικανοποιητικότερων μεθόδων διαχωρισμού και των αποδοτικότερων συνδυασμών, ώστε να επιτευχθούν ταυτόχρονα η βέλτιστη ανάκτηση και περιεκτικότητα, σε χρήσιμο στοιχείο, στο συμπύκνωμα, με βάση τις τρέχουσες υπαγορευμένες τιμές αγοράς του χρήσιμου στοιχείου (Wills & Napier-Munn, 2006).



Σχήμα 2.1: Τυπική καμπύλη ανάκτησης-ποιότητας (Wills & Napier-Munn, 2006).

Παρ' όλα αυτά, ένας υψηλός βαθμός διαχωρισμού, δεν εγγυάται και την πιο οικονομική απόδοση, επειδή αυτός ο δείκτης στη βάση του στηρίζεται στις μεταβλητές παραμέτρους της περιεκτικότητας και της ανάκτησης, οι οποίες έχουν μια αντίστροφη συσχέτιση μεταξύ τους (βλ. Σχήμα 2.1). Για παράδειγμα, στην προσπάθεια να παραχθεί υψηλής ποιότητας συμπύκνωμα, το απόρριμμα θα είναι αρκετά πλούσιο σε χρήσιμο στοιχείο, κι επομένως η ανάκτηση είναι χαμηλή. Στον αντίποδα, όταν το

ενδιαφέρον εστιάζεται στην υψηλή ανάκτηση του χρήσιμου στοιχείου, τότε στο συμπύκνωμα θα περιέχεται περισσότερο σύνδρομο κι επομένως η ποιότητα του συμπυκνώματος, αλλά κι ο λόγος συγκέντρωσης θα μειωθούν (Wills & Napier-Munn, 2006).

2.3. Ισοζύγιο Μάζας Διακινούμενων Στερεών

Αρκετές από τις διεργασίες της Μηχανικής Προπαρασκευής και του Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων απαιτούν τη δημιουργία πολφού (δηλαδή το άθροισμα της μάζας των στερεών και του νερού). Επομένως, το ισοζύγιο, αποκλειστικά σε ένα μηχάνημα ή σε ένα οποιοδήποτε κύκλωμα, είναι δυνατό να υπολογιστεί ως προς τη μάζα των στερεών, προσδιορίζοντας τις αραιώσεις (Σταμπολιάδης, 2008a και 2008b).

Ως αραιώση ή λόγος αραιώσης D' (*Dilution Ratio*) ενός πολφού, ορίζεται η σχέση της μάζας του νερού M_W προς τη μάζα των στερεών M_S , που υπολογίζεται κι από τα αντίστοιχα ποσοστά (%) σε στερεά D και στη γενική περίπτωση, ισχύει:

$$D' = \frac{M_W}{M_S} = \frac{100 - D}{D} \quad (2.16)$$

Έστω ένας υδροταξινομητής, ο οποίος τροφοδοτείται με μια μάζα στερεών F , με αραιώση f' , την οποία την κατανέμει σε Y στην υπερχειλίση, με αραιώση y' και σε U στην απορροή, με αραιώση u' , ανά μονάδα χρόνου. Εάν, f , y και u , είναι οι περιεκτικότητες (%) σε στερεά, κατά βάρος, του πολφού, στην τροφοδοσία, στην υπερχειλίση και στην απορροή του υδροταξινομητή αντίστοιχα, τότε από την Εξίσωση 2.16, ισχύει:

$$f' = \frac{100 - f}{f} \quad (2.17a), \quad y' = \frac{100 - y}{y} \quad (2.17b) \quad \text{και} \quad u' = \frac{100 - u}{u} \quad (2.17c)$$

Επομένως, το ισοζύγιο της μάζας των στερεών στον υδροταξινομητή, είναι:

$$F = Y + U \quad (2.18)$$

και το ισοζύγιο της μάζας του νερού, είναι:

$$F * f' = Y * y' + U * u' \quad (2.19)$$

Με επίλυση της Εξίσωσης 2.18 ως προς U κι αντικατάσταση στην Εξίσωση 2.19, προκύπτει το κλάσμα μάζας (%) των στερεών, που πηγαίνει στην υπερχειλίση, ως:

$$\frac{Y}{F} = \frac{f' - u'}{y' - u'} \quad (2.20)$$

ενώ, με επίλυση της Εξίσωσης 2.18 ως προς Y κι αντικατάσταση στην Εξίσωση 2.19, προκύπτει το κλάσμα μάζας (%) των στερεών, που πηγαίνει στην απορροή, ως:

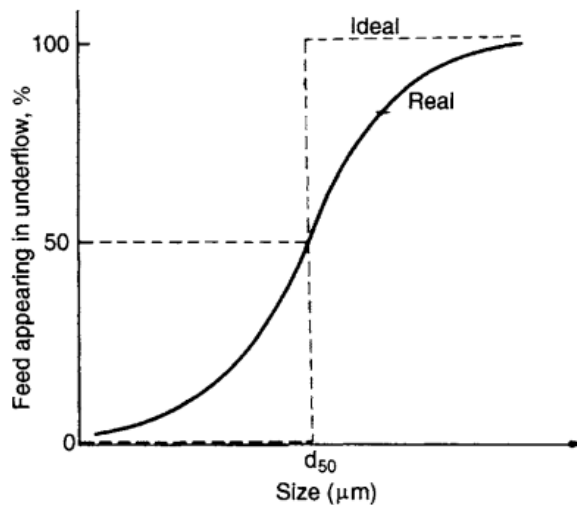
$$\frac{U}{F} = \frac{y' - f'}{y' - u'} \quad (2.21)$$

Επίσης, έστω πως αυτός ο υδροταξινομητής είναι σε κλειστό κύκλωμα με έναν σφαιρόμυλο κι ανά μονάδα χρόνου η απορροή του υδροταξινομητή ανακυκλώνεται στην είσοδο του μύλου αυτού. Εάν a , b και c , συμβολίζουν τις ροές στην υπερχειλίση, στην είσοδο και στην απορροή του υδροταξινομητή, αντίστοιχα, τότε ο λόγος της διαφοράς των αραιώσεων, δίνει τον λόγο του κυκλοφορούντος φορτίου (*Circulation Load Ratio-CLR*), δηλαδή (Φραγκίσκος, 2001):

$$CLR = \frac{D'_a - D'_b}{D'_b - D'_c} \quad (2.22)$$

2.4. Αξιολόγηση Λειτουργίας Ταξινομητών

Η αξιολόγηση της ταξινόμησης, γίνεται με τον προσδιορισμό της κατανομής κάθε συγκεκριμένου μεγέθους κλάσματος (ορίζεται από το μέσο μέγεθος των κόκκων του) στο χονδρό προϊόν. Η κατανομή κάθε κλάσματος στο χονδρό προϊόν γίνεται με βάση το ανηγμένο βάρος του κλάσματος στο χονδρό προϊόν, ως προς το βάρος του στην υπολογιζόμενη τροφή (Σταμπολιάδης, 2008b). Ένα τυπικό διάγραμμα της κατανομής αυτής, το οποίο αναπαριστά την καμπύλη διαχωρισμού του ταξινομητή (*Partition Curve* ή *Tromp Curve*), παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Τυπικό διάγραμμα πραγματικής (*Real*) και ιδανικής (*Ideal*) κατανομής στο χονδρό προϊόν (Wills & Napier-Munn, 2006).

Τέτοια διαγράμματα, περιγράφουν το πώς τα τεμαχίδια μιας τροφοδοσίας, διαχωρίζονται στα δύο προϊόντα της διεργασίας και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της λειτουργίας, αλλά και τη σύγκριση μεταξύ ταξινομητών. Ειδικότερα, αυτά τα διαγράμματα προσδιορίζουν τα ποσοστά (%) μάζας, από όλα τα κλάσματα μεγέθους της τροφοδοσίας, που κατέληξαν στην απορροή του ταξινομητή και κατ' επέκταση αναπαριστούν την απόδοση της ταξινόμησης (Wills & Napier-Munn, 2006).

Σε έναν ιδανικό υδροκυκλώνα, τα τεμαχίδια θα διαχωρίζονταν ακριβώς στο επιθυμητό μέγεθος. Στην πράξη όμως, αυτό είναι αδύνατο τις περισσότερες φορές, γιατί πάντα παρουσιάζεται ένα μέρος των λεπτών τεμαχιδίων στο προϊόν των χονδρών (απορροή) κι επομένως το μέσο μέγεθος d_{50} αποτελεί την πιθανότητα, ένα τεμαχίδιο παραπλήσιου μεγέθους, να καταλήξει είτε στην απορροή, είτε στην υπερχειλίση (Wills & Napier-Munn, 2006).

Επίσης, σημαντικός παράγοντας στους υδροκυκλώνες είναι το ποσοστό (%) των τεμαχιδίων που πηγαίνουν στην απορροή, εξαιτίας του νερού διεργασίας. Το κλάσμα μάζας (%) των λεπτών τεμαχιδίων R_f (*By-pass*), που πηγαίνει στην απορροή, υπολογίζεται από τον λόγο της μάζας του νερού στην απορροή του υδροκυκλώνα U , προς τη μάζα του νερού στην τροφοδοσία του F (Bennetts, 2019), δηλαδή:

$$R_f = \frac{U}{F} * 100 \quad (2.23)$$

Η μείωση της μάζας του νερού στην απορροή του υδροκυκλώνα, ελαχιστοποιεί και τα λεπτομερή κλάσματα που συμμετέχουν στο χονδρό προϊόν της απορροής.

Η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος, συνήθως μεταξύ 25% έως 75%, μιας τέτοιας καμπύλης (βλ. Σχήμα 2.2), περιγράφει την απόδοση του υδροκυκλώνα να διαχωρίζει τα λεπτά από τα χονδρά τεμαχίδια, η οποία καλείται οξύτητα διαχωρισμού Sh (*Separation Sharpness*) στο σημείο του 50% (Σταμπολιάδης, 2008b) κι υπολογίζεται ως:

$$Sh = \frac{d_{75}}{d_{25}} \quad (2.24)$$

ενώ στην ιδανική περίπτωση το Sh ισούται με τη μονάδα (1).

Με βάση την τιμή του Sh , προκύπτει κι ο χαρακτηρισμός της ταξινόμησης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, για διάφορα εύρη τιμών.

Πίνακας 2.1: Κριτήρια χαρακτηρισμού της ταξινόμησης (Heidelberg Cement AG, 2012).

Χαρακτηρισμός Ταξινόμησης					
Κριτήριο	$S_h = 1$	$1 < S_h \leq 1.5$	$1.5 < S_h \leq 1.8$	$1.8 < S_h \leq 2.1$	$S_h > 2.1$
Περιγραφή	Τέλεια (Perfect)	Εξαιρετική (Excellent)	Καλή (Good)	Μέτρια (Fair)	Φτωχή (Poor)

2.5. Περιγραφή της Κατάτμησης σε Μύλους

Η συνάρτηση επιλογής (*Selection Function*) ή ρυθμός θραύσης (*Rate of Breakage*) ή πιθανότητα θραύσης (*Probability of Breakage*) περιγράφει τον ρυθμό με τον οποίο τα τεμαχίδια σπάζουν σε μικρότερα μεγέθη (Rodríguez-Torres et al., 2021), δηλαδή προσδιορίζει την αναλογία μάζας των τεμαχιδίων, από μια συνολική ποσότητα, που θραύονται κατά τη διάρκεια της λειοτριβήσης μιας μεμονωμένης παρτίδας. Συνήθως, ο ρυθμός θραύσης εκτιμάται, είτε από αναδρομικούς υπολογισμούς (*Back-Calculations*), είτε απευθείας από μελέτες ενεργειακής κατανάλωσης του μύλου (Rodríguez-Torres et al., 2021).

Η συνάρτηση θραύσης (*Breakage Function*) περιγράφει την κοκκομετρική κατανομή των προϊόντων που παράγονται κατά τη διαδικασία της λειοτριβήσης (Rodríguez-Torres et al., 2021; Hotić et al., 2022). Αυτή η συνάρτηση εκτιμάται από μια σειρά δοκιμών λειοτριβήσης σε μύλους (Rodríguez-Torres et al., 2021).

Οι συναρτήσεις επιλογής και θραύσης, συνθέτουν το κινητικό μοντέλο, δηλαδή ένα μαθηματικό μοντέλο της διεργασίας της κατάτμησης σε μύλους, γνωστό ως μοντέλο ισοζυγίου πληθυσμού (*Population Balance Model-PBM*), το οποίο περιγράφει την ισορροπία του μεγέθους και της μάζας των τεμαχιδίων (Kwon & Cho, 2021), σε πλήρους ανάμιξης λειοτριβήσεις σε παρτίδες (*Batch Grinding*). Η μαθηματική έκφραση, αυτού του μοντέλου, όπως αναπτύσσεται και περιγράφεται από τους Austin et al. (1984) και τον Πετράκη (2017) είναι:

$$\frac{d[m_i(t) * M]}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ i>1}}^{i-1} b_{i,j} * S_j * m_j(t) * M - S_i * m_i(t) * M, n \geq i \geq j \geq 1 \quad (2.25)$$

όπου,

j : η τάξη μεγέθους των αρχικών τεμαχιδίων κι είναι αδιάστατος θετικός ακέραιος αριθμός,

i : οποιαδήποτε τάξη μεγέθους, επόμενη της j , με ανώτερο μέγεθος x_i και κατώτερο μέγεθος x_{i+1} , το οποίο αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή του δείκτη του ανώτερου μεγέθους κι είναι αδιάστατος θετικός ακέραιος αριθμός,

$m_i(t)$, $m_j(t)$: οι μάζες των τεμαχιδίων, που περιέχονται στις τάξεις μεγέθους i και j αντίστοιχα, μετά από χρόνο λειοτρίβησης t , σε kg,

M : η ολική μάζα του υλικού, σε kg. Επειδή, αυτή η ποσότητα είναι σταθερή σε δοκιμές batch, ο παράγοντας M στην *Εξίσωση* 2.25, μπορεί να απαλειφθεί κι από τα δύο (2) μέλη της,

$b_{i,j}$: το κλάσμα της θραυσμένης μάζας τάξης μεγέθους j , που εμφανίζεται στην τάξη μεγέθους i , μετά τη λειοτρίβηση, σε επί τοις εκατό (%),

S_i , S_j : οι ρυθμοί θραύσης των τεμαχιδίων στις τάξεις μεγεθών i και j αντίστοιχα, σε μονάδες μέτρησης όπως, min^{-1} ή h^{-1} ,

n : οι τάξεις μεγέθους που χωρίζεται η ολική μάζα M , από 1 έως $n+1$, κι είναι αδιάστατος θετικός ακέραιος αριθμός,

Επίσης,

$S_j * m_j(t) * M$: ο ρυθμός εξαφάνισης των τεμαχιδίων μεγέθους j ,

$b_{i,j} * S_j * m_j(t) * M$: ο ρυθμός εμφάνισης των τεμαχιδίων μεγέθους i , από τη λειοτρίβηση των τεμαχιδίων μεγέθους j ,

$S_i * m_i(t) * M$: ο ρυθμός εξαφάνισης των τεμαχιδίων μεγέθους i .

Σύμφωνα με τους Herbst and Fuerstenau (1973 and 1980) και τον King (2001), ο ρυθμός θραύσης από την κατηγορία μεγέθους S_i , σχετίζεται με την καθαρή ειδική ισχύ του μύλου και το φορτίο που εισάγεται σε αυτόν, ως:

$$S_i = S_i^E \frac{P}{M} \quad (2.26)$$

όπου,

S_i : ο ρυθμός θραύσης ή η συνάρτηση επιλογής της κατηγορίας μεγέθους i , σε h^{-1} ,

S_i^E : η ενεργειακή-ειδική συνάρτηση επιλογής (*Energy-Specific Selection Function*) της κατηγορίας μεγέθους i , σε t/kWh ,

P : η καθαρή ισχύς του μύλου, η οποία υπολογίζεται από τη διαφορά της συνολικής ισχύος (*Gross Power*) από την ισχύ χωρίς φορτίο (*Non-load Power*), σε kW,

M : η μάζα του υλικού που εισάγεται στον μύλο, εξαιρουμένων των σφαιρών, για χρόνο λειοτρίβησης t , σε t,

P/M : η καθαρή ειδική ισχύς του μύλου, σε kW/t .

Το βασικό χαρακτηριστικό της *Εξίσωσης* 2.26, είναι ότι η ενεργειακή-ειδική συνάρτηση επιλογής S_i^E , σχετίζεται αποκλειστικά με το υλικό τροφοδοσίας και δεν

μεταβάλλεται με τις συνθήκες λειοτρίβησης ή τις διαστάσεις του μύλου κι επομένως αποτελεί έμμεση μέθοδο αναγωγής σε βιομηχανική κλίμακα, από εργαστηριακές και πιλοτικές δοκιμές (King, 2001).

Οι Rajamani and Herbst (1984) περιέγραψαν με λεπτομέρεια τη μεταβολή του S_i^E σε συνάρτηση με το μέγεθος των τεμαχιδίων, ως:

$$S_i^E = S_1^E * \exp \left\{ \zeta_1 * \ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) + \zeta_2 * \left[\ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.27)$$

όπου,

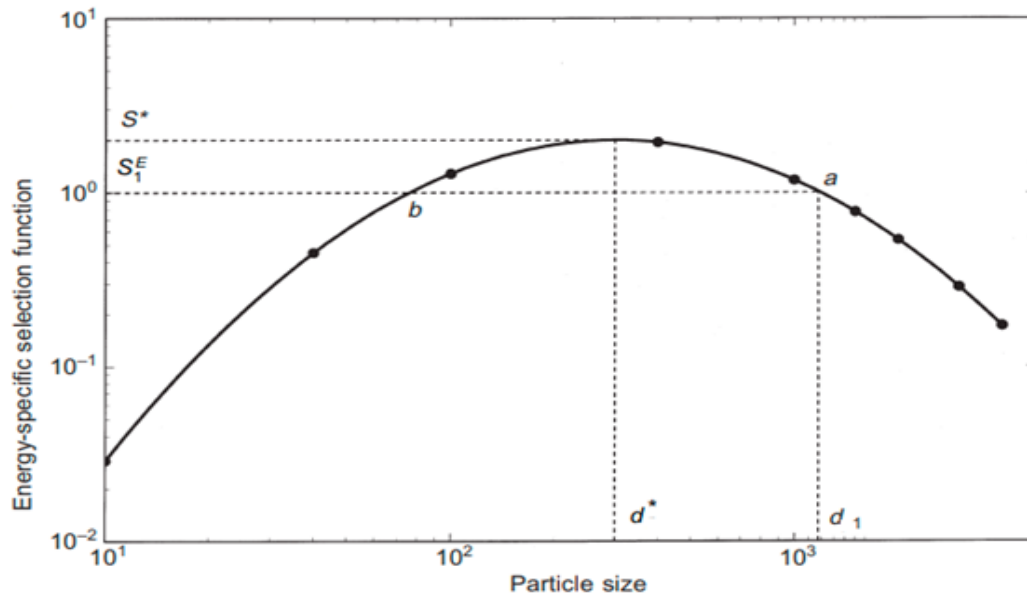
S_1^E : η ενεργειακή-ειδική συνάρτηση επιλογής, για μέγεθος αναφοράς d_1 , σε t/kWh,

d_1 : μέγεθος αναφοράς, σε mm, που αντιστοιχεί σε S_1^E . Συνήθως, επιλέγεται ως μέγιστο μέγεθος, όμως δεν είναι απαραίτητο,

d_i : τα μεγέθη των τεμαχιδίων που προέκυψαν από τη λειοτρίβηση του υλικού, με d_i/d_1 το σχετικό (αδιάστατο) μέγεθος των τεμαχιδίων, το οποίο κανονικοποιείται για $d_1 = 1$ mm, και

ζ_1, ζ_2 : αδιάστατες παράμετροι που μαζί με το S_1^E , αποτελούν τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του υλικού και των συνθηκών της λειοτρίβησης (Mazzinghy et al., 2014).

Ένα τυπικό διάγραμμα της Εξίσωσης 2.27, δίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Τυπικό διάγραμμα της ενεργειακής-ειδικής συνάρτησης επιλογής συναρτήσει του μεγέθους των τεμαχιδίων (King, 2001).

Η εμπειρική αθροιστική συνάρτηση θραύσης $B_{i,j}$, όπως περιγράφεται από τους Austin and Luckie (1972), αποτελεί το άθροισμα δύο (2) ευθειών γραμμών σε λογαριθμική κλίμακα (βλ. Σχήμα 2.4) κι η οποία είναι:

$$B_{i,j} = \begin{cases} \varphi_j * \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\gamma + (1 - \varphi_j) * \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\beta, & n \geq i > j \geq 1 \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (2.28)$$

όπου,

$B_{i,j}$: το αθροιστικό κλάσμα (%) υλικού, το οποίο είναι μικρότερο από το ανώτερο μέγεθος i , που προκύπτει από τη λειοτριβήση υλικού μεγέθους j κι επομένως ισχύει ότι $b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j}$, για $i > j$. Επίσης, η κλαδική συνάρτηση περιλαμβάνει τις περιπτώσεις, $b_{i,j} = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} b_{i,j}$, όταν $i = n$ και $b_{i,j} = 0$, όταν $i \leq j$ (Rodríguez-Torres et al., 2021),

x_j : το μέγιστο μέγεθος των αρχικών (μητρικών) τεμαχιδίων, σε mm,

x_{i-1} : μέγεθος κόκκων που διακρίνονται στις τάξεις μεγέθους i , σε mm,

β : αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει το υλικό και περιγράφει την παραγωγή (ρυθμό) των χονδρομερών θυγατρικών τεμαχιδίων που προκύπτουν από τη λειοτριβήση, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο τα τεμαχίδια αυτής της ομάδας κατανέμονται,

γ : αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει το υλικό και περιγράφει την παραγωγή (ρυθμό) των λεπτομερών θυγατρικών τεμαχιδίων που προκύπτουν από τη λειοτριβήση (Deniz et al., 2011; Πετράκης, 2017), καθώς και τον τρόπο με τον οποίο τα τεμαχίδια αυτής της ομάδας κατανέμονται. Μικρές τιμές του γ , δίνουν μεγάλες σχετικές ποσότητες λεπτομερών και τη δημιουργία προϊόντων με εκτενή εύρη μεγεθών (εκτενής κοκκομετρία) (Ipek & Göktepe, 2011), που υποδηλώνει ότι η λειοτριβήση είναι πιο αποδοτική (Shah & Austin, 1983; Πετράκης, 2017), κι αντίστροφα. Μελέτες έχουν δείξει, ότι τα μαλακά υλικά δίνουν χαμηλότερες τιμές του γ σε σχέση με τα πιο σκληρά (Shah & Austin, 1983; Πετράκης, 2017), και

φ_j : αδιάστατη παράμετρος ($0 \leq \varphi_j \leq 1$) που χαρακτηρίζει το υλικό κι αποτυπώνει το κλάσμα των θυγατρικών προϊόντων του υλικού που συμμετέχει στα λεπτότερα μεγέθη (King, 2001; Nghipulile et al., 2022). Όσο αυξάνεται το φ_j , η παραγωγή των λεπτομερών πρέπει να αυξάνει, κι αντίστροφα (Anticoi et al., 2018).

Επίσης,

x_{i-1}/x_j : η συσχέτιση μεταξύ των θυγατρικών και των μητρικών τεμαχιδίων (σχετικό μέγεθος),

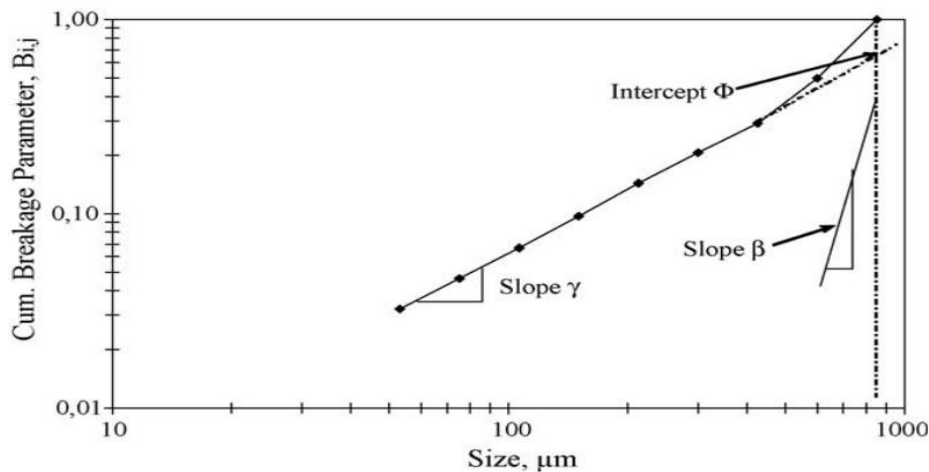
$\varphi_j * (x_{i-1}/x_j)^\gamma$: ο όρος που προσδιορίζει την παραγωγή των λεπτομερών θυγατρικών τεμαχιδίων, και

$(1 - \varphi_j) * (x_{i-1}/x_j)^\beta$: ο όρος που προσδιορίζει την παραγωγή των χονδρομερών θυγατρικών τεμαχιδίων. Οι τιμές των β και φ_j , αυτού του όρου, δείχνουν το πόσο αργά ή γρήγορα, τα κοκκομετρικά κλάσματα που βρίσκονται κοντά στο μέγεθος της τροφοδοσίας ελαττώνονται σε μικρότερα μεγέθη κατά τη λειοτριβήση (Ipek & Göktepe, 2011).

Εάν τα πειραματικά δεδομένα δεν παρουσιάζουν κανονικοποίηση, η παράμετρος φ_j πρέπει να καθοριστεί συναρτήσει του μεγέθους του υλικού τροφοδοσίας (Austin & Luckie, 1972; Austin & Bagga, 1981; Austin et al., 1984), ως:

$$\varphi_j = \varphi_1 * \left(\frac{x_j}{x_1}\right)^{-\delta} \quad (2.29)$$

όπου,



Σχήμα 2.4: Εμπειρική αθροιστική συνάρτηση θραύσης συναρτήσει του μεγέθους (Ipek et al., 2005).

x_1 : ένα χαρακτηριστικό μητρικό μέγεθος, το οποίο συνήθως επιλέγεται στα 5 mm (King, 2001), και

δ : παράμετρος που χαρακτηρίζει το μητρικό υλικό της τροφοδοσίας κι αποτυπώνει την απόκλιση των τιμών $B_{i,j}$ στα διαφορετικά μεγέθη τροφοδοσίας του μύλου. Όταν, $\delta = 0$, σημαίνει πως οι τιμές της αθροιστικής συνάρτησης θραύσης, είναι κανονικοποιημένες, δηλαδή ανεξάρτητες του μεγέθους τροφοδοσίας (Πετράκης, 2017).

2.6. Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης

Η ανάλυση λειτουργικής απόδοσης (*Functional Performance Analysis-FPA*), είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται για τη βελτίωση της απόδοσης και των συνθηκών λειτουργίας, καθώς και την επιλογή εξοπλισμού, κλειστών κυκλωμάτων λειοτρίβησης-ταξινόμησης (McInor, 1988a and 1988b). Στηρίζεται στην επιλογή ενός επιθυμητού μεγέθους, το οποίο ορίζει τη διαχωριστική γραμμή, μεταξύ των χονδρών και των λεπτών τεμαχιδίων, του εκάστοτε κυκλώματος. Το επιθυμητό μέγεθος, συνήθως ορίζεται ως το P_{80} του τελικού προϊόντος του κυκλώματος, αλλά δεν είναι αναγκαίο, καθώς επιτρέπεται να επιλεγεί οποιοδήποτε μέγεθος (Bartholomew et al., 2018).

Σε κλειστά κυκλώματα λειοτρίβησης με ταξινομητή, το χονδρό υλικό προορίζεται για περαιτέρω λειοτρίβηση, ενώ το λεπτό αποτελεί το τελικό προϊόν. Ο στόχος σε τέτοια συστήματα είναι η αποφυγή της υπέρ-λειοτρίβησης των λεπτών τεμαχιδίων, η οποία μειώνει την απόδοση των ακολουθούμενων διεργασιών, όπως η επίπλευση (Wills & Napier-Munn, 2006). Οι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση τέτοιων συστημάτων είναι η απόδοση του ταξινομητή, ο χρόνος παραμονής στον μύλο κι ο τύπος του υλικού.

Η απόδοση της ταξινόμησης του συστήματος (*Classification System Efficiency-CSE*¹) για κλειστά κυκλώματα λειοτρίβησης με ταξινομητή, είναι το ποσοστό (%) του περιεχόμενου υλικού στον μύλο, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το επιλεγμένο

¹ Αναφέρεται στην αποτελεσματικότητα της αποβολής των λεπτομερών τεμαχιδίων από το κύκλωμα και δεν πρέπει να συγχέεται ή να ταυτίζεται με την απόδοση αποκλειστικά του ταξινομητή (Metcom Technologies Inc., 2005; Bartholomew et al., 2018).

επιθυμητό μέγεθος (χονδρό υλικό) (McIvor, 2006) κι υπολογίζεται ως ο αριθμητικός μέσος όρος των χονδρών που υπάρχουν στην είσοδο R_{Feed} και στην έξοδο $R_{Discharge}$ του μύλου, δηλαδή:

$$CSE = \frac{R_{Feed} + R_{Discharge}}{2} \quad (2.30)$$

Το CSE , αντιπροσωπεύει επίσης, το κλάσμα (%) της ολικής ισχύος του μύλου (*Total Mill Power-TMP*), που καταναλώνεται για τη λειοτρίβηση του χονδρού υλικού ή εναλλακτικά το σχετικό ποσοστό (%) της ολικής ισχύος του μύλου, που εφαρμόζεται αποτελεσματικά στο χονδρό υλικό έναντι του λεπτού (McIvor et al., 2017). Επισημαίνεται ότι υψηλό CSE σημαίνει λιγότερη λειοτρίβηση του λεπτού υλικού κι επομένως αύξηση της απόδοσης της διεργασίας.

Επομένως, ορίζεται η αποτελεσματική ή ενεργή ισχύς του μύλου (*Effective Mill Power-EMP*), ως το γινόμενο της ολικής ισχύος (kW) του μύλου επί την απόδοση της ταξινόμησης του συστήματος (CSE), δηλαδή:

$$EMP = TMP * \frac{CSE}{100} \quad (2.31)$$

ενώ, η απολεσμένη ισχύς του μύλου (*Wasted/Overgrinding Mill Power-WOMP*) που καταναλώνεται για τη λειοτρίβηση του λεπτού υλικού κι οδηγεί σε υπέρ-λειοτρίβηση:

$$WOMP = TMP * \frac{(100 - CSE)}{100} \quad (2.32)$$

Για οποιοδήποτε επιλεγμένο επιθυμητό μέγεθος αναφοράς, ο ρυθμός παραγωγής των λεπτών από το κύκλωμα (*Circuit Production Rate of Fines-CPRF*), ισούται με το γινόμενο της παροχής της τροφοδοσίας (*Feed Rate-FR*) του κυκλώματος επί τη διαφορά των κλασμάτων μάζας των λεπτών που υπάρχουν στο προϊόν $P_{Product}$ και στην τροφοδοσία P_{Feed} αντίστοιχα (Metcom Technologies Inc., 2005; McIvor et al., 2017), δηλαδή:

$$CPRF = FR * \frac{P_{Product} - P_{Feed}}{100} \quad (2.33)$$

Ο λόγος του ρυθμού παραγωγής των λεπτών $CPFR$, που παράγονται ανά μονάδα ενεργής ισχύος του μύλου EMP , καλείται ειδικός ρυθμός θραύσης των χονδρών τεμαχιδίων (*Specific Grinding Rate of Coarse-SGRC*), δηλαδή:

$$SGRC = \frac{CPRF}{EMP} \quad (2.34a) \xrightarrow{\text{Αναδιάταξη Όρων}} CPRF = EMP * SGRC \quad (2.34b)$$

Το $SGRC$, εξαρτάται από την ευθραυστότητα του μεταλλεύματος (*Ore Grindability-OG*) και την απόδοση της λειοτρίβησης του μύλου (*Mill Grinding Efficiency-MGE*). Η ευθραυστότητα αναφέρεται στην ενέργεια που απαιτείται για τη μείωση του υλικού και προσδιορίζεται με τον δείκτη έργου του Bond, W_i^2 , ενώ η απόδοση της λειοτρίβησης του μύλου επηρεάζεται από το μέγεθος των μέσων λειοτρίβησης και την περιεκτικότητα του μύλου σε στερεά (McIvor, 2006). Ο λόγος του ειδικού ρυθμού θραύσης των χονδρών τεμαχιδίων $SGRC$, που προκύπτει από λειοτρίβηση σε εργοστασιακό μύλο, προς την ευθραυστότητα του μεταλλεύματος OG που προκύπτει από εργαστηριακό μύλο, αποτελεί ένα σχετικό μέτρο της απόδοσης της λειοτρίβησης

² Ο δείκτης αυτός, είναι ένα μέτρο της αντίστασης που έχουν οι ορυκτές πρώτες ύλες, στη θραύση κι ειδικότερα στη λειοτρίβηση. Προσδιορίζεται σε εργαστηριακής κλίμακας ειδικούς μύλους (*Bond Ball Mill Test*), με την εξομοίωση της λειοτρίβησης ξηρού μεταλλεύματος, σε κλειστό κύκλωμα, μέχρις ότου να επιτευχθεί 250% λόγος κυκλοφορούντος φορτίου (Magdalinović, 1989).

του μύλου, δηλαδή:

$$MGE = \frac{SGRC}{OG} \quad (2.35a) \quad \xleftrightarrow{\text{Αναδιάταξη όρων}} \quad SGRC = MGE * OR \quad (2.35b)$$

Από την Εξίσωση 2.34b, λαμβάνοντας υπόψη τις Εξισώσεις 2.31 και 2.35b, προκύπτει η εξίσωση της λειτουργικής απόδοσης, που αναπτύχθηκε από τον McInvor (1988b), ως:

$$CPRF = TMP * \frac{CSE}{100} * MGE * OG \quad (2.36)$$

Η Εξίσωση 2.36 εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- ❖ Την καθαρή ισχύ του μύλου, σε kW,
- ❖ Τον τύπο του υλικού, εκπεφρασμένος ως ευθραυστότητα, σε g/rev,
- ❖ Την απόδοση της ταξινόμησης του συστήματος, που είναι το ποσοστό (%) της ενέργειας του μύλου, που εφαρμόζεται στα χονδρά τεμαχίδια, και
- ❖ Την απόδοση της λειοτριβήσης του μύλου, η οποία εξαρτάται από την ενέργεια που καταναλώνεται στα χονδρά τεμαχίδια, σε (t/kWh)/(g/rev).

2.7. Περιγραφή της Επίπλευσης

Η μέγιστη ανάκτηση κι ο ρυθμός της επίπλευσης, διέπονται από μια κινητική πρώτης τάξης³ (Huber-Panu et al., 1976; Klimpel, 1984), της οποίας το μοντέλο, είναι:

$$R(t_i) = R_{\infty} * \left(1 - \frac{1 - \exp(-k_2 * t_i)}{k_2 * t_i} \right), 0 < t_i \leq \tau \quad (2.37)$$

όπου,

$R(t_i)$: το αθροιστικό ποσοστό (%) μάζας του χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου, που ανακτήθηκε τις χρονικές στιγμές της επίπλευσης t_i ,

t_i : τα χρονικά διαστήματα που χωρίζεται η επίπλευση, για τη συλλογή των συμπυκνωμάτων, κατά τις εργαστηριακές δοκιμές, σε sec ή min, με i ένας αδιάστατος θετικός ακέραιος αριθμός, που διακρίνει τα χρονικά διαστήματα μεταξύ τους,

R_{∞} : το μέγιστο θεωρητικό ποσοστό (%) μάζας του χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου, που ανακτάται για θεωρητικά άπειρο χρόνο επίπλευσης,

k_2 : η σταθερά του ρυθμού επίπλευσης, που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη δυνατή τιμή

³ Τα κινητικά μοντέλα που περιγράφουν τη διεργασία της επίπλευσης, στη βάση τους έχουν θεωρηθεί ανάλογα με τις ομοιογενείς χημικές αντιδράσεις, καθώς η διεργασία αυτή αναπαρίσταται ως αντίδραση μεταξύ τεμαχιδίων και φυσαλίδων σε περίσσεια (Vinnett & Waters, 2020). Επομένως, η εξίσωση που περιγράφει τον ρυθμό μεταβολής της στιγμιαίας συγκέντρωσης C των ορυκτών, σε μια πλήρους ανάμιξης δοκιμή επίπλευσης σε παρτίδες (Batch Flotation Process), είναι:

$$dC/dt = -k * (C - C_{\infty})^n \quad \text{όπου,}$$

k : η σταθερά του ρυθμού επίπλευσης, σε sec^{-1} ή min^{-1} ,

C, C_{∞} : η στιγμιαία συγκέντρωση κι η συγκέντρωση ισορροπίας, όταν ο χρόνος t τείνει στο άπειρο, αντίστοιχα, στις επιθυμητές μονάδες μέτρησής, π.χ. kg/m^3 για συγκέντρωση μάζας ή mol/m^3 για συγκέντρωση μορίων στο SI,

n : η τάξη της αντίδρασης κι είναι αδιάστατος θετικός ακέραιος αριθμός. Προφανώς, για $n = 1$, η αντίδραση είναι πρώτης τάξης, και

dC/dt : ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης, ο οποίος περιγράφει την ταχύτητα ανάκτησης του χρήσιμου ορυκτού ή στοιχείου στο συμπύκνωμα.

μιας ομοιόμορφης κατανομής (*Uniform ή Rectangular Distribution*⁴) ενός πλήθους τιμών (Gupta & Denis, 2006), σε sec^{-1} ή min^{-1} , και

τ : η ολική διάρκεια της επίπλευσης, σε sec ή min .

Η Εξίσωση 2.39, προέρχεται από τροποποίηση του κλασικού μοντέλου, κινητικής πρώτης τάξης του Garcia-Zuñiga (1935), η οποία εκφράζεται με όρους ανάκτησης συναρτήσεως του χρόνου $R(t_i)$, που βασίζεται στην αλλαγή της συγκέντρωσης των χρήσιμων ορυκτών ή στοιχείων, για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια επίπλευσης και για το οποίο ισχύει:

$$R(t_i) = R_{\infty} * (1 - \exp(-k_1 * t_i)) \quad (2.38)$$

όπου,

k_1 : η κινητική σταθερά του ρυθμού επίπλευσης, σε sec^{-1} ή min^{-1} .

Γίνεται αντιληπτό, πως η διαφορά μεταξύ του κλασικού μοντέλου και του μοντέλου του Klimpel, έγκειται στην αναπαράσταση της κατανομής της σταθεράς του ρυθμού της επίπλευσης, ως ομοιόμορφης ή ορθογώνιας (βλ. υποσημείωση υπ' αριθμό 4). Η τροποποίηση αυτή, αφενός προσφέρει καλύτερη περιγραφή της διεργασίας της επίπλευσης κι αφετέρου επεκτείνει την ευελιξία στην αναπαράσταση των δεδομένων του ρυθμού επίπλευσης, για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών (Bu et al., 2017; Gül & Aydın, 2021). Το μοντέλο του Klimpel, λαμβάνει υπόψη το γεγονός, ότι τα υδρόφοβα τεμαχίδια διαφέρουν ως προς το μέγεθος, αλλά και τον βαθμό υδροφοβίας κι επομένως είναι καταλληλότερο από το κλασικό μοντέλο, που προορίζεται για την περιγραφή συστημάτων με πανομοιότυπα μόρια (Kawatara, 2011).

Η Εξίσωση 2.37, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, για τη συσχέτιση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Στις εργαστηριακές δοκιμές, η παράμετρος $R(t_i)$ κατέχει σημαντικό ρόλο για τον προσδιορισμό της απόδοσης της επίπλευσης, επειδή αυτές είναι εύκολο να εκτελεστούν μέχρι να ανακτηθεί όλη η χρήσιμη ποσότητα. Αντιθέτως στο εργοστάσιο, η παράμετρος k_2 είναι πιο σημαντική, επειδή είναι αρκετά δαπανηρό να παρέχεται αρκετός όγκος κυψελών επίπλευσης, για την ανάκτηση της χρήσιμης ποσότητας, που δεν επιπλέει σε σύντομο χρονικό διάστημα. Εξαιτίας αυτής της διαφοράς, τα εργαστηριακά αποτελέσματα μπορεί να αποδειχθούν πολύ κακοί δείκτες πρόβλεψης της απόδοσης των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Για να διορθωθεί αυτό, είναι καταλληλότερο να εκτελούνται χρονομετρημένες εργαστηριακές δοκιμές επίπλευσης, οι οποίες παράγουν τα κινητικά δεδομένα της επίπλευσης, ώστε να προσδιοριστούν οι επιδόσεις των $R(t_i)$ και k_2 . Κατόπιν, με βάση τον χρόνο παραμονής στις εργοστασιακές μονάδες επίπλευσης και τα αποτελέσματά τους, προσδιορίζεται κι η απόδοση των εγκαταστάσεων εμπλουτισμού (Klimpel, 1995). Γενικότερα, το μοντέλο του Klimpel, αποτελεί μία εύχρηστη μαθηματική έκφραση, που χρησιμεύει στη σύγκριση μεταξύ των αντιδραστηρίων και των συνθηκών, σε βιομηχανικά συστήματα επίπλευσης (King, 2000).

⁴ Στη Θεωρία Πιθανοτήτων και στη Στατιστική, η ομοιόμορφη ή ορθογώνια κατανομή, περιγράφει συνεχείς και διακριτές μεταβλητές. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ομοιόμορφης κατανομής, είναι σταθερή (ισοπίθανη) μέσα στο διάστημα $I = [a, b]$ και μηδενίζεται εκτός του (Χριστόπουλος, 2016):

$$f_X(x) = \begin{cases} 1/(b-a), & x \in I \\ 0, & x \notin I \end{cases}.$$

Κεφάλαιο 3-Μεταλλείο Cerro de Maimón της Δομινικανής Δημοκρατίας

3.1. Γενικές Πληροφορίες

Το μεταλλείο Cerro de Maimón (γεωγραφικό πλάτος $\varphi = 18^{\circ} 52' 54''$ βόρεια και γεωγραφικό μήκος $\lambda = 70^{\circ} 14' 42''$ δυτικά, κατά το σύστημα αναφοράς WGS 84), βρίσκεται στο δήμο Maimón, της επαρχίας Monseñor Nouel, περίπου 70 km βορειοδυτικά του Santo Domingo, πρωτεύουσα της Δομινικανής Δημοκρατίας, που ανήκει στο νησί της Ισπανιόλα (Hudson Institute of Mineralogy, n.d.; Perilya Limited, n.d.).



Σχήμα 3.1: Χάρτης της Δομινικανής Δημοκρατίας με την τοποθεσία του μεταλλείου Cerro de Maimón (Hudson Institute of Mineralogy, n.d.).

Τα δικαιώματα του μεταλλείου, καθώς κι η έκταση των 3,391 εκταρίων περίξ αυτού, έχουν παραχωρηθεί εξ ολοκλήρου, από το 2010, στην CORMIDOM S.A.S. (*Corporación Minera Dominicana Société par Actions Simplifiées*), θυγατρική της Perilya Limited, η οποία έχει αναλάβει την εκμετάλλευση του κοιτάσματος, τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος και την προώθηση-πώληση των συμπυκνωμάτων, στην αγορά (Perilya Limited, n.d.).

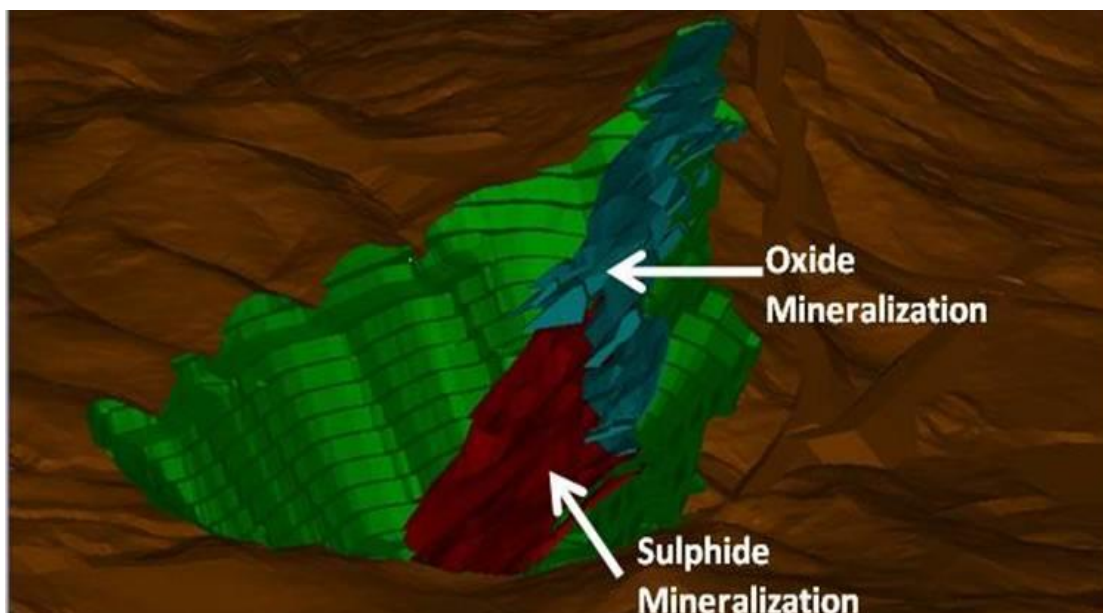
Ο τύπος της εκμετάλλευσης που έχει επιλεγεί, με βάση τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του κοιτάσματος, είναι αυτός της επιφανειακής (υπαίθριας) εκμετάλλευσης με ανοιχτές βαθμίδες (*Open Pit Mining*), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3. Τα έργα αποκάλυψης (*Advance Stripping*) του κοιτάσματος, κατασκευής των εγκαταστάσεων επεξεργασίας και της σχετικής υποδομής, συνολικού κόστους 69 εκατομμυρίων δολαρίων, ξεκίνησαν τον Δεκέμβριο του 2006 κι ολοκληρώθηκαν τον Οκτώβριο του 2008, από την GlobeStar Mining Corporation (Perilya Limited, n.d.).



Σχήμα 3.2: Βαθμίδες υπαίθριας εκμετάλλευσης του μεταλλείου Cerro de Maimón (Perilya Limited, n.d.).

3.2. Κοιτασματολογικά Χαρακτηριστικά και Μεταλλοφορία

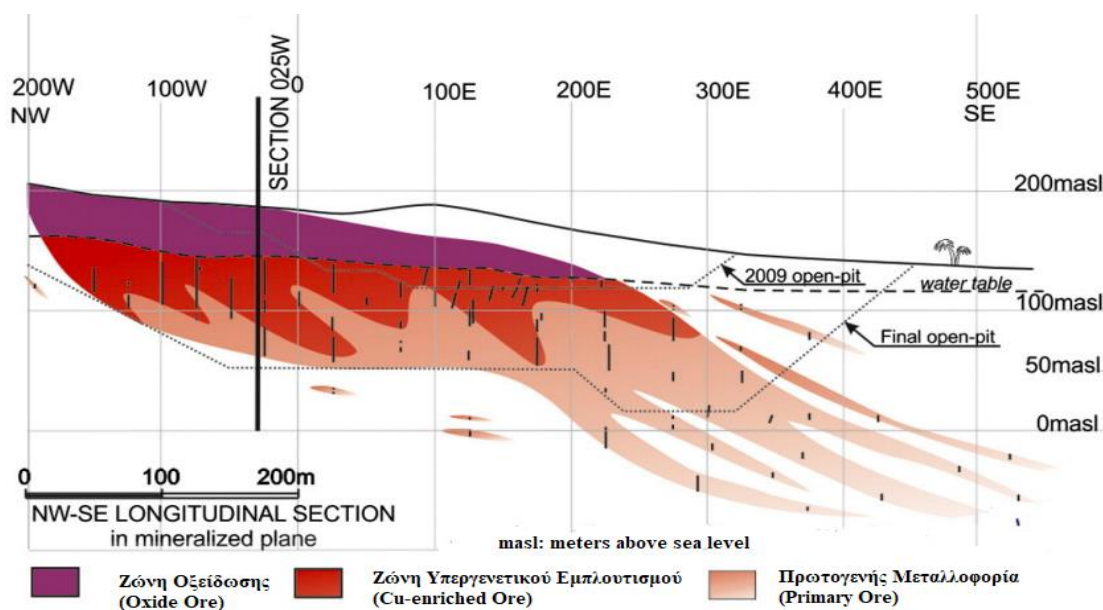
Αποτελεί, ηφαιστειογενές κοιτάσμα συμπαγών σουλφιδίων (*Volcanogenic Massive Sulfide Deposit-VMS*). Το κοιτάσμα έχει μήκος 1000 m, πλάτος περίπου 300 m και πάχος 15 m κατά μέσο όρο, εάν και τοπικά φτάνει και τα 40 m. Η εμφάνισή του ξεκινά από την επιφάνεια, βυθίζεται προς τα νοτιοανατολικά κατά 25° κι έχει κλίση 30° προς τα νοτιοδυτικά. Η βύθισή του εξομαλύνεται κατά 20° προς τα κατάντη (Andreu et al., 2015; Perilya Limited, n.d.).



Σχήμα 3.3: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του κοιτάσματος (Perilya Limited, n.d.).

Η συνολική έκταση του κοιτάσματος, με βάση τους Andreu et al. (2015), διακρίνεται από τα κάτω προς τα επάνω (Σχήμα 3.4):

- i. Στην πρωτογενή μεταλλοφορία (*Primary Ore*), με αναλογία Cu-Zn που τείνει στο 1:1 σε χαμηλότερα βάθη, η οποία αποτελείται κυρίως από σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη και σφαλερίτη.
- ii. Σε μια ακανόνιστη ζώνη υπεργενετικού εμπλουτισμού (*Cu-enriched Ore*), με περιεκτικότητα έως και 10 % σε Cu, με αναλογία Cu-Zn ίση με 3:1, η οποία αποτελείται από δευτερογενή χαλκούχα σουλφίδια, αποτελούμενα από μικρού μεγέθους συμφύσεις χαλκοσίνη και κοβελίνη, μαζί με διγενίτη ή γιαροσίτη.
- iii. Μια οξειδωμένη ζώνη (*Oxide Ore*), η οποία αποτελείται κατά κύριο λόγο από γκαιτίτη κι αιματίτη.



Σχήμα 3.4: Λεπτομερής τομή των μεταλλοφόρων επιπέδων του κοιτάσματος, προβαλλόμενη κατά τη διεύθυνση BA-NA (Andreu et al., 2015).

Με βάση τα προηγούμενα, το κοιτάσμα Cerro de Maimón έχει προκύψει από χημική αποσάθρωση μεταλλικών ορυκτών κι ιδίως των περιεχόμενων σουλφιδίων (Andreu et al., 2015). Η διαδικασία της οξείδωσης κι αναγωγής, είναι σημαντική για τον σχηματισμό μεταλλευμάτων, διότι αφενός τα μέταλλα που αποδεσμεύονται συγκεντρώνονται σε κάποιο βάθος κι αφετέρου είναι πολύ πιθανό να διαλυθεί μικρό ποσοστό μετάλλων από μεγάλο όγκο πετρώματος και να καθιζήσει εκ νέου, ως κοιτάσμα μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε μικρό όγκο πετρώματος (Χρηστίδης, 2015).

Η διαδικασία αυτή καλείται υπεργενετικός εμπλουτισμός (*Supergene Enrichment*), η οποία οδηγεί στον σχηματισμό τριών (3) διακριτών επιμέρους ζωνών (ζώνες οξείδωσης κι αναγωγής) από την επιφάνεια προς το βάθος (Χρηστίδης, 2015):

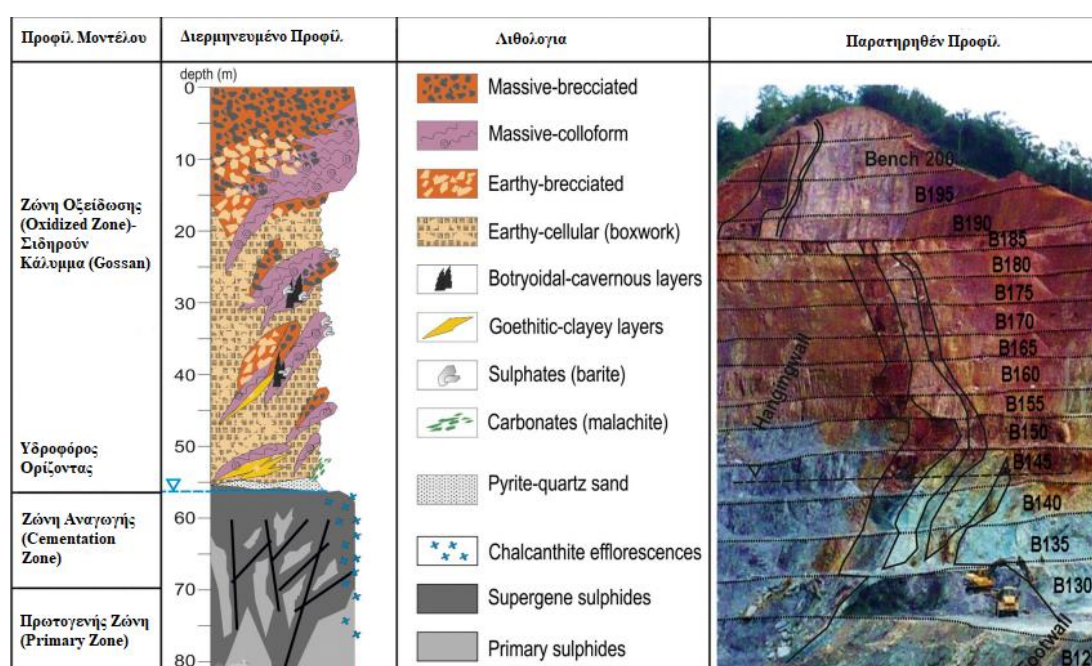
- i. Τη ζώνη οξείδωσης (*Oxidized Zone*), στο ανώτερο τμήμα κοντά στην επιφάνεια.
- ii. Τη ζώνη αναγωγής ή υπεργενετικού εμπλουτισμού (*Cementation Zone*), η οποία αποτελεί την πιο σημαντική από άποψη οικονομική ζώνη.
- iii. Την υπογενετική ή πρωτογενή ζώνη (*Primary Zone*) της μεταλλοφορίας.

Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα στο επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα ή και κάτω από αυτό. Επομένως, το όριο μεταξύ της ζώνης οξείδωσης και της ζώνης αναγωγής καθορίζεται αποκλειστικά από τη θέση και τη διατήρηση αυτού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η μετάβαση από τη ζώνη οξείδωσης στη ζώνη αναγωγής είναι βαθμιαία,

με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μεταβατική ζώνη, η οποία χαρακτηρίζεται από βαθμιαία μετάβαση από οξειδωτικές σε αναγωγικές συνθήκες κι οφείλεται στις διαχρονικές διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα.

Το ανώτερο τμήμα της ζώνης οξείδωσης είναι συμπαγές, περισσότερο πλούσιο σε σίδηρο κι έχει χρώμα πιο έντονο καστανό-κόκκινο από ότι η υπόλοιπη ζώνη οξείδωσης και καλείται σιδηρούν κάλυμμα (*Gossan*). Κατά κύριο λόγο, τα *gossan*, αποτελούνται, από γκαιτίτη, αιματίτη και γιαροσίτη (ο σχηματισμός του προϋποθέτει την ύπαρξη καλίου στα αρχικά ορυκτά). Απαντώνται με τη μορφή πλέγματος των σιδηρούχων ορυκτών που σχηματίζουν πορώδη δομή (*Boxwork*), η οποία προκύπτει από εξαλλοίωση των αρχικών θειούχων ορυκτών (Χρηστίδης, 2015).

Το προφίλ της αποσάθρωσης του κοιτάσματος Cerro de Maimón, συναρτήσει της δομής του, όπως αποκαλύφθηκε κατά τον Ιούνιο του 2009, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Σχηματική απεικόνιση του αποσαθρωμένου προφίλ του κοιτάσματος, σε αντιπαραβολή με φωτογραφία πεδίου από τη φάση της αποκάλυψής του. Κάθε βαθμίδα έχει ύψος 5 m, ενώ τα υψόμετρα είναι ορθομετρικά, δηλαδή από τη μέση στάθμη της θάλασσας (Andreu et al., 2015).

3.3. Ορυκτοί Πόροι κι Αποθέματα

Με βάση τη διάκριση των ζωνών του κοιτάσματος, όπως αναπτύχθηκε προηγουμένως, διακρίνονται κι οι κάτωθι τύποι αποθεμάτων (Roos et al., 2007):

- ❖ Το οξειδωμένο μέταλλευμα (*Oxide Ore*), το οποίο φιλοξενεί χρυσό κι άργυρο, καθώς και χαμηλές περιεκτικότητες χαλκού και ψευδαργύρου.
- ❖ Το θειούχο μέταλλευμα (*Sulfide Ore*), το οποίο περιέχει θειούχα ορυκτά του χαλκού και του ψευδαργύρου μαζί με σιδηροπυρίτη, καθώς και μεταβλητές περιεκτικότητες χαλκούχων ορυκτών, δευτερογενούς προέλευσης. Το μέταλλευμα αυτό, υποδιαιρείται σε επιμέρους ζώνες:

- i. Στην άνω, πλούσια σε χαλκό, η οποία φιλοξενεί τα δευτερογενούς προέλευσης χαλκούχα ορυκτά, όπως χαλκοσίνης, βορνίτης, κ.λπ., καθώς και χαμηλές περιεκτικότητες ψευδαργυρούχων ορυκτών.
- ii. Στην κάτω, ενδιάμεσης σε χαλκό και ψευδάργυρο, η οποία παρουσιάζει αισθητά χαμηλότερα ποσοστά δευτερογενούς προέλευσης χαλκούχων ορυκτών κι υψηλότερη περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο.
- iii. Στην κατώτερη, πλούσια σε ψευδάργυρο, η οποία παρουσιάζει ελάχιστα ορυκτά του χαλκού και κατά κύριο λόγο αποτελείται από σουλφίδια του ψευδαργύρου.

Η κατάταξη των ορυκτών πόρων (*Mineral Resources*⁵) και των αποθεμάτων (*Mineral/Ore Reserves*⁶), του κοιτάσματος Cerro de Maimón, έγινε με βάση το σύστημα του CIM (*Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*) το 2007 (Roos et al., 2007) κι ακολούθησε επανεκτίμηση το 2011 (Perilya Limited, 2011).

Οι ορυκτοί πόροι του κοιτάσματος, εκτιμήθηκαν βάσει ανάλυσης ευαισθησίας (*Sensitivity Analysis*⁷) για διάφορες τιμές των κατώτατων ορίων περιεκτικότητας (*Cut-off Grade*⁸), σε διαστήματα 0.25 έως 1.25 με βήμα 0.25 για την οξειδωμένη ζώνη και 0.20 έως 0.40 με βήμα 0.10 καθώς και 0.60 έως 1.00 με βήμα 0.2 για τη θειούχα ζώνη. Με βάση τα αποτελέσματα, ο συνδυασμός των κατώτατων ορίων που επιλέχθηκε, ώστε η εξόρυξη να έχει οικονομική προοπτική, είναι 0.5 g/t ισοδύναμο Au για την οξειδωμένη ζώνη και 0.3% Cu για τη θειούχα ζώνη. Επίσης, τα κατώτατα όρια περιεκτικότητας, στα περιθώρια του κοιτάσματος, ορίστηκαν σε 0.3 g/t ισοδύναμο Au και 0.2% Cu (Roos et al., 2007).

Με βάση τα επικρατέστερα κατώτατα όρια περιεκτικότητας, οι ενδεικτικοί (*Indicated*) και μετρημένοι (*Measured*) ορυκτοί πόροι, περιλάμβαναν περίπου 1.25 εκατομμύρια τόνους (t), με ποιότητα 1.76 g/t σε Au και 31.1 g/t σε Ag για την οξειδωμένη ζώνη, ενώ για τη θειούχα ζώνη περιλάμβαναν περίπου 7.36 εκατομμύρια τόνους (t), με ποιότητα 2.05% σε Cu, 1.43% σε Zn, 0.87 g/t Au και 32.2 g/t σε Ag (Roos et al., 2007).

Επομένως, οι υποτιθέμενοι (*Inferred*), οι ενδεικτικοί κι οι μετρημένοι ορυκτοί πόροι για την οξειδωμένη ζώνη του κοιτάσματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 και για τη θειούχα ζώνη του κοιτάσματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

⁵ Είναι μια ζώνη μεταλλοφορίας, στην οποία έχει πραγματοποιηθεί κατάλληλη δειγματοληψία και μελέτη, σε βαθμό που μπορεί να διατυπωθεί αξιόπιστη εκτίμηση ως προς την έκταση, την ποσότητα και την ποιότητα του χρήσιμου περιεχόμενου συστατικού (Μόδης & Σταματάκη, 2015).

⁶ Χαρακτηρίζεται το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο τμήμα του υπό έρευνα ορυκτού πόρου, όπως προκύπτει ύστερα από εμπεριστατωμένη μελέτη σκοπιμότητας/οικονομικής ανάλυσης (Μόδης & Σταματάκη, 2015).

⁷ Προσδιορίζει την ευαισθησία της εξόδου ενός μαθηματικού μοντέλου, ως προς τις μεταβολές στις μεταβλητές εισόδου. Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν, προσδιορίζεται ο βαθμός εξάρτησης των αποτελεσμάτων ενός μαθηματικού μοντέλου, ως προς κάθε μεταβλητή ξεχωριστά (Λαμπροπούλου, 2016).

⁸ Περιεκτικότητα κάτω από την οποία το μέταλλο δεν μπορεί να αποφέρει κέρδη κι υπολογίζεται ως: Κόστος/(Αξία*Απόληψη) (Davey, 1979). Εξαρτάται από παράγοντες όπως η τιμή του υλικού, η μέθοδος εκμετάλλευσης, το κόστος εξόρυξης κι επεξεργασίας του μεταλλεύματος.

Πίνακας 3.1: Ορυκτοί πόροι της οξειδωμένης ζώνης του κοιτάσματος Cerro de Maimón (Roos et al., 2007).

Κλάση	Μάζα (t)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Ισ. Au (g/t)	Au (ounces)	Ag (ounces)
Υποτιθέμενοι	Δεν Διατίθενται Πληροφορίες					
Ενδεικτικοί	261,407	1.39	23.4	1.78	11,713	196,929
Μετρημένοι	985,172	1.86	33.2	2.40	58,828	1,051,146
E+M	1,246,579	1.76	31.1	2.27	70,541	1,248,075
-Κατώτατο όριο περιεκτικότητας στα 0.5 g/t ισοδύναμο Au, όπου ισοδύναμο Au = Au (g/t) + Ag (g/t)*Ag Factor, με Ag Factor = 0.01630. Ισχύει πως: $\text{Ag Factor} = \frac{(\text{Ag Price} - \text{Ag Refining Cost}) * \text{Ag Recovery}}{(\text{Au Price} - \text{Au Refining Cost}) * \text{Au Recovery}}$						

Πίνακας 3.2: Ορυκτοί πόροι της θειούχας ζώνης του κοιτάσματος Cerro de Maimón (Roos et al., 2007).

Κλάση	Μάζα (t)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Zn (%)	Cu (lb)	Au (ounces)	Ag (ounces)	Zn (lb)
Υποτ.	142,283	1.20	0.71	34.6	1.12	3,758,520	3,249	158,491	3,522,333
Ενδ.	1,739,214	1.25	0.73	28.7	1.31	47,862,876	40,634	1,603,996	50,063,877
Μετρ.	5,628,632	2.30	0.91	33.3	1.46	285,868,560	164,955	6,030,179	181,517,189
E+M	7,367,846	2.05	0.87	32.2	1.43	333,731,436	205,589	7,634,175	231,581,065
Κατώτατο όριο περιεκτικότητας στα 0.3% Cu.									

Ακολουθως, παρουσιάζονται τα μεταλλευτικά αποθέματα, για το οξειδωμένο μετάλλευμα στον Πίνακας 3.3 και για το θειούχο μετάλλευμα στον Πίνακας 3.4, τα οποία διακρίνονται σε αποδεδειγμένα (Proven) και πιθανά (Probable).

Πίνακας 3.3: Αποθέματα του οξειδωμένου μεταλλεύματος (Roos et al., 2007).

Κλάση	Μάζα (t)	Au (g/t)	Ag (g/t)
Αποδεδειγμένα	927,274	1.95	37.1
Πιθανά	230,093	1.48	23.9
Σύνολο	1,157,367	1.86	34.5

Πίνακας 3.4: Αποθέματα του θειούχου μεταλλεύματος (Roos et al., 2007).

Κλάση	Μάζα (t)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)
Αποδεδειγμένα	4,285,800	2.66	0.98	35.7
Πιθανά	538,760	1.52	0.78	28.7
Σύνολο	4,824,560	2.54	0.96	34.9

Σύμφωνα με την αναφορά των Roos et al. (2007), τα συνολικά αποθέματα (οξειδωμένο και θειούχο μετάλλευμα), για τον σχεδιασμό της εκμετάλλευσης της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, περιλαμβάναν περίπου έξι (6) εκατομμύρια τόνους (t), με ποιότητα 2.54% σε Cu, 1.13 g/t σε Au και 34.81 g/t σε Ag, ενώ τα συνολικά

άγωνα/υπερκείμενα που έπρεπε να διακινηθούν, εκτιμήθηκαν περίπου σε 46 εκατομμύρια τόνους (t). Η σχέση αποκάλυψης (*Stripping Ratio*⁹), για τις συγκεκριμένες εκτιμήσεις, προσδιορίστηκε περίπου σε 7.7/1.

Με βάση την επανεκτίμηση της Perilya Limited (2011), τα συνολικά αποθέματα του οξειδωμένου μεταλλεύματος ήταν 901,000 t και του θειούχου μεταλλεύματος 5,370,000 t, με 49,292,000 t αγόνου υλικού. Η ολική σχέση αποκάλυψης και για τους δύο (2) τύπους μεταλλευμάτων, προσδιορίστηκε σε 7.85/1.

Κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος, από το 2008 μέχρι και το 2018, που δημοσιεύθηκε κι η τελευταία καταχώρηση από την εταιρεία, το μεταλλείο έχει παράγει συνολικά 98,492 t Cu, 15,297 t Zn, 114,604 ounces Au και 4,092,616 ounces Ag, όπως παρουσιάζονται και στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Ετήσια παραγωγή κύριων μετάλλων του μεταλλείου Cerro de Maimón, από τον Δεκέμβριο του 2008 μέχρι το διάστημα Ιανουαρίου-Οκτωβρίου του 2018 (Redwood, 2019).

Έτος	Cu (t)	Zn (t)	Au (ounces)	Ag (ounces)	Έτος	Cu (t)	Zn (t)	Au (ounces)	Ag (ounces)
2008	2,109	-	1,314	94,334	2014	9,263	-	10,308	251,581
2009	12,937	-	13,678	665,147	2015	6,884	4,655	8,757	336,971
2010	10,015	-	17,131	733,550	2016	8,314	3,636	7,397	298,697
2011	11,777	-	15,914	596,531	2017	8,549	3,920	6,868	270,852
2012	11,736	-	13,887	341,801	2018	6,530	3,086	4,716	178,877
2013	10,379	-	14,633	324,277	Σύνολο	98,492	15,297	144,604	4,092,616

Το 2017, η εταιρεία CORMIDOM, ανακοίνωσε την ύπαρξη νέου κοιτάσματος, το οποίο ανακαλύφθηκε στα μέσα του 2016 και βρίσκεται 470 m νότια του υπαίθριου μεταλλείου, σε βάθος 400 m (αποτελεί γεωλογική προέκταση του ήδη εκμεταλλευόμενου κοιτάσματος). Με βάση την εκτίμηση της JORC (*Joint Ore Reserve Committee*), οι ορυκτοί πόροι που ανέρχονται σε 8.49 εκατομμύρια τόνους (t), με 2.5% Cu, 3.2% Zn, 1.4 g/t Au και 47 g/t Ag, περιλαμβάνουν 209,760 t Cu, 275,150 t Zn, 405,000 ounces Au και 14,087,000 ounces Ag. Ο καθορισμός των μεταλλευτικών αποθεμάτων του νέου κοιτάσματος, μπορεί να επεκτείνει τη μεταλλευτική δραστηριότητα της εταιρείας για τουλάχιστον δέκα (10) έτη ακόμη, ενώ η εκμετάλλευσή του θα γίνει με υπόγεια μέθοδο (Redwood, 2019).

3.4. Περιγραφή των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας

Η επιχείρηση διαθέτει ξεχωριστές εγκαταστάσεις εμπλουτισμού για τα δύο (2) διαφορετικά μεταλλεύματα (Σχήμα 3.6). Ο χαλκός κι ο ψευδάργυρος βρίσκονται στο θειούχο μετάλλευμα, από το οποίο ανακτώνται ως παραπροϊόντα και κάποιες ποσότητες χρυσού κι αργύρου, ενώ στο οξειδωμένο μετάλλευμα βρίσκονται ο χρυσός κι ο άργυρος. Οι εγκαταστάσεις εμπλουτισμού, λειτουργούν σε δύο (2) οκτάωρες βάρδιες την ημέρα (Δεδομένα CORMIDOM S.A.S., 2023).

⁹ Η σχέση εκμετάλλευσης *R* (*Mining Ratio*), ορίζεται ως ο όγκος ή το βάρος των αγόνων υλικών που πρέπει να εξορυχθούν, μεταφερθούν, αποτεθούν προκειμένου να παραχθεί μία μονάδα όγκου ή βάρους χρήσιμου μεταλλεύματος ή ορυκτού κι υπολογίζεται ως: Όγκος ή μάζα διακινούμενων αγόνων/Όγκος ή μάζα απολαμβανόμενου χρήσιμου μεταλλεύματος ή ορυκτού (Γαλετάκης, 2015).

Το εργοστάσιο επεξεργασίας του οξειδωμένου μεταλλεύματος, έχει δυναμικότητα 700 t/day, όμως από τον Απρίλιο του 2015 περιορίστηκε η χρήση του, λόγω εξάντλησης των μεταλλευτικών αποθεμάτων (Redwood, 2019; Perilya Limited, n.d.).

Το εργοστάσιο επεξεργασίας του θειούχου μεταλλεύματος, με δυναμικότητα 1300 t/day, αρχικά σχεδιάστηκε για την ανάκτηση μόνο του χαλκού, όμως το 2015 μετασχηματίστηκε με την προσθήκη επιπλέον σταδίων επίπλευσης, για την ανάκτηση και του ψευδαργύρου, καθώς η περιεκτικότητά του στο μέταλλο αυξήθηκε σε σημαντικό βαθμό (Redwood, 2019; Perilya Limited, n.d.).



Σχήμα 3.6: Εγκαταστάσεις επεξεργασίας του μεταλλείου. Στα αριστερά βρίσκεται το εργοστάσιο εμπλουτισμού του οξειδωμένου μεταλλεύματος και στα δεξιά αυτό του θειούχου (Perilya Limited, n.d.).

Κι οι δύο (2) τύποι μεταλλευμάτων, περνάνε από το ίδιο κύκλωμα θραύσης-κοσκίνισης και σύστημα ταινιοδρόμων μεταφοράς. Το κύκλωμα αυτό, είναι δύο (2) σταδίων κι ελαττώνει το μέγεθος των τεμαχιδίων στα $-3/4$ in (-19.05 mm), με $P_{80} = 11-18$ mm (Δεδομένα CORMIDOM S.A.S., 2023; Perilya Limited, n.d.).

Το οξειδωμένο μέταλλευμα, αρχικά λειοτριβείται σε σφαιρόμυλο, διαστάσεων 8 ft (D)*15 ft (L) και στη συνέχεια ακολουθεί εκχύλιση με κυάνιο (Cyanidation Leaching) σε αναδευόμενους αντιδραστήρες. Στο εκχύλισμα εφαρμόζεται η μέθοδος της ανάστροφης ή αντιρροϊκής μετάγγισης του διαλύματος (Counter Current Decantation-CCD¹⁰) σε κύκλωμα παχυντών. Το προϊόν αυτού του κυκλώματος οδηγείται για βαρυτομετρικό διαχωρισμό, ώστε να απομακρυνθούν τα χονδρά τεμαχίδια και τα σουλφίδια. Η ανάκτηση του χρυσού και του αργύρου γίνεται με τη διεργασία Merrill-Crowe¹¹ (Mining Technology, 2011; Perilya Limited, n.d.).

¹⁰ Χρησιμοποιείται για την παραλαβή των διαλυτών μετάλλων από το διάλυμα της εκχύλισης με κυάνιο. Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής, είναι η συγκέντρωση των στερεών, ελαχιστοποιώντας την περιεκτικότητα του διαλύτη στον πολφό της απορροής, που ρέει προς τη μια κατεύθυνση. Τότε, ο πολφός της απορροής αραιώνεται με υγρό έκπλυσης, που ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα τη συνεχή συγκέντρωση των στερεών (Muhtadi, n.d.). Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται σε κυκλώματα παχυντών σε σειρά.

¹¹ Είναι μια τεχνική διαχωρισμού του χρυσού από το διάλυμα που λαμβάνεται κατά την εκχύλιση με κυάνιο των χρυσοφόρων μεταλλευμάτων. Αποτελεί βελτίωση της διεργασίας MacArthur-Forrest, όπου χρησιμοποιείται επιπλέον κενό για την απομάκρυνση του αέρα από το διάλυμα (βελτίωση Crowe) και χρησιμοποιείται σκόνη, αντί για ρινίσματα, ψευδαργύρου (βελτίωση Merrill). Ο ψευδάργυρος, έχει μεγαλύτερη χημική συγγένεια (Chemical Affinity) με τα κυανιούχα ιόντα, με αποτέλεσμα ο χρυσός, ο άργυρος κι άλλα βασικά μέταλλα, όπως ο χαλκός, να καθιζάνουν (Muhtadi, n.d.).

Το θειούχο μετάλλευμα, υφίσταται λειοτρίβηση στον πρωτογενή σφαιρόμυλο, διαστάσεων 12 ft (D)*14 ft (L) κι ισχύος 1100 hp, σε $P_{80} = 110-130 \mu\text{m}$. Ο δευτερογενής σφαιρόμυλος, διαστάσεων 11 ft (D)*13 ft (L) κι ισχύος 800 hp, λειοτριβεί το συμπύκνωμα των κελιών χονδροειδούς επίπλευσης, σε $P_{80} = 25-30 \mu\text{m}$. Στη συνέχεια, η υπερχειλίση του υδροκυκλώνα, που προηγείται του δευτερογενή σφαιρόμυλου, οδηγείται στα κελιά επίπλευσης καθαρού διαχωρισμού, πριν την εισαγωγή τους σε στήλη επίπλευσης, διαστάσεων 3 m (D)*8 m (H). Τα προϊόντα της στήλης επίπλευσης υφίστανται επιπλέον επίπλευση και τα τελικά συμπυκνώματα, περνάνε αρχικά από παχυντές κι έπειτα από μηχανές διήθησης, ώστε η περιεχόμενη υγρασία να ελαχιστοποιηθεί περίπου στο 6-10% (Mining Technology, 2011; Δεδομένα CORMIDOM S.A.S., 2023; Perilya Limited, n.d.).

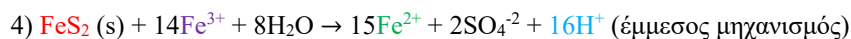
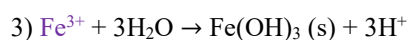
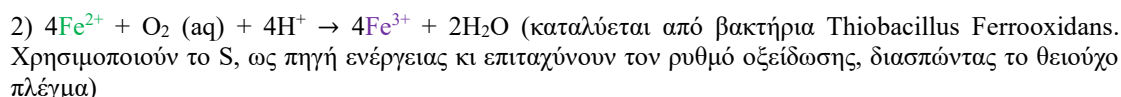
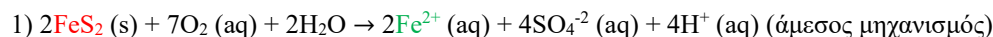
Στα τελικά συμπυκνώματα, γίνεται μια αρχική μορφοποίηση σε μπρικέτες (*Copper and Zinc Briquettes*) ή ράβδους (*Gold and Silver Dore Bars*) με χύτευση (*Smelting*), για την εύκολη διακίνησή τους και μεταφέρονται στο λιμάνι Río Haina (γεωγραφικό πλάτος $\phi = 18^{\circ} 25' 00''$ βόρεια και γεωγραφικό μήκος $\lambda = 70^{\circ} 00' 00''$ δυτικά, κατά το σύστημα αναφοράς WGS 84), στη νότια ακτή της Δομινικανής Δημοκρατίας, όπου φορτώνονται κι αποστέλλονται σε πελάτες στο εξωτερικό (Mining Technology, 2011; Perilya Limited, n.d.).

Τα τελικά απορρίμματα των εργοστασίων εμπλουτισμού, καθώς και τα απόβλητα της εκμετάλλευσης, μεταφέρονται σε ειδικές εγκαταστάσεις απόθεσης, που σχεδιάστηκαν από την Golder Associates (Perilya Limited, n.d.), ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία του φαινομένου της όξινης απορροής των μεταλλείων (*Acid Mine Drainage-AMD*)¹², εξαιτίας των περιεχόμενων θειούχων ενώσεων κι ιδιαίτερα του σιδηροπυρίτη¹³.

Ο διαχωρισμός γίνεται είτε με διήθηση, είτε με ανάστροφη ή αντιρροϊκή μετάγγιση του διαλύματος.

¹² Είναι ο σχηματισμός όξινων εκχυλισμάτων με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων/τοξικών μετάλλων, εξαιτίας μιας μεταλλοφορίας, οπότε αναφέρεται ως όξινη απορροή πετρωμάτων (*Acid Rock Drainage-ARD*) ή της εκμετάλλευσης μιας μεταλλοφορίας, οπότε αναφέρεται ως όξινη απορροή μεταλλείων (*Acid Mine Drainage-AMD*). Οφείλεται στην οξείδωση των θειούχων ορυκτών (με κύρια: γαληνίτης, κοβελίνης, σιδηροπυρίτης, σφαλερίτης, χαλκοπυρίτης και χαλκοσίνης) με τη δράση του νερού, του οξυγόνου και των υπαρχόντων βακτηρίων (Περδικάκης, 2006; Κανελλόπουλος, 2019). Παρουσιάζει περιβαλλοντικό αντίκτυπο, καθώς καταστρέφει τη βλάστηση και τη ζωή των οργανισμών, μολύνει τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ προκαλεί αισθητική και πρακτική υποβάθμιση της περιοχής.

¹³ Η σταδιακή οξείδωση του σιδηροπυρίτη, περιλαμβάνει τέσσερις (4) αντιδράσεις (Κομνίτσας, 2018):



Ο Fe^{3+} είναι πολύ πιο ισχυρός οξειδωτικός παράγοντας κι η κινητική της τελευταίας αντίδρασης είναι πολλή μεγαλύτερη από των πρώτης αντίδρασης. Επίσης, από την τελευταία αντίδραση, παρατηρείται η μεγάλη παραγωγή ανιόντων υδρογόνου (16H^+), η οποία αποτυπώνεται στη χαμηλή τιμή του pH (Κανελλόπουλος, 2019).

Κεφάλαιο 4-Προσομοίωση Εργοστασίου Θειούχου Μεταλλεύματος με τη Χρήση του Λογισμικού MODSIM™

Η προσομοίωση, του εργοστασίου εμπλουτισμού Cu-Zn, το οποίο επεξεργάζεται το θειούχο μετάλλευμα, εκτελείται με τον τυποποιημένο προσομοιωτή εργοστασίων εμπλουτισμού μεταλλευμάτων MODSIM™ (*MODular SIMulator for Ore Dressing Plants*), που αναπτύχθηκε από την Mineral Technologies International Inc. Το λογισμικό, υπολογίζει με λεπτομέρεια τα ισοζύγια μάζας (στερεών, νερού και πολφού), την κατανομή του μεγέθους των στερεών και την ανάλυσή τους (ορυκτολογική σύσταση και περιεκτικότητα ορυκτών και στοιχείων) στις ροές που σχεδιάζονται, επιτρέποντας στους μηχανικούς να επικεντρωθούν στη μεταλλουργική εφαρμογή, χωρίς να αναλώνονται στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων (King, 2000).

Ως προσομοίωση (*Simulation*), καλείται η αναπαράσταση της λειτουργίας μιας πραγματικής διαδικασίας ή ενός συστήματος. Αποτυπώνει τα βασικά χαρακτηριστικά και συμπεριφορές της επιλεγμένης δραστηριότητας (Banks et al., 2005), για την εκτέλεση πειραμάτων, ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η συμπεριφορά της πραγματικής δραστηριότητας ή/και να αξιολογηθούν διάφορες τεχνικές για τον έλεγχο της (Merks, 1990).

Οι δυνατότητες της προσομοίωσης, που προσφέρουν τέτοιου είδους λογισμικά για την κάλυψη των αναγκών των εργοστασίων επεξεργασίας ορυκτών πρώτων υλών, περιλαμβάνουν άμεση παρακολούθηση των ισοζυγίων μάζας, τη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας του εργοστασίου για την εκτίμηση της χωρητικότητας και της απόδοσής του, ευελιξία στην τροποποίηση του εργοστασίου με αφαίρεση υπάρχοντος ή/και με προσθήκη άλλου εξοπλισμού στα πλαίσια της βελτιστοποίησης, κ.λπ..

Ο σημαντικότερος παράγοντας, για την επίτευξη τέτοιου είδους προσομοιώσεων, είναι η ικανότητα μοντελοποίησης των μονάδων επεξεργασίας (μηχανημάτων) του εργοστασίου. Οι λειτουργικές μονάδες που προσομοιώνονται, προγραμματίζονται να ακολουθούν συγκεκριμένες μαθηματικές εξισώσεις. Επομένως, όλες οι μονάδες επεξεργασίας εξαρτώνται από τις (λειτουργικές) παραμέτρους αυτών των μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες καθορίζονται σε εργαστηριακή ή/και βιομηχανική κλίμακα. Αυτή, η μαθηματική μοντελοποίηση (*Mathematical Modeling*) της εκάστοτε μονάδας, επιτρέπει την αναγνώριση της απόκρισης των μηχανημάτων και των αποτελεσμάτων εξόδου του λογισμικού, κατά την αλλαγή των συνθηκών του κυκλώματος.

Η έναρξη της προσομοίωσης στο MODSIM™, ξεκινάει με τη δημιουργία νέας εργασίας, από τον κατάλογο επιλογών του λογισμικού (*Menu: File Menu>Start a New Job*) κι αποθηκεύεται¹⁴ αμέσως, για να δημιουργηθεί το αρχείο στον υπολογιστή, με τίτλο CORMIDOM Cu-Zn Mineral Processing Plant (*Menu: File Menu>Pack this Job*).

¹⁴ Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και των μοντελοποιήσεων, αυτό το βήμα επαναλαμβάνεται τακτικά, καθώς απαιτείται να εκτελούνται συχνές προσομοιώσεις, για κάθε νέα μονάδα που εισάγεται, ώστε να γίνεται έλεγχος στα αποτελέσματα που υπολογίζονται από το λογισμικό, σε σχέση με τις τιμές εισόδου. Επειδή, στο υπό-κεφάλαιο 4.2.2. *Επιλογή και Μοντελοποίηση των Λειτουργικών Μονάδων*, υπαινίσσεται συχνά ότι προηγείται προσομοίωση, διευκρινίζεται σε αυτό το σημείο, για την αποφυγή των συγχύσεων.

4.1. Εισαγωγή Δεδομένων

Αυτό το μέρος αποτελείται από τα δεδομένα που παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διαδικασία των προσομοιώσεων και χαρακτηρίζουν τα δεδομένα του συστήματος και του εργοστασίου, δηλαδή όλες εκείνες τις πληροφορίες που περιγράφουν το υπό επεξεργασία υλικό και τη δομή του εργοστασίου (King, 2000).

4.1.1. Ορισμός των Δεδομένων του Συστήματος

Στη φόρμα συμπλήρωσης των δεδομένων του συστήματος (Σχήμα 4.1) καθορίζονται τα χαρακτηριστικά του υλικού τροφοδοσίας κι εμφανίζονται τα ρεύματα ή οι ροές (*Streams*) του διαγράμματος ροής (*Feed Streams, Water Addition Streams & Internal and Product Streams*). Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής πειραματικών δεδομένων στις ροές που σχεδιάζονται, ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή τους με τα δεδομένα εξόδου του προσομοιωτή (King, 2000).

Από το *Menu: Edit Menu>Edit System Data*, τα πεδία των δεδομένων αυτής της φόρμας, που απαιτούνται να συμπληρωθούν είναι:

Ore Characteristics: καθορίζει τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τη φύση του στερεού υλικού που υφίσταται επεξεργασία στο εργοστάσιο. Οι επιλογές που διατίθενται, είναι για επεξεργασία συμβατικών μεταλλευμάτων (*Conventional Minerals*) κι επεξεργασία γαιανθράκων (*Coal Processing Plant*).

Για τον εμπλουτισμό του θείουχου μεταλλεύματος, επιλέγεται το *Conventional Minerals*.

Number of Minerals: καθορίζει το πλήθος των ορυκτών που παρουσιάζουν κύριο ενδιαφέρον για την προσομοίωση.

Από τα στοιχεία που δόθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM, τα κύρια ορυκτά είναι ο χαλκοπυρίτης (CuFeS_2), ο σφαλερίτης (ZnS), ο σιδηροπυρίτης (FeS_2), ενώ όλο το υπόλοιπο θεωρήθηκε στείρο.

Συμπληρώνεται, η τιμή τέσσερα (4).

Mineral Names: δίνονται τα ονόματα των συμμετεχόντων ορυκτών με λατινικούς χαρακτήρες.

Συμπληρώνονται, με την ακόλουθη σειρά *chalcopyrite* (χαλκοπυρίτης), *sphalerite* (σφαλερίτης), *pyrite* (σιδηροπυρίτης) και *gangue* (στείρο).

Mineral Specific Gravities: εισάγονται τα ειδικά βάρη των ορυκτών σε g/cm^3 . Καθορίζονται είτε από την ορυκτολογική σύσταση του κάθε τύπου των τεμαχιδίων και τα ειδικά βάρη των συμμετεχόντων ορυκτών (*Specify sp. gr. by Mineral*), είτε το ειδικό βάρος κάθε τύπου τεμαχιδίων καθορίζεται ρητά (*Specify sp. Gr. by Particle Type*), σε επόμενη φόρμα συμπλήρωσης.

Επιλέγεται το *Specify sp. gr. by Mineral* κι από βιβλιογραφικές πηγές (Κωστάκης, 2005) το ειδικό βάρος του χαλκοπυρίτη είναι 4.1-4.3 g/cm^3 , του σφαλερίτη είναι 3.9-4.1 g/cm^3 , του σιδηροπυρίτη είναι 5-5.2 g/cm^3 και του στείρου θεωρήθηκε 3 g/cm^3 .

Number of Size Classes: καθορίζεται το πλήθος των κατηγοριών μεγέθους που θα λάβει υπόψη το λογισμικό στην προσομοίωσή του, ώστε να αποτυπωθεί με ικανοποιητική λεπτομέρεια η κατανομή του μεγέθους. Η τιμή που καθορίζεται εδώ, δεν απαιτείται να ταυτίζεται με το διαθέσιμο αριθμό μεγεθών των δεδομένων που καθορίζουν τις τροφοδοσίες, αλλά ούτε με το διαθέσιμο αριθμό στα πειραματικά δεδομένα και διατίθενται απλά για σύγκριση με τα δεδομένα εξόδου του προσομοιωτή.

Συμπληρώνεται η τιμή 33, η οποία καλύπτει τις ανάγκες της παρούσας προσομοίωσης.

Largest Particle Size: εισάγεται το μεγαλύτερο μέγεθος τεμαχιδίου που εντοπίζεται στη τροφοδοσία σε m (μέτρα).

Βάσει των διαθέσιμων δεδομένων της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή 0.6 m.

Number of Grade Classes: εισάγεται το πλήθος των κατηγοριών ποιότητας που είναι απαραίτητα για να οριστούν τα χαρακτηριστικά αποδέσμευσης των ορυκτών. Σε περίπτωση, που ο βαθμός αποδέσμευσης δεν είναι σημαντικός, αυτό το πεδίο γίνεται ίσο με το πλήθος των ορυκτών.

Λόγω απουσίας διαθέσιμων δεδομένων από την εταιρεία CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή τέσσερα (4), δηλαδή όσο είναι και το πλήθος των ορυκτών.

Number of S-Classes: οι τάξεις S επιβάλουν τον πληθυσμό των τεμαχιδίων να ταξινομηθεί με βάση κάποια επιπρόσθετη φυσική παράμετρο, όπως είναι η μαγνητική διαπερατότητα ή η σταθερά του ρυθμού επίπλευσης.

Εισάγεται η τιμή ένα (1), κατά την οποία δεν δύναται να καθοριστούν τάξεις S, καθώς οι ζητούμενες παράμετροι της επίπλευσης θα καθοριστούν απευθείας, στα επιλεγμένα μοντέλα των μονάδων.

MODSIM - Specify ore characteristics and stream data for job CORMIDOM Cu-Zn Mineral Processing ... X
File

ORE CHARACTERISTICS

Select type of mineral to be processed

☒ Conventional minerals

☐ Coal processing plant

Number of minerals: 4

Mineral names

Chalcopyrite	4.2
Sphalerite	4
Pyrite	5.1
Gangue	3

Mineral specific gravities

Specify sp.gr by

☒ Mineral

☐ Particle type

Number of size classes: 33

Largest particle size: 6.00E-1 m

Number of grade classes: 4

Number of S-classes: 1

Set up grade classes

Set up S-classes

Feed streams

1 Feed-ROM

Water addition streams

52 Sump #2 Fresh Water

53 Sump #3 Fresh Water

Internal and product streams

2 Jaw Crusher Product

3 Screen Feed

5 Cone Crusher Product

6 Screen Undersize

7 CRUSHED MATERIAL with P80

8 Fresh Feed per Hour

9 Primary Ball Mill Feed

Set convergence properties

Cancel

Accept

Σχήμα 4.1: Συμπληρωμένη φόρμα των δεδομένων του συστήματος.

4.1.2. Ορισμός των Κατηγοριών Ποιότητας

Για τον καθορισμό της σύστασης των κατηγοριών ποιότητας, επιλέγεται η κορνίζα *Set Up Grade Classes*, η οποία εμφανίζεται στη φόρμα των δεδομένων του συστήματος (βλ. Σχήμα 4.1). Τα πεδία συμπλήρωσης, της νέας φόρμας που ανοίγει το λογισμικό (Σχήμα 4.2), είναι:

Composition: προσδιορίζεται η σύσταση κάθε κατηγορίας ποιότητας, σε σχέση με το ποσοστό συμμετοχής κάθε ορυκτού στο τεμαχίδιο είτε κατ' όγκο (*Specify Composition by Volume*), είτε κατά βάρος (*Specify Composition by Mass*). Κάθε κατηγορία ποιότητας προσδιορίζεται ως ένα διάνυσμα ορυκτολογικών συστάσεων, με τη σειρά των ορυκτών στο διάνυσμα να αντιστοιχεί στη σειρά με την οποία εισήχθησαν τα ονόματα των ορυκτών στα δεδομένα του συστήματος (βλ. Σχήμα 4.1).

Επιλέγεται *Specify Composition by Mass* και θεωρείται πως τα τεμαχίδια της κάθε κατηγορίας ποιότητας αποτελούνται εξ ολοκλήρου από το ορυκτό που αντιστοιχεί στο εκάστοτε ορυκτολογικό διάνυσμα, δηλαδή 100%.

Specify Gravity of Class: προσδιορίζεται αυτόματα το ειδικό βάρος των τεμαχιδίων της κάθε κατηγορίας ποιότητας, ως συνάρτηση των ειδικών βαρών που εισήχθησαν στα δεδομένα του συστήματος και των ποσοστών συμμετοχής των ορυκτών στα τεμαχίδια. Εάν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα των πραγματικών ειδικών βαρών των τεμαχιδίων, εισάγονται σε αυτά τα πεδία.

Σε αυτή την περίπτωση, που έγινε η θεώρηση της εξ ολοκλήρου εξάρτησης των ορυκτολογικών διανυσμάτων από το ονομαστικό ορυκτό της κάθε κατηγορίας ποιότητας, τα ειδικά βάρη ταυτίζονται με αυτά που εισήχθησαν στα δεδομένα του συστήματος (βλ. Σχήμα 4.1).

Επιπλέον, στη συγκεκριμένη φόρμα μπορούν να καθοριστούν η μαγνητική διαπερατότητα (*Magnetic Susceptibility of Class*) ή κάποια άλλη ιδιότητα (*Other Property*) που χαρακτηρίζει την κάθε κατηγορία τεμαχιδίων, ενώ υπάρχει κι η δυνατότητα για να καθοριστούν λεπτομέρειες του μοντέλου αποδέσμευσης (*Specify Liberation Model Data*), όμως στην παρούσα προσομοίωση δε θα αξιοποιηθούν.

Class	Composition	Sp. gr. of class
1	1.0000 0.0000 0.0000 0.0000	4.200
2	0.0000 1.0000 0.0000 0.0000	4.000
3	0.0000 0.0000 1.0000 0.0000	5.100
4	0.0000 0.0000 0.0000 1.0000	3.000

Σχήμα 4.2: Συμπληρωμένη φόρμα των κατηγοριών ποιότητας.

4.1.3. Ορισμός των Δεδομένων στις Ροές Τροφοδοσίας

Οποιαδήποτε ροή τροφοδοσίας (*Feed Stream*), απαιτείται να καθοριστεί πλήρως, χρησιμοποιώντας πληροφορίες που αφορούν την παροχή, τη σύνθεση και την κοκκομετρική κατανομή της. Οι ροές τροφοδοσίας που σχεδιάζονται, στο περιβάλλον του λογισμικού, διατίθενται στη φόρμα των δεδομένων των συστήματος κι επιλέγοντας κάποια, εμφανίζεται μια νέα φόρμα (Σχήμα 4.3), με πεδία συμπλήρωσης:

Stream: εμφανίζεται ο αριθμός του ρεύματος που αντιστοιχεί μέσα στο διάγραμμα ροής, ενώ προαιρετικά επισυνάπτεται κι ένα περιγραφικό όνομα (*Stream Name*).

Ορίζεται μία ροή αρχικής τροφοδοσίας (βλ. Σχήμα 4.1), με όνομα *Feed-ROM* (*Run of Mine*).

Number of Mesh Sizes in Your Data: καθορίζεται το πλήθος των κοκκομετρικών μεγεθών, τα οποία είναι διαθέσιμα στα δεδομένα κοκκομετρίας, για τη συγκεκριμένη ροή. Ο αριθμός αυτός δεν πρέπει να ταυτίζεται κατ' ανάγκη με τον αριθμό που καθορίστηκε στα δεδομένα του συστήματος.

Συμπληρώνεται η τιμή 11, με βάση τον Πίνακα 4.1.

Mesh Size: συμπληρώνονται τα κοκκομετρικά μεγέθη που καθορίζουν την κατανομή.

% Passing: συμπληρώνεται η αθροιστική κατανομή του μεγέθους, ως επί τοις εκατό διερχόμενο από το αντίστοιχο μέγεθος.

Units of Size: καθορίζεται μία από τις διαθέσιμες μονάδες μέτρησης.

Επιλέγεται το m (μέτρο).

Use Rosin-Rammler Distribution: εάν η κατανομή μεγέθους είναι άγνωστη, ελέγχοντας αυτή την επιλογή, εμφανίζονται οι παράμετροι D63.2 και Lambda της κατανομής Rosin-Rammler, οι οποίες με συμπλήρωσή τους υπολογίζουν την κατανομή του μεγέθους αυτόματα.

Στην παρούσα προσομοίωση, η κοκκομετρική κατανομή υπολογίστηκε με βάση την κατανομή Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS¹⁵) για $P_{100} = 0.6$ m και συντελεστή ομοιομορφίας κατανομής $m = 0.25$, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Εκτιμώμενη κοκκομετρική κατανομή της τροφοδοσίας του εργοστασίου.

a/a	Μέγεθος (m)	Διερχόμενο	a/a	Μέγεθος (m)	Διερχόμενο
1	0.6	$(0.6/0.6)^{0.25} = 1$	7	0.075	$(0.075/0.6)^{0.25} = 0.5946$
2	0.425	$(0.425/0.6)^{0.25} = 0.9174$	8	0.053	$(0.053/0.6)^{0.25} = 0.5452$
3	0.3	$(0.3/0.6)^{0.25} = 0.8409$	9	0.045	$(0.045/0.6)^{0.25} = 0.5233$
4	0.212	$(0.212/0.6)^{0.25} = 0.7710$	10	0.038	$(0.038/0.6)^{0.25} = 0.5017$
5	0.15	$(0.15/0.6)^{0.25} = 0.7071$	11	0.025	$(0.025/0.6)^{0.25} = 0.4518$
6	0.106	$(0.106/0.6)^{0.25} = 0.6483$			

¹⁵ Περιγράφει την κατανομή του βάρους κατά μέγεθος (Σταμπολιάδης, 2008b) κι υπολογίζεται, ως:

$$P = (x/k)^m \text{ όπου,}$$

P: το ποσοστό (%) του αθροιστικώς διερχόμενου βάρους από το μέγεθος x,

k: το μέγιστο μέγεθος κόκκου, και

m: σταθερά της κατανομής του μεγέθους, που είναι αδιάστατος θετικός ρητός αριθμός.

Feed Rate και Units of Feed Rate: εισάγεται η παροχή της τροφοδοσίας των στερεών της συγκεκριμένης ροής, επιλέγοντας την κατάλληλη διαθέσιμη μονάδα μέτρησης.

Με βάση τα δεδομένα της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή 85 σε tonnes/hr.

Percent Solids: εισάγεται το ποσοστό των στερεών της συγκεκριμένης ροής.

Θεωρήθηκε μέση υγρασία μεταλλεύματος 7% και στο συγκεκριμένο πεδίο συμπληρώθηκε η τιμή 93.

Particle-size distribution and feed rate in feed streams

File

Mesh size	% Passing
Infinity	100.00
4.250E-1	91.74
3.000E-1	84.09
2.120E-1	77.10
1.500E-1	70.71
1.060E-1	64.83
7.500E-2	59.46
5.300E-2	54.52
4.500E-2	52.33
3.800E-2	50.17
2.500E-2	45.18

Stream number 1 Stream name Feed-ROM

Number of mesh sizes in your data 11

Units of size
☐ micron ☐ mm ☐ cm ☒ m ☐ inch

☐ Use Rosin-Rammler distribution

Solids feed rate 85 Percent solids 93.00

Units of feed rate
☐ kg/s ☐ Short tons/hr
☒ tonnes/hr ☐ Long tons/hr

Export size distribution

Import size distribution

Specify grade distributions

Specify distribution over S-classes

Cancel Accept

Σχήμα 4.3: Συμπληρωμένη φόρμα κοκκομετρικής κατανομής και παροχής της ροής τροφοδοσίας.

4.1.4. Ορισμός της Κατανομής στις Κατηγορίες Ποιότητας

Η κατανομή στις κατηγορίες ποιότητας, αναφέρεται στην ορυκτολογική σύσταση των στερεών σε κάθε ροή τροφοδοσίας, καθώς αυτή μπορεί να διαφοροποιείται από μέγεθος σε μέγεθος των τεμαχιδίων. Για τον καθορισμό της κατανομής στις κατηγορίες ποιότητας, επιλέγεται η *Specify Grade Distributions*, η οποία εμφανίζεται στη φόρμα των δεδομένων της αναφερόμενης ροής τροφοδοσίας (βλ. Σχήμα 4.3). Τα πεδία συμπλήρωσης, της νέας φόρμας που ανοίγει το λογισμικό (Σχήμα 4.4), είναι:

Mass Fraction: συμπληρώνονται τα κατά βάρος κλάσματα, τα οποία αντιστοιχούν στην εκάστοτε κατηγορία ποιότητας, σε σχέση με το συνολικό βάρος των στερεών του επιλεγμένου εύρους μεγέθους τεμαχιδίων.

Με βάση τις απαιτούμενες αναγωγές, που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α-Α.2., συμπληρώνονται κατά αντιστοιχία 0.068733 για τον χαλκοπυρίτη, 0.038597 για τον σφαλερίτη, 0.53577 για τον σιδηροπυρίτη και 0.3569 για το στείρο. Το άθροισμα αυτών των τιμών, απαιτείται να γίνεται ίσο με τη μονάδα (1) ή ποσοστιαία να αθροίζεται στο 100 %.

Size Range: η κατανομή των κατηγοριών ποιότητας καθορίζεται για συγκεκριμένα εύρη μεγεθών, σε συνεχή διαστήματα, καθώς τα μικρότερα τεμαχίδια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποδέσμευση, σε σχέση με τα μεγαλύτερα.

Η κατανομή που επιλέχθηκε, καλύπτει όλο το εύρος μεγέθους, από μηδέν (0) έως και το μέγιστο μέγεθος τεμαχιδίου (0.6 m), που συμπληρώθηκε στη φόρμα των δεδομένων του συστήματος (βλ. Σχήμα 4.1).

Η συγκεκριμένη φόρμα δίνει, επίσης, τη δυνατότητα εισαγωγής των δεδομένων της κατανομής, από εξωτερικό αρχείο ASCII, με την επιλογή *Import Data from File* (βλ. Σχήμα 4.4), στην περίπτωση που το φάσμα αποδέσμευσης του υλικού στη συγκεκριμένη ροή έχει προσδιοριστεί με την τεχνική της ανάλυσης εικόνας (*Image Analysis*), για δεδομένο πλήθος μεγεθών. Λόγω απουσίας τέτοιων δεδομένων, η συγκεκριμένη επιλογή παραλείπεται.

Σχήμα 4.4: Συμπληρωμένη φόρμα της κατανομής των κατηγοριών ποιότητας.

4.1.5. Επιλογή των Δεδομένων Εξόδου του Λογισμικού

Σε αυτό το στάδιο γίνεται επιλογή των δεδομένων που είναι επιθυμητά να υπολογιστούν από το λογισμικό, ενώ καθορίζονται οι μονάδες μέτρησής τους καθώς κι η ανάλυση σε ορυκτό ή χημικό στοιχείο, στις ετικέτες (*Flyouts*) και στα αρχεία ιδιοτήτων (*Stream Properties*) των ρευμάτων.

Από το *Menu: Edit Menu>Edit Output Format*, τα πεδία των δεδομένων αυτής της φόρμας (Σχήμα 4.5), που απαιτούνται να επιλεγθούν και να συμπληρωθούν είναι:

Select Quantities to Display: επιλέγονται οι ποσότητες που ενδιαφέρουν την προσομοίωση, όπως η παροχή των στερεών (*Solids Flowrate*), η παροχή του νερού (*Water Flowrate*), η ποσοστιαία (%) παροχή των στερεών (*% Solids*), η αναλογία του συμπυκνώματος κάθε μονάδας ως προς την αρχική τροφοδοσία (*Yield of Total Solids*), όπως επίσης η ανάκτηση κι η ανάλυση των συμμετεχόντων ορυκτών (*Recovery and Grade of Individual Minerals*) και στοιχείων (*Recovery and Grade of Individual Metals*).

Ελέγχονται, όλες οι διαθέσιμες επιλογές.

Units for Solid Flowrate, Units for Water Flowrate και Units for Metal Content: καθορίζονται μία από τις διαθέσιμες μονάδες μέτρησης, κατά αντιστοιχία.

Για τις παροχές στερεών και νερού επιλέγονται tonnes/hr, ενώ οι αναλύσεις θα εκφράζονται ποσοστιαία (%).

Metals or Elements: συμπληρώνονται οι περιεκτικότητες των χημικών στοιχείων, που απαντώνται σε κάθε ορυκτό κατά αντιστοιχία.

Με βάση τη χημική σύνθεση και την ποσοστιαία κατανομή των χημικών στοιχείων των κύριων ορυκτών, που παρατίθενται στο *Παράρτημα Α-Α.1.*, συμπληρώνονται κατά αντιστοιχία 0.34625 Cu και 0.30435 Fe στον χαλκοπυρίτη, 0.67103 Zn στον σφαλερίτη και 0.46546 Fe στον σιδηροπυρίτη, ενώ για το στείρο ορίζεται η περιεκτικότητα του χαλαζία, η οποία είναι 0.13005.

Specify the format for the output file for job CORMIDOM Cu-Zn Mineral Processing Plant

File

Select quantities to display

☒ Solids flowrate ☒ Water flowrate ☒ Recovery and grade of individual minerals

☒ % solids ☒ Yield of total solids ☒ Recovery and grade of individual metals

Data set

☒ New

☐ Current

☐ Default

Units for solid flowrate

☐ kg/s ☒ tonnes/hr ☐ ktonnes/month

☐ Mtonnes/year ☐ short tons/hr ☐ short tons/day

Units for water flowrate

☐ kg/s ☒ tonnes/hr ☐ cub m/hr

☐ liters/min ☐ gal/min

Units for metal content

☒ %

☐ g/t

☐ Display size distributions of selected streams

☐ Accumulate data from selected streams

Double click to select streams

Selected streams

Size Accumulate

1 Feed-ROM

2 Jaw Crusher Product

3 Screen Feed

5 Cone Crusher Product

6 Screen Undersize

7 CRUSHED MATERIAL with P80

8 Fresh Feed per Hour

Metals or elements

	Cu	Zn	Fe	SiO2
Minerals				
Chalcopyrite	0.34625	0	0.30435	0
Sphalerite	0	0.67103	0	0
Pyrite	0	0	0.46546	0
Gangue	0	0	0	0.13005

☐ Use format for coal data

☐ Display latest output data

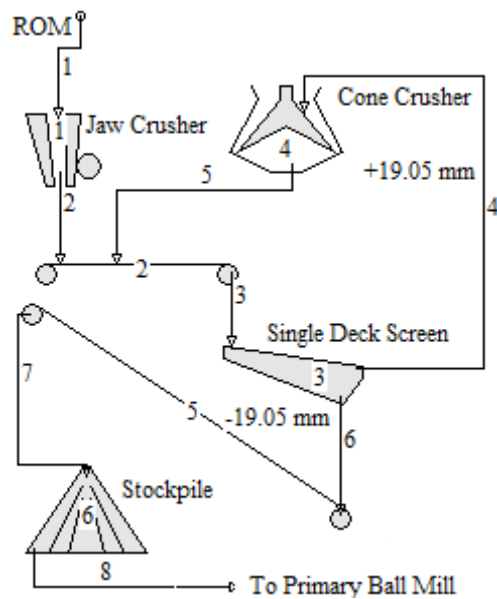
Cancel Accept

Σχήμα 4.5: Συμπληρωμένη φόρμα των δεδομένων εξόδου.

4.1.6. Ορισμός της Διαθέσιμης Κοκκομετρικής Κατανομής

Με βάση την εισαγωγική περιγραφή, του εργοστασίου εμπλουτισμού του θειούχου μεταλλεύματος, που έγινε στο υπό-κεφάλαιο 3.4. *Περιγραφή των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας*, η διαθέσιμη κοκκομετρική κατανομή (Πίνακας 4.2), που παραχωρήθηκε από την εταιρεία CORMIDOM, αφορά το προϊόν του κυκλώματος θραύσης-κοσκίνισης (Σχήμα 4.6).

Σε αυτό το κύκλωμα γίνεται μια αρχική προπαρασκευή του εξορυγμένου μεταλλεύματος. Σκοπός του είναι να προετοιμάσει μια νέα τροφοδοσία, η οποία θα αποτελείται από τεμαχίδια που θα έχουν πιο διαχειρίσιμα μεγέθη για μεταφορά και θα εξυπηρετούν τις διεργασίες του επόμενου κυκλώματος. Η πρωτογενής θραύση του



Σχήμα 4.6: Κύκλωμα προπαρασκευής εξορυγμένου μεταλλεύματος.

μεταλλεύματος ακολουθείται από ταξινόμηση. Στο παραμένον μετάλλευμα, επί του ταξινομητή, λαμβάνει χώρα δευτερογενής θραύση, ενώ το διερχόμενο από τον ταξινομητή αποτελεί το τελικό προϊόν αυτού του κυκλώματος.

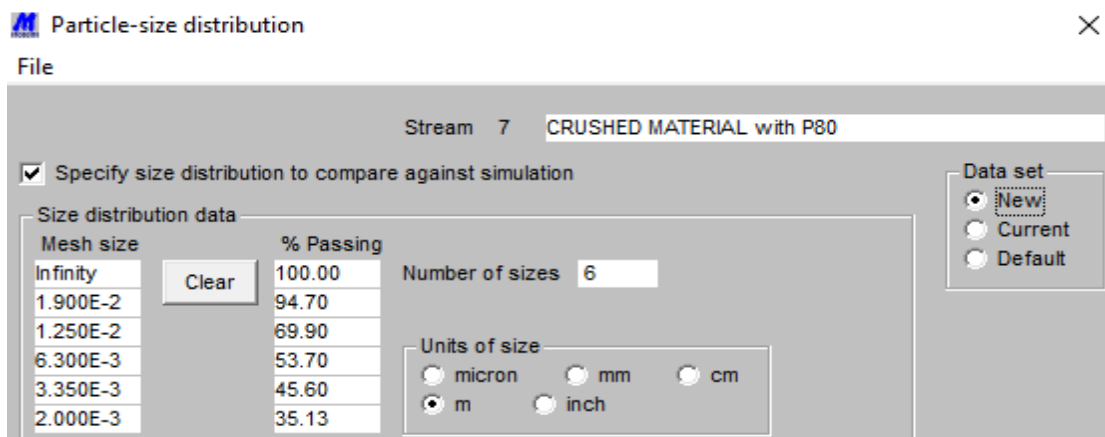
Αυτό το προϊόν στοιβάζεται σε σωρούς (*Stockpiles*) κι αποτελεί την πρωτογενή τροφοδοσία, που εισέρχεται σε όλο το υπόλοιπο εργοστάσιο, με την εισαγωγή της στον πρωτογενή σφαιρόμυλο.

Η εισαγωγή του μεγέθους και του διερχόμενου ποσοστού, γίνεται από τη φόρμα των δεδομένων του συστήματος με διπλό κλικ στην έβδομη ροή (*Internal and Product Streams*->*CRUSHED MATERIAL with P₈₀*, (βλ. Σχήμα 4.1). Σε αυτήν τη φόρμα, που

ανοίγει το λογισμικό, συμπληρώνεται το περιγραφικό όνομα της ροής, ελέγχεται η επιλογή *Specify Size Distribution to Compare Against Simulation*, εισάγεται η τιμή έξι (6) για το πλήθος των μεγεθών στο πεδίο *Number of Sizes*, επιλέγεται η διαθέσιμη μονάδα μέτρησης, που είναι το m κι εισάγονται τα δεδομένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.

Πίνακας 4.2: Κοκκομετρική κατανομή πρωτογενούς τροφοδοσίας του πρωτογενή σφαιρόμυλου (Δεδομένα CORMIDOM S.A.S., 2023).

Mesh (in)	Μέγεθος (μm)	Μάζα (g)	Παραμένον (%)	Διερχόμενο (%)
1	25000	0	0	100
3/4	19000	106	5.3	94.7
1/2	125000	496	24.8	69.9
1/4	6300	324	16.2	53.7
6	3350	162	8.1	45.6
10	2000	209	10.5	35.2
-10	-2000	703	35.2	0
Σύνολο		2000		$\overline{P_{80}} = 14.8 \text{ mm}$



Σχήμα 4.7: Συμπληρωμένη φόρμα κοκκομετρικής κατανομής της πρωτογενούς τροφοδοσίας του πρωτογενή σφαιρόμυλου στο έβδομο ρεύμα του διαγράμματος ροής.

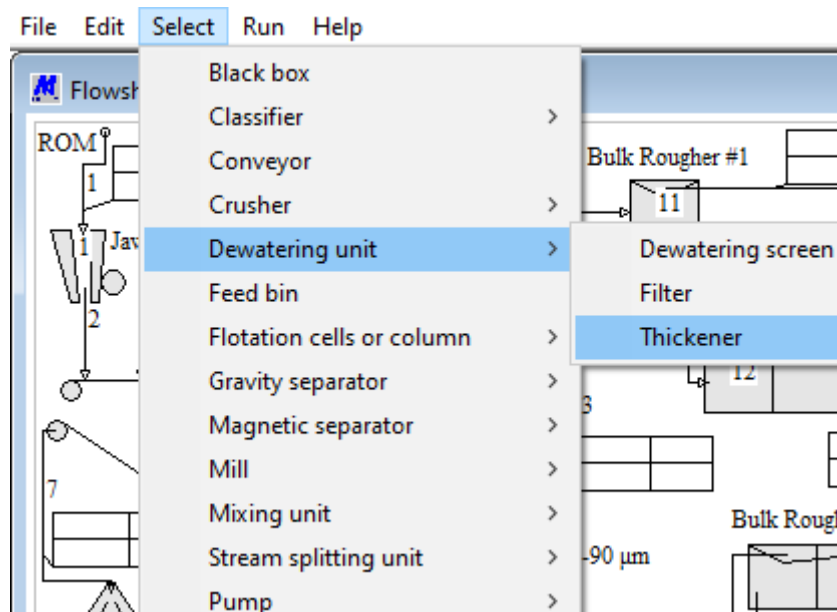
4.2. Σχεδιασμός Εργοστασίου και Μοντελοποίηση των Μονάδων

Ο σχεδιασμός του εργοστασίου εμπλουτισμού, του θειούχου μεταλλεύματος, γίνεται με την εισαγωγή-διάταξη των επιθυμητών λειτουργικών μονάδων επεξεργασίας και τη σύνδεσή τους με ρεύματα, που θα αποτελούν τις ροές του διαγράμματος. Το διάγραμμα ροής που σχεδιάστηκε, έγινε με βάση τα διαγράμματα ροής και των πληροφοριών τους, που παραχώρησε η εταιρεία CORMIDOM (βλ. Παράρτημα Β).

Επίσης, αυτό το μέρος αποτελείται από τα δεδομένα που κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων μεταβάλλονται τακτικά και σχετίζονται με όλες εκείνες τις λειτουργικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την κάθε μονάδα επεξεργασίας που παρίσταται στο διάγραμμα ροής (King, 2000).

4.2.1. Εισαγωγή των Μονάδων και Σχεδιασμός των Ρευμάτων

Η κατασκευή κι επεξεργασία του διαγράμματος ροής γίνεται από το *Menu: Edit Menu>Edit Flowsheet*, στο οποίο αρχικά είχε σχεδιαστεί μόνο η ροή τροφοδοσίας (*Feed Stream*), ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή των δεδομένων του συστήματος και του εργοστασίου, όπως παρουσιάστηκε στο υπό-κεφάλαιο 4.1. *Εισαγωγή των Δεδομένων*. Η εισαγωγή των μονάδων γίνεται από το *Flowsheet Editor Menu: Select Menu* επιλέγοντας αρχικά, από τον αναπτυσσόμενο κατάλογο, την επιθυμητή διεργασία και κατόπιν τη σχετιζόμενη απεικόνιση, που χρειάζεται να εισαχθεί (π.χ. *Flowsheet Editor Menu: Select Menu>Dewatering Unit>Thickener*, βλ. Σχήμα 4.8). Παράλληλα, με την εισαγωγή των μονάδων στην επιφάνεια εργασίας, γίνεται κι η επιθυμητή διάταξη των μονάδων από το *Flowsheet Editor Menu: Edit Menu>Move* (ή Ctrl+M) και προστίθενται επεξηγήσεις στο διάγραμμα ροής από το *Flowsheet Editor Menu: Edit Menu>Annotate*.



Σχήμα 4.8: Το μενού επιλογής (Select Menu) των διαθέσιμων διεργασιών του Flowsheet Editor. Σε αυτό απεικονίζεται η επιλογή της λειτουργικής μονάδας ενός παχυντή, για τη διεργασία της αφυδάτωσης.

Η σύνδεση των μονάδων γίνεται, με το σχεδιασμό των ρευμάτων, από το *Flowsheet Editor Menu: Edit Menu > Rectangular Cursor* και στα ρεύματα αυτά τοποθετούνται οι ετικέτες από το *Flowsheet Editor Menu: Edit Menu > Add Stream Flyout*.

Στο Σχήμα 4.9, παρουσιάζεται ολόκληρο το διάγραμμα ροής του εργοστασίου εμπλουτισμού του θείουχου μεταλλεύματος. Το συγκεκριμένο διάγραμμα ροής χωρίζεται σε εννέα (9) διαδοχικά κυκλώματα (Circuits). Διακρίνονται:

- ❖ Κύκλωμα θραύσης-κοσκίνισης, το οποίο περιλαμβάνει έναν (1) σπαστήρα σιαγόνων, δύο (2) ταινοδρόμους, ένα (1) κόσκινο μονού καταστρώματος, έναν (1) κωνικό σπαστήρα και τον σωρό του θραυσμένου μεταλλεύματος,
- ❖ Κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης I, το οποίο περιλαμβάνει τον πρωτογενή σφαιρόμυλο και τον πρώτο υδροκυκλώνα,
- ❖ Κύκλωμα επίπλευσης I, το οποίο περιλαμβάνει ένα (1) κελί και δύο (2) συστοιχίες επίπλευσης,
- ❖ Κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης II, το οποίο περιλαμβάνει τον δευτερογενή σφαιρόμυλο και τον δεύτερο υδροκυκλώνα,
- ❖ Κύκλωμα επίπλευσης II, το οποίο περιλαμβάνει τέσσερις (4) συστοιχίες επίπλευσης,
- ❖ Κύκλωμα επίπλευσης III, το οποίο περιλαμβάνει μία (1) στήλη και δύο (2) συστοιχίες επίπλευσης, και
- ❖ Τρία (3) κυκλώματα αφυδάτωσης, τα οποία περιλαμβάνουν το καθένα από έναν (1) παχυντή/πυκνωτή κι από μία (1) μηχανή διήθησης.

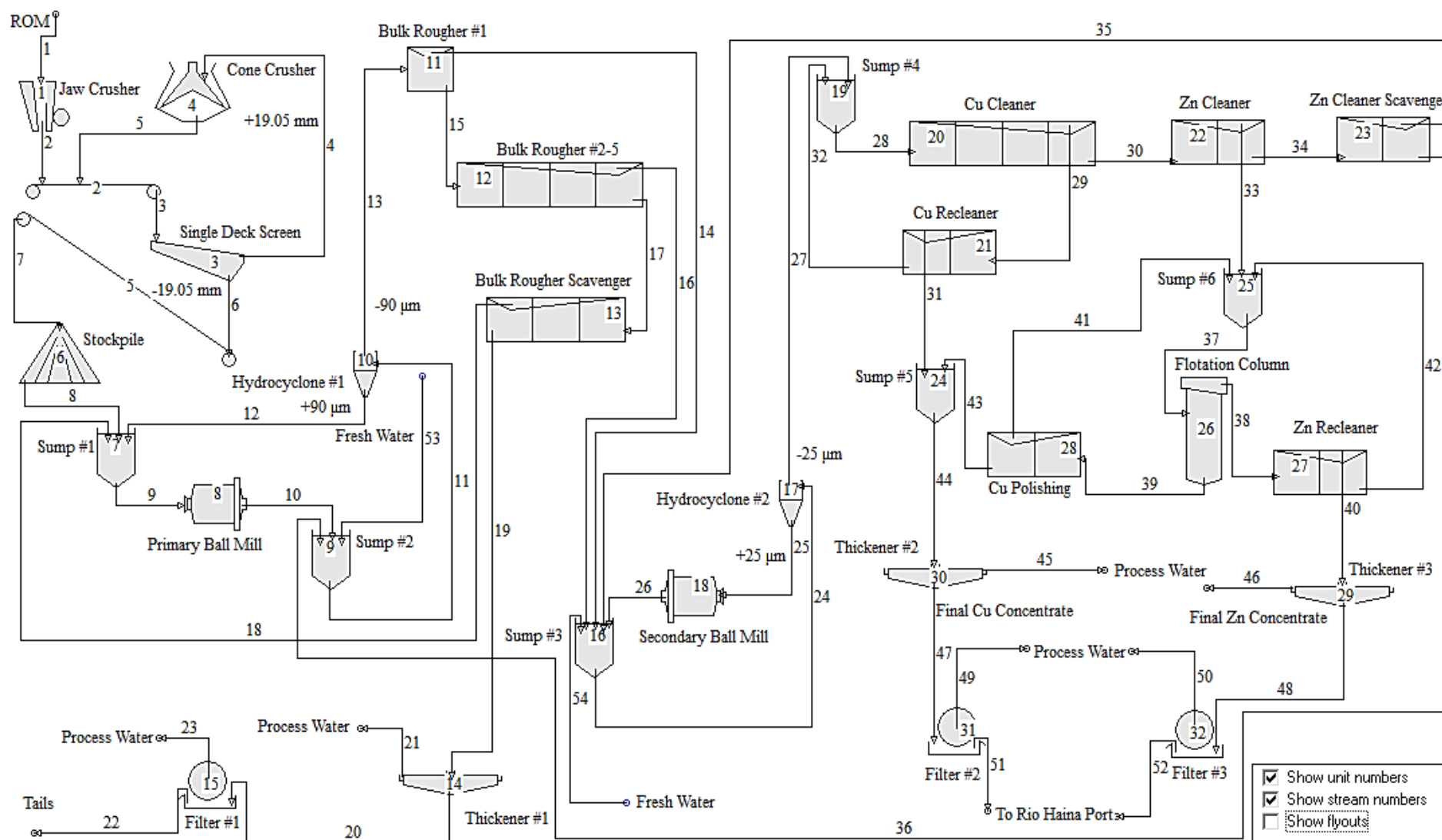
Επίσης, στο διάγραμμα ροής περιλαμβάνονται συνολικά έξι (6) δεξαμενές, οι οποίες εξυπηρετούν στην ένωση ή/και στην αραίωση των ροών, πριν την εισαγωγή τους σε κάποια λειτουργική μονάδα.

Η σειρά, με την οποία πραγματοποιούνται οι διεργασίες και διακινείται το μετάλλευμα μέσα στο διάγραμμα ροής, γίνεται με την εμφανιζόμενη αύξουσα αρίθμηση του Σχήμα 4.9.

4.2.2. Επιλογή και Μοντελοποίηση των Λειτουργικών Μονάδων

Η βιβλιοθήκη του MOSDIM™, περιέχει ένα πλήθος μοντέλων, τα οποία μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια τη λειτουργία οποιασδήποτε μονάδας, ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή και τα διαθέσιμα δεδομένα. Αυτά τα μοντέλα, απαιτούν τη συμπλήρωση των διαθέσιμων δεδομένων, στα οποία το λογισμικό έχει ήδη προκαθορισμένες τιμές (*Default Data*). Η πρόσβαση στα μοντέλα των μονάδων, γίνεται από το *Menu: Edit Menu>Edit Model Parameter Data* (βλ. Σχήμα 4.10).

Οι ακόλουθες μοντελοποιήσεις, γίνονται με την επιλογή ενός μοντέλου για κάθε μονάδα και στηρίζονται στις διαθέσιμες πληροφορίες της εταιρείας CORMIDOM, αλλά και σε βιβλιογραφικές πηγές. Ο Πίνακας 4.3, παρουσιάζει τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα για κάθε μονάδα. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται κι η επιλογή του μοντέλου, η οποία βασίστηκε στο γεγονός του προσδιορισμού των λιγότερων δυνατών λειτουργικών παραμέτρων.



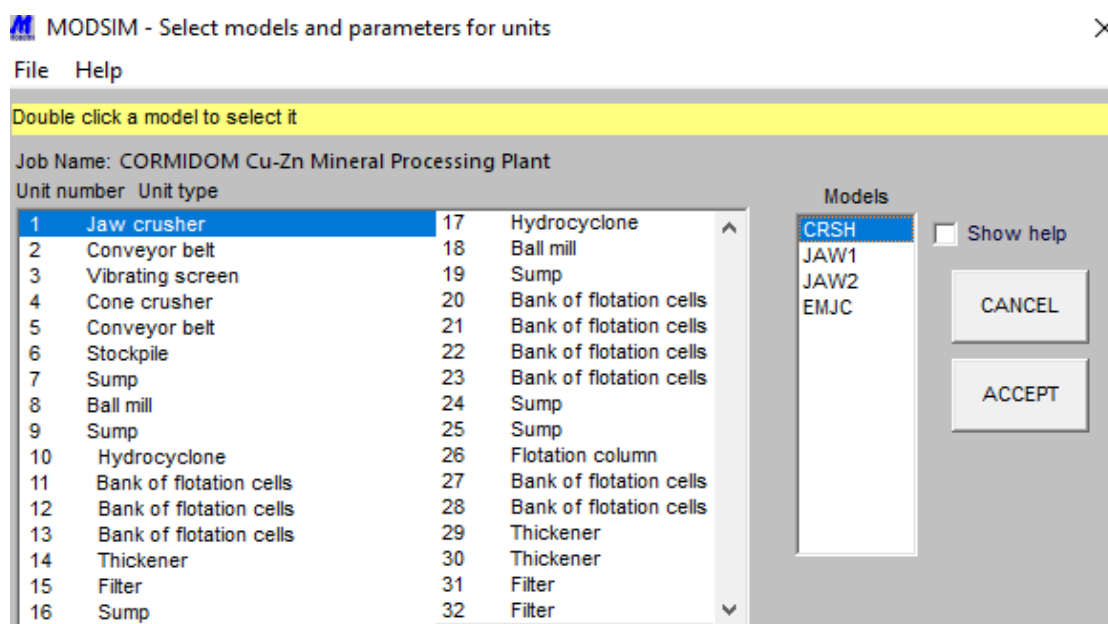
Σχήμα 4.9: Αναπαράσταση του διαγράμματος ροής του εργοστασίου εμπλουτισμού Cu-Zn, της εταιρείας CORMIDOM, στο περιβάλλον του MODSIM™.

Πίνακας 4.3: Μοντέλα μονάδων που διατίθενται στη βιβλιοθήκη MODSIM™ κι εξυπηρετούν την παρούσα προσομοίωση (King, 2000).

Μονάδα	Διαθέσιμο Μοντέλο	Σύντομη Περιγραφή	Επιλογή
Σιαγονωτός	CRSH	Τυπικό μοντέλο ενός σπαστήρα	CRSH
	EMJC	Εμπειρικό μοντέλο για σιαγονωτούς και κωνικούς σπαστήρες	
	JAW1-JAW2	Απλό μοντέλο σιαγονωτού σπαστήρα	
Ταινιόδρομος	CONV	Μοντέλο μεταφοράς υλικού	MIXR
	MIXR	Μοντέλο ανάμιξης	
Κόσκινο	CYCB	Γενικό εμπειρικό μοντέλο για ταξινομητή	SCRN
	CSCR	Τυπικό μοντέλο ενός κοσκίνου	
	KSCN	Απλό κινητικό μοντέλο κοσκίνισης	
	PSCN	Κόσκινο πιθανοτήτων	
	SCRN	Απλό ιδανικό μοντέλο κοσκίνισης	
	SCR1	Μοντέλο ξηρής κοσκίνισης κατά Rogers	
	SCR2	Μοντέλο κοσκίνου μονού καταστρώματος κατά Karra	
Κωνικός	CRSH	Τυπικό μοντέλο ενός σπαστήρα	SHHD
	CRS1	Μοντέλο κωνικού σπαστήρα Symons	
	SHHD	Μοντέλο για κωνικό σπαστήρα τύπου short-head	
Σφαιρόμυλος	GMIL	Μοντέλο σφαιρόμυλου με ορυκτολογική αποδέσμευση	HFMI
	GMI1	Μοντέλο σφαιρόμυλου κατά Austin χρησιμοποιώντας τρία (3) τέλεια αναμιγμένα δείγματα στη σειρά, με γνωστούς τους χρόνους παραμονής στον μύλο (hold up/residence time)	
	GMSU	Μοντέλο σφαιρόμυλου κατά Austin με μεγέθυνση (scale up)	
	HFMI	Μοντέλο σφαιρόμυλου κατά Herbst-Fuerstenau	
	HFML	Μοντέλο σφαιρόμυλου κατά Herbst-Fuerstenau με αποδέσμευση	
	HFSU	Μοντέλο σφαιρόμυλου κατά Herbst-Fuerstenau με μεγέθυνση (scale up)	
	MILL	Απλό μοντέλο σφαιρόμυλου κατά Austin	
	UMIL	Μοντέλο σφαιρόμυλου κατά Austin χρησιμοποιώντας τρία (3) αναμιγμένα δείγματα στη σειρά, στο οποίο ορίζονται οι παράμετροι για το διάγραμμα Andrews-Mika	
Υδροκυκλώνας	CYCA	Γενικό εμπειρικό μοντέλο για ταξινομητή	CYCA
	CYCL	Μοντέλο υδροκυκλώνα κατά Plitt	
	NAGE	Μοντέλο υδροκυκλώνα κατά JKMRC (<i>Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre</i>)	
Κελί/Συστοιχία Επίπλευσης	FLTK	Μοντέλο επίπλευσης κατά King	KLIM
	FLTN	Μοντέλο επίπλευσης κατά Sutherland	

	KLIM	Μοντέλο επίπλευσης κατά Klimpel	
Στήλη	KLIC	Μοντέλο επίπλευσης κατά Klimpel	KLIC
Παχυντής	KYNC	Ιδανικό μοντέλο παχυντή κατά Kynch	THIC
	THIC	Ιδανικό μοντέλο παχυντή	
Μηχανή Διήθησης	FILT	Ιδανικό μοντέλο μηχανής διήθησης	FILT
Δεξαμενές, Σωροί	MIXR	Μοντέλο ανάμιξης	MIXR

Στο Σχήμα 4.10, απεικονίζεται το παράθυρο που περιέχει τις λειτουργικές μονάδες του διαγράμματος ροής του Σχήμα 4.9. Επιλέγοντας κάποια από τις μονάδες, εμφανίζονται και τα διαθέσιμα μοντέλα της (εδώ εμφανίζονται τα μοντέλα του σιαγονωτού σπαστήρα), ενώ ελέγχοντας την επιλογή *Show Help*, το λογισμικό ανοίγει το παράθυρο πληροφοριών του επιλεγμένου μοντέλου (King, 2000).



Σχήμα 4.10: Παράθυρο των επιλεγμένων μονάδων του διαγράμματος ροής, για την πρόσβαση στις φόρμες συμπλήρωσης των επιθυμητών μοντέλων.

4.2.2.1. Μοντελοποίηση Σιαγονωτού Σπαστήρα

Το μοντέλο CRSH, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σιαγονωτούς, γυροσκοπικούς και κωνικούς σπαστήρες κι έχει προκαθορισμένες τιμές τυπικού κωνικού σπαστήρα κατά Symons (King, 2000). Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη ζώνη θραύσης και στη συμπεριφορά της εσωτερικής ταξινόμησης κατά Whiten (Whiten, 1973; Whiten et al., 1973).

Με διπλό κλικ στο CRSH (βλ. Σχήμα 4.10), στη φόρμα των λειτουργικών παραμέτρων του μοντέλου, του Σχήμα 4.11, επιλέγεται η διαθέσιμη επιθυμητή μονάδα μέτρησης, που είναι το m και συμπληρώνεται στο πεδίο ανοίγματος εξόδου (*Closed Side Set-CSS*), η τιμή των 0.075 m, που παραχωρήθηκε από την εταιρεία CORMIDOM. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούν τις προκαθορισμένες τιμές τους και γίνεται αποδοχή (*Accept*) της φόρμας.

MODSIM - Parameter specification for unit 1

File

Units of size

☐ micron ☐ mm ☐ cm ☒ m ☐ inch ☐ feet

Proportion of fines produced during a breakage event K .2

Impact work index of the material kWhr/tonne 12

Proportionality constant between CSS or OSS and d1 - Alpha1 .653

Proportionality constant between CSS or OSS and d2 - Alpha2 1.6

Cancel Accept

Σχήμα 4.11: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου CRSH, για τον σιαγονωτό σπαστήρα.

4.2.2.2. Μοντελοποίηση Κοσκίνου Μονού Καταστρώματος

Το μοντέλο SCRN, έχει προγραμματιστεί για να δέχεται το μέγεθος των οπών/βρογχίδων του πλέγματος, τις διαστάσεις του κοσκίνου και την προσθήκη παροχής νερού στην επιφάνειά του, εάν η κοσκίνιση γίνεται εν υγρώ. Το κλάσμα μάζας (%) του υπό-μεγέθους που παραμένει στο υπέρ-μέγεθος υπολογίζεται συναρτήσει της απόδοσης της κοσκίνισης (King, 2000).

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου SCRN (Σχήμα 4.12), επιλέγεται η διαθέσιμη επιθυμητή μονάδα μέτρησης που είναι το m, συμπληρώνεται η δεδομένη τιμή, της εταιρείας CORMIDOM, των 0.01905 m, στο πεδίο του μεγέθους οπής του πλέγματος (*Mesh Size*) και θεωρείται απόδοση κοσκίνισης (*Transmission Efficiency*) ίση με 85%. Στην επιφάνεια του κοσκίνου δεν παρέχεται ποσότητα νερού και δεν χρησιμοποιείται η επιλογή *Specify Screen Dimensions*, λόγω απουσίας πληροφοριών των διαστάσεων του κοσκίνου και γίνεται αποδοχή της φόρμας.

Specify parameters for model SCRN on unit 3

File

Units of mesh size

☐ mm ☐ cm ☒ m ☐ inch

Mesh size 0.01905

Transmission efficiency % 85

Surface water on screen oversize % 0

Cancel Accept

☐ Specify screen dimensions

Σχήμα 4.12: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου SCRN, για το κόσκινο.

4.2.2.3. Μοντελοποίηση Κωνικού Σπαστήρα

Το μοντέλο SHHD, επιλέχθηκε επειδή ο κωνικός που χρησιμοποιείται από την εταιρεία είναι ίδιου τύπου, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 4.3. Βασίζεται στις ίδιες θεωρήσεις, όπως το μοντέλο CRSH, με τη διαφορά πως οι λειτουργικές παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι κατά Karra (1983) (King, 2000).

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου SHHD (Σχήμα 4.13), επιλέγεται η διαθέσιμη επιθυμητή μονάδα μέτρησης, που είναι το m και συμπληρώνεται στο πεδίο ανοίγματος εξόδου, η τιμή των 0.015 m, που παραχωρήθηκε από την εταιρεία CORMIDOM. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούν τις προκαθορισμένες τιμές τους και γίνεται αποδοχή της φόρμας.

File

Units of size

☐ micron
 ☐ mm
 ☐ cm
☒ m
 ☐ inch
 ☐ feet

Closed-side set .015
 Proportion of fines produced during a breakage event K .2
 Impact work index of the material kWhr/tonne 12
 Alpha1 .653
 Alpha2 2

Cancel Accept

Σχήμα 4.13: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου SHHD, για τον κωνικό σπαστήρα.

4.2.2.4. Μοντελοποίηση Σφαιρόμυλων

Το μοντέλο HFMI, προσομοιάζει ένα απλό μοντέλο πλήρους ανάμιξης για σφαιρόμυλους (*Batch Grinding Process*), το οποίο βασίζεται στις συναρτήσεις επιλογής και θραύσης (King, 2000), για τις οποίες έγινε λόγος στο υπό-κεφάλαιο 2.6. *Περιγραφή της Κατάτμησης σε Μύλους.*

Για τη συμπλήρωση των παραμέτρων, στις φόρμες του μοντέλου HFMI (Σχήμα 4.14 και Σχήμα 4.15), των σφαιρόμυλων, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του Πίνακα 4.4, διότι δεν παραχωρήθηκαν οι συγκεκριμένες πληροφορίες. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, το βασικό κριτήριο για την επιλογή του συνόλου των παραμέτρων, αποτελεί η συνθήκη ο πρωτογενής σφαιρόμυλος να παράγει προϊόν με $P_{80} = 110-130 \mu\text{m}$ κι ο δευτερογενής σφαιρόμυλος να παράγει προϊόν με $P_{80} = 25-30 \mu\text{m}$.

Ο Πίνακας 4.4, δείχνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μελέτη προσομοίωσης της κατάτμησης σιδηρομεταλλεύματος σε κατακόρυφο μύλο (*Vertical Mill*), των Mazzinghy et al. (2015b), με εργαστηριακά αποτελέσματα από σφαιρόμυλο. Αυτή η μελέτη στηρίχθηκε στα μαθηματικά μοντέλα που περιεγράφηκαν στο υπό-κεφάλαιο 2.6. *Περιγραφή της Κατάτμησης σε Μύλους*, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των συναρτήσεων επιλογής και θραύσης.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης των Mazzinghy et al. (2015).

Δείγμα	Συνάρτηση Επιλογής				Συνάρτηση Θραύσης		
	S_1^{E*} (t/kWh)	S_1^E (t/kWh)	ζ_1	ζ_2	γ	β	φ
A	5.11	3.79	0.12	-0.44	1.51	2.35	0.41
B	12.99	9.61	0.63	-0.31	2.50	5.55	0.64
C	5.21	3.86	0.01	-0.40	2.31	2.66	0.84
D	4.81	3.55	1.20	-0.09	0.65	1.73	0.13

Η παράμετρος S_1^{E*} που παρουσιάζεται στα αποτελέσματα του Πίνακα 4.4, υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη παράμετρο S_1^E , με έναν συντελεστή αναγωγής $k = 1.35$, ώστε να γίνει μετατροπή της παραμέτρου που προκύπτει από συμβατικό σφαιρόμυλο σε κατακόρυφο μύλο, καθώς οι κατακόρυφοι μύλοι παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση, συγκρινόμενοι με τους σφαιρόμυλους (Mazzinghy et al., 2014; Mazzinghy et al., 2015a; Mazzinghy et al., 2015b).

Επίσης, παρατηρείται πως στον Πίνακα 4.4, απουσιάζουν δεδομένα της παραμέτρου δ (βλ. Εξίσωση 2.29), γεγονός που σημαίνει ότι οι παράμετροι της συνάρτησης επιλογής δεν εξαρτώνται από το μέγεθος της τροφοδοσίας, κι επομένως

στην παρούσα μοντελοποίηση των δύο (2) σφαιρόμυλων, θα συμπληρωθούν οι ίδιες τιμές των άγνωστων ζητούμενων παραμέτρων.

Το κριτήριο, που ορίστηκε με βάση τα P_{80} στις απορροές των σφαιρόμυλων, ικανοποιείται με προσομοίωση των δεδομένων του δείγματος B (βλ. Πίνακας 4.4), καθώς ο πρωτογενής σφαιρόμυλος στην απορροή του δίνει $P_{80} = 116 \mu\text{m}$ κι ο δευτερογενής σφαιρόμυλος στην απορροή του δίνει $P_{80} = 39.1 \mu\text{m}$.

Επίσης, και στους δύο (2) σφαιρόμυλους συμπληρώνεται η καθαρή ισχύς των μύλων (*Net Power Drawn by Mill Charge*) σε kW, η οποία προκύπτει από τη μετατροπή των ίππων (hp) τους. Με συντελεστή 0.746, για τη μετατροπή των hp σε kW, η ισχύς του πρωτογενή σφαιρόμυλου, που συμπληρώνεται στο Σχήμα 4.14, είναι $0.746 \cdot 1100 \text{ (hp)} = 820.6 \text{ kW}$ κι η ισχύς του δευτερογενή μύλου, που συμπληρώνεται στο Σχήμα 4.15, είναι $0.746 \cdot 800 \text{ (hp)} = 596.8 \text{ kW}$.

Specify parameters for model HFM1 for unit 8

File

Net power drawn by mill charge kW 820.6

Parameters for energy-specific selection function:

Energy-specific selection function at 1mm tonnes/kWhr 9.61

Zeta 1 .63

Zeta 2 -.31

Parameters for breakage function:

Beta 5.55

Gamma 2.5

Delta 0

Phi at 5mm .64

Cancel Accept

Σχήμα 4.14: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου HFM1, για τον πρωτογενή σφαιρόμυλο.

Specify parameters for model HFM1 for unit 18

File

Net power drawn by mill charge kW 596.8

Parameters for energy-specific selection function:

Energy-specific selection function at 1mm tonnes/kWhr 9.61

Zeta 1 .63

Zeta 2 -.31

Parameters for breakage function:

Beta 5.55

Gamma 2.5

Delta 0

Phi at 5mm .64

Cancel Accept

Σχήμα 4.15: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου HFM1, για τον δευτερογενή σφαιρόμυλο.

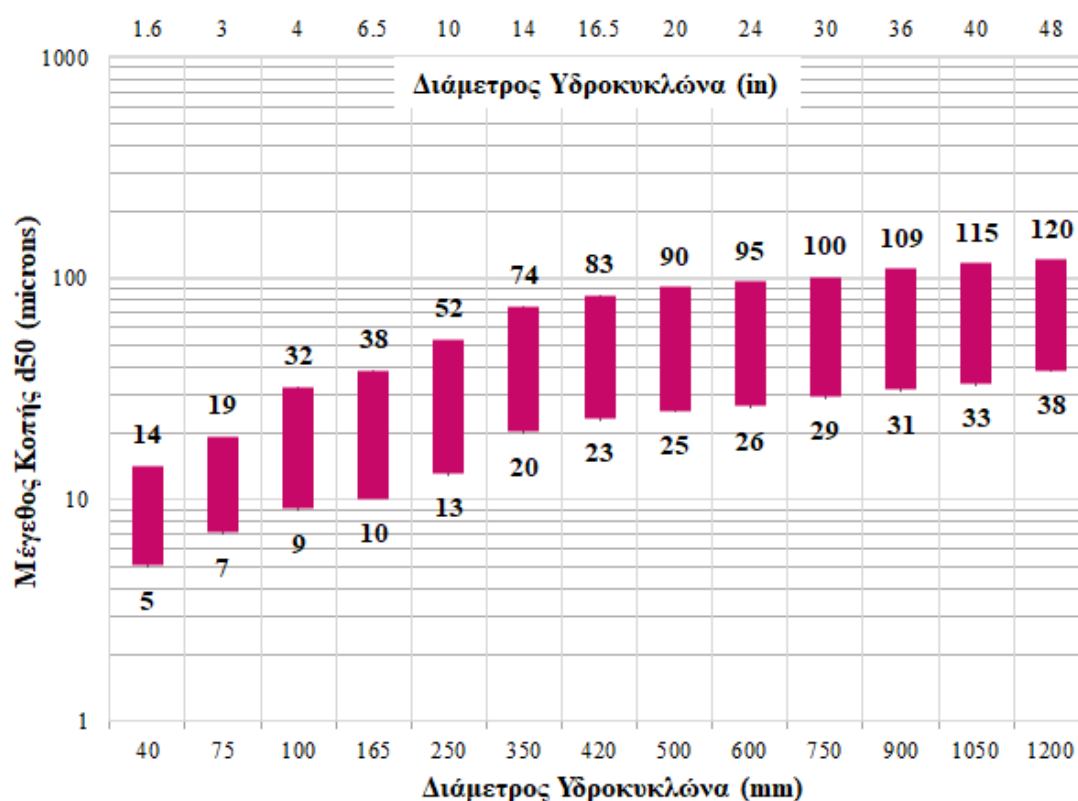
4.2.2.5. Μοντελοποίηση Υδροκυκλώνων¹⁶

Το μοντέλο CYCA, βασίζεται στο εμπειρικό μοντέλο για ταξινομητές, όπως περιγράφεται από τους Austin et al. (1984). Η καμπύλη της κατανομής στο χονδρό προϊόν, μπορεί να υπολογιστεί είτε με το μοντέλο του Lynch (*Exponential Sum*), είτε με τη συνάρτηση Rosin-Rammler, είτε με τη λογιστική συνάρτηση (*Logistic Function*). Σε αυτό το μοντέλο, μπορούν να οριστούν η οξύτητα διαχωρισμού και το κλάσμα μάζας των λεπτών τεμαχιδίων που πηγαίνουν στην απορροή του υδροκυκλώνα (King, 2000).

¹⁶ Στην πραγματικότητα ο πρώτος υδροκυκλώνας είναι μια συστοιχία δύο (2) υδροκυκλώνων με 20 in (D) κι ο δεύτερος υδροκυκλώνας είναι μια συστοιχία οκτώ (8) υδροκυκλώνων με 6 in (D) (βλ. Παράρτημα Β). Κατά τον σχεδιασμό στο λογισμικό (βλ. Σχήμα 4.9), επιλέχθηκε να εισαχθεί από μία (1) λειτουργική μονάδα, που θα αντιπροσωπεύει την αντίστοιχη συστοιχία, για εξοικονόμηση χώρου στο διάγραμμα ροής κι επειδή δεν υπάρχει επιλογή εισαγωγής συστοιχίας, οπότε πρέπει να προηγηθεί μονάδα διαχωριστή (*Splitter*).

Επίσης, εάν η λειτουργική μονάδα που πρόκειται να μοντελοποιηθεί εξαρτάται από την τερματική ταχύτητα καθίζησης (*Terminal Settling Velocity*), τότε υπάρχει η δυνατότητα της ταξινόμησης συναρτήσει της πυκνότητας των τεμαχιδίων. Αυτή η ταξινόμηση μοντελοποιείται με μια εκθετική συνάρτηση, της οποίας η ζητούμενη παράμετρος είναι ο εκθέτης και δέχεται τιμές από 0.5 έως 1 αποκλειστικά, οι οποίες σχετίζονται με τον συντελεστή οπισθέλκουσας των τεμαχιδίων (*Particle Drag Coefficient*). Η τιμή 0.5 αντιστοιχεί στο νόμο του Stokes, ενώ η τιμή 1 στο νόμο του Newton (King, 2000; King, 2001).

Με βάση το νομόγραμμα του Σχήμα 4.16, για τον πρώτο υδροκυκλώνα διαμέτρου 20 in, επιλέγεται μέγεθος κοπής (*Cut Size*), η μέγιστη τιμή του απεικονιζόμενου εύρους, που είναι 90 μm , ενώ για τον δεύτερο υδροκυκλώνα διαμέτρου 6 in, επειδή απουσιάζει το εύρος για τη συγκεκριμένη διάμετρο, εκτιμάται μια μέση τιμή¹⁷, μεταξύ των ευρών που αντιστοιχούν στις 4 in κι 6.5 in. Επομένως, το μέγεθος κοπής για τον υδροκυκλώνα των 6 in, ορίζεται στα 25 μm .



Σχήμα 4.16: Τροποποιημένο νομόγραμμα επιλογής μεγέθους υδροκυκλώνων με βάση τη μέθοδο της Metso¹⁸ (Metso Limited, 2011).

Στις ακόλουθες φόρμες συμπλήρωσης του μοντέλου CYCA (Σχήμα 4.17 και Σχήμα 4.18), επιλέγεται η διαθέσιμη μονάδα μέτρησης που είναι τα microns κι όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά διατηρούν τις προκαθορισμένες τιμές κι επιλογές τους.

¹⁷ Για το εύρος των 4 in: $(9 + 32)/2 = 20.5 \mu\text{m}$ και για το εύρος των 6.5 in: $(10 + 38)/2 = 24 \mu\text{m}$. Επομένως, $(20.5 + 24)/2 = 22.25 \mu\text{m}$ το οποίο ανάγεται χονδρικά στα 25 μm .

¹⁸ Για αναλυτικές πληροφορίες Metso Limited (2011, pp. 4:8-4:9).

Επίσης, σε καμία φόρμα δεν χρησιμοποιείται η επιλογή της μεταβολής του σημείου κοπής d_{50} με τη πυκνότητα των τεμαχιδίων και γίνεται αποδοχή των φορμών.

Σχήμα 4.17: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου CYCA, για τον πρώτο υδροκυκλώνα.

Σχήμα 4.18: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου CYCA, για τον δεύτερο υδροκυκλώνα.

4.2.2.6. Μοντελοποίηση Κελιού, Συστοιχιών και Στήλης Επίπλευσης

Τα μοντέλα KLIM και KLIC βασίζονται στη θεώρηση πως κάθε τύπος τεμαχιδίων, αποτελείται από ένα επιπλεύσιμο κι ένα μη επιπλεύσιμο μέρος, κι επομένως δε γίνεται να ανακτηθεί όλη η χρήσιμη ποσότητα, ανεξάρτητα από τον χρόνο παραμονής της, στο περιβάλλον της επίπλευσης (King, 2000). Αυτό σημαίνει ότι, κάθε τύπος τεμαχιδίων έχει μια μέγιστη ανάκτηση, η οποία είναι μικρότερη από 100 % (Gül & Aydın, 2021) και κατ' επέκταση, το επιπλεύσιμο μέρος ανακτάται με ρυθμό ανάλογο της ποσότητάς του στο κελί επίπλευσης (King, 2000).

Επίσης, αυτά τα μοντέλα, δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της επιφάνειας των φυσαλίδων και τα χαρακτηριστικά της φάσης του αφρού, όπως επίσης την επίδραση του μεγέθους των τεμαχιδίων. Επιπλέον, τα μοντέλα δεν είναι ικανά να περιγράψουν τη συμπεριφορά μιας συστοιχίας κελιών (κάθε συστοιχία θεωρείται ένα ενιαίο κελί), κι οι κινητικές παράμετροι δεν διατηρούν τις τιμές τους, καθώς τα προϊόντα διακινούνται από στάδιο σε στάδιο επίπλευσης, επιτρέποντας στον χρήστη να καθορίζει τις κινητικές παραμέτρους για κάθε τύπο τεμαχιδίων, σε κάθε νέα μονάδα. Τέλος, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ανάκτησης του νερού, ώστε να είναι δυνατό να υπολογιστούν τα ισοζύγια μάζας από το λογισμικό, είναι αυτή στην οποία απαιτείται να καθοριστεί η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος της επίπλευσης (King, 2000).

Η μοντελοποίηση, όλων των λειτουργικών μονάδων, της παρούσας προσομοίωσης, που αφορούν την επίπλευση (βλ. υπό-κεφάλαιο 2.7. Περιγραφή της Επίπλευσης), στηρίχθηκε στην παρατήρηση της μεταβολής των αποτελεσμάτων εξόδου του λογισμικού, βάσει μεταβολών των παραμέτρων κινητικής, για κάθε τύπο τεμαχιδίων. Αυτό, σημαίνει πως, ένα τυχαίο αρχικό σύνολο δεδομένων, μεταβαλλόταν διαρκώς με κατάλληλο τρόπο, μέχρις ότου τα τελικά αποτελέσματα εξόδου να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα διαθέσιμα δεδομένα της εταιρείας CORMIDOM (ποιότητες σε

στοιχεία στις τροφοδοσίες, στα συμπυκνώματα και στα απορρίμματα). Η κατευθυντήρια γραμμή, περιλαμβάνει το γεγονός πως όσο ελαττώνεται το R_{∞} , για κάποια αρχική τιμή του k_2 , η περιεκτικότητα σε χρήσιμο στοιχείο αυξάνει στο απόρριμμα της επίπλευσης, ενώ όσο αυξάνει το k_2 , για κάποια τιμή του R_{∞} που έχει ήδη μεταβληθεί, η περιεκτικότητα σε χρήσιμο στοιχείο αυξάνει στο συμπύκνωμα και ταυτόχρονα ελαττώνεται ελάχιστα στο απόρριμμα. Αυτός ο κανόνας, εφαρμόζεται ταυτόχρονα και για τους τέσσερις (4) τύπους τεμαχιδίων, όπως καθορίστηκαν στις κατηγορίες ποιότητας (βλ. Σχήμα 4.2), καθώς μόνο μια μεταβολή οποιασδήποτε παραμέτρου κάποιας κατηγορίας ποιότητας, μπορεί να επηρεάσει αισθητά τα αποτελέσματα και των υπολοίπων κατηγοριών.

Οι διαθέσιμες πληροφορίες της εταιρείας CORMIDOM, για όλες τις επιπλεύσεις περιλαμβάνουν, το πλήθος και τους όγκους των κελιών, τις αναλύσεις σε στοιχεία στις ροές τους και σε κάποια επιλεκτικά σημεία τις περιεκτικότητες σε στερεά. Οι κοινές παράμετροι, που διατηρούνται στις ακόλουθες φόρμες των μοντέλων KLIM και KLIC, αφορούν τη διαθέσιμη επιθυμητή μονάδα μέτρησης των όγκων των κελιών, που είναι το m^3 και τον αριθμό των συστοιχιών που βρίσκονται παράλληλα (*Number of Banks in Parallel*), στη μονάδα που μοντελοποιείται, η οποία διατηρεί την προκαθορισμένη τιμή της, που είναι το ένα (1). Επίσης, για την απλούστευση των μοντελοποιήσεων αυτών, θεωρείται πως στους πολφούς όλων των επιπλεύσεων, παρέχεται αέρας (*Air Holdup in the Cells*) 15% του όγκου τους (προκαθορισμένη τιμή).

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για το πρώτο κελί επίπλευσης (Σχήμα 4.19), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή ένα (1) στο πεδίο του πλήθους των κελιών (*Number of Cells in this Bank*) κι ο όγκος των κελιού (*Volume of Each Cell in this Bank*) που είναι $50 m^3$. Η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος (*Percent Solids in the Concentrate*), από αυτήν την επίπλευση θεωρείται 25% κι οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν¹⁹ με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 9.65% Cu, 13.24% Zn και 31.3% Fe στο συμπύκνωμα και 1.24% Cu, 1.96% Zn και 30.62% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM. Επίσης, για αυτήν την επίπλευση, καθορίζονται τιμές κινητικών παραμέτρων για τον χαλαζία και γίνεται αποδοχή.

¹⁹ Η σειρά συμπλήρωσης αυτών των πεδίων ακολουθεί τον κανόνα που περιεγράφηκε στο υπό-κεφάλαιο 4.1.2. Ορισμός των Κατηγοριών Ποιότητας ¶2, §2.

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	90	k1 .275
2	70	k2 .935
3	70	k3 .0175
4	5	k4 .009

Σχήμα 4.19: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για το πρώτο κελί επίπλευσης.

Επειδή, η μοντελοποίηση όλων των υπόλοιπων λειτουργικών μονάδων που αφορούν την επίπλευση, ακολουθούν το ίδιο μοτίβο, παρατίθενται στο Παράρτημα Γ-Γ.1..

4.2.2.7. Μοντελοποίηση Παχυντών και Μηχανών Διήθησης

Τα μοντέλα THIC και FILT, για παχυντές και μηχανές διήθησης αντίστοιχα, έχουν προγραμματιστεί, ώστε να δέχονται την τελική περιεκτικότητα σε στερεά μετά το τέλος της διεργασίας. Αναλυτικότερα, το μοντέλο THIC απαιτεί τον προσδιορισμό του ποσοστού (%) των στερεών, που πηγαίνουν στην απορροή του παχυντή και το μοντέλο FILT απαιτεί τον προσδιορισμό του ποσοστού (%) των στερεών των πλακούντων (*Filter Cakes*), που σχηματίζονται στους δίσκους της μηχανής διήθησης (King, 2000).

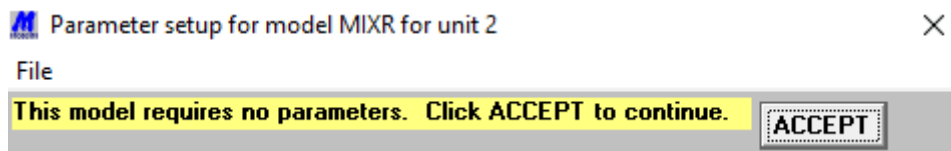
Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου THIC, θεωρήθηκε περιεκτικότητα σε στερεά στην απορροή (*Percent Solids in the Underflow*) ίση με 80% και για τους τρεις (3) παχυντές (Σχήμα 4.20), ενώ στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου FILT, θεωρήθηκε περιεκτικότητα σε στερεά στους πλακούντες (*Percent Solids in the Filter Cake*), ίση με 94% και για τις τρεις (3) μηχανές διήθησης (Σχήμα 4.21). Παρουσιάζεται η συμπλήρωση κι αποδοχή μόνο για τον πρώτο παχυντή και την πρώτη μηχανή διήθησης.

Σχήμα 4.20: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου THIC, για τον πρώτο παχυντή.

Σχήμα 4.21: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου FILT, για την πρώτη μηχανή διήθησης.

4.2.2.8. Μοντελοποίηση Ταινοδρόμων, Σωρού και Δεξαμενών

Το μοντέλο MIXR (Σχήμα 4.22), δεν απαιτεί να καθοριστεί καμία παράμετρος κι αρκεί να γίνει μόνο αποδοχή της φόρμας (King, 2000).

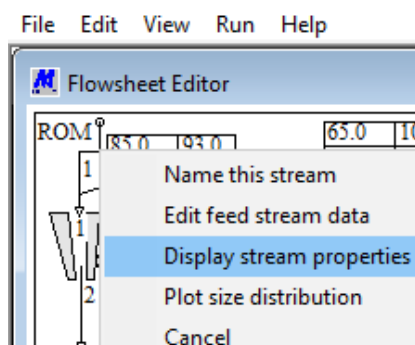


Σχήμα 4.22: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου MIXR, για όλες τις μονάδες στις οποίες έχει επιλεγθεί.

4.3. Εκτέλεση της Προσομοίωσης

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του διαγράμματος ροής και της μοντελοποίησης των λειτουργικών μονάδων, ακολουθεί η προσομοίωση, η οποία γίνεται από το *Flowsheet Editor Menu: Run Menu> Run Simulation*. Στο Σχήμα 4.24 και Σχήμα 4.25, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής, στο οποίο απεικονίζονται κι οι ετικέτες των ρευμάτων, όπως προκύπτουν μετά από την προσομοίωση των καθορισμένων δεδομένων και των μοντελοποιήσεων. Επειδή, οι ετικέτες έχουν τον περιορισμό να αποτυπώνουν, στην επιφάνεια σχεδιασμού, μόνο τις μάζες των στερεών, τις περιεκτικότητες σε στερεά, τις μάζες του νερού και την παρουσία ενός ορυκτού ή στοιχείου, το Σχήμα 4.24 δείχνει την προσομοίωση με στοιχείο αναφοράς, στις ετικέτες των ρευμάτων, τον χαλκό (αφού ορίστηκε πρώτος στα δεδομένα εξόδου του λογισμικού (βλ. Σχήμα 4.5)), ενώ το Σχήμα 4.25 δείχνει την προσομοίωση με στοιχείο αναφοράς τον ψευδάργυρο (αυτό γίνεται μεταφέροντας το Zn στην πρώτη στήλη και το Cu στη δεύτερη στήλη του πίνακα *Minerals-Metals or Elements* του Σχήμα 4.5).

Στην επιθυμητή ροή, με δεξί κλικ>*Display Stream Properties* (βλ. Σχήμα 4.23), ανοίγει το αρχείο με τις αναλυτικές πληροφορίες, της συγκεκριμένης ροής. Τα στοιχεία που περιλαμβάνουν αυτά τα αρχεία, αφορούν τα δεδομένα που επιλέχθηκαν να υπολογιστούν από το λογισμικό, με βάση το υπό-κεφάλαιο 4.1.5. *Ορισμός των Δεδομένων Εξόδου του Λογισμικού*, καθώς και την κοκκομετρική κατανομή που υπολογίζει το λογισμικό. Παράδειγμα ενός τέτοιου αρχείου, είναι το ακόλουθο που αφορά την αρχική τροφοδοσία (*Feed-ROM ή Stream 1*), η οποία καθορίστηκε στα υπό-κεφάλαια 4.1.3. *Ορισμός Δεδομένων στις Ροές Τροφοδοσίας* και 4.1.4. *Ορισμός της Κατανομής στις Κατηγορίες Ποιότητας*.



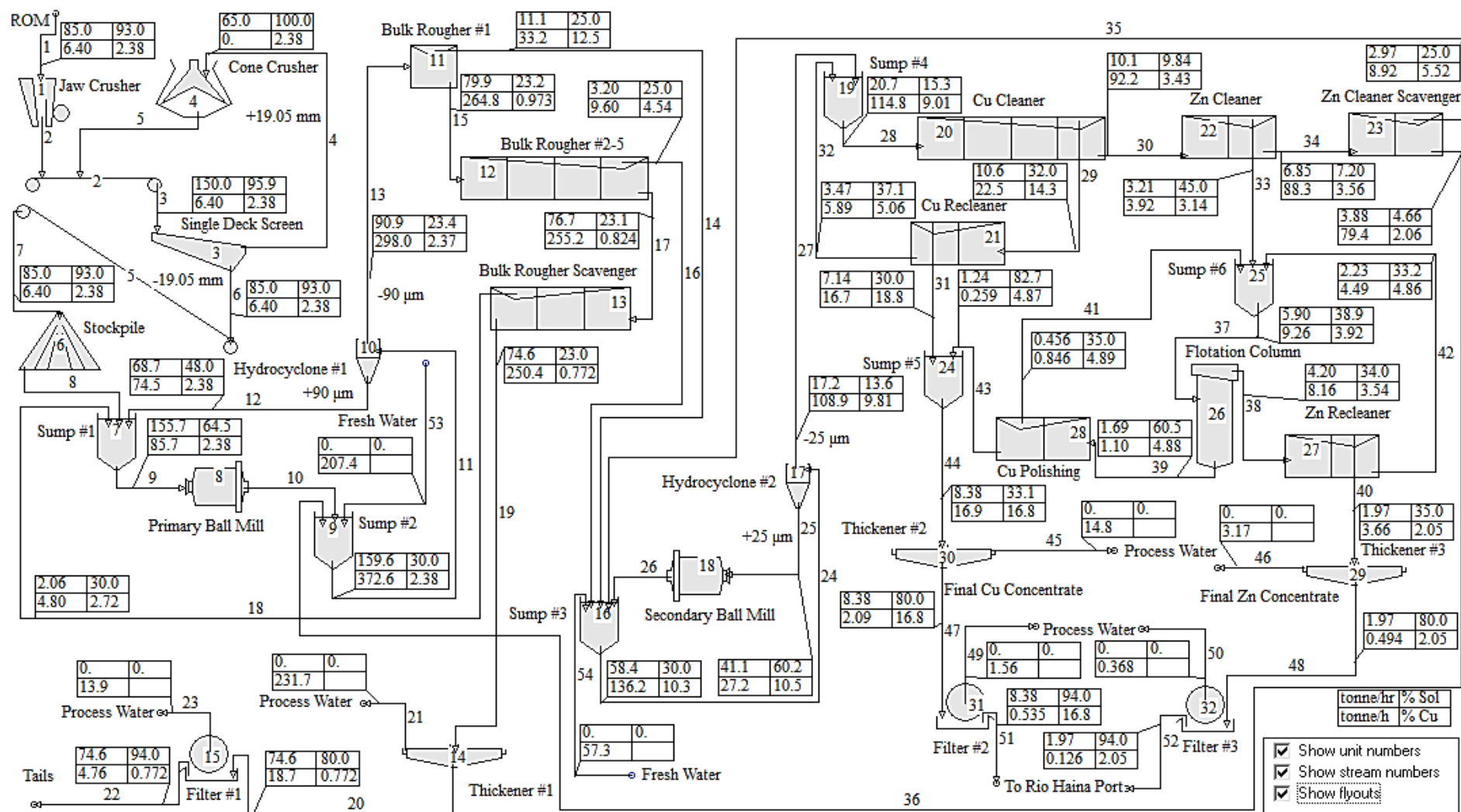
Σχήμα 4.23: Πρόσβαση στις ιδιότητες των ροών (*Stream Properties*).

Stream number: 1
Job name: CORMIDOM Cu-Zn Mineral Processing Plant
Solid flowrate: 85.00 tonne/hr
Water flowrate: 6.40 tonne/hr
Slurry flowrate: 25.39 kg/s
Slurry volumetric flowrate: 0.7680E-02 m³/s

Percent solids by mass: 93.00 %
Percent solids by volume: 76.86 %
Yield of solids: 100.00 %
Recovery of mineral Chal: 100.00 %
Grade of mineral Chal: 6.87 %
Recovery of mineral Spha: 100.00 %
Grade of mineral Spha: 3.86 %
Recovery of mineral Pyri: 100.00 %
Grade of mineral Pyri: 53.58 %
Recovery of mineral Gang: 100.00 %
Grade of mineral Gang: 35.69 %
Recovery of Cu: 100.00 %
Grade of Cu: 2.38 %
Recovery of Zn: 100.00 %
Grade of Zn: 2.59 %
Recovery of Fe: 100.00 %
Grade of Fe: 27.03 %
Recovery of SiO₂: 100.00 %
Grade of SiO₂: 4.64 %
Simulated size distribution
Number of size classes: 33
80% passing size: 0.243 m.
50% passing size: 0.374E-01m.
20% passing size: 0.963E-03m.

Size (m) Passing (%)

0.505	94.486
0.356	88.228
0.253	80.726
0.178	73.961
0.126	67.791
0.891E-01	62.147
0.631E-01	56.981
0.446E-01	52.213
0.316E-01	47.915
0.223E-01	43.905
0.158E-01	40.258
0.111E-01	36.914
0.789E-02	33.848
0.557E-02	31.037
0.394E-02	28.459
0.279E-02	26.095
0.197E-02	23.927
0.139E-02	21.940
0.987E-03	20.118
0.696E-03	18.447
0.493E-03	16.914
0.348E-03	15.510
0.247E-03	14.221
0.174E-03	13.040
0.123E-03	11.957
0.870E-04	10.964
0.616E-04	10.053
0.435E-04	9.218
0.308E-04	8.453
0.218E-04	7.750
0.154E-04	7.107
0.109E-04	6.516
0.00	0.000



Σχήμα 4.24: Προσομοιωμένο διάγραμμα ροής του εργοστασίου του θειούχου μεταλλεύματος, με έμφαση των ετικετών, στη στοιχειακή ανάλυση του Cu..

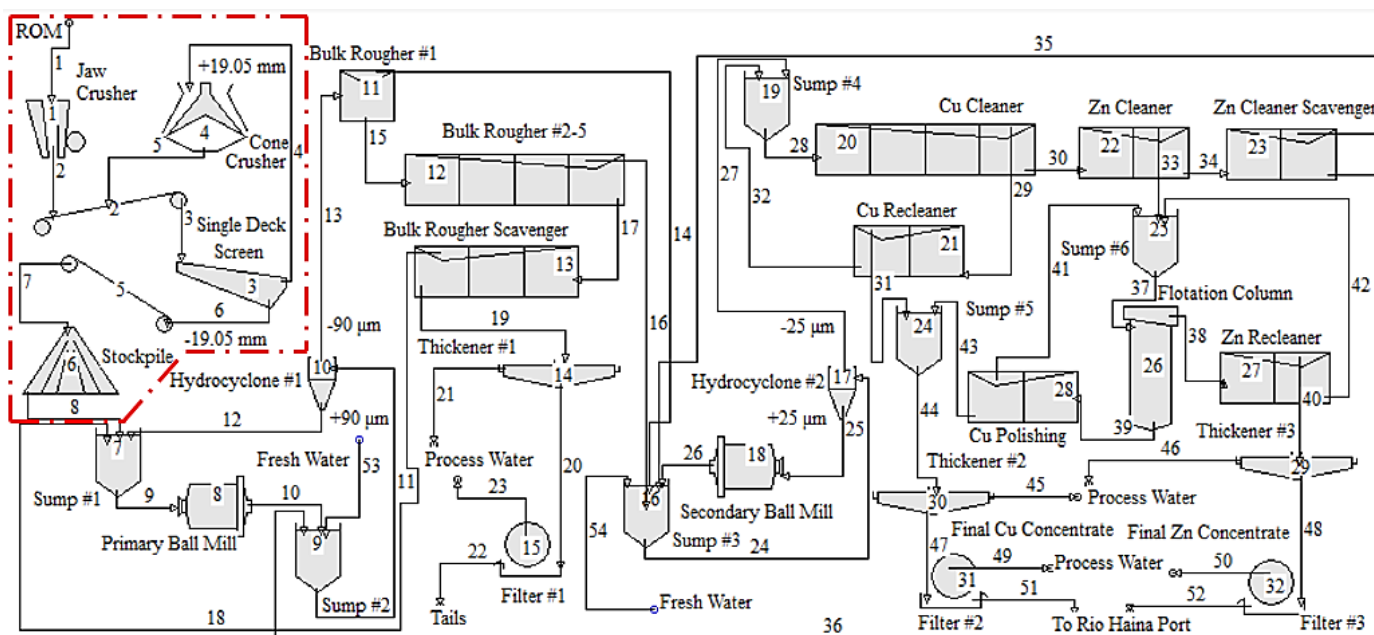
Τα αρχεία που αφορούν όλα τα υπόλοιπα ρεύματα του διαγράμματος ροής, παρατίθενται στο Παράρτημα Δ-Δ.1..

4.4. Τμηματική Παρουσίαση του Εργοστασίου Εμπλουτισμού και Συνοδευτικοί Υπολογισμοί

Το εργοστάσιο εμπλουτισμού, του θειούχου μεταλλεύματος, παρουσιάζεται τμηματικά, με βάση τη διάκριση που έγινε στο υπό-κεφάλαιο 4.2.1. *Εισαγωγή των Μονάδων και Σχεδιασμός των Ρευμάτων*, για την καλύτερη κατανόηση της διακίνησης του μεταλλεύματος στα διαδοχικά κυκλώματα. Στόχος είναι, αφενός να γίνει περιγραφή των κυκλωμάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στα στάδια που διακρίνονται και στις συνθήκες που πραγματοποιούνται οι επιπλεύσεις, βάσει των διαθέσιμων πληροφοριών της εταιρείας CORMIDOM, κι αφετέρου να παρουσιαστούν τα κυριότερα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του διαγράμματος ροής. Τέλος, με βάση αυτά τα αποτελέσματα, παρουσιάζονται και σχετικοί υπολογισμοί, η θεωρία των οποίων καλύπτεται στα υπό-κεφάλαια 2.4. *Ισοζύγια Μάζας Διακινούμενων Στερεών* και 2.6. *Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης*, σε επιλεγμένα σημεία των κυκλωμάτων.

4.4.1. Κύκλωμα Θραύσης-Κοσκίνισης

Στο Σχήμα 4.26, εντοπίζεται το κύκλωμα θραύσης-κοσκίνισης κι ο Πίνακας 4.5, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του κυκλώματος.



Σχήμα 4.26: Το κύκλωμα θραύσης-κοσκίνισης στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος θραύσης-κοσκίνισης.

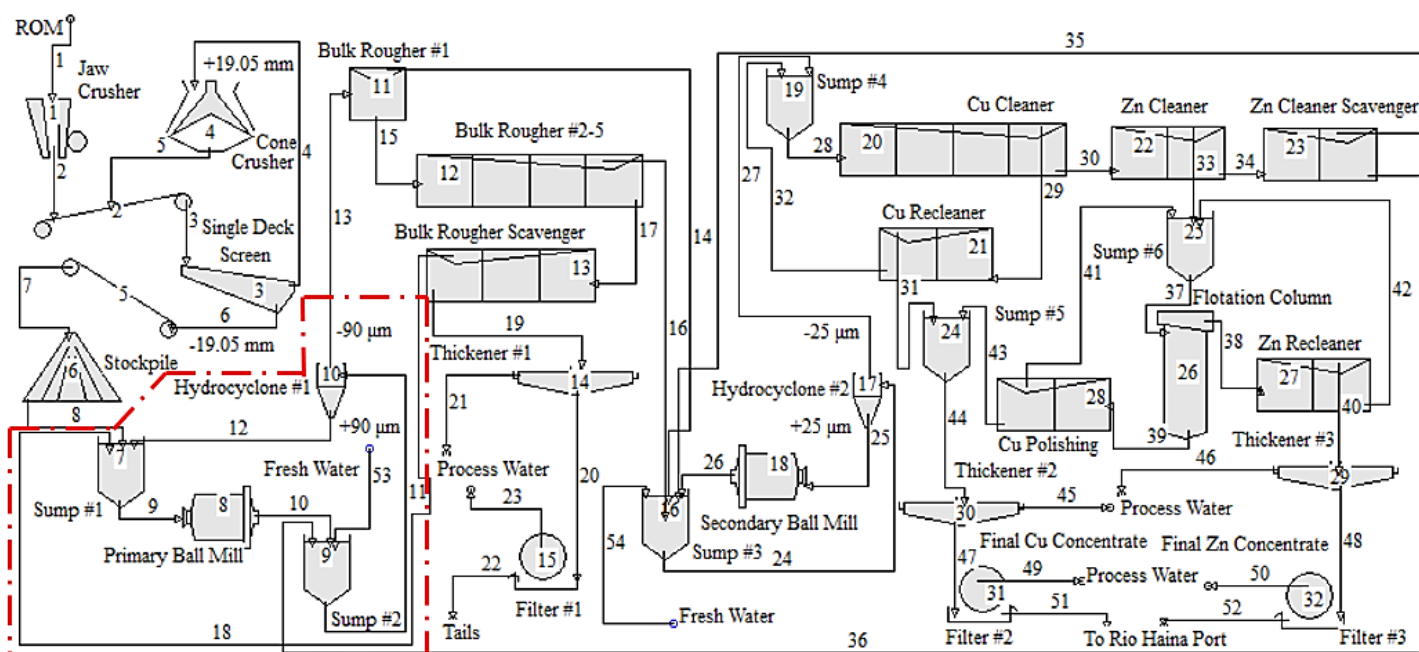
Ρεύμα	Παροχή Στερεών (t/h)	Παροχή Νερού (t/h)	Περιεκ. Πολφού σε Στερεά (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	P ₈₀ (mm)
1	85.00	6.40	93.00	2.38	2.59	27.03	4.64	243
2	85.00	6.40	93.00	2.38	2.59	27.03	4.64	63.2
3	150.01	6.40	95.91	2.38	2.59	27.03	4.64	37.7
4	65.02	0.00	100.00	2.38	2.59	27.03	4.64	69.9

5	65.02	0.00	100.00	2.38	2.59	27.03	4.64	16.9
6	85.00	6.40	93.00	2.38	2.59	27.03	4.64	12.5
7	85.00	6.40	93.00	2.38	2.59	27.03	4.64	12.5
8	85.00	6.40	93.00	2.38	2.59	27.03	4.64	12.5

Από το υλικό εξόρυξης, 85 t/h με μέγιστο μέγεθος κόκκου τα 0.6 m και $P_{80} = 243$ mm (Ρεύμα 1), διέρχονται από σπαστήρα σιαγόνων (Jaw Crusher) με άνοιγμα εξόδου (Close Side Setting) ίσο με 75 mm, παράγοντας προϊόν με $P_{80} = 63.1$ mm (Ρεύμα 2). Το προϊόν οδηγείται με μεταφορική ταινία (Conveyor Belt) σε κόσκινο (Screen), με βρογχίδες ανοίγματος τα 19.05 mm (Ρεύμα 3). Το διερχόμενο υλικό του κοσκίνου, των 85 t/h με $P_{80} = 12.5$ mm (Ρεύμα 6), παραλαμβάνεται από μεταφορική ταινία και στοιβάζεται σε σωρούς (Stockpiles) (Ρεύμα 7), ενώ το παραμένον, των 65.02 t/h με $P_{80} = 69.9$ mm (Ρεύμα 4), ανακυκλώνεται σε κωνικό σπαστήρα (Cone Crusher). Ο κωνικός με άνοιγμα εισόδου (Open Side Setting) 63.5 mm κι άνοιγμα εξόδου 15 mm, παράγει προϊόν με $P_{80} = 16.9$ mm, το οποίο εισέρχεται εκ νέου στο κόσκινο (Ρεύμα 5).

4.4.2. Κύκλωμα Λειτουργίβησης-Ταξινόμησης I

Στο Σχήμα 4.27, εντοπίζεται το κύκλωμα λειτουργίβησης-ταξινόμησης I κι ο Πίνακας 4.6, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του κυκλώματος.



Σχήμα 4.27: Το κύκλωμα λειτουργίβησης-ταξινόμησης I στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος λειτουργίβησης-ταξινόμησης I.

Ρεύμα	Παροχή Στερεών (t/h)	Παροχή Νερού (t/h)	Περιεκ. Πολφού σε Στερεά (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	P_{80} (μm)
8	85	6.4	93	2.38	2.59	27.03	4.64	12500
9	155.74	85.68	64.51	2.38	2.57	27.42	4.54	9000
10	155.74	85.68	64.51	2.38	2.57	27.42	4.54	116
11	159.62	372.6	29.99	2.38	2.54	27.8	4.44	114

12	68.69	74.48	47.98	2.38	2.57	27.4	4.54	229
13	90.94	297.97	23.38	2.37	2.52	28.10	4.36	64.1
18	2.06	4.8	30	2.72	2.01	43.83	0.02	63.6
36	3.88	79.38	4.66	2.06	1.22	43.30	0.40	24.1
53	-	207.4	-	-	-	-	-	-

Η φρέσκια τροφή των 85 t/h (Πεύμα 8), μαζί με τους 68.69 t/h (Πεύμα 12) της απορροής του πρώτου υδροκυκλώνα (*Hydrocyclone #1 Underflow*) και τους 2.06 t/h (Πεύμα 18) του συμπυκνώματος της συστοιχίας επίπλευσης του χονδροειδούς καθαριστικού (*Bulk Rougher Scavenger Concentrate*), με τελικό $P_{80} = 9000 \mu\text{m}$ (Πεύμα 9), εισάγονται, μέσω της πρώτης δεξαμενής (*Sump #1*), στον πρωτογενή σφαιρόμυλο (*Primary Ball Mill*), παράγοντας προϊόν 155.74 t/h με $P_{80} = 116 \mu\text{m}$ (Πεύμα 10).

Το προϊόν αυτό μαζί με τους 3.88 t/h (Πεύμα 36) του απορρίμματος της συστοιχίας επίπλευσης του καθαριστικού καθαρού διαχωρισμού Zn (*Zn Cleaner Scavenger Tail*), εισάγονται, μέσω της δεύτερης δεξαμενής (*Sump #2*), στον υδροκυκλώνα, με μέγεθος κοπής τα 90 μm . Η απορροή του υδροκυκλώνα, ανακυκλώνεται στον πρωτογενή σφαιρόμυλο για περαιτέρω λειοτρίβηση, ενώ η υπερχειλίση (*Hydrocyclone #1 Overflow*) των 90.94 t/h (Πεύμα 13) ακολουθεί την πορεία της προς το επόμενο κύκλωμα του εργοστασίου.

4.4.2.1. Ισοζύγιο στη Δεύτερη Δεξαμενή του Κυκλώματος Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης Ι κι Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού

Η δεύτερη δεξαμενή (*Sump #2*), δέχεται $F_{Prim.B.M.D.} = 155.74 \text{ t/h}$ και $F_{Zn\text{ Clea.Scav.Tail}} = 3.88 \text{ t/h}$, με περιεκτικότητα σε στερεά $f_{Prim.B.M.D.} = 64.51\%$ και $f_{Zn\text{ Clea.Scav.Tail}} = 4.66\%$, από τα Πεύματα 10 και 36, αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 4.27 και Πίνακας 4.6). Επομένως, η ολική μάζα στερεών που εισέρχεται στη δεύτερη δεξαμενή, από την Εξίσωση 2.18, είναι:

$$F_{Sump\#2} = F_{Prim.B.M.D.} + F_{Zn\text{ Clea.Scav.Tail}} = 155.74 \text{ t/h} + 3.88 \text{ t/h} = 159.62 \text{ t/h}.$$

Από το ισοζύγιο νερού (βλ. Εξίσωση 2.19) και τις αντίστοιχες αραιώσεις (βλ. Εξισώσεις 2.17), για τα Πεύματα 10 και 36, η περιεκτικότητα (%) σε στερεά στην είσοδο της δεύτερης δεξαμενής, είναι:

$$F_{Sump\#2} * f'_{Sump\#2} = F_{Prim.B.M.D.} * f'_{Prim.B.M.D.} + F_{Zn\text{ Clea.Scav.Tail}} * f'_{Zn\text{ Clea.Scav.Tail}} \rightarrow$$

$$\rightarrow 159.62 * f'_{Sump\#2} = 155.74 * \frac{100-64.51}{64.51} + 3.88 * \frac{100-4.66}{4.66} \rightarrow$$

$$\rightarrow 159.62 * f'_{Sump\#2} = 155.74 * 0.55 + 3.88 * 20.46 \rightarrow$$

$$\rightarrow 159.62 \text{ (t/h)} * f'_{Sump\#2} = 165.03 \text{ (t/h)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{100-f_{Sump\#2}}{f_{Sump\#2}} = 1.02 \rightarrow 100 - f_{Sump\#2} = 1.02 * f_{Sump\#2} \rightarrow$$

$$\rightarrow 2.02 * f_{Sump\#2} = 100 \rightarrow f_{Sump\#2} = 49.5\%.$$

Το περιεχόμενο της δεύτερης δεξαμενής, πρέπει να αραιωθεί, με προσθήκη επιπλέον ποσότητας φρέσκου νερού (*Fresh Water*), για να δώσει τελική περιεκτικότητα 30% σε στερεά (βλ. *Παράρτημα Γ-Γ.2.*), πριν την εισαγωγή του στον πρώτο υδροκυκλώνα, ώστε η ταξινόμηση να πραγματοποιηθεί με ικανοποιητική απόδοση και χωρίς προβλήματα.

Το βάρος του νερού του πολφού, με περιεκτικότητα 49.5% σε στερεά, από τον ορισμό της αραιώσης, της *Εξίσωσης 2.16*, είναι:

$$M_{W@49.50\%} = f'_{Sump \#2@49.50\%} * M_S = 1.02 * 159.62 \text{ (t/h)} = 162.8 \text{ t/h.}$$

Ο τελικός πολφός, με περιεκτικότητα 30% σε στερεά, πρέπει να έχει αραιώση:

$$f'_{Sump \#2@30\%} = \frac{100-30}{30} = 2.32$$

με βάρος νερού:

$$M_{W@30\%} = f'_{Sump \#2@30\%} * M_S = 2.32 * 159.62 \text{ (t/h)} = 370.32 \text{ t/h.}$$

Η απαιτούμενη ποσότητα φρέσκου νερού, που πρέπει να εισέρχεται στη δεύτερη δεξαμενή, είναι:

$$F_{W1} = M_{W@30\%} - M_{W@49.49\%} = 370.32 \text{ t/h} - 162.8 \text{ t/h} = 207.52 \text{ t/h.}$$

4.4.2.2. Υπολογισμός Κυκλοφορούντος Φορτίου στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης I

Το κυκλοφορούν φορτίο, που υπολογίζεται, σε αυτό το κύκλωμα, αντιστοιχεί στο *Ρεύμα 12*, του διαγράμματος ροής, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.27*.

Η αραιώση στην είσοδο του υδροκυκλώνα (βλ. *Σχήμα 4.27*), είναι $D'_{Ρεύμα \ 11} = f'_{Sump \#2@30\%} = 2.32$ (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.2.1. *Ισοζύγιο στη Δεύτερη Δεξαμενή του Κυκλώματος Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης I* κι *Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού*).

Η αραιώση στην απορροή του υδροκυκλώνα (βλ. *Σχήμα 4.27*), με περιεκτικότητα σε στερεά 47.98% (βλ. *Πίνακας 4.6*), από την *Εξίσωση 2.27* είναι:

$$D'_{Ρεύμα \ 12} = \frac{100-47.98}{47.98} = 1.07.$$

κι ομοίως, η αραιώση στην υπερχείλιση του υδροκυκλώνα (βλ. *Σχήμα 4.27*), με περιεκτικότητα σε στερεά 23.38% (βλ. *Πίνακας 4.6*), είναι:

$$D'_{Ρεύμα \ 13} = \frac{100-23.38}{23.38} = 3.26$$

Ο λόγος του κυκλοφορούντος φορτίου, από την *Εξίσωση 2.22* είναι:

$$CLR = \frac{D'_{Ρεύμα \ 13} - D'_{Ρεύμα \ 11}}{D'_{Ρεύμα \ 11} - D'_{Ρεύμα \ 12}} = \frac{3.26 - 2.32}{2.32 - 1.07} = 0.752 \text{ ή } 75.2\%.$$

Το κύκλωμα δέχεται $F_{Stock.} = 85 \text{ t/h}$, $F_{B.Ro.Scav.Conc.} = 2.06 \text{ t/h}$ και $F_{Zn \ Clea.Scav.Tail} = 3.88 \text{ t/h}$, από τα *Ρεύματα 8, 18 και 36*, αντίστοιχα (βλ. *Σχήμα 4.27* και *Πίνακας 4.6*). Η συνολική μάζα στερεών που εισέρχεται στο κύκλωμα, είναι:

$$F_{Circuit \#2} = 85 \text{ t/h} + 2.06 \text{ t/h} + 3.88 \text{ t/h} = 90.94 \text{ t/h}.$$

Επομένως, το κυκλοφορούν φορτίο (*Circulation Load-CL*), είναι:

$$CL = CLR * F_{Circuit \#2} = 0.752 * 90.94 \text{ (t/h)} = 68.39 \text{ t/h}.$$

4.4.2.3. Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης I

Το μέγεθος ενδιαφέροντος, για αυτό το κύκλωμα, ορίζεται στα 90 μm, δηλαδή όσο είναι και το μέγεθος κοπής του πρώτου υδροκυκλώνα. Με βάση το Παράρτημα E-E.1., το διερχόμενο ποσοστό από το μέγεθος των 90 μm, στην είσοδο και στην έξοδο του πρωτογενή σφαιρόμυλου και στην υπερχειλίση του πρώτου υδροκυκλώνα (Ρεύματα 9, 10 και 13 αντίστοιχα, βλ. Σχήμα 4.27) είναι $P_{90\mu m@P.B.M.F.} = 25.53\%$, $P_{90\mu m@P.B.M.D.} = 70.90\%$ και $P_{90\mu m@H/C\#1-O/F} = 97.11\%$, αντίστοιχα.

Η απόδοση της ταξινόμησης του συστήματος, από την Εξίσωση 2.30, για $R_{Feed} = 100\% - 25.53\% = 74.47\%$ στην είσοδο και για $R_{Discharge} = 100\% - 70.90\% = 29.1\%$ στην απορροή του πρωτογενή σφαιρόμυλου, είναι:

$$CSE = \frac{R_{Feed} + R_{Discharge}}{2} = \frac{74.47 (\%) + 29.1 (\%)}{2} = 51.79\%.$$

Επομένως, το κλάσμα (%) της ολικής ισχύος, του πρωτογενή σφαιρόμυλου, που καταναλώνεται για τη λειοτρίβηση του χονδρομερούς υλικού (+90 μm) είναι 51.79%.

Για καθαρή ισχύ σφαιρόμυλου ίση με 820.6 kW (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.2.2.4. Μοντελοποίηση Σφαιρόμυλων), η αποτελεσματική ή ενεργή ισχύς του μύλου, από την Εξίσωση 2.31, είναι:

$$EMP = TMP * \frac{CSE}{100} = 820.6 \text{ (kW)} * \frac{51.79 (\%)}{100} = 424.98 \text{ kW}.$$

ενώ, η απολεσμένη ισχύς του μύλου από την Εξίσωση 2.32, είναι:

$$WOMP = TMP * \frac{(100 - CSE)}{100} = 820.6 \text{ (kW)} * \frac{(100 - 51.79)}{100} = 395.62 \text{ kW}.$$

Ο ρυθμός παραγωγής των λεπτομερών τεμαχιδίων από το κύκλωμα (βλ. Εξίσωση 2.33), για συνολική τροφοδοσία $F_{Circuit \#2} = 90.94 \text{ t/h}$ (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.2.2. Υπολογισμός Κυκλοφορούντος Φορτίου στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης Ταξινόμησης I), για $P_{Product} = P_{90\mu m@H/C\#1-O/F} = 97.11\%$ στην υπερχειλίση του υδροκυκλώνα και για $P_{Feed} = P_{90\mu m@P.B.M.F.} = 25.53\%$ στην είσοδο του πρωτογενή σφαιρόμυλου, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$CPRF = F_{Circuit \#2} * \frac{P_{Product} - P_{Feed}}{100} = 90.94 \text{ (t/h)} * \frac{97.11 (\%) - 25.53 (\%)}{100} = 90.94 \text{ (t/h)} * 0.7158 = 65.1 \text{ t/h}.$$

Δηλαδή, για κάθε 90.94 t/h στερεών που εισέρχονται στο κύκλωμα, παράγονται 65.1 t/h μεταλλεύματος που είναι κάτω από 90 μm.

Επομένως, ο ειδικός ρυθμός θραύσης του +90 μm, από την Εξίσωση 2.34a είναι:

$$SGRC = \frac{CPRF}{EMP} = \frac{65.1 \text{ (t/h)}}{424.98 \text{ (kW)}} = 0.152 \text{ t/kWh}.$$

χονδροειδούς επίπλευσης (*Bulk Rougher #1*), όγκου 50 m³, με την προσθήκη 35 mL/min του συλλέκτη (*Collector*²¹) 1234 Collector²² και 14 mL/min του αφριστικού (*Frother*²³) F-160-10²⁴, της εταιρείας Flottec LLC, ενώ η επίπλευση ξεκινά με ανάδευση και με εισαγωγή 440 m³/h αέρα. Το συμπύκνωμα, των 11.06 t/h (*Πεύμα 14*), αυτής της επίπλευσης (*Bulk Rougher #1 Concentrate*) πηγαίνει, μέσω της τρίτης δεξαμενής (*Sump #3*), στον δεύτερο υδροκυκλώνα (*Hydrocyclone #2*), ενώ το απόρριμμα (*Bulk Rougher #1 Tail*), των 79.88 t/h (*Πεύμα 15*), πηγαίνει προς το επόμενο στάδιο.

Το δεύτερο στάδιο, της χονδροειδούς επίπλευσης, πραγματοποιείται σε συστοιχία τεσσάρων (4) κελιών (*Bulk Rougher #2-5*), με όγκο κάθε κελιού 10 m³. Στο πρώτο κελί (No. 2), γίνεται προσθήκη 10 mL/min του συλλέκτη 1234 Collector κι 7 mL/min του αφριστικού F-160-10, ενώ εισάγονται σε κάθε κελί, 120 m³/h, 130 m³/h, 100 m³/h κι 120 m³/h αέρα, κατά αντιστοιχία από το No. 2 στο No. 5. Επίσης, κατά την επίπλευση που γίνεται στο τέταρτο κελί της συστοιχίας (No. 5), συμπληρώνονται επιπλέον 10 mL/min, αντιδραστήριου 1234 Collector. Το συμπύκνωμα, των 3.2 t/h (*Πεύμα 16*), από αυτή τη συστοιχία (*Bulk Rougher #2-5 Concentrate*), πηγαίνει κι αυτό στον δεύτερο υδροκυκλώνα, με την εισαγωγή του στην τρίτη δεξαμενή, ενώ το απόρριμμα (*Bulk Rougher #2-5 Tail*), των 76.68 t/h (*Πεύμα 17*), πηγαίνει προς το καθαριστικό στάδιο.

Ο χονδροειδής καθαριστικός διαχωρισμός, του απορρίμματος της προηγούμενης επίπλευσης, πραγματοποιείται σε συστοιχία τριών (3) κελιών (*Bulk Rougher Scavenger*), με όγκο κάθε κελιού 10 m³. Η επίπλευση, γίνεται με προσθήκη 9 mL/min του συλλέκτη 1234 Collector, στο πρώτο κελί αυτής της συστοιχίας και με παροχή αέρα σε κάθε κελί, 180 m³/h, 210 m³/h και 210 m³/h, κατά αντιστοιχία με τη φορά της επίπλευσης. Το συμπύκνωμα (*Bulk Rougher Scavenger Concentrate*), των 2.06 t/h (*Πεύμα 18*), ανακυκλώνεται στο κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης I (βλ. *Σχήμα 4.27*), με την εισαγωγή του στην πρώτη δεξαμενή, ενώ το απόρριμμα (*Bulk Rougher Scavenger Tail*), των 74.63 t/h (*Πεύμα 19*), αποτελεί το τελικό απόρριμμα (*Final Tail*) του εργοστασίου εμπλουτισμού κι ακολουθεί την πορεία του προς το κύκλωμα αφυδάτωσης I (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.7. *Κυκλώματα Αφυδάτωσης I, II και III*).

καθίσταται υδρόφοβο, κατόπιν προοδοποίησης, τότε η διεργασία καλείται ανάστροφη επίπλευση (*Reversed Froth Flotation*) (Σταμπολιάδης, 2008a).

²¹ Είναι επιφανειακά ενεργές οργανικές χημικές ουσίες που καθιστούν υδρόφοβη την επιφάνεια του προς επίπλευση ορυκτού. Για αναλυτικές πληροφορίες Σταμπολιάδης (2008a, σσ. 182-189).

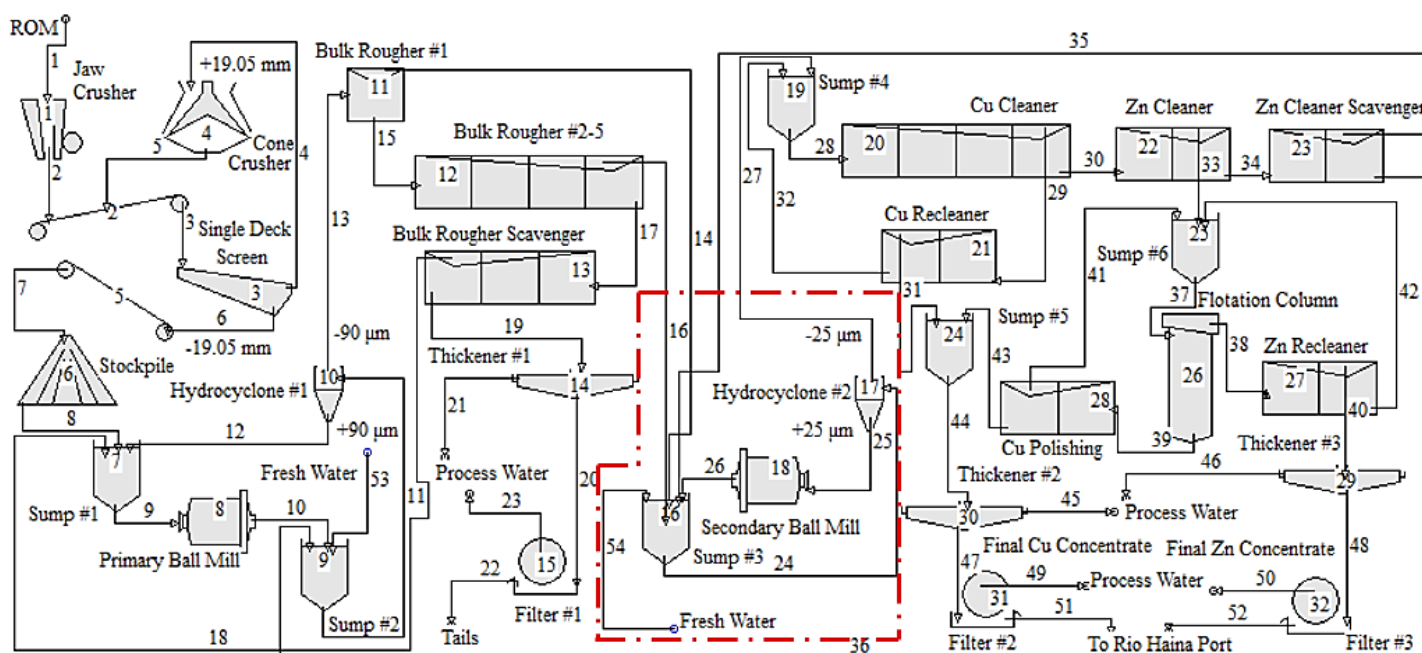
²² Είναι αντιδραστήριο συλλέκτη, με σύσταση 90-98 % w/w σε o-isopropyl ethylthiocarbamate και 2-5 % w/w σε isopropyl alcohol (Flottec LLC, 2019).

²³ Είναι επιφανειακά ενεργές οργανικές χημικές ουσίες που μειώνουν την επιφανειακή τάση του νερού, ώστε να σταθεροποιήσουν τις φυσαλίδες, που ανέρχονται με το μέταλλευμα, σε ένα στρώμα αφρού στη κορυφή της κυψέλης επίπλευσης, για να διευκολύνουν την απομάκρυνση του συμπυκνώματος. Για αναλυτικές πληροφορίες Σταμπολιάδης, (2008a, σσ. 190-191).

²⁴ Είναι ένα αφριστικό αντιδραστήριο, με σύσταση 0.1 % w/w σε potassium hydroxide, 90-95 % w/w σε propylene glycol-mono methyl ether και >5 % w/w σε polipropilenglycol (Flottec LLC, 2016).

4.4.4. Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II

Στο Σχήμα 4.29, εντοπίζεται το κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης II κι ο Πίνακας 4.8, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του κυκλώματος.



Σχήμα 4.29: Το κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης II στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος λειοτρίβησης-ταξινόμησης II.

Ρεύμα	Παροχή Στερεών (t/h)	Παροχή Νερού (t/h)	Περιεκ. Πολφού σε Στερεά (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	P ₈₀ (μm)
14	11.06	33.17	25	12.49	12.95	31.27	0.13	64
16	3.2	9.6	25	4.54	6.05	40.16	0.02	63.7
24	58.36	136.19	30	10.34	11	33.75	0.1	43.6
25	41.15	27.22	60.18	10.55	11.31	33.39	0.11	50.4
26	41.15	27.22	60.18	10.55	11.31	33.39	0.11	39.1
27	17.2	108.9	13.64	9.81	10.22	34.57	0.09	24.3
35	2.97	8.92	25	5.52	4.58	40.81	0	24.2
54	-	57.28	-	-	-	-	-	-

Το δεύτερο κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης, είναι αντίστροφο από το προηγούμενο, εξ αιτίας της διαμόρφωσής του, καθώς η τροφοδοσία περνάει πρώτα από τον υδροκυκλώνα και μετά από τον σφαιρόμυλο (βλ. Σχήμα 4.29).

Στον δεύτερο υδροκυκλώνα (Hydrocyclone #2), με μέγεθος κοπής 25 μm, τροφοδοτούνται 58.36 t/h (Ρεύμα 24). Η απορροή του υδροκυκλώνα (Hydrocyclone #2 Underflow) των 41.15 t/h με P₈₀ = 50.4 μm (Ρεύμα 25), εισάγεται στον δευτερογενή σφαιρόμυλο (Secondary Ball Mill), ο οποίος παράγει προϊόν με P₈₀ = 39.1 μm, ενώ η υπερχειλίση (Hydrocyclone #2 Overflow) των 17.2 t/h (Ρεύμα 27), πηγαίνει προς το επόμενο κύκλωμα του εργοστασίου.

Το προϊόν των 41.15 t/h του σφαιρόμυλου (*Πεύμα 26*), μαζί με τους 11.06 t/h του συμπυκνώματος του πρώτου κελιού επίπλευσης (*Πεύμα 14*), τους 3.2 t/h του συμπυκνώματος του δεύτερου σταδίου χονδροειδούς επίπλευσης (*Πεύμα 16*) και τους 2.97 t/h (*Πεύμα 35*) του συμπυκνώματος της συστοιχίας επίπλευσης του καθαριστικού καθαρού διαχωρισμού Zn (*Zn Cleaner Scavenger Concentrate*), αναμιγνύονται στην τρίτη δεξαμενή κι εισάγονται στον υδροκυκλώνα του κυκλώματος αυτού.

4.4.4.1. Ισοζύγιο στη Δεξαμενή του Κυκλώματος Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II κι Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού

Η τρίτη δεξαμενή (*Sump #3*), δέχεται $F_{B.Ro.\#1Conc.} = 11.06$ t/h, $F_{B.Ro.\#2-5Conc.} = 3.2$ t/h, $F_{Zn\ Clea.Scav.Conc.} = 2.97$ t/h και $F_{Sec.B.M.D.} = 41.15$ t/h, με περιεκτικότητες σε στερεά $f_{B.Ro.\#1\ Conc.} = 25\%$, $f_{B.Ro.\#2-5Conc.} = 25\%$, $f_{Zn\ Clea.Scav.Conc.} = 25\%$ και $f_{Sec.B.M.D.} = 60.18\%$, από τα *Πεύματα 14, 16, 35 κι 26*, αντίστοιχα (βλ. *Σχήμα 4.29* και *Πίνακας 4.8*). Επομένως, η ολική μάζα στερεών που εισέρχεται, στην τρίτη δεξαμενή, από την *Εξίσωση 2.18*, είναι:

$$F_{Sump\ #3} = F_{B.Ro.\#1Conc.} + F_{B.Ro.\#2-5Conc.} + F_{Zn\ Clea.Scav.Conc.} + F_{Sec.B.M.D.} \rightarrow$$

$$\rightarrow F_{Sump\ #3} = 11.06\text{ t/h} + 3.2\text{ t/h} + 2.97\text{ t/h} + 41.15\text{ t/h} = 58.38\text{ t/h.}$$

Από το ισοζύγιο νερού (βλ. *Εξίσωση 2.19*) και τις αντίστοιχες αραιώσεις (βλ. *Εξισώσεις 2.17*), για τα *Πεύματα 14, 16, 35 κι 26*, η περιεκτικότητα (%) σε στερεά στην είσοδο της τρίτης δεξαμενής, είναι:

$$F_{Sump\ #3} * f'_{Sump\ #3} = F_{B.Ro.\#1Conc.} * f'_{B.Ro.\#1Conc.} + F_{B.Ro.\#2-5Conc.} * f'_{B.Ro.\#2-5Conc.} +$$

$$F_{Zn\ Clea.Scav.Conc.} * f'_{Zn\ Clea.Scav.Conc.} + F_{Sec.B.M.D.} * f'_{Sec.B.M.D.} \rightarrow$$

$$\rightarrow 58.38 * f'_{Sump\ #3} = 11.06 * \frac{100-25}{25} + 3.2 * \frac{100-25}{25} + 2.97 * \frac{100-25}{25} + 41.15 * \frac{100-60.18}{60.18}$$

$$\rightarrow 58.38 * f'_{Sump\ #3} = (11.06 + 3.2 + 2.97) * 3 + 41.15 * 0.65 \rightarrow$$

$$\rightarrow 58.38\text{ (t/h)} * f'_{Sump\ #3} = 78.44\text{ (t/h)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{100 - f_{Sump\ #3}}{f_{Sump\ #3}} = 1.34 \rightarrow 100 - f_{Sump\ #3} = 1.34 * f_{Sump\ #3} \rightarrow$$

$$\rightarrow 2.34 * f_{Sump\ #3} = 100 \rightarrow f_{Sump\ #3} = 42.74\%.$$

Και σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να προστεθεί επιπλέον ποσότητα (φρέσκου) νερού, ώστε ο πολφός να εισέλθει στον δεύτερο υδροκυκλώνα με περιεκτικότητα 30% σε στερεά (βλ. *Παράρτημα Γ-Γ.2*).

Το βάρος του νερού του πολφού, με περιεκτικότητα 42.74% σε στερεά από τον ορισμό της αραιώσης, της *Εξίσωσης 2.16*, είναι:

$$M_{W@42.74\%} = f'_{Sump\ #3} * M_S = 1.34 * 58.38\text{ (t/h)} = 78.23\text{ t/h.}$$

Ο πολφός, που θα τροφοδοτείται στον δεύτερο υδροκυκλώνα, με περιεκτικότητα 30% σε στερεά, πρέπει να έχει αραιώση:

$$f'_{\text{Sump \#3@30\%}} = \frac{100-30}{30} = 2.32$$

με βάρος νερού:

$$M_{W@30\%} = f'_{\text{Sump \#3@30\%}} * M_S = 2.32 * 58.38 \text{ (t/h)} = 135.43 \text{ t/h.}$$

Επομένως, η απαιτούμενη ποσότητα φρέσκου νερού, που πρέπει να εισέρχεται στην τρίτη δεξαμενή, είναι:

$$F_{W2} = M_{W@30\%} - M_{W@42.74\%} = 135.43 \text{ t/h} - 78.23 \text{ t/h} = 57.2 \text{ t/h.}$$

4.4.4.2. Υπολογισμός Κυκλοφορούντος Φορτίου στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II.

Το κυκλοφορούν φορτίο, που υπολογίζεται, σε αυτό το κύκλωμα, αντιστοιχεί στο Ρεύμα 25 ή Ρεύμα 26, του διαγράμματος ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.29.

Η αραίωση στην είσοδο του υδροκυκλώνα (βλ. Σχήμα 4.29), είναι $D'_{\text{Ρεύμα 24}} = f'_{\text{Sump \#3@30\%}} = 2.32$ (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.4.1. Ισοζύγιο στη Δεξαμενή του Κυκλώματος Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II κι Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού).

Η αραίωση στην απορροή του υδροκυκλώνα (βλ. Σχήμα 4.29), με περιεκτικότητα σε στερεά 60.18% (βλ. Πίνακας 4.8), από την Εξίσωση 2.16 είναι:

$$D'_{\text{Ρεύμα 25}} = \frac{100-60.18}{60.18} = 0.65.$$

κι ομοίως, η αραίωση στην υπερχείλιση του υδροκυκλώνα (βλ. Σχήμα 4.29), με περιεκτικότητα σε στερεά 13.64% (βλ. Πίνακας 4.8), είναι:

$$D'_{\text{Ρεύμα 27}} = \frac{100-13.64}{13.64} = 6.32.$$

Ο λόγος του κυκλοφορούντος φορτίου, από την Εξίσωση 2.22 είναι:

$$CLR = \frac{D'_{\text{Ρεύμα 27}} - D'_{\text{Ρεύμα 24}}}{D'_{\text{Ρεύμα 24}} - D'_{\text{Ρεύμα 25}}} = \frac{6.32 - 2.32}{2.32 - 0.65} = 2.39 \text{ ή } 239\%.$$

Το κύκλωμα δέχεται $F_{B.Ro.\#1Conc.} = 11.06 \text{ t/h}$, $F_{B.Ro.\#2-5Conc.} = 3.2 \text{ t/h}$, $F_{Zn\text{ Clea.Scav.Conc.}} = 2.97 \text{ t/h}$, από τα Ρεύματα 14, 16 και 35, αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 4.29 και Πίνακας 4.8). Η συνολική μάζα που εισέρχεται στο κύκλωμα, είναι:

$$F_{\text{Circuit \#3}} = 11.06 \text{ t/h} + 3.2 \text{ t/h} + 2.97 \text{ t/h} = 17.25 \text{ t/h.}$$

Επομένως, το κυκλοφορούν φορτίο, είναι:

$$CL = CLR * F_{\text{Circuit \#3}} = 2.39 * 17.25 \text{ (t/h)} = 41.23 \text{ t/h.}$$

4.4.4.3. Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II

Το μέγεθος ενδιαφέροντος, για αυτό το κύκλωμα, ορίζεται στα 25 μm (μέγεθος κοπής του δεύτερου υδροκυκλώνα). Με βάση το *Παράρτημα E-E.2.*, το διερχόμενο ποσοστό από το μέγεθος των 25 μm , στην είσοδο και στην έξοδο του δευτερογενή σφαιρόμυλου και στην υπερχειλίση του δεύτερου υδροκυκλώνα (*Περίληψη 25, 26 και 27* αντίστοιχα, βλ. *Σχήμα 4.29*) είναι $P_{25\mu\text{m}@S.B.M.F.} = 15.31\%$, $P_{25\mu\text{m}@S.B.M.D.} = 30.37\%$ και $P_{25\mu\text{m}@H/C\#2-O/F} = 77.24\%$, αντίστοιχα.

Η απόδοση της ταξινόμησης του συστήματος, από την *Εξίσωση 2.30*, για $R_{Feed} = 100\% - 15.31\% = 84.69\%$ στην είσοδο και για $R_{Discharge} = 100\% - 30.37\% = 69.63\%$ στην απορροή του δευτερογενή σφαιρόμυλου, είναι:

$$CSE = \frac{R_{Feed} + R_{Discharge}}{2} = \frac{84.69 (\%) + 69.63 (\%)}{2} = 77.16\%.$$

Επομένως, το κλάσμα (%) της ολικής ισχύος, του δευτερογενή σφαιρόμυλου, που καταναλώνεται για τη λειοτρίβηση του χονδρομερούς υλικού (+25 μm) είναι 77.16%.

Για καθαρή ισχύ σφαιρόμυλου ίση με 596.8 kW (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.2.2.4. *Μοντελοποίηση Σφαιρόμυλων*), η αποτελεσματική ή ενεργή ισχύς του μύλου, από την *Εξίσωση 2.31*, είναι:

$$EMP = TMP * \frac{CSE}{100} = 596.8 (\text{kW}) * \frac{77.16 (\%)}{100} = 460.49 \text{ kW}.$$

ενώ, η απολεσμένη ισχύς του μύλου από την *Εξίσωση 2.32*, είναι:

$$WOMP = TMP * \frac{(100 - CSE)}{100} = 596.8 (\text{kW}) * \frac{(100 - 77.16)}{100} = 136.31 \text{ kW}.$$

Ο ρυθμός παραγωγής των λεπτών τεμαχιδίων από το κύκλωμα (βλ. *Εξίσωση 2.33*), για συνολική τροφοδοσία $F_{Circuit \#3} = 17.25 \text{ t/h}$ (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.4.2. *Υπολογισμός Κυκλοφορούντος Φορτίου στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης Ταξινόμησης II*), για $P_{Product} = P_{25\mu\text{m}@H/C\#2-O/F} = 77.24\%$ στην υπερχειλίση του δεύτερου υδροκυκλώνα και για $P_{Feed} = P_{25\mu\text{m}@S.B.M.F.} = 15.31\%$ στην είσοδο του δευτερογενή σφαιρόμυλου, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$CPRF = F_{Circuit \#3} * \frac{P_{Product} - P_{Feed}}{100} = 17.25 (\text{t/h}) * \frac{77.24 (\%) - 15.31 (\%)}{100} = 17.25 (\text{t/h}) * 0.6193 = 10.67 \text{ t/h}.$$

Δηλαδή, για κάθε 17.25 t/h στερεών που εισέρχονται στο κύκλωμα, παράγονται 10.67 t/h μεταλλεύματος που είναι κάτω από 25 μm .

Επομένως, ο ειδικός ρυθμός θραύσης του +25 μm , από την *Εξίσωση 2.34a* είναι:

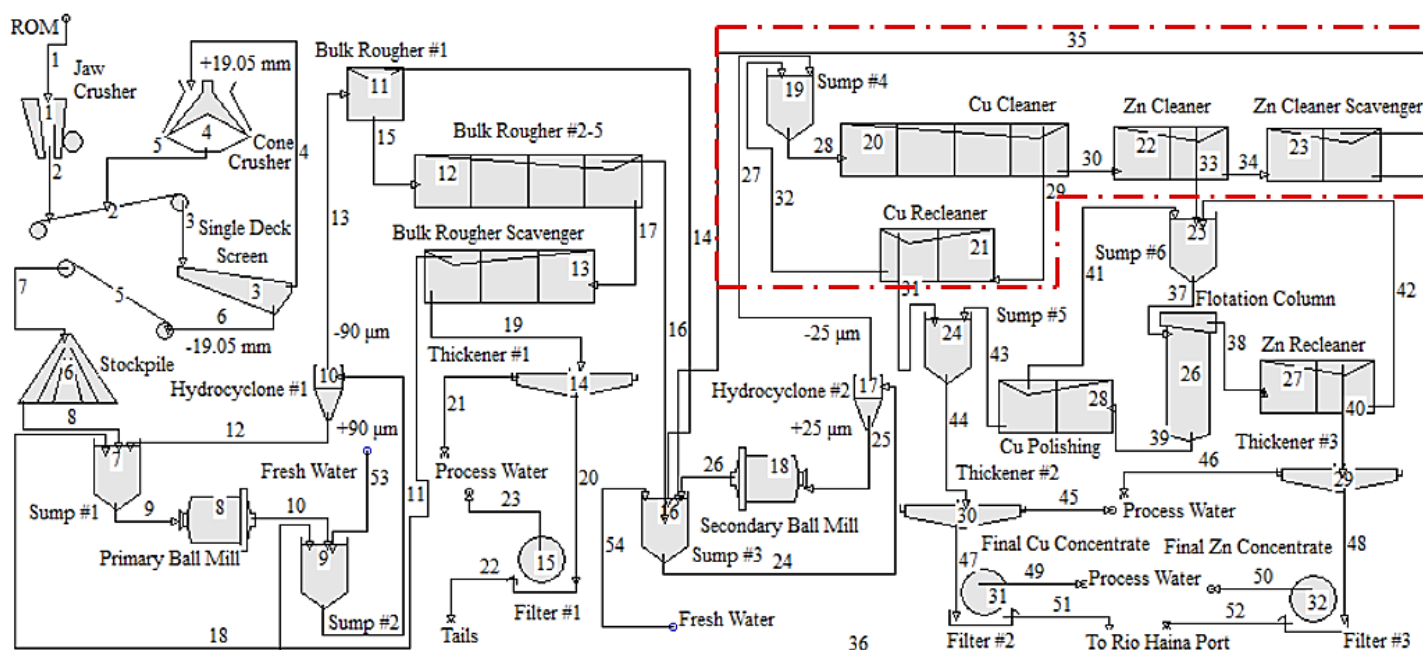
$$SGRC = \frac{CPRF}{EMP} = \frac{10.67 (\text{t/h})}{460.49 (\text{kW})} = 0.0232 \text{ t/kWh}^{25}.$$

Δηλαδή, ο ρυθμός που θραύονται τα χονδρομερή τεμαχίδια (+25 μm), είναι 0.0232 t ανά kWh που καταναλώνεται.

²⁵ Οι υπολογισμοί της ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης και στα δύο (2) κυκλώματα λειοτρίβησης-ταξινόμησης, σταμάτησαν στον υπολογισμό του ειδικού ρυθμού θραύσης, διότι έλειπαν οι πληροφορίες της ευθραυστότητας του μεταλλεύματος και της απόδοσης της λειοτρίβησης των σφαιρόμυλων.

4.4.5. Κύκλωμα Επίπλευσης II

Στο Σχήμα 4.30, εντοπίζεται το κύκλωμα επίπλευσης II κι ο Πίνακας 4.9, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του κυκλώματος.



Σχήμα 4.30: Το κύκλωμα επίπλευσης II στο διάγραμμα ροής του εργοστασίου.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα του κυκλώματος επίπλευσης II.

Ρεύμα	Παροχή Στερεών (t/h)	Παροχή Νερού (t/h)	Περιεκ. Πολφού σε Στερεά (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	P ₈₀ (μm)
27	17.2	108.9	13.64	9.81	10.22	34.57	0.09	24.3
28	20.67	114.77	15.26	9.01	9.42	35.55	0.07	24.3
29	10.61	22.55	32	14.31	7.69	34.56	0	24.3
30	10.06	92.23	9.84	3.43	11.25	36.6	0.15	24.2
31	7.14	16.66	30	18.81	8.78	31.71	0	24.4
32	3.47	5.89	37.08	5.06	5.45	40.41	0	24.2
33	3.21	3.92	45	3.14	29.53	24.6	0	24.3
34	6.85	88.31	7.2	3.56	2.68	42.23	0.23	24.2
35	2.97	8.92	25	5.52	4.58	40.81	0	24.2
36	3.88	79.38	4.66	2.06	1.22	43.3	0.4	24.1

Αυτό το κύκλωμα, περιλαμβάνει τέσσερις (4) διαδοχικές επιπλεύσεις, οι οποίες αποτελούν, κατά κύριο λόγο, τα στάδια καθαρισμού του μεταλλεύματος, από τα οποία ο χαλκός κι ο ψευδάργυρος αρχίζουν να διαχωρίζονται.

Το πρώτο στάδιο επίπλευσης αποτελεί τον καθαρό διαχωρισμό Cu (Cu Cleaner), το οποίο πραγματοποιείται σε συστοιχία τεσσάρων (4) κελιών, με όγκους 10 m³ το καθένα, ενώ σε κάθε κελί εισάγονται 100 m³/h, 110 m³/h, 110 m³/h και 110 m³/h αέρα, κατά αντιστοιχία με τη φορά της επίπλευσης (βλ. Σχήμα 4.30). Στους 17.2 t/h (Ρεύμα 27) της υπερχειλίσσης του δεύτερου υδροκυκλώνα και στους 3.47 t/h (Ρεύμα 32) του απορρίμματος της συστοιχίας επίπλευσης επανακαθαρισμού Cu (Cu Recleaner Tail), γίνεται προοδοποίηση εντός της τέταρτης δεξαμενής (Sump #4), πριν την εισαγωγή τους στη συστοιχία του καθαρού διαχωρισμού Cu, με προσθήκη 4000 mL/min

ρυθμιστικού (*Modifier*²⁶) ZnSO_4 ²⁷ της εταιρείας Flottec LLC, ώστε να επιδράσει σε αυτή την επίπλευση ως καταβυθιστικό του σφαλερίτη, με pH 10.5. Το συμπύκνωμα αυτής της επίπλευσης (*Cu Cleaner Concentrate*) των 10.61 t/h (*Πεύμα 29*), πηγαίνει στο στάδιο επανακαθαρισμού Cu (*Cu Recleaner*), ενώ το απόρριμμα (*Cu Cleaner Tail*) των 10.06 t/h (*Πεύμα 30*) πηγαίνει στο στάδιο καθαρισμού Zn (*Zn Cleaner*).

Το δεύτερο στάδιο της επίπλευσης, που αποτελεί τον επανακαθαρισμό του Cu, πραγματοποιείται σε συστοιχία δύο (2) κελιών, όγκων 10 m³. Σε αυτή την επίπλευση το pH είναι 10.4 και παρέχονται 90 m³/h και 140 m³/h αέρα, κατά αντιστοιχία με τη φορά της επίπλευσης (βλ. *Σχήμα 4.30*), ενώ δεν προστίθεται καμία ποσότητα αντιδραστηρίου. Το συμπύκνωμα των 7.14 t/h (*Πεύμα 31*), από αυτό το στάδιο (*Cu Recleaner Concentrate*) συγκεντρώνεται στην πέμπτη δεξαμενή (*Sump #5*), ενώ το απόρριμμα (*Cu Recleaner Tail*) των 3.47 t/h (*Πεύμα 32*), ανακυκλώνεται στο κύκλωμα, με την εισαγωγή του στην τέταρτη δεξαμενή.

Ακολουθεί, το στάδιο καθαρού διαχωρισμού του Zn (*Zn Cleaner*), με την επίπλευση των 10.06 t/h (*Πεύμα 30*) του απορρίμματος του καθαρού διαχωρισμού του Cu (*Cu Cleaner Tail*), σε συστοιχία δύο (2) κελιών, όγκου 38 m³ το καθένα. Και στα δυο κελία παρέχονται 500 m³/h αέρα και χωρίς προσθήκη ποσότητας αντιδραστηρίων, η επίπλευση γίνεται σε pH 7.5. Το συμπύκνωμα (*Zn Cleaner Concentrate*) των 3.21 t/h (*Πεύμα 33*) πηγαίνει προς το επόμενο κύκλωμα με την εισαγωγή του στην έκτη δεξαμενή (*Sump #6*), ενώ το απόρριμμα (*Zn Cleaner Tail*) των 6.85 t/h (*Πεύμα 34*), πηγαίνει στο τελευταίο στάδιο επίπλευσης, αυτού του κυκλώματος.

Αυτό το στάδιο, αποτελεί τον καθαριστικό καθαρό διαχωρισμό Zn (*Zn Cleaner Scavenger*) και γίνεται σε συστοιχία δύο (2) κελιών, με όγκους 10 m³ το καθένα. Η επίπλευση γίνεται σε pH 10.3, καθώς στο πρώτο κελί προστίθενται 5 mL/min του συλλέκτη 1234 Collector, ενώ η παροχή του αέρα στα κελία είναι 100 m³/h και 140 m³/h κατά αντιστοιχία με τη φορά της επίπλευσης (βλ. *Σχήμα 4.30*). Το συμπύκνωμα (*Zn Cleaner Scavenger Concentrate*) των 2.97 t/h (*Πεύμα 35*), ανακυκλώνεται στο κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης II, ενώ το απόρριμμα (*Zn Cleaner Scavenger Tail*) των 3.88 t/h (*Πεύμα 36*), ανακυκλώνεται στο κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης I.

4.4.6. Κύκλωμα Επίπλευσης III

Στο *Σχήμα 4.31*, εντοπίζεται το κύκλωμα επίπλευσης III κι ο *Πίνακας 4.10*, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του κυκλώματος.

Σε αυτό το κύκλωμα, που είναι και το τελευταίο της επίπλευσης του διαγράμματος ροής του εργοστασίου, γίνεται η παραλαβή του τελικού συμπυκνώματος του ψευδαργύρου κι η παραλαβή ενός μέρους του τελικού συμπυκνώματος του χαλκού, μέσω τριών σταδίων επίπλευσης, σε pH 7.2.

²⁶ Είναι οργανικές ή ανόργανες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση-ρύθμιση των συνθηκών του πολφού, ώστε να ενισχύσουν τη διαφορά στην επιφανειακή χημεία, μεταξύ των χρήσιμων και των σπινδρομων ορυκτών. Για αναλυτικές πληροφορίες Σταμπολιάδης (2008a, σσ. 191-193).

²⁷ Είναι ανασταλτικό αντιδραστήριο, με σύσταση 97 % w/w σε θειικό ψευδάργυρο (*Zinc Sulfate*) (Flottec LLC, 2017b).

Επειδή, το απόρριμμα της στήλης επίπλευσης, δεν είναι πολύ πλούσιο ούτε σε χαλκό (4.88% Cu), αλλά ούτε σε ψευδάργυρο (7.33% Zn), ακολουθεί ένα τελευταίο στάδιο επίπλευσης (*Cu Polishing*), σε συστοιχία δύο (2) κελιών, όγκων 10 m³, στα οποία παρέχονται 160 m³/h αέρα. Το συμπύκνωμα (*Cu Polishing Concentrate*) των 0.46 t/h (Περίγραμμα 41), ανακυκλώνεται στη στήλη επίπλευσης, ενώ το απόρριμμα (*Cu Polishing Tail*) των 1.24 t/h (Περίγραμμα 43), το οποίο αναφέρεται ως χαμηλής ποιότητας συμπύκνωμα χαλκού με 4.87% Cu, εισάγεται στην πέμπτη δεξαμενή και με τους 7.14 t/h (Περίγραμμα 31) του συμπυκνώματος της συστοιχίας επίπλευσης επανακαθαρισμού Cu (*Cu Recleaner Concentrate*) με 18.81% Cu, αποτελούν το τελικό συμπύκνωμα χαλκού (*Final Cu Concentrate*) του εργοστασίου με 16.75% Cu, το οποίο πηγαίνει προς το σύστημα αφυδάτωσης ΙΙ (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.7. Κυκλώματα Αφυδάτωσης Ι, ΙΙ και ΙΙΙ).

Στο Σχήμα 4.32, εντοπίζονται τα κυκλώματα αφυδάτωσης I, II και III κι ο Πίνακας 4.11, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του κυκλώματος.

[illegible]

79

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα ρεύματα των κυκλωμάτων αφυδάτωσης I, II και III.

Ρεύμα	Παροχή Στερεών (t/h)	Παροχή Νερού (t/h)	Περιεκ. Πολφού σε Στερεά (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	P ₈₀ (μm)
19	74.63	250.42	22.96	0.77	0.83	26.68	5.29	64.2
20	74.63	18.66	80	0.77	0.83	26.68	5.29	64.2
21	-	231.73	-	-	-	-	-	-
22	74.63	4.76	94	0.77	0.83	26.68	5.29	64.2
23	-	13.89	-	-	-	-	-	-
40	1.97	3.66	35.01	2.05	45.38	14.11	0	24.4
44	8.38	16.92	33.12	16.75	8.1	33.12	0	24.3
45	-	14.82	-	-	-	-	-	-
46	-	3.17	-	-	-	-	-	-
47	8.38	2.09	80	16.75	8.1	33.12	0	24.3
48	1.97	0.49	80	2.05	45.38	14.11	0	24.4
49	-	1.56	-	-	-	-	-	-
50	-	0.37	-	-	-	-	-	-
51	8.38	0.53	94	16.75	8.1	33.12	0	24.3
52	1.97	0.13	94	2.05	45.38	14.11	0	24.4

Το κύκλωμα αφυδάτωσης I (*Dewatering Circuit I*) χρησιμοποιείται για το τελικό απόρριμμα του εργοστασίου. Οι 74.63 t/h με περιεκτικότητα 22.96% σε στερεά (Ρεύμα 19), του απορρίμματος της χονδροειδούς καθαριστικής επίπλευσης (*Bulk Rougher Scavenger Tail*), περνάνε από τον πρώτο παχυντή (*Thickener #1*), ο οποίος μεταβάλλει την περιεκτικότητα σε 80% (Ρεύμα 20). Το προϊόν, της απορροής του παχυντή (*Thickener #1 Underflow*), πηγαίνει στη μηχανή διήθησης (*Filter #1*), η οποία μεταβάλλει την περιεκτικότητα σε στερεά από 80% σε 94% (Ρεύμα 22).

Το κύκλωμα αφυδάτωσης II (*Dewatering Circuit II*), μεταβάλλει την περιεκτικότητα σε στερεά των 8.38 t/h, του τελικού συμπυκνώματος χαλκού του εργοστασίου από 33.12% (Ρεύμα 44) σε 80% (Ρεύμα 47) με πάχυνση (@ *Thickener #2*) κι από 80% σε 94% (Ρεύμα 51) με διήθηση (@ *Filter #2*).

Το κύκλωμα αφυδάτωσης III (*Dewatering Circuit III*), μεταβάλλει την περιεκτικότητα σε στερεά των 1.97 t/h, του τελικού συμπυκνώματος ψευδαργύρου από 35.01% (Ρεύμα 40) σε 80% (Ρεύμα 48) με πάχυνση (@ *Thickener #3*) κι από 80% σε 94% (Ρεύμα 52) με διήθηση (@ *Filter #3*).

4.4.7.1. Ανάκτηση Νερού από τα Κυκλώματα Αφυδάτωσης του Εργοστασίου

Από την υπερχείλιση του πρώτου παχυντή (*Thickener #1 Overflow*) και την απορροή της πρώτης μηχανής διήθησης (*Filter #1 Underflow*), ανακτώνται $WR_{1,1} = 231.73$ t/h και $WR_{1,2} = 13.89$ t/h νερού διεργασίας (*Process Water*), από τα Ρεύματα 21 κι 23, αντίστοιχα (βλ. *Σχήμα 4.32* και *Πίνακας 4.10*). Επομένως, η μάζα του νερού, που ανακτάται³⁰ από το κύκλωμα αφυδάτωσης I, είναι:

³⁰ Προφανώς, αυτή η ποσότητα του νερού που ανακτάται εδώ ή στα επόμενα κυκλώματα αφυδάτωσης, ανακυκλώνεται στα διάφορα κυκλώματα του εργοστασίου, όπως π.χ. στο κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης I (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.2. *Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης I*). Για συμπληρωματικές πληροφορίες βλ. *Παράρτημα Ε-Ε.2.*.

$$WR_{@Dewatering\ Circuit\ I} = WR_{1,1} + WR_{1,2} = 231.73\ \text{t/h} + 13.89\ \text{t/h} = 245.62\ \text{t/h}.$$

Ομοίως, από το δεύτερο κύκλωμα αφυδάτωσης, ανακτώνται $WR_{2,1} = 14.82\ \text{t/h}$ και $WR_{2,2} = 1.56\ \text{t/h}$, από τα Ρεύματα 45 και 49, αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 4.32 και Πίνακας 4.10) με συνολική μάζα:

$$WR_{@Dewatering\ Circuit\ II} = WR_{2,1} + WR_{2,2} = 14.82\ \text{t/h} + 1.56\ \text{t/h} = 16.38\ \text{t/h}$$

ενώ, από το τρίτο κύκλωμα, ανακτώνται $WR_{3,1} = 3.17\ \text{t/h}$ και $WR_{3,2} = 0.37\ \text{t/h}$, από τα Ρεύματα 46 και 50, αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 4.32 και Πίνακας 4.10) με συνολική μάζα:

$$WR_{@Dewatering\ Circuit\ III} = WR_{3,1} + WR_{3,2} = 3.17\ \text{t/h} + 0.37\ \text{t/h} = 3.54\ \text{t/h}.$$

Επομένως, η ολική μάζα νερού, που ανακτάται από όλο το εργοστάσιο εμπλουτισμού, είναι:

$$WR_{@Processing\ Plant} = WR_{Dew.Cir.I} + WR_{Dew.Cir.II} + WR_{Dew.Cir.III} \rightarrow$$

$$\rightarrow WR_{Processing\ Plant} = 245.62\ \text{t/h} + 16.38\ \text{t/h} + 3.54\ \text{t/h} = 264.89\ \text{t/h}.$$

4.5. Σχολιασμός της Προσομοίωσης

Από τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την προσομοίωση (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4. Τμηματική Παρουσίαση του Εργοστασίου Εμπλουτισμού και Συνοδευτικοί Υπολογισμοί), μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν την προσέγγιση στις πραγματικές συνθήκες παραγωγής, καθώς και χρήσιμα διαγράμματα, που αφορούν τη λειτουργία και τη συνεργασία των διαδοχικών μηχανημάτων στα κυκλώματα επεξεργασίας.

4.5.1. Αναλύσεις στα Ρεύματα του Διαγράμματος Ροής

Ο Πίνακας 4.12, παρουσιάζει τις περιεκτικότητες που παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM, καθώς και τις περιεκτικότητες που προέκυψαν από την προσομοίωση. Κατά κύριο λόγο, οι περιεκτικότητες αυτές, αφορούν τα ρεύματα των σταδίων επίπλευσης του εργοστασίου, με βάση τις οποίες έγινε η μοντελοποίηση των επιπλεύσεων (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.2.2.6. Μοντελοποίηση Κελιού, Συστοιχιών και Στήλης Επίπλευσης).

Πίνακας 4.12: Συγκεντρωτική παρουσίαση στοιχειακών αναλύσεων, που προέκυψαν από την αυτοψία στο εργοστάσιο (Plant Survey) και την προσομοίωση στο MODSIM™.

Στάδιο	Ρεύμα	Δεδομένα			Προσομοίωση			
		Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)
Χονδροειδής #1 (Bulk Ro. #1)	Τροφ.	2.38	2.59	27.03	2.37	2.52	28.1	4.36
	Απορ.	1.24	1.96	30.62	0.97	1.07	27.66	4.94
	Συμπ.	9.65	13.24	31.3	12.49	12.95	31.27	0.13
Χονδροειδής #2-5 (Bulk Ro. #2-5)	Τροφ.	1.24	1.96	30.62	0.97	1.07	27.66	4.94
	Απορ.	-	-	-	0.82	0.87	27.14	5.15
	Συμπ.	4.81	6.32	39.02	4.54	6.05	40.16	0.02

Χονδροειδής Καθαριστικός (Bulk Ro. Sc.)	Τροφ.	-	-	-	0.82	0.87	27.14	5.15
	Τ.Απορ.	0.45	0.66	27.25	0.77	0.83	26.68	5.29
	Συμπ.	2.09	2.01	44.3	2.72	2.01	43.83	0.02
Καθαρός Cu (Cu Cleaner)	Τροφ.	6.18	6.14	39.94	9.01	9.42	35.55	0.07
	Απορ.	3.37	6.23	40.9	3.43	11.25	36.6	0.15
	Συμπ.	15.74	8.19	34.92	14.31	7.69	34.56	0
Επανακαθ. Cu (Cu Recleaner)	Τροφ.	15.74	8.19	34.92	14.31	7.69	34.56	0
	Απορ.	6.58	6.67	37.81	5.06	5.45	40.41	0
	Συμπ.	19.09	8.96	31.02	18.81	8.78	31.71	0
Καθαρός Zn (Zn Cleaner)	Τροφ.	3.37	6.23	40.9	3.43	11.25	36.6	0.15
	Απορ.	3.44	1.61	44.64	3.56	2.68	42.2	0.23
	Συμπ.	3.68	29.55	22.48	3.14	29.53	24.6	0
Καθαριστικός Καθαρού Zn (Zn Clea. Sc.)	Τροφ.	3.68	29.55	22.48	3.14	29.53	24.6	0
	Απορ.	2.18	0.98	45.82	2.06	1.22	43.3	0.4
	Συμπ.	5.81	2.95	42.61	5.52	4.58	40.81	0
Στήλη (Column)	Τροφ.	4.08	24.95	25.64	3.92	23	28.76	0
	Απορ.	5.04	8.41	38.76	4.88	7.33	39.19	0
	Συμπ.	3.77	36.44	18.25	3.54	29.32	24.57	0
Επανακαθ. Zn (Zn Recleaner)	Τροφ.	3.77	36.44	18.25	3.54	29.32	24.57	0
	Απορ.	5.1	13	34.41	4.86	15.09	33.82	0
	Τ. Συμπ.	3.47	37.21	13.7	2.05	45.38	14.11	0
Cu Polishing	Τροφ.	5.04	8.41	38.76	4.88	7.33	39.19	0
	Απορ.	4.67	3.76	41.23	4.87	4.24	41.34	0
	Συμπ.	6.34	16.94	31.19	4.89	15.71	33.37	0
	Τ. Συμπ.	15.37	7.11	32.98	16.75	8.1	33.12	0

Επίσης, οι αναλύσεις, της εταιρείας CORMIDOM, περιλαμβάνουν 185 ppm (*Parts per Million*) Cd στη τροφοδοσία του σταδίου της χονδροειδούς επίπλευσης #1, 74 ppm Cd στο τελικό απόρριμμα, 486 ppm Cd στο τελικό συμπύκνωμα του χαλκού και 2343 ppm Cd στο τελικό συμπύκνωμα του ψευδαργύρου (Δεδομένα CORMIDOM S.A.S., 2023).

Αναγνωρίζοντας, πως η μοντελοποίηση των επιπλεύσεων είναι αρκετά απαιτητική να οριστεί ρητά μόνο από δεδομένα αναλύσεων, θεωρείται πως η προσομοίωση είναι αρκετά ικανοποιητική.

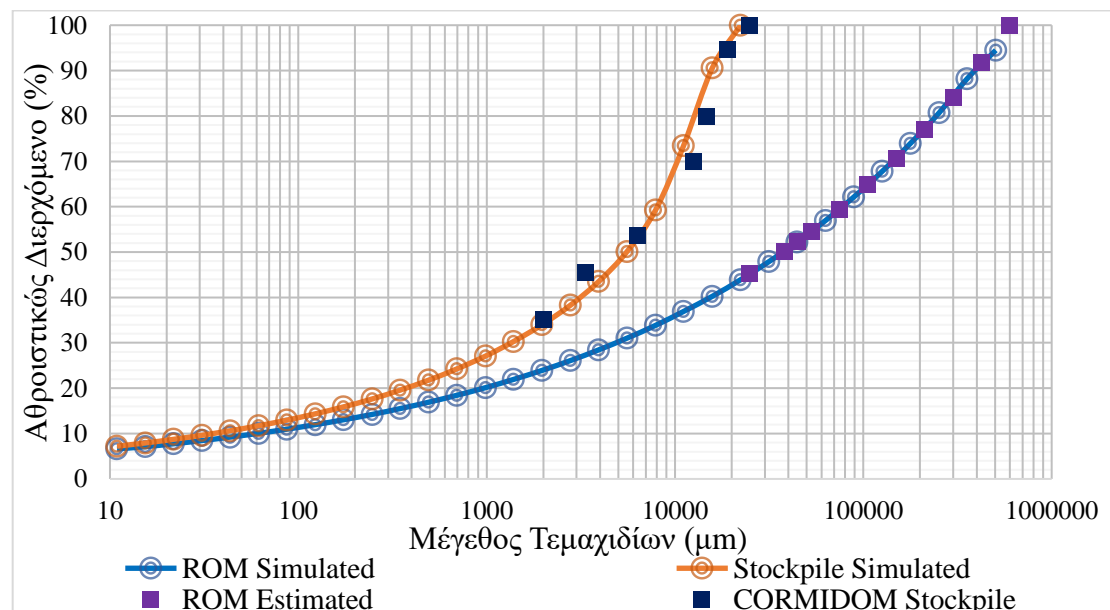
4.5.2. Διαγράμματα που Εξάγονται από την Προσομοίωση.

Τα διαγράμματα³¹ των κοκκομετρικών κατανομών των ρευμάτων, που υπολογίζονται από το λογισμικό, μπορούν να εμφανιστούν με δεξί κλικ στην επιθυμητή ροή>*Plot Size Distribution* (βλ. Σχήμα 4.23).

³¹ Επειδή τα διαγράμματα που εκτυπώνει το λογισμικό, δεν είναι ευέλικτα για παρουσίαση, τα δεδομένα μεταφέρονται σε λογιστικό φύλλο (*Spreadsheet*) και κατασκευάζονται εκ νέου.

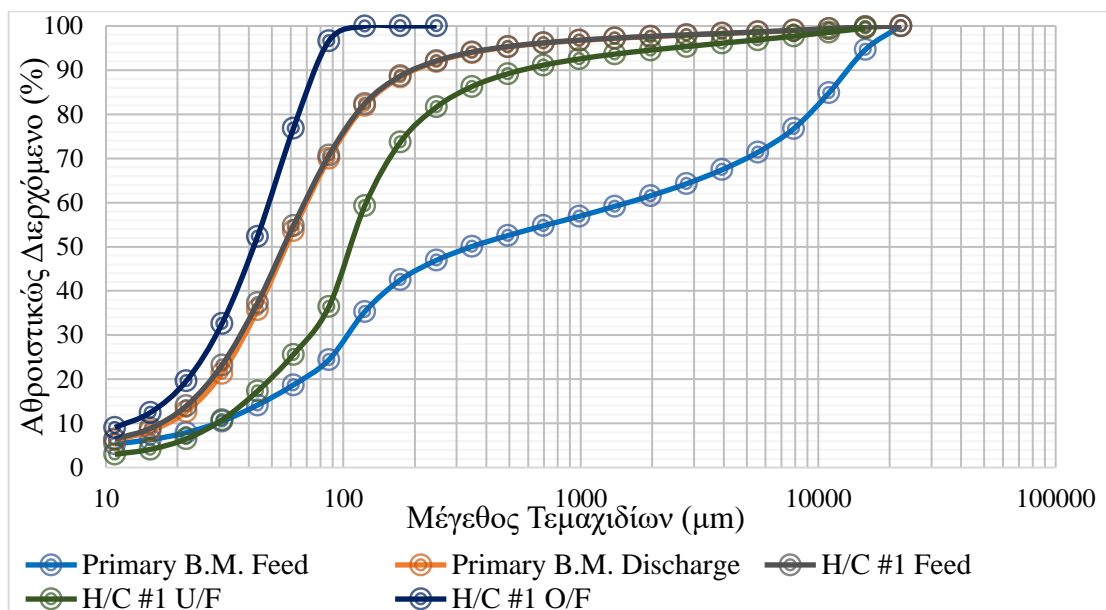
Η κοκκομετρική κατανομή, που αφορά την αρχική τροφοδοσία του σιαγονωτού κι υπολογίστηκε στον Πίνακα 4.1, προέκυψε από το γεγονός, πως για δεδομένα λειτουργικά χαρακτηριστικά μονάδων, που παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM (βλ. υπό-κεφάλαια 4.2.2.1. Μοντελοποίηση Σιαγονωτού Σπαστήρα, 4.2.2.2. Μοντελοποίηση Κοσκίνου Μονού Καταστρώματος και 4.2.2.3. Μοντελοποίηση Κωνικού Σπαστήρα), η κοκκομετρική κατανομή του προϊόντος, του κυκλώματος θραύσης-κοσκίνισης, που προκύπτει από τη προσομοίωση, πρέπει να είναι παραπλήσια με την αντίστοιχη που παραχωρήθηκε από την εταιρεία, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2.

Από το Σχήμα 4.33, προκύπτει πως η εκτίμηση της κοκκομετρίας του εξορυγμένου μεταλλεύματος (*ROM Estimated*), για συντελεστή ομοιομορφίας κατανομής $m = 0.25$ (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.1.3. Ορισμός Δεδομένων στις Ροές Τροφοδοσίας), είναι αρκετά ικανοποιητική, καθώς η κοκκομετρία του προϊόντος του κυκλώματος (*Stockpile Simulated*), που υπολογίστηκε από το λογισμικό, έχει προσεγγίσει σε μεγάλο βαθμό τη διαθέσιμη κοκκομετρία (*CORMIDOM Stockpile*), που παραχωρήθηκε από την εταιρεία CORMIDOM (βλ. Πίνακα 4.2). Επίσης, το μέγεθος, από το οποίο διέρχεται το 80% του μεταλλεύματος, δεν παρουσιάζει ουσιαστική διαφορά μεταξύ πραγματικού (14,824 μm @ *CORMIDOM Stockpile*) και προσομοιωμένου (12,500 μm @ *Stockpile Simulated*).



Σχήμα 4.33: Κοκκομετρικές κατανομές της τροφοδοσίας και του προϊόντος του κυκλώματος θραύσης-κοσκίνισης.

Στο Σχήμα 4.34, παρουσιάζονται οι προσομοιωμένες κοκκομετρικές κατανομές, που αφορούν το κύκλωμα λειοτρίβησης-ταξινόμησης Ι. Η κοκκομετρία στην είσοδο του πρωτογενή σφαιρόμυλου (*Primary B.M. Feed*), υπεκφεύγει από τις συνηθισμένες κατανομές και δεν παρουσιάζει κάποια σχετική ομοιομορφία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, πως η φρέσκια τροφή των 85 t/h, αναμειγνύεται με ανακυκλώσεις του μεταλλεύματος από άλλα στάδια του εργοστασίου, εντός κι εκτός κυκλώματος (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.2. Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης Ι), διαφορετικών κοκκομετρικών ευρών.



Σχήμα 4.34: Κοκκομετρικές κατανομές στις εισόδους και στις εξόδους του κυκλώματος λειοτριβήσης-ταξινόμησης I.

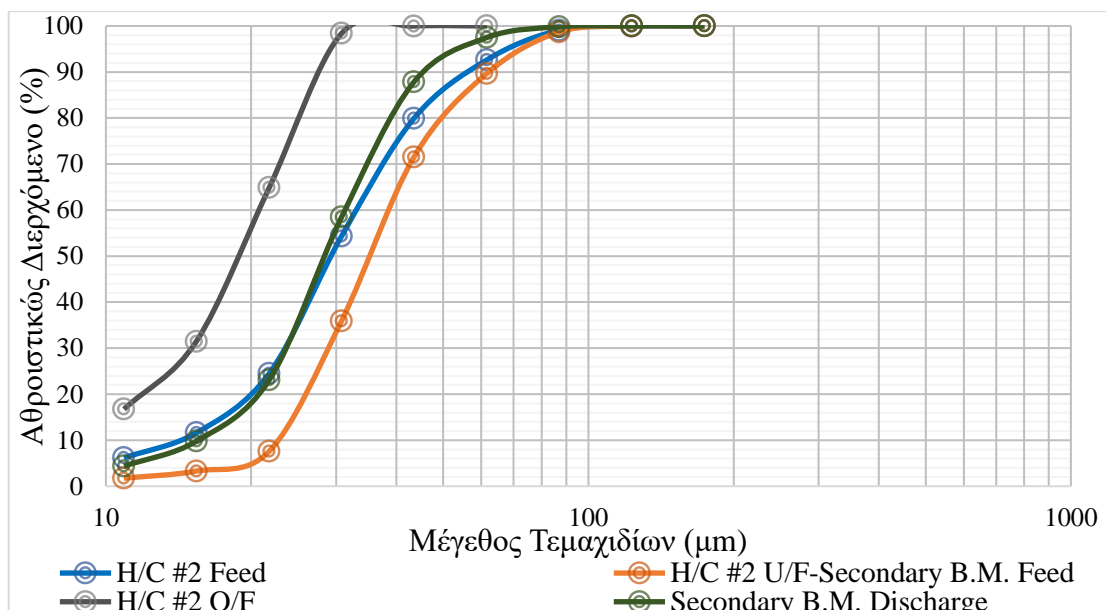
Συνέπεια αυτής τη μη ομαλής κοκκομετρίας, αφενός είναι η δυσκολία του μύλου να λειοτριβήσει σε ικανοποιητικό βαθμό (πτώση της απόδοσής του) κι αφετέρου η μεταβολή της αναγκαίας ποσότητας του νερού, που πρέπει να προστίθεται ή να αφαιρείται, για την επίτευξη των βέλτιστων περιεκτικοτήτων σε στερεά των πολφών. Η μη ισορροπημένη λειτουργία, ενός τέτοιου κυκλώματος, μπορεί να προκαλέσει φτωχή ταξινόμηση, επιπλοκές στη συνεργασία των μηχανημάτων, μη σταθεροποιημένη παραγωγή από το κύκλωμα, καθώς και φθορά του εξοπλισμού, σε βάθος χρόνου (π.χ. στα μέσα λειοτριβήσης).

Παρ' όλα αυτά, η μοντελοποίηση του πρωτογενή σφαιρόμυλου (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.2.2.4. Μοντελοποίηση Σφαιρόμυλων) έδωσε αρκετά καλή εκτίμηση του P_{80} (116 μm) στην απορροή του (Primary B.M. Discharge), σε σχέση με το εύρος του P_{80} (110-130 μm), που παραχωρήθηκε από την εταιρεία κι απέδωσε μια ομοιόμορφη κοκκομετρία, με ένα εκτενές εύρος μεγεθών.

Η ανάμιξη του προϊόντος της απορροής του μύλου, με το απόρριμμα της συστοιχίας επίπλευσης του καθαριστικού καθαρού διαχωρισμού Zn, δίνει παραπλήσια κοκκομετρία (H/C #1 Feed), με αυτήν που αντιστοιχεί στην απορροή του μύλου.

Τέλος, μια σημαντική ποσότητα του μεταλλεύματος φαίνεται να υπέρ-λειοτριβείται, σε αυτό το κύκλωμα, καθώς η κοκκομετρική κατανομή της απορροής του πρώτου υδροκυκλώνα (H/C #1 U/F), αποτελείται στο 40% από τεμαχίδια, που είναι μικρότερα από 90 μm.

Στο Σχήμα 4.35, παρουσιάζονται οι προσομοιωμένες κοκκομετρικές κατανομές, που αφορούν το κύκλωμα λειοτριβήσης-ταξινόμησης II. Η μοντελοποίηση του δευτερογενή σφαιρόμυλου (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.2.2.4. Μοντελοποίηση Σφαιρόμυλων) έδωσε μια μέτρια εκτίμηση του P_{80} (39.1 μm) στην απορροή του (Secondary B.M. Discharge), σε σχέση με το εύρος του P_{80} (25-30 μm), που παραχωρήθηκε από την εταιρεία.

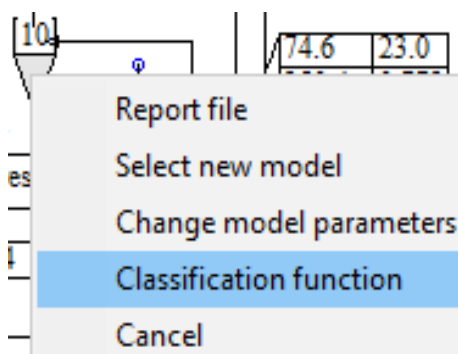


Σχήμα 4.35: Κοκκομετρικές κατανομές στις εισόδους και στις εξόδους του κυκλώματος λειοτριβήσης-ταξινόμησης II.

Η κοκκομετρία της απορροής αυτής επηρεάζεται ελαφρώς αισθητά (ιδίως στο εύρος 30-80 μm), όταν αναμιγνύεται με τα συμπυκνώματα των χονδροειδών επιπλεύσεων #1 και #2-5 (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.4. *Κύκλωμα Λειοτριβήσης-Ταξινόμησης II*).

Επίσης, δεν παρατηρείται σημαντική υπέρ-λειοτριβήση σε αυτό το κύκλωμα, καθώς η απορροή του υδροκυκλώνα (*H/C #2 U/F-Secondary B.M. Feed*) αποτελείται περίπου στο 15% από τεμαχίδια που είναι μικρότερα από 25 μm.

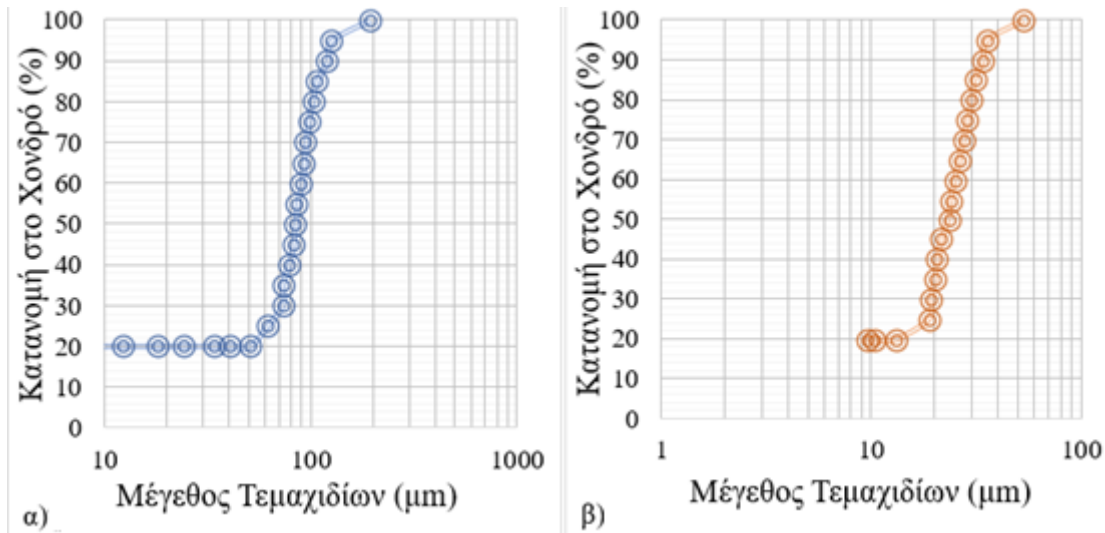
4.5.2.1. Αξιολόγηση Λειτουργίας Υδροκυκλώνων



Σχήμα 4.36: Πρόσβαση στις καρτέλες διαχωρισμού των υδροκυκλώνων.

Στις λειτουργικές μονάδες των υδροκυκλώνων του προσομοιωμένου διαγράμματος ροής, με δεξί κλικ>*Classification Function* (βλ. Σχήμα 4.36), το λογισμικό εμφανίζει τα διαγράμματα κατανομής στο χονδρό προϊόν. Με βάση αυτά τα διαγράμματα, γίνονται οι σχετικοί υπολογισμοί, που παρουσιάζονται στο υπό-κεφάλαιο 2.5. *Αξιολόγηση Λειτουργίας Ταξινομητών* και χαρακτηρίζεται η ποιότητα της ταξινόμησης.

Στο Σχήμα 4.37 απεικονίζονται τα διαγράμματα κατανομής στο χονδρό προϊόν, για τους υδροκυκλώνες του εργοστασίου.



Σχήμα 4.37: Διάγραμμα κατανομής στο χονδρό α) για τον πρώτο υδροκυκλώνα και β) για τον δεύτερο υδροκυκλώνα.

Το κλάσμα μάζας των λεπτών τεμαχιδίων, που πηγαίνει στην απορροή του πρώτου υδροκυκλώνα, για μάζες νερού $F_{H/C \#1} = 372.6 \text{ t/h}$ και $\Psi_{H/C \#1} = 74.48 \text{ t/h}$, στην τροφοδοσία και στην απορροή του (βλ. Πίνακας 4.6), αντίστοιχα, από την Εξίσωση 2.23, είναι:

$$R_{f@H/C \#1} = \frac{\Psi_{H/C \#1}}{F_{H/C \#1}} * 100 = \frac{74.48 \text{ t/h}}{372.6 \text{ t/h}} * 100 = 19.99\%.$$

κι ομοίως, για μάζες νερού $F_{H/C \#2} = 136.19 \text{ t/h}$ και $\Psi_{H/C \#2} = 27.22 \text{ t/h}$, στην τροφοδοσία και στην απορροή του δεύτερου υδροκυκλώνα (βλ. Πίνακας 4.8) αντίστοιχα:

$$R_{f@H/C \#2} = \frac{\Psi_{H/C \#2}}{F_{H/C \#2}} * 100 = \frac{27.22 \text{ t/h}}{136.19 \text{ t/h}} * 100 = 19.99\%$$

Η οξύτητα διαχωρισμού του πρώτου υδροκυκλώνα για $d_{25} = 61.8 \mu\text{m}$ και $d_{75} = 97.7 \mu\text{m}$ (βλ. Σχήμα 4.37α)), από την Εξίσωση 2.24, είναι:

$$Sh_{@H/C \#1} = \frac{d_{75}}{d_{25}} = \frac{97.7 \mu\text{m}}{61.8 \mu\text{m}} = 1.57$$

κι ομοίως, για τον δεύτερο υδροκυκλώνα με $d_{25} = 18.7 \mu\text{m}$ και $d_{75} = 28.8 \mu\text{m}$, (βλ. Σχήμα 4.37β)):

$$Sh_{@H/C \#2} = \frac{d_{75}}{d_{25}} = \frac{28.8 \mu\text{m}}{18.7 \mu\text{m}} = 1.53$$

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα και τον Πίνακα 2.1, η ταξινόμηση και των δύο (2) υδροκυκλώνων χαρακτηρίζεται ως καλή.

4.5.3. Υπολογισμοί Βάσει των Τελικών Προϊόντων του Εργοστασίου

Γνωρίζοντας τις ποσότητες και τις ποιότητες των τελικών προϊόντων, γίνεται η αξιολόγηση του διαχωρισμού με βάση τα υπό-κεφάλαια 2.1. *Ισοζύγια Μαζών και Περιεκτικότητες* και 2.3. *Βαθμός Διαχωρισμού*. Ο Πίνακας 4.13 συγκεντρώνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν την αρχική τροφοδοσία, το τελικό απόρριμμα και τα τελικά συμπυκνώματα του εργοστασίου εμπλουτισμού.

Πίνακας 4.13: Ποσότητες και περιεκτικότητες της αρχικής τροφοδοσίας και των τελικών προϊόντων του εργοστασίου εμπλουτισμού, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση.

Προϊόν	Μάζα (t/h)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)
Τροφοδοσία (F)	85	2.38	2.59	27.03	4.64
Τελικό Συμπύκνωμα Cu (C_{Cu})	8.38	16.75	8.1	33.12	0
Τελικό Συμπύκνωμα Zn (C_{Zn})	1.97	2.05	45.38	14.11	0
Τελικό Απόρριμμα (T)	74.65	0.77	0.83	26.88	5.29

Από την Εξίσωση 2.5, ο λόγος συγκέντρωσης του συμπυκνώματος χαλκού, είναι:

$$K_{Cu} = \frac{F}{C_{Cu}} = \frac{85 \text{ t/h}}{8.38 \text{ t/h}} = 10.13$$

κι ο λόγος συγκέντρωσης του συμπυκνώματος ψευδαργύρου, είναι:

$$K_{Zn} = \frac{F}{C_{Zn}} = \frac{85 \text{ t/h}}{1.97 \text{ t/h}} = 43.15.$$

Δηλαδή, απαιτούνται 10.13 t τροφοδοσίας για την παραγωγή ενός (1) τόνου (t) συμπυκνώματος χαλκού και 43.15 t για την παραγωγή ενός (1) τόνου (t) συμπυκνώματος ψευδαργύρου, από το συγκεκριμένο μετάλλευμα.

Από την Εξίσωση 2.6, το εκατοστιαίο ποσοστό (%) της τροφοδοσίας, που εμφανίζεται στο συμπύκνωμα του χαλκού, είναι:

$$Y_{Cu} = \frac{C_{Cu}}{F} * 100 = \frac{8.38 \text{ t/h}}{85 \text{ t/h}} * 100 = 9.86\%$$

ενώ, το αντίστοιχο ποσοστό (%), για το συμπύκνωμα του ψευδαργύρου, είναι:

$$Y_{Zn} = \frac{C_{Zn}}{F} * 100 = \frac{1.97 \text{ t/h}}{85 \text{ t/h}} * 100 = 2.32\%.$$

Επίσης, από τις Εξισώσεις 2.8 και 2.9³², η ανάκτηση του χαλκού στο τελικό του συμπύκνωμα, είναι:

³² Όπως παρατηρείται, $R_{Cu} + J_{Cu}$ και $R_{Zn} + J_{Zn}$, $\neq 100$ %. Για να ισχύει, $R + J = 100$ % στην περίπτωση αυτή, πρέπει να υπολογιστούν οι ανακτήσεις (ή απώλειες, ανάλογα με την προσωπική θεώρηση), του χαλκού στο συμπύκνωμα του ψευδαργύρου και του ψευδαργύρου στο συμπύκνωμα του χαλκού. Επομένως, θα ισχύει:

$$R_{Cu@Cu \text{ Conc.}} + J_{Cu@Zn \text{ Conc.}} + J_{Cu@Final \text{ Tail}} = 100\%, \text{ και} \\ R_{Zn@Zn \text{ Conc.}} + J_{Zn@Cu \text{ Conc.}} + J_{Zn@Final \text{ Tail}} = 100\%.$$

$$R_{Cu} = \frac{C_{Cu} * c_{Cu} * 100}{F * f_{Cu}} = \frac{8.38 (t/h) * 16.75}{85 (t/h) * 2.38} * 100 = 69.37\%$$

με την απώλεια του χαλκού στο τελικό απόρριμμα:

$$J_{Cu} = \frac{T_{Cu} * t_{Cu} * 100}{F * f_{Cu}} = \frac{74.65 (t/h) * 0.77}{85 (t/h) * 2.38} * 100 = 28.49\%$$

κι η ανάκτηση του ψευδαργύρου στο τελικό του συμπύκνωμα, είναι:

$$R_{Zn} = \frac{C_{Zn} * c_{Zn} * 100}{F * f_{Zn}} = \frac{1.97 (t/h) * 45.38}{85 (t/h) * 2.59} * 100 = 40.61\%.$$

με την απώλεια του ψευδαργύρου στο τελικό απόρριμμα:

$$J_{Zn} = \frac{T_{Zn} * t_{Zn} * 100}{F * f_{Zn}} = \frac{74.65 (t/h) * 0.83}{85 (t/h) * 2.59} * 100 = 28.13\%.$$

Επομένως, ο βαθμός διαχωρισμού, με $Y_{Cu} = 9.86\%$, $c_{max} = 34.625\%$ (περιεκτικότητα Cu στο $CuFeS_2$, βλ. *Παράρτημα Α-Α.1.*), $c_{Cu} = 16.75\%$ κι $f_{Cu} = 2.38\%$ στο τελικό συμπύκνωμα του χαλκού, σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία, από την *Εξίσωση 2.15*, είναι:

$$\eta_{Cu} = \frac{Y_{Cu} * c_{max} * (c_{Cu} - f_{Cu})}{(c_{max} - f_{Cu}) * f_{Cu}} * 100 = \frac{0.0986 * 0.34625 * (0.1675 - 0.0238)}{(0.34625 - 0.0238) * 0.0238} * 100 = 63.93\%$$

ενώ, ο βαθμός διαχωρισμού, με $Y_{Zn} = 2.32\%$, $c_{max} = 67.103\%$ (περιεκτικότητα Zn στο ZnS , βλ. *Παράρτημα Α-Α.1.*), $c_{Zn} = 45.38\%$ κι $f_{Zn} = 2.59\%$ στο τελικό συμπύκνωμα του ψευδαργύρου, σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία, είναι:

$$\eta_{Zn} = \frac{Y_{Zn} * c_{max} * (c_{Zn} - f_{Zn})}{(c_{max} - f_{Zn}) * f_{Zn}} * 100 = \frac{0.0232 * 0.67103 * (0.4538 - 0.0259)}{(0.67103 - 0.0259) * 0.0259} * 100 = 39.87\%.$$

Κεφάλαιο 5-Βελτιστοποίηση με Βάση τις Υπάρχουσες Συνθήκες του Διαγράμματος Ροής του Εργοστασίου Εμπλουτισμού

Τα εργοστάσια εμπλουτισμού αντιμετωπίζουν συχνά προκλήσεις που αφορούν, χαμηλές ανακτήσεις και μεταβλητές ποιότητες στα τελικά προϊόντα (Jargalsaikhan & Ishgen, 2019), μέτρια έως κακή λειτουργία των μηχανημάτων, καθώς κι υψηλά κόστη λειτουργίας, συντήρησης, μεταφοράς, χύτευσης κι επεξεργασίας.

Η βελτιστοποίηση (*Optimization*) τέτοιων βιομηχανικών εγκαταστάσεων, έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των διεργασιών, για την επίτευξη της μέγιστης παραγωγής με το ελάχιστο κόστος. Απαιτεί διεπιστημονική προσέγγιση, καθώς η παραγωγή εμπορεύσιμου προϊόντος υψηλής ποιότητας, είναι άθροισμα πολλών παραγόντων, που χρήζουν ευρείας κατανόησης των τεχνικών κι οικονομικών πτυχών της συνολικής επεξεργασίας και των σταδίων που συνδέονται με αυτήν (Luukkanen, 2021).

Η επιτυχημένη λειτουργία, μιας σύνθετης βιομηχανικής εγκατάστασης, εξαρτάται από ακριβείς μετρήσεις και τον έλεγχο ενός πλήθους παραμέτρων. Η μεταβλητότητα της αρχικής τροφοδοσίας, η σύνθετη ορυκτολογία, η ποιότητα του νερού επεξεργασίας, τα αντιδραστήρια, όπως κι άλλοι παράγοντες, επηρεάζουν την απόδοση των διεργασιών, θέτοντας προκλήσεις για βελτιστοποίηση κι έλεγχο (*Process Auditing*). Η ολοκληρωμένη και συχνή ανάλυση με βάση την ορυκτολογία, οι αξιόπιστες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο από τα διάφορα στάδια των διεργασιών κι η ορθή διαχείριση ενός συνόλου δεδομένων, αποτελούν τους βασικούς πυλώνες της βελτιστοποίησης (Luukkanen, 2021).

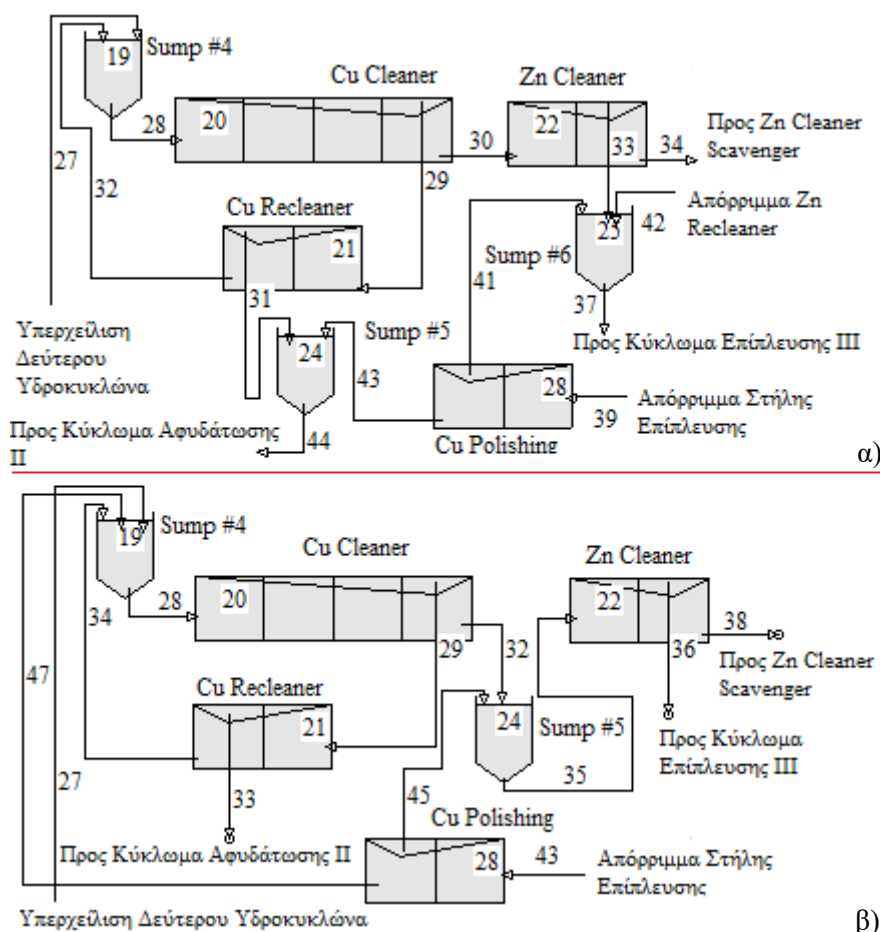
5.1. Περιγραφή της Βελτιστοποίησης και Προσομοίωσή της

Η παρούσα βελτιστοποίηση σχετίζεται με βελτιωτικές αλλαγές που περιλαμβάνουν την αναδιάταξη των ρευμάτων επεξεργασίας του σταδίου επίπλευσης Cu Polishing, στο υπάρχον διάγραμμα ροής (βλ. *Σχήμα 4.9*). Στο *Σχήμα 5.1*, απεικονίζεται η νέα διάταξη των ρευμάτων, σε σχέση με την αρχική τους διεύθυνση.

Με βάση τα αποτελέσματα του υπό-κεφαλαίου 4.4.6. *Κύκλωμα Επίπλευσης III* και το *Σχήμα 5.1α*), το *Ρεύμα 43* (*Ρεύμα 47* στο *Σχήμα 5.1β*)) με 4.87% Cu αναμιγνύεται μέσω της πέμπτης δεξαμενής με το *Ρεύμα 31* (*Ρεύμα 33* στο *Σχήμα 5.1β*) με 18.81% Cu, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα, να υποβαθμίζεται η ποιότητα του τελικού συμπυκνώματος χαλκού (16.75% Cu). Για αυτόν τον λόγο, το απόρριμμα της συστοιχίας επίπλευσης Cu Polishing (*Ρεύμα 47*), μεταφέρεται στην αρχική τροφοδοσία του κυκλώματος επίπλευσης II, με την εισαγωγή του στην τέταρτη δεξαμενή (*Sump #4*) για επανακυκλοφορία, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 5.1β*).

Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα των υπό κεφαλαίων 4.4.5. *Κύκλωμα Επίπλευσης II* και 4.4.6. *Κύκλωμα Επίπλευσης III* και το *Σχήμα 5.1α*), το *Ρεύμα 30* (*Ρεύμα 32* στο *Σχήμα 5.1β*)) έχει ποιότητα 3.43% Cu και 11.25% Zn, ενώ το *Ρεύμα 41* (*Ρεύμα 45* στο *Σχήμα 5.1β*)) έχει ποιότητα 4.89% Cu και 15.71% Zn. Λόγω της παραπλήσιας ποιότητας των δύο ρευμάτων, θεωρείται πως είναι πιο αποδοτικό το συμπύκνωμα της

συστοιχίας επίπλευσης Cu Polishing να περάσει από το στάδιο καθαρού διαχωρισμού Zn. Επομένως, η πέμπτη δεξαμενή (Sump #5) χρησιμοποιείται για την ανάμιξη του απορρίμματος της συστοιχίας επίπλευσης του καθαρού διαχωρισμού Cu (Cu Cleaner) (Ρεύμα 32) με το συμπύκνωμα της συστοιχίας επίπλευσης Cu Polishing (Ρεύμα 45) και κατόπιν, το προϊόν αυτό, οδηγείται στην επίπλευση του καθαρού διαχωρισμού Zn (Zn Cleaner), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1β).



Σχήμα 5.1: Εστίαση στις διατάξεις των ρευμάτων α) πριν και β) μετά τις βελτιωτικές αλλαγές.

Στο Σχήμα 5.2 και Σχήμα 5.3, παρουσιάζονται κι οι δυο διατάξεις του εργοστασίου εμπλουτισμού. Το Σχήμα 5.2 δείχνει την αρχική και τη βελτιωμένη προσομοίωση, με στοιχείο αναφοράς στις ετικέτες των ρευμάτων τον χαλκό κι αντίστοιχα το Σχήμα 5.3 δείχνει την προσομοίωση αυτήν, με στοιχείο αναφοράς τον ψευδάργυρο.

5.1.1. Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού στην Έκτη Δεξαμενή του Κυκλώματος Επίπλευσης ΙΙΙ³³

Κατά τη μεταφορά του ρεύματος του συμπυκνώματος της συστοιχίας επίπλευσης Cu Polishing, μεταβάλλεται η ποσότητα κι η περιεκτικότητα σε στερεά της τροφοδοσίας της στήλης επίπλευσης, από 5.9 t/h και 38.9% (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.6. Κύκλωμα Επίπλευσης ΙΙΙ) σε 5.98 t/h και 39.8%, αντίστοιχα. Οπότε, για να διατηρηθεί η περιεκτικότητα 38.9% στην τροφοδοσία της στήλης, στους πλέον 5.98 t/h, πρέπει να προστεθεί επιπλέον ποσότητα φρέσκου νερού στην έκτη δεξαμενή (Sump #6), η οποία υπολογίζεται από τις αραιώσεις (βλ. υπό-κεφάλαιο 2.4. Ισοζύγια Μάζας Διακινούμενων Στερεών).

Ο πολφός, με περιεκτικότητα 38.9%, έχει αραιώση:

$$f'_{Sump \#6@38.9\%} = \frac{100-38.9}{38.9} = 1.56$$

με βάρος νερού:

$$M_{W@38.9\%} = f'_{Sump \#6@38.9\%} * M_S = 1.56 * 5.98 \text{ (t/h)} = 9.32 \text{ t/h.}$$

Ο πολφός, με περιεκτικότητα 39.8%, έχει αραιώση:

$$f'_{Sump \#6@39.8\%} = \frac{100-39.8}{39.8} = 1.51$$

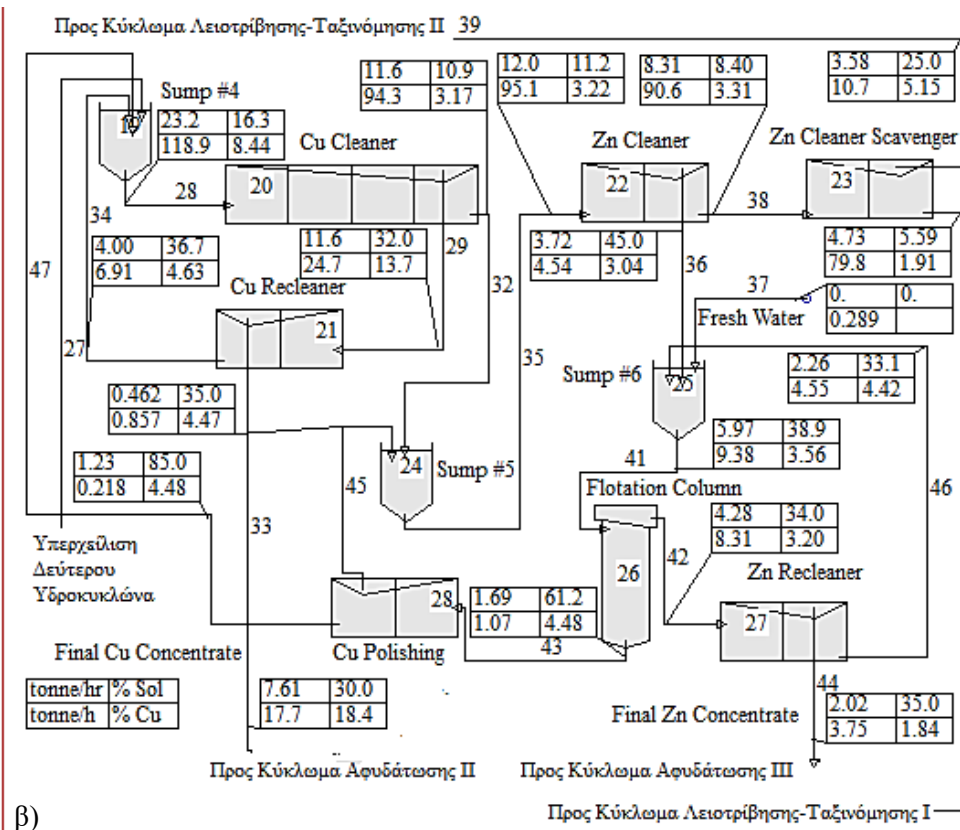
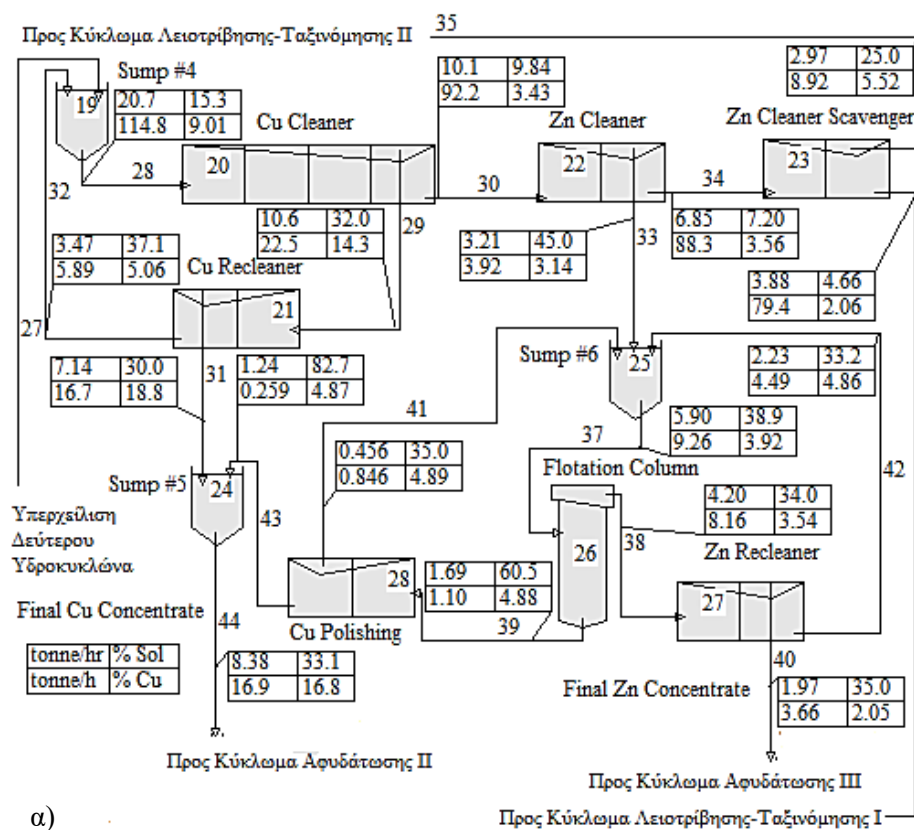
με βάρος νερού:

$$M_{W@39.8\%} = f'_{Sump \#6@39.8\%} * M_S = 1.51 * 5.98 \text{ (t/h)} = 9.03 \text{ t/h.}$$

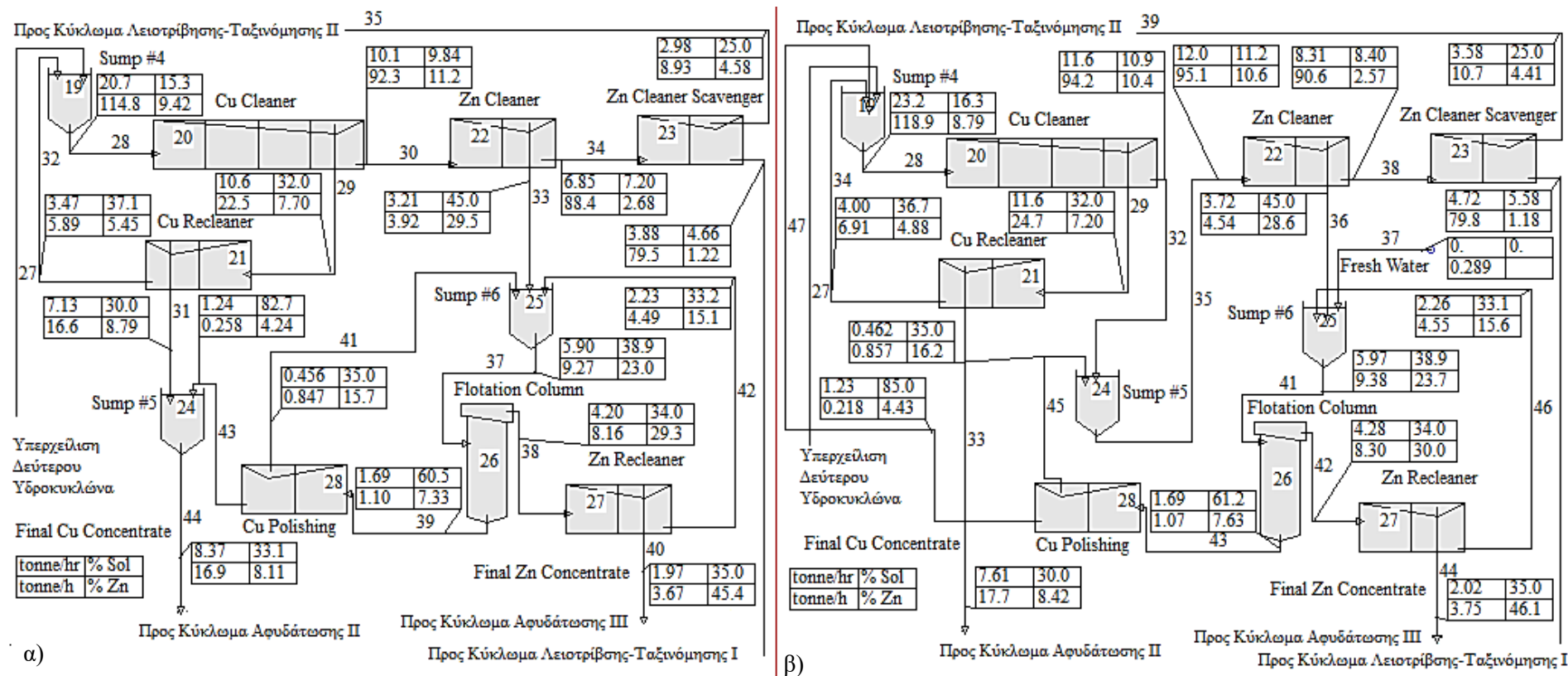
Επομένως, η απαιτούμενη ποσότητα φρέσκου νερού, που πρέπει να συμπληρώνεται στην έκτη δεξαμενή (βλ. *Παράρτημα Γ-Γ.2.*), μετά την αναδιάταξη, είναι:

$$F_{W3} = M_{W@38.9\%} - M_{W@39.8\%} = 9.32 \text{ t/h} - 9.03 \text{ t/h} = 0.29 \text{ t/h.}$$

³³ Αυτός ο υπολογισμός ήταν απαραίτητος καθώς το λογισμικό, μετά την αναδιάταξη των ρευμάτων, παρουσίαζε πρόβλημα στον υπολογισμό του ισοζυγίου του νερού. Προκειμένου όμως, να διατηρηθούν όλες οι μοντελοποιήσεις όπως παρουσιάστηκαν στο υπό-κεφάλαιο 4.2.2. *Επιλογή και Μοντελοποίηση των Λειτουργικών Μονάδων*, αποφασίστηκε να προστεθεί μια επιπλέον ροή φρέσκου νερού, η οποία θα εξυπηρετεί τον υπολογισμό του ισοζυγίου.



Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα κύρια κυκλώματα ενδιαφέροντος α) πριν και β) μετά τις βελτιωτικές αλλαγές με έμφαση των ετικετών, στη στοιχειακή ανάλυση του Cu.



Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης στα κύρια κυκλώματα ενδιαφέροντος α) πριν και β) μετά τις βελτιωτικές αλλαγές με έμφαση των ετικετών, στη στοιχειακή ανάλυση του Zn.

5.2. Βελτιώσεις που Προκύπτουν από τη Νέα Προσομοίωση

Από τα νέα αποτελέσματα της βελτιωμένης προσομοίωσης, που προέκυψαν για τα τελικά συμπυκνώματα του εργοστασίου εμπλουτισμού, επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί που σχετίζονται με τα υπό-κεφάλαια 2.1. *Ισοζύγια Μαζών και Περιεκτικότητες* και 2.3. *Βαθμός Διαχωρισμού*. Σκοπός είναι να γίνει συγκριτική αξιολόγηση (*Benchmarking*) μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης του εργοστασίου, ως προς την παραγωγή των τελικών συμπυκνωμάτων.

5.2.1. Υπολογισμοί Βάσει των Νέων Τελικών Προϊόντων του Εργοστασίου

Ο Πίνακας 5.1 συγκεντρώνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν την αρχική τροφοδοσία, το νέο τελικό απόρριμμα και τα νέα τελικά συμπυκνώματα του εργοστασίου εμπλουτισμού (βλ. Παράρτημα Δ-Δ.2.).

Πίνακας 5.1: Ποσότητες και περιεκτικότητες της αρχικής τροφοδοσίας και των τελικών προϊόντων του εργοστασίου εμπλουτισμού, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του βελτιωμένου διαγράμματος ροής.

Προϊόν	Μάζα (t/h)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)
Τροφοδοσία (F)	85	2.38	2.59	27.03	4.64
Τελικό Συμπύκνωμα Cu (C _{Cu})	7.61	18.43	8.42	32	0
Τελικό Συμπύκνωμα Zn (C _{Zn})	2.02	1.84	46.1	13.72	0
Τελικό Απόρριμμα (T)	75.38	0.77	0.83	26.88	5.23

Από την Εξίσωση 2.5, ο λόγος συγκέντρωσης του συμπυκνώματος χαλκού, είναι:

$$K_{Cu} = \frac{F}{C_{Cu}} = \frac{85 \text{ t/h}}{7.61 \text{ t/h}} = 11.17$$

κι ο λόγος συγκέντρωσης του συμπυκνώματος ψευδαργύρου, είναι:

$$K_{Zn} = \frac{F}{C_{Zn}} = \frac{85 \text{ t/h}}{2.02 \text{ t/h}} = 42.08.$$

Δηλαδή, απαιτούνται 11.17 t τροφοδοσίας για την παραγωγή ενός (1) τόνου (t) συμπυκνώματος χαλκού και 42.08 t για την παραγωγή ενός (1) τόνου (t) συμπυκνώματος ψευδαργύρου, από το συγκεκριμένο μέταλλευμα, με βάση τις νέες συνθήκες.

Από την Εξίσωση 2.6, το εκατοστιαίο ποσοστό της τροφοδοσίας, που εμφανίζεται στο νέο συμπύκνωμα του χαλκού, είναι:

$$Y_{Cu} = \frac{C_{Cu}}{F} * 100 = \frac{7.61 \text{ t/h}}{85 \text{ t/h}} * 100 = 8.94\%$$

ενώ, το αντίστοιχο ποσοστό, για το νέο συμπύκνωμα του ψευδαργύρου, είναι:

$$Y_{Zn} = \frac{C_{Zn}}{F} * 100 = \frac{2.02 \text{ t/h}}{85 \text{ t/h}} * 100 = 2.38\%.$$

Από τις Εξισώσεις 2.8 και 2.9, η ανάκτηση του χαλκού στο νέο τελικό του συμπύκνωμα, είναι:

$$R_{Cu} = \frac{C_{Cu} * c_{Cu}}{F * f_{Cu}} * 100 = \frac{7.61 (t/h) * 18.43}{85 (t/h) * 2.38} * 100 = 69.33\%$$

με την απώλεια του χαλκού στο νέο τελικό απόρριμμα:

$$J_{Cu} = \frac{T_{Cu} * t_{Cu}}{F * f_{Cu}} * 100 = \frac{75.38 (t/h) * 0.77}{85 (t/h) * 2.38} * 100 = 28.77\%$$

κι η ανάκτηση του ψευδαργύρου στο νέο τελικό του συμπύκνωμα, είναι:

$$R_{Zn} = \frac{C_{Zn} * c_{Zn}}{F * f_{Zn}} * 100 = \frac{2.02 (t/h) * 46.1}{85 (t/h) * 2.59} * 100 = 42.30\%$$

με την απώλεια του ψευδαργύρου στο νέο τελικό απόρριμμα:

$$J_{Zn} = \frac{T_{Zn} * t_{Zn}}{F * f_{Zn}} * 100 = \frac{75.38 (t/h) * 0.83}{85 (t/h) * 2.59} * 100 = 28.42\%.$$

Επομένως, ο νέος βαθμός διαχωρισμού, με $Y_{Cu} = 8.94\%$, $c_{max} = 34.625\%$, $c_{Cu} = 18.43\%$ κι $f_{Cu} = 2.38\%$ στο τελικό συμπύκνωμα του χαλκού, σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία, από την Εξίσωση 2.15, είναι:

$$\eta_{Cu} = \frac{Y_{Cu} * c_{max} * (c_{Cu} - f_{Cu})}{(c_{max} - f_{Cu}) * f_{Cu}} * 100 = \frac{0.0894 * 0.34625 * (0.1843 - 0.0238)}{(0.34625 - 0.0238) * 0.0238} * 100 = 64.74\%$$

ενώ, ο νέος βαθμός διαχωρισμού, με $Y_{Zn} = 2.38\%$, $c_{max} = 67.103\%$, $c_{Zn} = 46.1\%$ κι $f_{Zn} = 2.59\%$ στο τελικό συμπύκνωμα του ψευδαργύρου, σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία, είναι:

$$\eta_{Zn} = \frac{Y_{Zn} * c_{max} * (c_{Zn} - f_{Zn})}{(c_{max} - f_{Zn}) * f_{Zn}} * 100 = \frac{0.0238 * 0.67103 * (0.461 - 0.0259)}{(0.67103 - 0.0259) * 0.0259} * 100 = 41.59\%.$$

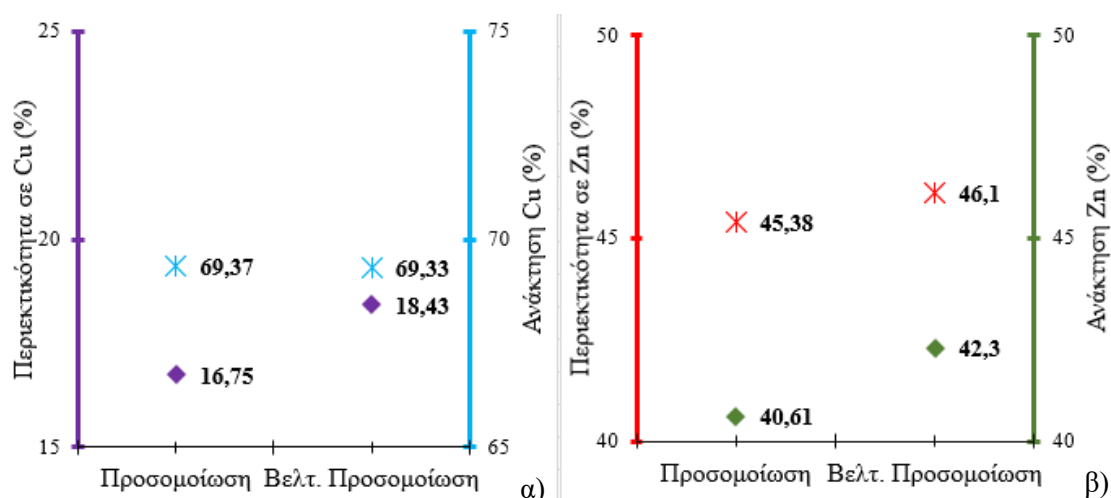
5.2.2. Συγκριτική Αξιολόγηση Παραγόμενων Τελικών Συμπυκνωμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα και τους υπολογισμούς, που αφορούν τα τελικά συμπυκνώματα (βλ. υπό-κεφάλαια 4.5.3. Υπολογισμοί Βάσει των Τελικών Προϊόντων του Εργοστασίου και 5.2.1. Υπολογισμοί Βάσει των Νέων Τελικών Προϊόντων του Εργοστασίου) από τις δύο (2) εκδοχές προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν, κατασκευάζονται διαγράμματα. Αυτά τα διαγράμματα, συσχετίζουν τα αποτελέσματα κι αναδεικνύουν τις μεταβολές που προέκυψαν.

Το Σχήμα 5.4, δείχνει τη μεταβολή της περιεκτικότητας και της ανάκτησης, των χρήσιμων στοιχείων στα τελικά τους συμπυκνώματα, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης.

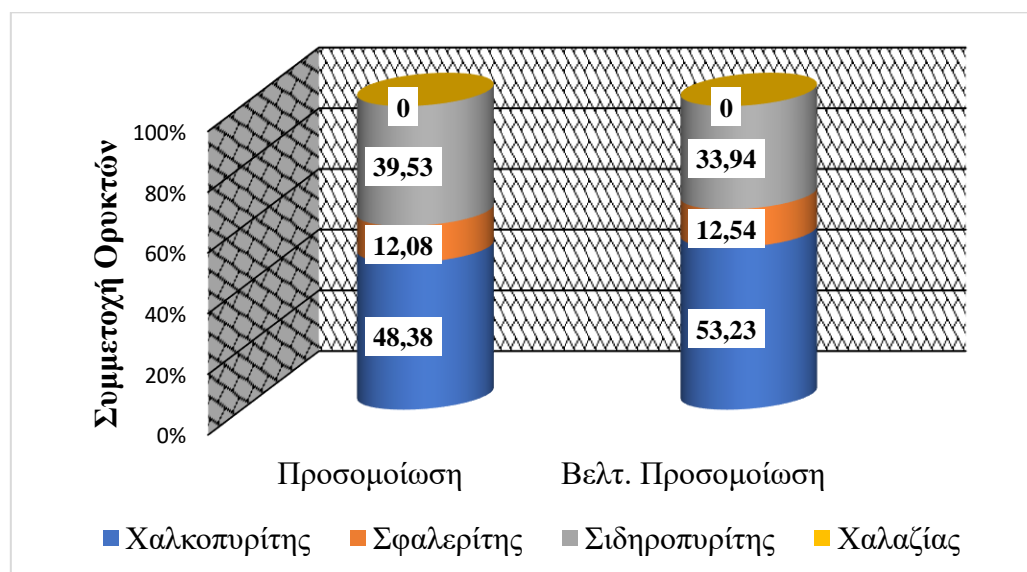
Παρατηρείται πως, η περιεκτικότητα του χαλκού, στο τελικό του συμπύκνωμα, σημείωσε αύξηση με την εφαρμογή των βελτιωτικών αλλαγών, ενώ δεν υπήρχε κάποια ουσιαστική μεταβολή στην ανάκτησή του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4α).

Για το συμπύκνωμα του ψευδαργύρου (Σχήμα 5.4β)), οι βελτιωτικές αλλαγές έδειξαν αύξηση ως προς την περιεκτικότητα και την ανάκτηση του ψευδαργύρου.



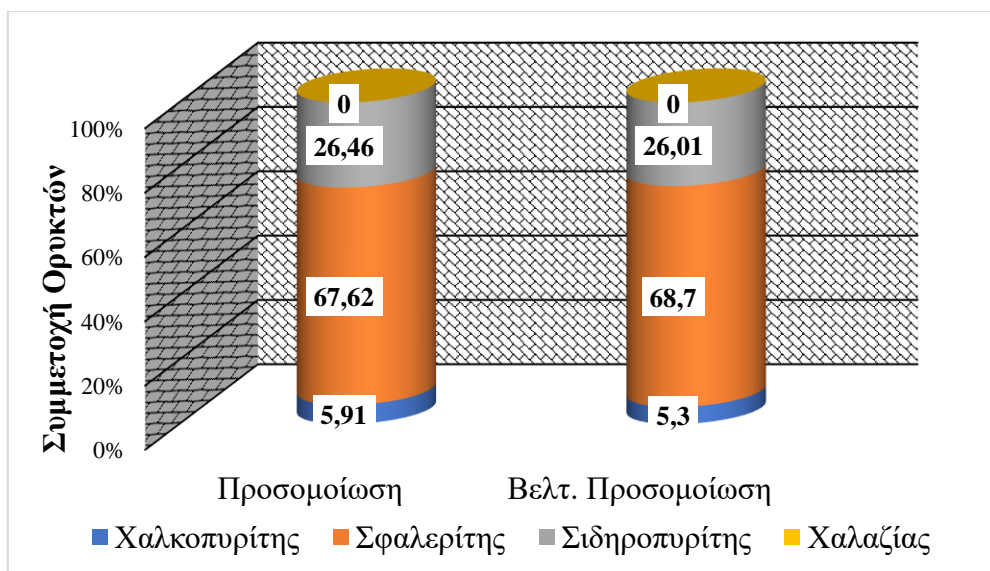
Σχήμα 5.4: Σύγκριση της περιεκτικότητας και της ανάκτησης α) για το συμπύκνωμα του χαλκού και β) για το συμπύκνωμα του ψευδαργύρου, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης. Προέλευση ιδέας διαγραμμάτων (Han et al., 2021).

Στο Σχήμα 5.5, αναπαρίσταται η ποσοστιαία (%) κατανομή των κύριων ορυκτολογικών φάσεων του μεταλλεύματος, στο τελικό συμπύκνωμα του χαλκού. Οι βελτιωτικές αλλαγές δείχνουν αύξηση στη συμμετοχή του χαλκοπυρίτη και του σφαλερίτη, με ταυτόχρονη μείωση της περιεκτικότητας του σιδηροπυρίτη, ενώ ο χαλαζίας απουσιάζει.



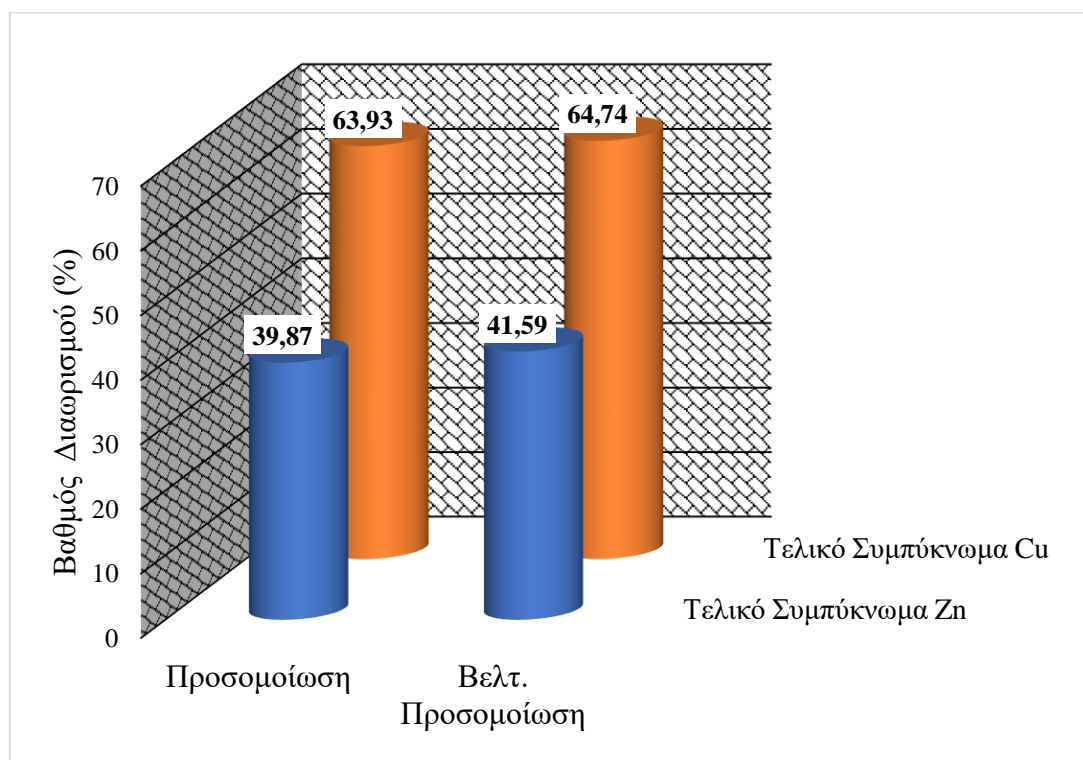
Σχήμα 5.5: Σύγκριση της ορυκτολογικής σύστασης του τελικού συμπυκνώματος χαλκού, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης.

Ομοίως, το Σχήμα 5.6, παρουσιάζει την ποσοστιαία (%) κατανομή των κύριων ορυκτολογικών φάσεων του μεταλλεύματος, στο τελικό συμπύκνωμα του ψευδαργύρου. Οι βελτιωτικές αλλαγές δείχνουν αύξηση στη συμμετοχή του σφαλερίτη, η οποία συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση της συμμετοχής του χαλκοπυρίτη και του σιδηροπυρίτη. Ο χαλαζίας απουσιάζει και σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 5.6: Σύγκριση της ορυκτολογική σύστασης του τελικού συμπυκνώματος ψευδαργύρου, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης.

Τέλος, από το Σχήμα 5.7, προκύπτει πως οι βελτιωτικές αλλαγές που εφαρμόστηκαν, δείχνουν αύξηση και στους βαθμούς διαχωρισμού του εργοστασίου εμπλουτισμού και για τα δύο (2) τελικά του συμπυκνώματα.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση του βαθμού διαχωρισμού του εργοστασίου εμπλουτισμού, ως προς την παραγωγή τελικών συμπυκνωμάτων, μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 6-Συμπεράσματα

6.1. Απόρροιες της Διπλωματικής Εργασίας

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε η προσομοίωση κι η βελτιστοποίηση του εργοστασίου εμπλουτισμού θειούχου μεταλλεύματος, του μεταλλείου Cerro de Maimón της Δομινικανής Δημοκρατίας, με τη χρήση του λογισμικού MODSIM™. Ειδικότερα, η προσομοίωση στηρίχθηκε στη μαθηματική μοντελοποίηση της αρχικής τροφοδοσίας και των μηχανημάτων του εργοστασίου εμπλουτισμού, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα της εταιρείας CORMIDOM, αλλά και τις πληροφορίες που ανακτήθηκαν από σχετικές επιστημονικές μελέτες και βιβλιογραφικές πηγές.

Η προσομοίωση παρουσίασε ικανοποιητική προσέγγιση στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του εργοστασίου εμπλουτισμού, χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν υπάρχει κάποια καλύτερη εκδοχή της. Η έκταση του διαγράμματος ροής, η δυσκολία μοντελοποίησης κι ειδικότερα των επιπλεύσεων, οι περιορισμένες πληροφορίες των ροών μάζας, οι προσωπικές θεωρήσεις για την απλούστευση κάποιων παραμέτρων και συνθηκών, η διαχείριση του λογισμικού κι η επιλογή ορισμένων λειτουργικών μονάδων έναντι κάποιων άλλων, εισάγουν αβεβαιότητες κατά τη μεταφορά μιας πραγματικότητας σε ένα ψηφιακό περιβάλλον.

Η συνεχής αναπροσαρμογή των συνθηκών επεξεργασίας των ορυκτών πρώτων υλών είναι απαραίτητη στη βιομηχανία κι αποτελεί εξαιρετικής σημασίας πεδίο έρευνας. Η βελτιστοποίηση είναι μια μαθηματική διαδικασία που απαιτεί την εύρεση της καλύτερης λύσης (μέγιστη δυνατή βελτίωση), βάσει καθορισμένων αντικειμενικών συναρτήσεων και περιορισμών. Οι αλλαγές που εφαρμόστηκαν δεν αντιστοιχούν στο βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα που θα μπορούσε να επιτευχθεί κι αποτελούν έναν εναλλακτικό τρόπο βελτίωσης της απόκρισης του εργοστασίου και των παραγόμενων συμπεκνωμάτων.

Η συγκριτική αξιολόγηση που έγινε μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης προσομοίωσης, ανέδειξε τα προτερήματα αυτών των αλλαγών, καθώς για το εργοστάσιο εμπλουτισμού θειούχου μεταλλεύματος της Δομινικανής Δημοκρατίας, προέκυψαν τα εξής:

❖ Πλεονεκτήματα:

- i. Μείωση του λόγου συγκέντρωσης του συμπεκνώματος ψευδαργύρου, από 43.15 σε 42.08,
- ii. Ταυτόχρονη αύξηση της περιεκτικότητας των χρήσιμων στοιχείων, στα τελικά τους συμπεκνώματα. Σημειώθηκε αύξηση 1.68% Cu στο συμπίκνωμα του χαλκού και 0.72% Zn στο συμπίκνωμα του ψευδαργύρου,
- iii. Αύξηση της ανάκτησης του ψευδαργύρου, στο συμπίκνωμά του, της τάξης του 1.69%,
- iv. Δεν παρατηρήθηκε πτώση στην ανάκτηση του χαλκού στο συμπίκνωμά του.
- v. Αύξησης της περιεκτικότητας του χρήσιμου ορυκτού, στο τελικό του συμπίκνωμα. Για το συμπίκνωμα του χαλκού σημειώθηκε αύξηση

4.85% σε χαλκοπυρίτη, ενώ για το συμπύκνωμα του ψευδαργύρου σημειώθηκε αύξηση 1.08% σε σφαλερίτη.

- vi. Μείωση της παρουσίας του σιδηροπυρίτη στα τελικά συμπυκνώματα. Για το συμπύκνωμα του χαλκού σημειώθηκε μείωση 5.59%, ενώ για το συμπύκνωμα του ψευδαργύρου σημειώθηκε μείωση 0.45%.
- vii. Μείωση της παρουσίας του χαλκοπυρίτη στο τελικό συμπύκνωμα του ψευδαργύρου, της τάξης του 0.61%.
- viii. Ταυτόχρονη αύξηση των βαθμών διαχωρισμού. Για το συμπύκνωμα του χαλκού σημειώθηκε αύξηση 0.81%, ενώ για το συμπύκνωμα του ψευδαργύρου σημειώθηκε αύξηση 1.72%.

❖ Μειονεκτήματα:

- i. Αύξηση του λόγου συγκέντρωσης του συμπυκνώματος χαλκού, από 10.13 σε 11.17, και
- ii. Αύξηση της παρουσίας του σφαλερίτη στο τελικό συμπύκνωμα του χαλκού, της τάξης του 0.46%.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η προτεινόμενη διάταξη επιφέρει καλύτερη παραγωγή συμπυκνωμάτων, υπό τις παρούσες συνθήκες λειτουργίας του εργοστασίου εμπλουτισμού.

6.2. Εναλλακτική Πρόταση για Βελτιστοποίηση

Οι βελτιωτικές αλλαγές, που παρουσιάστηκαν κι αναλύθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, δεν αποτελούν τις μοναδικές που μπορούσαν να εφαρμοστούν. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση της ενίσχυσης και του περιορισμού της ποσότητας των λεπτών κλασμάτων που ανακυκλώνονται στους μύλους λειοτρίβησης, με την μεταβολή της ποσότητας του νερού στις απορροές των υδροκυκλώνων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα προσδιορίζονταν εκ νέου οι δείκτες της ανάλυσης λειτουργικής απόδοσης των κυκλωμάτων λειοτρίβησης-ταξινόμησης I και II, από τους οποίους θα προέκυπταν συμπεράσματα για τη συμμετοχή των λεπτών κλασμάτων στη λειοτρίβηση.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Ακαδημαϊκές Διαλέξεις και Σημειώσεις

- King, R. P. (2000). *MODSIM™: Τυποποιημένος εξομοιωτής εργοστασίων εμπλουτισμού μεταλλευμάτων (Εγχειρίδιο χρήστη)*. (Η. Θ. Σταμπολιάδης, Μεταφρ.) Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος Σχεδιασμός Εργοστασίων Εμπλουτισμού, 9ο εξ. Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Γαλετάκης, Μ. (2015). Διάλεξη στα πλαίσια του μαθήματος Μεταλλευτική Έρευνα με τίτλο *Ορισμοί και βασικές έννοιες των επιφανειακών εκμεταλλεύσεων*, 5ο εξ. Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κανελλόπουλος, Χ. (2019). *Όξινη απορροή*. Ανάκτηση Δεκέμβριος 16, 2023, από Eclass Upatras: <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/GEO389/%CE%A0%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%99%CE%9F%20%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%9F/8-Acid%20drain-2020.pdf>
- Κομνίτσας, Κ. (2018). Διάλεξη στα πλαίσια του μαθήματος Βιομηχανική Οικολογία με τίτλο *Διαχείριση μεταλλευτικών αποβλήτων*, 6ο εξ. Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κωστάκης, Γ. (2005). Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος *Συστηματική Ορυκτολογία*, 3ο εξ. Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Περδικάσης, Β. (2006). Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος *Αναλυτική Περιβαλλοντική Γεωχημεία*, 9ο εξ. Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Χρηστίδης, Γ. (2015). Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος *Κοιτασματολογία Ι (Γενικές Αρχές-Μεταλλικά Ορυκτά)*, 6ο εξ. Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Χριστόπουλος, Δ. Θ. (2016). Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος *Στατιστική και Πιθανότητες για Μηχανικούς*, 4ο εξ. Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Εργασίες και Διατριβές

- Λαμπροπούλου, Α. Δ. (2016). *Ανάλυση ευαισθησίας μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για διάτρηση συμπαγούς κυλινδρικής πλάκας από κωνικό διεισδυτή*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ανάκτηση Μαρτίου 10, 2024, από <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/44678/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%80%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%28%CE%91.%CE%9B%CE%B1%CE%BC%CF%80%CF%81%CF%8C%CF%80%CE%BF%CF%85%CE%B%CE%>
- Πετράκης, Ε. Α. (2017). *Μοντελοποίηση της σχέσης ενέργειας-διαστασιακών ιδιοτήτων των προϊόντων κατάτμησης σε σφαιρόμυλο*. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης. ΕΑΔΔ. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12681/eadd/40017>

Εγχειρίδια και Συγγράμματα

- Μόδης, Κ., & Σταματάκη, Σ. (2015). *Εισαγωγή στη μεταλλευτική έρευνα [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. Ανάκτηση από <http://hdl.handle.net/11419/755>
- Σταμπολιάδης, Η. Θ. (2008a). *Εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων*. Συμμετρία.
- Σταμπολιάδης, Η. Θ. (2008b). *Μηχανική των τεμαχιδίων*. Συμμετρία.
- Φραγκίσκος, Α. Ζ. (2001). *Μελέτη και κατασκευή εργοστασίου εμπλουτισμού μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών: Σχεδιασμός εργοστασίου*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Φραγκίσκος, Α. Ζ., & Κατράκης, Σ. Δ. (1979). *Εισαγωγή εις τον εμπλουτισμόν των μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών*. ΤΕΕ. Ανάκτηση από http://library.tee.gr/digital/books_tee/book_35307.pdf

Ξενόγλωσση

Επιστημονικές Δημοσιεύσεις

- Andreu, E., Torró, L., Proenza, J. A., Domènech, C., García-Casco, A., De Benavent, C. V., Chavez, C., Espaillet, J., & Lewis, J. F. (2015). Weathering profile of the Cerro de Maimón VMS deposit (Dominican Republic): textures, mineralogy, gossan evolution and mobility of gold and silver. *Ore Geology Reviews*(65), pp. 165-179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.015>
- Anticoi, H., Guasch, E., Hamid, S., Oliva, J., Alfonso, P., Garcia-Valles, M., Bascompta, M., Sanmiquel, L., Escobet, T., Argelaguet, R., Escobet, A., de Felipe, J. J., Parcerisa, D., & Peña-Pitarch, E. (2018). Breakage function for HPGR: Mineral and mechanical characterization of tantalum and tungsten ores. *Minerals*, 8(4), pp. 170. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min8040170>
- Austin, L. G., & Luckie, P. T. (1972). Methods for determination of breakage distribution parameters. *Powder Technology*, 5(4), pp. 215-222. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)80022-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)80022-6)
- Austin, L. G., & Bagga, P. (1981). An analysis of fine dry grinding in ball mills. *Powder Technology*, 28(1), pp. 83-90. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0032-5910\(81\)87014-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0032-5910(81)87014-3)
- Bartholomew, K. M., McIvor, R. E., & Arafat, O. (2018). A guide to maximizing ball mill circuit classification system efficiency (CSE), for operators and equipment designers. In *Proceedings of the 14th AusIMM Mill Operators' Conference* (pp. 553-558). AusIMM. Retrieved from <https://www.metcomtech.com/Articles/Metcom%20CSE%20Paper%20-%20Mill%20Ops%202018.pdf>
- Bu, X., Xie, G., Peng, Y., Ge, L., & Ni, C. (2017). Kinetics of flotation. order of process, rate constant distribution and ultimate recovery. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53(1), pp. 342-365. <https://doi.org/https://doi.org/10.5277/PPMP170128>
- Davey, R. K. (1979). Mineral block evaluation criteria. In J. T. Crawford, & W. A. Hustrulid (Eds.), *Open pit mine planning and design* (pp. 83-96). SME-AIME.
- Deniz, V., Çayirli, S., & Umucu, Y. (2011). Investigation of breakage behavior of different mineralogical and morphological characteristics pumices. *Granular Mater*, 13(5), pp. 623-629.
- Garcia-Zuñiga, H. (1935). Flotation recovery is an exponential function of time. In *Boletín Minero* (Vol. 47, pp. 83-86). Sociedad Nacional de Minería.
- Gül, A., & Aydın, B. (2021). Kinetic modelling and optimization of flotation process of electrum. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(6), pp. 80-94. <https://doi.org/https://doi.org/10.37190/ppmp/142895>
- Han, S., Jung, M., Lee, W., Kim, S., Lee, K., Lim, G., Jeon, H-S., Choi, S. Q., & Han, Y. (2021). Diagnosis and optimization of gold ore flotation circuit via linear circuit analysis and mass balance simulation. *Minerals*, 11(10), pp. 1065. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min11101065>
- Herbst, J. A., & Fuerstenau, D. W. (1973). Mathematical simulation of dry ball milling using specific power information. *Transactions of the SME-AIME*, 254(4), pp. 343-348.
- Herbst, J. A., & Fuerstenau, D. W. (1980). Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models. *International Journal of Mineral Processing*, 7(1), pp. 1-31. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-7516\(80\)90034-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-7516(80)90034-4)
- Hotić, S., Matijašić, G., & Perviz, O. (2022). Kinetics of dolomite grinding in a laboratory ball mill. *Technologica Acta*, 15(1), pp. 29-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.6918933>
- Huber-Panu, I., Ene-Danalache, E., & Cojocariu, D. G. (1976). Mathematical models of batch and continuous flotation. In Fuerstenau (Ed.), *Flotation: A.M. Gaudin Memorial* (Vol. 2, pp. 675-724). AIME.
- Ipek, H., & Göktepe, F. (2011). Determination of grindability characteristics of zeolite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 47, pp. 183-192. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/267687591_Determination_of_grindability_characteristics_of_zeolite
- Ipek, H., Ucbas, Y., Yekeler, M., & Hoşten, Ç. (2005). Dry grinding kinetics of binary mixtures of ceramic raw materials by Bond milling. *Ceramics International*, 31(8), pp. 1065-1071. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2004.11.006>

- Jargalsaikhan, E., & Ishgen, K. (2019). Process optimization of grinding and flotation of copper-molibdenum ores with the use of model-based criteria. *Inżynieria Mineralna*, 21(1), pp. 129-132. <https://doi.org/https://doi.org/10.29227/IM-2019-02-22>
- Karra, V. K. (1983). A process performance model for cone crushers. In P. D. Maltby (Ed.), *XIV international mineral processing congress "worldwide industrial application of mineral processing technology"* (pp. III 6.1-III 6.14). CIM.
- Kawatara, S. K. (2011). *Fundamental principles of froth flotation*. Retrieved April 17, 2023, from Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/281944301_Fundamental_principles_of_froth_flotation
- King, R. P. (2001). *Modeling and simulation of mineral processing systems* (1st ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-26303-3>
- Klimpel, R. R. (1980). Selection of chemical reagents for flotation. In A. I. Mullar, & R. B. Bhappu (Eds.), *Mineral Processing Plant Design* (2nd ed., pp. 907-934). AIME.
- Klimpel, R. R. (1984). Froth flotation: The kinetic approach. In L. F. Haughton (Ed.), *Proceedings of Mintek 50* (pp. 385-392). Council for Mineral Technology.
- Klimpel, R. R. (1995). The influence of frother structure on industrial coal flotation. In S. K. Kawatara (Ed.), *High efficiency coal preparation: An international symposium* (1st ed., pp. 141-151). SME.
- Kwon, J., & Cho, H. (2021). Investigation of error distribution in the back-calculation of breakage function model parameters via nonlinear programming. *Minerals*, 11(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min11040425>
- Magdalinović, A. (1989). A procedure for rapid determination of the Bond work index. *International Journal of Mineral Processing*, 27(1-2), pp. 125-132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.006>
- Mazzeinghy, D. B., Galéry, R., Schneider, C. L., & Alves, V. K. (2014). Scale up and simulation of Vertimill™ pilot test operated with copper ore. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(1), pp. 86-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.11.001>
- Mazzeinghy, D. B., Schneider, C. L., Alves, V. K., & Galéry, R. (2015a). Vertical agitated media mill scale-up and simulation. *Minerals Engineering*, 73, pp. 69-76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.003>
- Mazzeinghy, D. B., Schneider, C. L., Alves, V. K., & Galéry, R. (2015b). Vertical mill simulation applied to iron ores. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(2), pp. 186-190. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.011>
- McIvor, R. E. (1988a). Classification effects in wet ball milling circuits. *Mining Engineering*, 40(11), pp. 815-820.
- McIvor, R. E. (1988b). *Technoeconomic analysis of plant grinding operations*. McGill University, Department of Mining and Materials Engineering. eScholarship. Retrieved from <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/1n79h618k>
- McIvor, R. E. (2006). Industrial validation of the functional performance equation for ball milling and pebble milling circuits. *Mining Engineering*, 58(11), pp. 47-51. Retrieved from http://www.ccecthefuture.org/wp-content/uploads/2015/04/MIN_047_0511.pdf
- McIvor, R. E., Bartholomew, K. M., Arafat, O. M., & Finch, J. A. (2017). Ball mill classification system optimization through functional performance modeling. *Mining Engineering*, 69(11), pp. 18-31. Retrieved from <https://www.metcomtech.com/Articles/MiningEngineeringMagazine-Nov2017-Metcom.pdf>
- Merk, J. W. (1990). Simulation models for mineral processing plants. In C. Twigg-Molecey, & T. Price (Eds.), *Materials Handling in Pyrometallurgy: Proceedings of the International Symposium on Materials Handling in Pyrometallurgy* (pp. 100-110). CIM. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-00826-5>
- Nghipulile, T., Moongo, T., Dzinomwa, G., Nkwanyana, S., Mapani, B., & Kurasha, J. (2022). Evaluation of the relationship between the milling breakage parameters and mineralogical data: A case study of three copper ores from a multi-mineralised deposit. *Minerals*, 12(10), pp. 1263. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min12101263>
- Özcan, Ö. (2022). Separation efficiency of different methods to treatment of a low-grade iron ore. *Bulletin Of The Mineral Research and Exploration*, 168, pp. 77-92. <https://doi.org/https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.992412>

- Prasad, L. (1969). Mineral processing plant design and cost estimation. *Processors Division of the CIM*, pp. 3-15. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/297713755.pdf>
- Rajamani, R. K., & Herbst, J. A. (1984). Simultaneous estimation of selection and breakage functions from batch and continuous grinding data. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C*, 93, pp. C74-C85.
- Redwood, S. D. (2019). The Dominican Republic's mining industry in 2018: The Dominican Republic is the biggest mineral producer in the Caribbean. *16(44)*, 12-21. (H. Dominguez, Trans.) GeoNoticias. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/332233754_The_Dominican_Mining_Industry_in_2018_Redwoodpdf
- Rodríguez-Torres, I., Perez-Alonso, C., Delgadillo, J. A., Espinosa, E., & Rosales-Marín, G. (2021). Study of the effect of the mineral feed size distribution on a ball mill using mathematical modeling. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 40(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.39002>
- Schulz, N. F. (1970). Separation efficiency. *Transactions of the SME-AIME*, 247, pp. 81-87.
- Shah, I., & Austin, L. G. (1983). Breakage rates and size distributions in dry ball milling for fine sizes. In S. G. Malghan (Ed.), *Ultrafine grinding and separation of industrial minerals* (pp. 9-19). SME-AIME.
- Vinnett, L., & Waters, K. E. (2020). Representation of kinetics models in batch flotation as distributed first-order reactions. *Minerals*, 10(10), pp. 913. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min10100913>
- Whiten, W. J. (1973). The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. In M. G. Salamon, & F. H. Lancaster (Ed.), *Application of computer methods in the mineral industry: Proceedings of the tenth international symposium* (pp. 317-323). South African Institute of Mining and Metallurgy. Ανακτήση από <https://www.saimm.co.za/Conferences/Apcom72/>
- Whiten, W. J., Walter, G. W., & White, M. E. (1973). A breakage function suitable for crusher models. *4th Tewksbury Symposium*, (pp. 19.1-19.32).

Εγχειρίδια και Συγγράμματα

- Austin, L. G., Klimpel, R. R., & Luckie, P. T. (1984). *Process engineering of size reduction: Ball milling*. SME-AIME.
- Banks, J., Carson II, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2005). *Discrete-event system simulation* (4th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Canadian Institute of Mining and Metallurgy. (2014, May 19). *CIM definition standards for mineral resources & mineral reserves*. Retrieved February 25, 2024, from MRMR-CIM: https://mrmr.cim.org/media/1128/cim-definition-standards_2014.pdf
- Dzrymala, J. (2007). *Mineral processing: Foundations of theory and practice of minerallurgy* (1st ed.). Wroclaw University of Technology. Retrieved from https://www.academia.edu/58799890/Mineral_processing_foundations_of_theory_and_practice_of_minerallurgy
- Gupta, A., & Denis, Y. S. (2006). *Mineral processing design and operations: An introduction*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51636-7.X5000-1>
- Heidelberg Cement AG. (2012, August 22). *Guideline for separator inspection and optimization*. Retrieved February 3, 2024, from PDFCOFFEE: <https://pdfcoffee.com/guidelineseparatorinspection-pdf-free.html>
- Metcom Technologies Inc. (2005). *The Metcom grinding process management system-Module #5: Functional performance of ball milling*. Retrieved March 27, 2024, from MetcomTech: <https://www.metcomtech.com/images/Mod5Sample.pdf>
- Metso Limited. (2011). *Basics in minerals processing*. Retrieved March 5, 2023, from AUSIMM: https://www.ausimm.com/globalassets/insights-and-resources/minerals-processing-toolbox/basics-in-minerals-processing_metso.pdf
- Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of the ore treatment and mineral recovery* (7th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4450-1.X5000-0>

Διάφορα Αρχεία από Διαδίκτυο και Διαδικτυακές Πηγές

- Bennetts, A. (2019, March 20). *The top 5 things you need to know about hydrocyclones*. Retrieved March 13, 2024, from McLanahan: <https://www.mclanahan.com/blog/the-top-5-things-you-need-to-know-about-hydrocyclones>
- Flottec LLC. (2016, January 31). *Flottec F160-10 Frother Safety Data Sheet*. Retrieved January 18, 2024, from <https://flottec.mx/archivos/Flottec%20F160-10%20Frother%20SDS%20r03%202016-01-31.pdf>
- Flottec LLC. (2017a, December 31). *Flottec Copper Sulfate Activator Safety Sheet Data*. Retrieved January 29, 2024, from https://flottec.mx/archivos/Flottec_CuSO4.pdf
- Flottec LLC. (2017b, December 31). *Flottec Zinc Sulfate Depressant Safety Data Sheet*. Retrieved January 27, 2024, from https://flottec.mx/archivos/Flottec_ZnSO4.pdf
- Flottec LLC. (2019, November 6). *Flottec 1234 Collector Safety Data Sheet*. Retrieved January 18, 2024, from <https://flottec.mx/archivos/Flottec%201234%20Collector%20SDS%20EN%20r03%202019-11-06.pdf>
- Hudson Institute of Mineralogy. (n.d.). *Cerro de Maimón Mine (Cerro de Maimón deposit)*. Retrieved December 2, 2023, from Mindat: <https://www.mindat.org/loc-222130.html>
- Luukkanen, S. (2021, June 18). *Special issue: Process optimization in mineral processing*. MDPI AG Retrieved February 23, 2024, from Minerals: https://www.mdpi.com/journal/minerals/special_issues/POMP
- Majumder, A. K. (2018). Lecture in the context of the course Introduction to Mineral Processing with title Lecture 05-Importance of Mineral Processing (Contd.). Retrieved January 31, 2024, from <http://acl.digimat.in/nptel/courses/video/105105171/lec5.pdf>
- Mining Technology. (2011, December 21). *Cerro de Maimón copper and gold mine*. Retrieved December 2, 2023, from Mining Technology: <https://www.mining-technology.com/projects/cerro-de-maimon-copper-and-gold-mine/#catfish?cf-view>
- Muhtadi, O. A. (n.d.). *Chapter 8: Metal extraction (recovery systems)*. Retrieved December 2, 2023, from 911metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/03/Merrill-Crowe-process.pdf>
- Oil & Gas Drilling Glossary-IADCLexicon. (n.d.). *Normal cubic meters pe hour (Nm³/h)*. Retrieved March 23, 2024, from IADCLexicon: <https://iadclexicon.org/normal-cubic-metres-per-hour-nm3h/>
- OXYWISE. (n.d.). *What's the difference between Nm³/h and Sm³/h*. Retrieved March 23, 2024, from: <https://www.oxywise.com/en-gr/whats-the-difference-between-nm3-and-sm3>
- Perilya Limited. (2011, September 29). *Increase in Cerro de Maimón mineral resource and ore reserve*. Retrieved December 2, 2023, from Perilya: https://www.perilya.com.au/articles/increase-in-mine-life-at-cerro-de-maimon/110929_Maimon_R_and_R_-_Final.pdf
- Perilya Limited. (n.d.). *Cerro de Maimón*. Retrieved December 2, 2023, from Perilya: <https://www.perilya.com.au/our-business/operations/cerro-de-maimon>
- Roos, P. P., Burgess, H. P., & Ward, I. P. (2007, August 21). NI 43-101 Technical Report, Updated mineral resource and reserve estimate for the Cerro de Maimón project. Retrieved February 2, 2024, from <https://www.perilya.com.au/articles/technicalreportmicon%2008212007.pdf>
- Stanley, G. G. (1987). Chapter 16: Plant design and Commissioning. In G. G.G. Stanley (ED.), *The Extractive Metallurgy of Gold in South Africa* (Vol. 2, pp. 907-969). SAIMM. Retrieved April 2, 2024, from: <https://www.saimm.co.za/Conferences/ExtractiveMetallurgyOfGold/0907-Chapter16.pdf>
- Wong, J. (2008, July 8). *Nm³/h to m³/h*. Retrieved March 25, 2024, from Global Spec: <https://cr4.globalspec.com/thread/25018/Nm3-hr-to-M3-hr>

Λογισμικά

MODSIM™ Academic Version 3.6.24.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α-Χαρακτηρισμός του Μεταλλεύματος

Α.1. Χημική Σύνθεση Κύριων Ορυκτολογικών Φάσεων Μεταλλεύματος

Τα κύρια ορυκτά που απαντώνται στο μέταλλευμα κι ενδιαφέρουν την προσομοίωση, είναι ο χαλκοπυρίτης (CuFeS_2), ο σφαλερίτης (ZnS), ο σιδηροπυρίτης (FeS_2) και στο στείρο υπερισχύει ο χαλαζίας (SiO_2) (Δεδομένα CORMIDOM S.A.S., 2023).

Πίνακας Α.1.1: Υπολογισμός μοριακής μάζας των ορυκτολογικών φάσεων.

Ορυκτό	Στοιχείο	Αρ. Ατόμων	Mr (g/mol)	Αρ. Ατόμων*Mr	Σύνολο (g/mol)
CuFeS₂	Cu	1	63.546	1*63.546 = 63.546	183.521
	Fe	1	55.845	1*55.845 = 55.845	
	S	2	32.065	2*32.065 = 64.13	
ZnS	Zn	1	65.409	1*65.409 = 65.409	97.474
	S	1	32.065	1*32.065 = 32.065	
FeS₂	Fe	1	55.845	1*55.845 = 55.845	119.975
	S	2	32.065	2*32.065 = 64.13	

Η ποσοστιαία (%) κατανομή του χαλκού, του σιδήρου και του θείου, στον χαλκοπυρίτη, είναι:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{array}{l} 183.521 \text{ g/mol CuFeS}_2 \rightarrow 100 \% \text{ CuFeS}_2 \\ 63.546 \text{ g/mol Cu} \rightarrow x_1 \% \text{ Cu} \end{array} \right\} \rightarrow x_1 = 34.625 \% \text{ Cu}, \quad \left. \begin{array}{l} 183.521 \text{ g/mol CuFeS}_2 \rightarrow 100 \% \text{ CuFeS}_2 \\ 55.845 \text{ g/mol Fe} \rightarrow x_2 \% \text{ Fe} \end{array} \right\} \rightarrow x_2 = 30.435 \% \text{ Fe} \\
 & \text{και} \quad \left. \begin{array}{l} 183.521 \text{ g/mol CuFeS}_2 \rightarrow 100 \% \text{ CuFeS}_2 \\ 64.13 \text{ g/mol S} \rightarrow x_3 \% \text{ S} \end{array} \right\} \rightarrow x_3 = 34.940 \% \text{ S}
 \end{aligned}$$

Η ποσοστιαία (%) κατανομή του ψευδαργύρου και του θείου, στον σφαλερίτη είναι:

$$\left. \begin{array}{l} 97.474 \text{ g/mol ZnS} \rightarrow 100 \% \text{ ZnS} \\ 65.409 \text{ g/mol Zn} \rightarrow x_1 \% \text{ Zn} \end{array} \right\} \rightarrow x_1 = 67.103 \% \text{ Zn} \text{ και } \left. \begin{array}{l} 97.474 \text{ g/mol ZnS} \rightarrow 100 \% \text{ ZnS} \\ 32.065 \text{ g/mol S} \rightarrow x_2 \% \text{ S} \end{array} \right\} \rightarrow x_2 = 32.897 \% \text{ S}$$

Η ποσοστιαία (%) κατανομή του σιδήρου και του θείου, στον σιδηροπυρίτη, είναι:

$$\left. \begin{array}{l} 119.975 \text{ g/mol FeS}_2 \rightarrow 100 \% \text{ FeS}_2 \\ 55.845 \text{ g/mol Fe} \rightarrow x_1 \% \text{ Fe} \end{array} \right\} \rightarrow x_1 = 46.546 \% \text{ Fe} \text{ και } \left. \begin{array}{l} 119.975 \text{ g/mol FeS}_2 \rightarrow 100 \% \text{ FeS}_2 \\ 64.13 \text{ g/mol S} \rightarrow x_2 \% \text{ S} \end{array} \right\} \rightarrow x_2 = 53.454 \% \text{ S}$$

Α.2. Ανηγγμένη Συμμετοχή Κύριων Ορυκτολογικών Φάσεων με Βάση τις Πρόσφατες Τιμές του Head Grade

Με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες της εταιρείας CORMIDOM, η μέση περιεκτικότητα του μεταλλεύματος (*Head Grade*), σε κύρια στοιχεία, στο σωρό τροφοδοσίας του πρωτογενή σφαιρόμυλου, περιλαμβάνει 2.38% Cu, 2.59% Zn, 27.03% Fe, 185 ppm Cd. Από παλαιότερη ορυκτολογική ανάλυση, η ποσοστιαία συμμετοχή του χαλαζία ήταν 13.005%.

Για την αναγωγή των στοιχειακών αναλύσεων, όλος ο χαλκός βρίσκεται στον χαλκοπυρίτη, ο ψευδάργυρος στον σφαλερίτη, ενώ ο σίδηρος στον χαλκοπυρίτη και στον σιδηροπυρίτη.

Για τον χαλκοπυρίτη, ισχύει:

$$\left. \begin{array}{l} 183.521 \text{ g/mol CuFeS}_2 \rightarrow 63.546 \text{ g/mol Cu} \\ y_1 \% \text{ CuFeS}_2 \rightarrow 2.38 \% \text{ Cu} \end{array} \right\} \rightarrow y_1 = 6.8733 \% \text{ CuFeS}_2$$

Για τον σφαλερίτη, ισχύει:

$$\left. \begin{array}{l} 97.474 \text{ g/mol ZnS} \rightarrow 65.409 \text{ g/mol Zn} \\ y_2 \% \text{ ZnS} \rightarrow 2.59 \% \text{ Zn} \end{array} \right\} \rightarrow y_2 = 3.8597 \% \text{ ZnS}$$

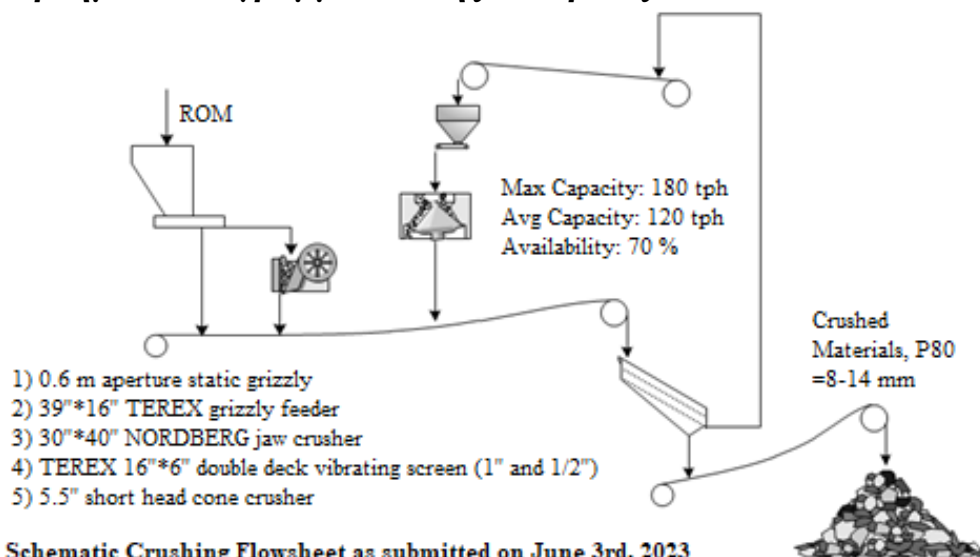
Για τον σιδηροπυρίτη, ισχύει:

$$\left. \begin{array}{l} 183.521 \text{ g/mol CuFeS}_2 \rightarrow 55.845 \text{ g/mol Fe} \\ 6.8733 \% \text{ CuFeS}_2 \rightarrow x_1 \% \text{ Fe} \end{array} \right\} \rightarrow x_1 = 2.092 \% \text{ Fe και } \left. \begin{array}{l} 119.975 \text{ g/mol FeS}_2 \rightarrow 55.845 \text{ g/mol Fe} \\ y_3 \% \text{ FeS}_2 \rightarrow (27.03 - 2.092) = 24.938 \% \text{ Fe} \end{array} \right\} \rightarrow y_3 = 53.577 \% \text{ FeS}_2$$

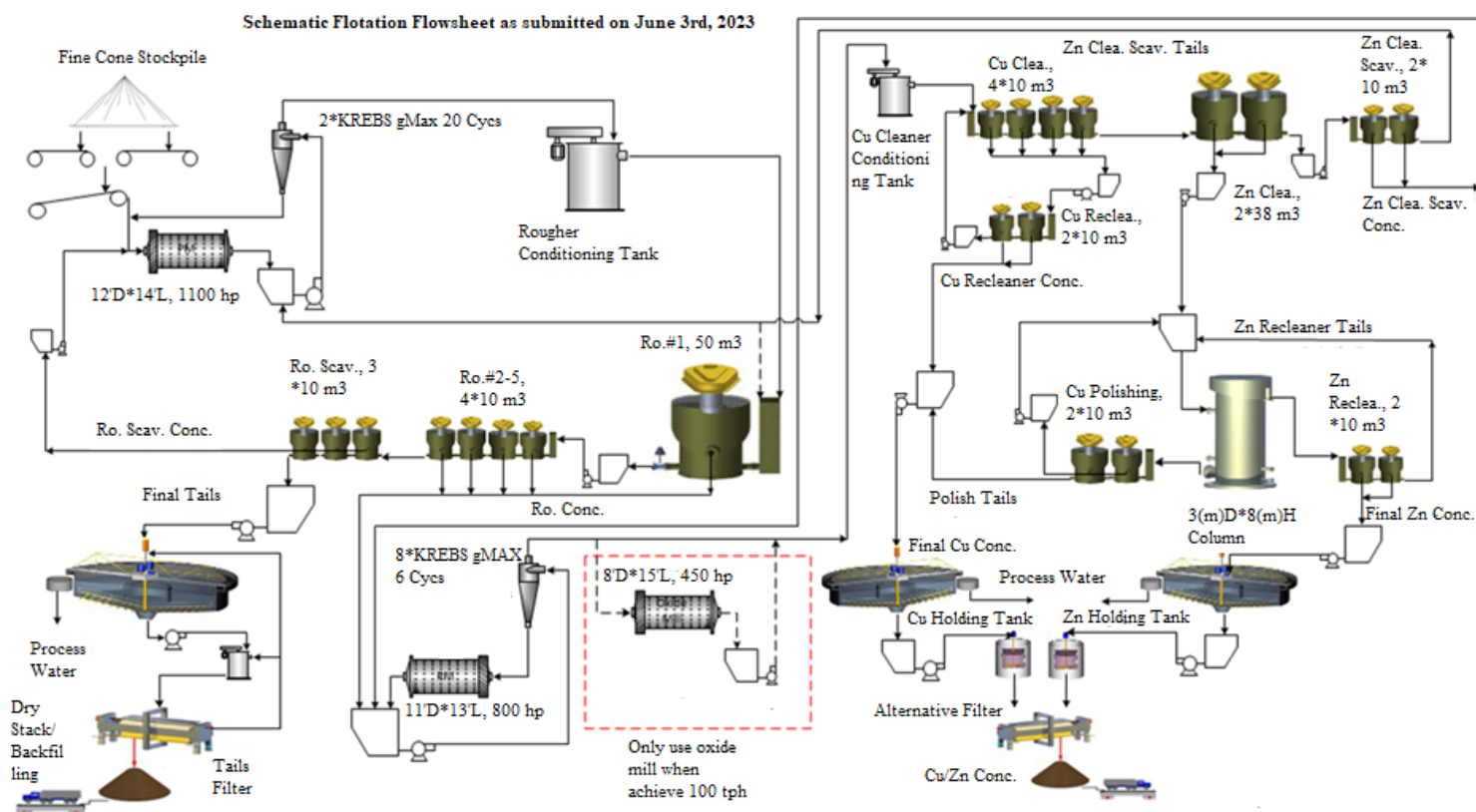
Για το στέιρο, ισχύει:

$$y_4 = 100 - 6.8733 - 3.8597 - 53.577 = 35.69 \%$$

Παράρτημα Β-Διαγράμματα Ροής Εταιρείας CORMIDOM



Σχήμα Β.1: Διάγραμμα ροής του κυκλώματος θραύσης-κοσκίνισης, της εταιρείας CORMIDOM S.A.S..



Σχήμα Β.2: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας θειούχου μεταλλεύματος, της εταιρείας CORMIDOM S.A.S..

Παράρτημα Γ-Εμβόλιμες Μοντελοποιήσεις

Γ.1. Μοντελοποίηση Κελιού, Συστοιχιών και Στήλης Επίπλευσης (Συνέχεια)

Specify parameters for model KLIM for unit 12

File

Number of cells in this bank	4
Volume of each cell in this bank	10 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	15
Percent solids in the concentrate	25
Number of banks in parallel	1

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	90	k1 .0325
2	90	k2 .0405
3	84	k3 .00915
4	5	k4 .0005

Σχήμα Γ.1.1: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την πρώτη συστοιχία επίπλευσης.

6.32% Zn και 39.02% Fe στο συμπύκνωμα (για το απόρριμμα δεν υπήρχαν πληροφορίες), όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM. Και σε αυτήν την επίπλευση, καθορίζονται τιμές κινητικών παραμέτρων για τον χαλαζία και γίνεται αποδοχή.

Specify parameters for model KLIM for unit 13

File

Number of cells in this bank	3
Volume of each cell in this bank	10 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	15
Percent solids in the concentrate	30
Number of banks in parallel	1

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	60	k1 .0285
2	60	k2 .0195
3	80	k3 .00965
4	3	k4 .0005

Σχήμα Γ.1.2: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για τη δεύτερη συστοιχία επίπλευσης.

Specify parameters for model KLIM for unit 20

File

Number of cells in this bank	4
Volume of each cell in this bank	10 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	15
Percent solids in the concentrate	32
Number of banks in parallel	1

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	45	k1 .65
2	85	k2 .035
3	45	k3 .075
4	0	k4 0

Σχήμα Γ.1.3: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την τρίτη συστοιχία επίπλευσης.

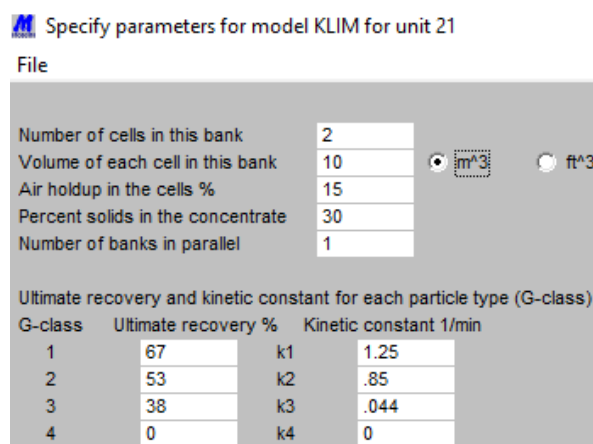
(10) για τους όγκους των κελιών κι η τιμή 32 για την περιεκτικότητα σε στερεά του

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για την πρώτη συστοιχία επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.1), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή τέσσερα (4) στο πεδίο του πλήθους των κελιών κι ο όγκος για το κάθε κελί της συστοιχίας, που είναι 10 m³. Η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος, από αυτήν την επίπλευση θεωρείται 25% κι οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 4.81% Cu,

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για τη δεύτερη συστοιχία επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.2), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή τρία (3) στο πεδίο του πλήθους των κελιών κι ο όγκος για το κάθε κελί της συστοιχίας, που είναι 10 m³. Η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος, από αυτήν την επίπλευση θεωρείται 30% κι οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 2.09% Cu, 2.01% Zn και 44.3% Fe στο συμπύκνωμα και 0.45% Cu, 0.66% Zn και 27.25% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM. Σε αυτήν την επίπλευση, καθορίζονται για τελευταία φορά τιμές για τις κινητικές παραμέτρους του χαλαζία, ώστε να απλοποιηθούν οι επόμενες μοντελοποιήσεις των επιπλεύσεων και γίνεται αποδοχή.

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για την τρίτη συστοιχία επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.3), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή τέσσερα (4) στο πεδίο του πλήθους των κελιών, η τιμή δέκα

συμπυκνώματος. Οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 15.74% Cu, 8.19% Zn και 34.92% Fe στο συμπύκνωμα και 3.37% Cu, 6.23% Zn και 40.9% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM και γίνεται αποδοχή.

 Specify parameters for model KLIM for unit 21

File

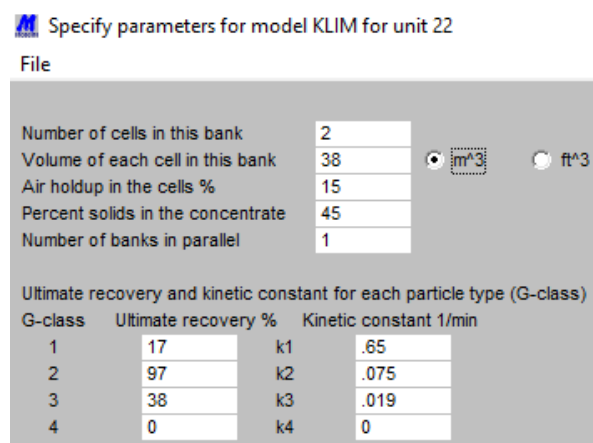
Number of cells in this bank	2
Volume of each cell in this bank	10 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	15
Percent solids in the concentrate	30
Number of banks in parallel	1

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	67	k1 1.25
2	53	k2 .85
3	38	k3 .044
4	0	k4 0

Σχήμα Γ.1.4: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την τέταρτη συστοιχία επίπλευσης.

και 6.58% Cu, 6.67% Zn και 37.81% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM και γίνεται αποδοχή.

 Specify parameters for model KLIM for unit 22

File

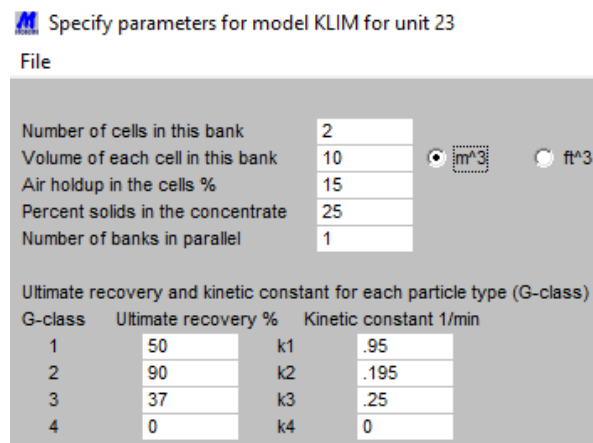
Number of cells in this bank	2
Volume of each cell in this bank	38 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	15
Percent solids in the concentrate	45
Number of banks in parallel	1

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	17	k1 .65
2	97	k2 .075
3	38	k3 .019
4	0	k4 0

Σχήμα Γ.1.5: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την πέμπτη συστοιχία επίπλευσης.

συμπύκνωμα και 3.44% Cu, 1.61% Zn και 44.64% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM και γίνεται αποδοχή.

 Specify parameters for model KLIM for unit 23

File

Number of cells in this bank	2
Volume of each cell in this bank	10 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	15
Percent solids in the concentrate	25
Number of banks in parallel	1

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	50	k1 .95
2	90	k2 .195
3	37	k3 .25
4	0	k4 0

Σχήμα Γ.1.6: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την έκτη συστοιχία επίπλευσης.

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για την τέταρτη συστοιχία επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.4), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή δύο (2) στο πεδίο του πλήθους των κελιών κι ο όγκος για το κάθε κελί της συστοιχίας, που είναι 10 m³. Η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος, από αυτήν την επίπλευση θεωρείται 30% κι οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 19.09% Cu, 8.96% Zn και 31.02% Fe στο συμπύκνωμα

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για την πέμπτη συστοιχία επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.5), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή δύο (2) στο πεδίο του πλήθους των κελιών κι ο όγκος για το κάθε κελί της συστοιχίας, που είναι 38 m³. Η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος, από αυτήν την επίπλευση θεωρείται 45% κι οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 3.68% Cu, 29.55% Zn και 22.48% Fe στο

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για την έκτη συστοιχία επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.6), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή δύο (2) στο πεδίο του πλήθους των κελιών κι ο όγκος για το κάθε κελί της συστοιχίας, που είναι 10 m³. Η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος, από αυτήν την επίπλευση θεωρείται 25% κι οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 5.81% Cu, 2.95% Zn και 42.61% Fe στο συμπύκνωμα και

2.18% Cu, 0.98% Zn και 45.82% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM και γίνεται αποδοχή.

Specify parameters for model KLIM for unit 26

File

Volume of column ☒ m³ ☐ ft³

Air holdup in the column %

Percent solids in the concentrate

Number of columns in parallel

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	<input type="text" value="65"/>	<input type="text" value="k1"/>
2	<input type="text" value="91"/>	<input type="text" value="k2"/>
3	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="k3"/>
4	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="k4"/>

Σχήμα Γ.1.7: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KILC, για τη στήλη επίπλευσης.

την εταιρεία CORMIDOM και γίνεται αποδοχή.

Specify parameters for model KLIM for unit 27

File

Number of cells in this bank

Volume of each cell in this bank ☒ m³ ☐ ft³

Air holdup in the cells %

Percent solids in the concentrate

Number of banks in parallel

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="k1"/>
2	<input type="text" value="55"/>	<input type="text" value="k2"/>
3	<input type="text" value="96"/>	<input type="text" value="k3"/>
4	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="k4"/>

Σχήμα Γ.1.8: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την έβδομη συστοιχία επίπλευσης.

και 5.1% Cu, 13% Zn και 34.41% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM και γίνεται αποδοχή.

Specify parameters for model KLIM for unit 27

File

Number of cells in this bank

Volume of each cell in this bank ☒ m³ ☐ ft³

Air holdup in the cells %

Percent solids in the concentrate

Number of banks in parallel

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type (G-class)

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="k1"/>
2	<input type="text" value="55"/>	<input type="text" value="k2"/>
3	<input type="text" value="96"/>	<input type="text" value="k3"/>
4	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="k4"/>

Σχήμα Γ.1.9: Συμπληρωμένη φόρμα μοντέλου KLIM, για την όγδοη συστοιχία επίπλευσης.

συμπύκνωμα και 4.67% Cu, 3.76% Zn και 41.23% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από την εταιρεία CORMIDOM και γίνεται αποδοχή.

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIC για τη στήλη επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.7), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή η τιμή 56.55 για τον όγκο της κι η τιμή 34 για την περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος. Οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 3.77% Cu, 36.44% Zn και 18.25% Fe στο συμπύκνωμα και 5.04% Cu, 8.41% Zn και 38.76% Fe στο απόρριμμα, όπως παραχωρήθηκαν από

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για την έβδομη συστοιχία επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.8), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή δύο (2) στο πεδίο του πλήθους των κελιών κι ο όγκος για το κάθε κελί της συστοιχίας, που είναι 10 m³. Η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος, από αυτή την επίπλευση θεωρείται 35% κι οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 3.47% Cu, 37.21% Zn και 13.7% Fe στο συμπύκνωμα

Στη φόρμα συμπλήρωσης του μοντέλου KLIM για την όγδοη συστοιχία επίπλευσης (Σχήμα Γ.1.9), με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εταιρείας CORMIDOM, συμπληρώνεται η τιμή δύο (2) στο πεδίο του πλήθους των κελιών κι ο όγκος για το κάθε κελί της συστοιχίας, που είναι 10 m³. Η περιεκτικότητα σε στερεά του συμπυκνώματος, από αυτή την επίπλευση θεωρείται 35% κι οι κινητικές παράμετροι καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι υπολογισμένες αναλύσεις, να προσεγγίζουν τις τιμές 6.34% Cu, 16.94% Zn και 31.19% Fe στο

Γ.2. Ορισμός των Δεδομένων στις Ροές Νερού

Τα ρεύματα τροφοδοσίας νερού για τα Ρεύματα 53 και 54 (βλ. Πίνακας 4.6 και Πίνακας 4.8, αντίστοιχα), εξυπηρετούν στη δημιουργία πολφών, με κατάλληλες περιεκτικότητες (%) σε στερεά, πριν την εισαγωγή τους στους υδροκυκλώνες. Επιλέχθηκε σκόπιμα να παρουσιαστεί η εισαγωγή των πληροφοριών αυτών σε παράρτημα, ώστε να γίνει πρώτα υπολογισμός των ποσοτήτων νερού (βλ. υπό-κεφάλαια 4.4.2.1. *Ισοζύγιο στη Δεύτερη Δεξαμενή του Κυκλώματος Λειτουργίας-Ταξινόμησης I* και *Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού* και 4.4.1.1. *Ισοζύγιο στη Δεξαμενή του Κυκλώματος Λειτουργίας-Ταξινόμησης II* και *Υπολογισμός Προστιθέμενης Ποσότητας Φρέσκου Νερού*, αντίστοιχα) και να διατηρηθεί η δομή της διπλωματικής εργασίας.

10-15 % solids by volume Good efficiency
15-30% solids by volume Deteriorating efficiency
> 30 % solids by volume Inefficient

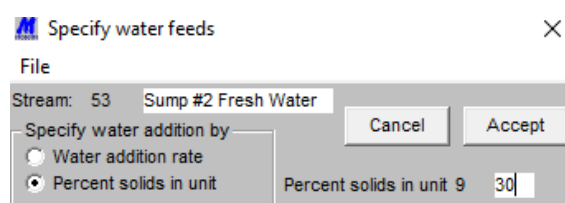
Σχήμα Γ.2.1: Χαρακτηρισμός της επίδοσης της ταξινόμησης ενός υδροκυκλώνα, με βάση την περιεκτικότητα κατ'όγκο του πολφού της τροφοδοσίας του (Metso Limited, 2011).

Η περιεκτικότητα (%) σε στερεά των πολφών, που έπρεπε να δημιουργηθούν, για την παρούσα προσομοίωση, έγινε με βάση τη βιβλιογραφική πηγή του Σχήμα Γ.2.1. Και για τα δύο (2) ρεύματα επιλέχθηκε

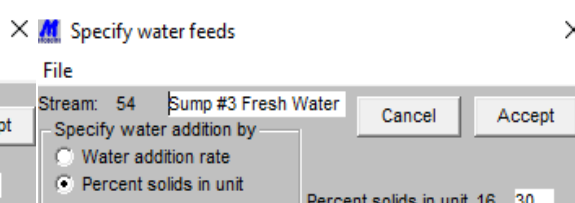
περιεκτικότητα 30% σε στερεά, ώστε να υπάρχει προοπτική βελτιστοποίησης.

Η επεξεργασία των ρευμάτων νερού, γίνεται από τη φόρμα των δεδομένων του συστήματος με διπλό κλικ στις εμφανιζόμενες ροές του πεδίου *Water Addition Streams* (βλ. Σχήμα 4.1). Σε αυτές τις φόρμες, που ανοίγει το λογισμικό, υπάρχει η δυνατότητα συμπλήρωσης ενός περιγραφικού ονόματος της ροής κι η προσθήκη ποσότητας νερού, είτε ως προς το ρυθμό παροχής του (*Specify Water Addition by Water Addition Rate*), είτε ως προς περιεκτικότητα στερεών σε επιλεγμένη λειτουργική μονάδα (*Specify Water Addition by Percent Solids in Unit*).

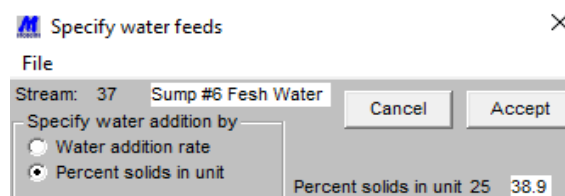
Στις φόρμες για τα Ρεύματα 53 και 54, συμπληρώνονται κατά αντιστοιχία τα περιγραφικά ονόματα *Sump #2 Fresh Water* (Σχήμα Γ.2.2) και *Sump #3 Fresh Water* (Σχήμα Γ.2.3), χρησιμοποιείται η επιλογή *Specify Water Addition by Percent Solids in Unit*, στα πεδία συμπλήρωσης *Percent Solids in Unit*, συμπληρώνεται η τιμή 30 και γίνεται αποδοχή των φορμών.



Σχήμα Γ.2.2: Συμπληρωμένη φόρμα, για την προσθήκη νερού στο Ρεύμα 53.



Σχήμα Γ.2.3: Συμπληρωμένη φόρμα, για τη προσθήκη νερού στο Ρεύμα 54.



Σχήμα Γ.2.4: Συμπληρωμένη φόρμα, για την προσθήκη νερού στο Ρεύμα 37.

Ομοίως, στη φόρμα για το Ρεύμα 37 (Σχήμα Γ.2.4), του βελτιστοποιημένου διαγράμματος ροής, συμπληρώνεται το περιγραφικό όνομα *Sump #6 Fresh Water* και στο πεδίο της περιεκτικότητας σε στερεά της έκτης δεξαμενής, συμπληρώνεται η τιμή 38.9 (βλ. υπό-κεφάλαιο 5.1.1. *Υπολογισμός Προστιθέμενης*

Ποσότητας Φρέσκου Νερού στην Έκτη Δεξαμενή του Κυκλώματος Επίπλευσης III).

Παράρτημα Δ-Αρχεία Ιδιοτήτων Ρευμάτων

Δ.1. Αρχεία από την Προσομοίωση που Έλαβε Χώρα στο Κεφάλαιο 4

Stream number: 2	Slurry volumetric flowrate:	Recovery of mineral Chal: 76.48 %
Solid flowrate: 85.00 tonne/hr	0.1220E-01 m ³ /s	Grade of mineral Chal: 6.87 %
Water flowrate: 6.40 tonne/h	Percent solids by mass: 95.91 %	Recovery of mineral Spha: 76.48 %
Slurry flowrate: 25.39 kg/s	Percent solids by volume: 85.43 %	Grade of mineral Spha: 3.86 %
Slurry volumetric flowrate:	Yield of solids: 176.49 %	Recovery of mineral Pyri: 76.48 %
0.7680E-02 m ³ /s	Recovery of mineral Chal: 176.48%	Grade of mineral Pyri: 53.57 %
Percent solids by mass: 93.00 %	Grade of mineral Chal: 6.87 %	Recovery of mineral Gang: 76.48 %
Percent solids by volume: 76.86 %	Recovery of mineral Spha: 176.47%	Grade of mineral Gang: 35.68 %
Yield of solids: 100.00 %	Grade of mineral Spha: 3.86 %	Recovery of Cu: 76.48 %
Recovery of mineral Chal:100.00%	Recovery of mineral Pyri: 176.48 %	Grade of Cu: 2.38 %
Grade of mineral Chal: 6.87 %	Grade of mineral Pyri: 53.57 %	Recovery of Zn: 76.48 %
Recovery of mineral Spha:100.00%	Recovery of mineral Gang:176.48%	Grade of Zn: 2.59 %
Grade of mineral Spha: 3.86 %	Grade of mineral Gang: 35.69 %	Recovery of Fe: 76.48 %
Recovery of mineral Pyri: 100.00 %	Recovery of Cu: 176.48 %	Grade of Fe: 27.03 %
Grade of mineral Pyri: 53.58 %	Grade of Cu: 2.38 %	Recovery of SiO ₂ : 76.48 %
Recovery of mineral Gang:100.00%	Recovery of Zn: 176.47 %	Grade of SiO ₂ : 4.64 %
Grade of mineral Gang: 35.69 %	Grade of Zn: 2.59 %	Simulated size distribution
Recovery of Cu: 100.00 %	Recovery of Fe: 176.48 %	Number of size classes: 33
Grade of Cu: 2.38 %	Grade of Fe: 27.03 %	80% passing size: 0.699E-01 m.
Recovery of Zn: 100.00 %	Recovery of SiO ₂ : 176.48 %	50% passing size: 0.332E-01 m.
Grade of Zn: 2.59 %	Grade of SiO ₂ : 4.64 %	20% passing size: 0.146E-01 m.
Recovery of Fe: 100.00 %	Simulated size distribution	Size (m) Passing (%)
Grade of Fe: 27.03 %	Number of size classes: 33	-(0.505)+(0.126) 100.000
Recovery of SiO ₂ : 100.00 %	80% passing size: 0.377E-01 m.	-(0.126)+(0.891E-01) 91.817
Grade of SiO ₂ : 4.64 %	50% passing size: 0.115E-01 m.	0.631E-01 73.797
Simulated size distribution	20% passing size: 0.135E-02 m.	0.446E-01 58.686
Number of size classes: 33	Size (m) Passing (%)	0.316E-01 48.519
80% passing size: 0.632E-01 m.	-(0.505)+(0.126) 100.000	0.223E-01 35.078
50% passing size: 0.168E-01 m.	-(0.126)+(0.891E-01) 96.454	0.158E-01 20.910
20% passing size: 0.660E-03 m.	0.631E-01 88.645	0.111E-01 16.943
Size (m) Passing (%)	0.446E-01 82.096	0.789E-02 13.675
-(0.505)+(0.126) 100.000	0.316E-01 77.691	0.557E-02 11.568
-(0.126)+(0.891E-01) 93.742	0.223E-01 71.866	0.394E-02 10.042
0.631E-01 79.961	0.158E-01 60.410	0.279E-02 8.841
0.446E-01 68.404	0.111E-01 48.950	0.197E-02 7.843
0.316E-01 60.629	0.789E-02 39.508	0.139E-02 6.991
0.223E-01 54.407	0.557E-02 33.420	0.987E-03 6.250
0.158E-01 49.049	0.394E-02 29.013	0.696E-03 5.600
0.111E-01 44.298	0.279E-02 25.541	0.493E-03 5.026
0.789E-02 40.055	0.197E-02 22.659	0.348E-03 4.519
0.557E-02 36.256	0.139E-02 20.196	0.247E-03 4.069
0.394E-02 32.848	0.987E-03 18.055	0.174E-03 3.668
0.279E-02 29.786	0.696E-03 16.177	0.123E-03 3.311
0.197E-02 27.031	0.493E-03 14.521	0.870E-04 2.992
0.139E-02 24.550	0.348E-03 13.055	0.616E-04 2.707
0.987E-03 22.312	0.247E-03 11.754	0.435E-04 2.451
0.696E-03 20.292	0.174E-03 10.597	0.308E-04 2.222
0.493E-03 18.466	0.123E-03 9.565	0.218E-04 2.016
0.348E-03 16.814	0.870E-04 8.643	0.154E-04 1.830
0.247E-03 15.319	0.616E-04 7.819	0.109E-04 1.663
0.174E-03 13.963	0.435E-04 7.081	0.00 0.000
0.123E-03 12.733	0.308E-04 6.418	Stream number: 5
0.870E-04 11.616	0.218E-04 5.823	Solid flowrate: 65.02 tonne/hr
0.616E-04 10.602	0.154E-04 5.287	Water flowrate: 0.00 tonne/h
0.435E-04 9.680	0.109E-04 4.804	Slurry flowrate: 18.06 kg/s
0.308E-04 8.841	0.00 0.000	Slurry volumetric flowrate:
0.218E-04 8.077	Stream number: 4	0.4516E-02 m ³ /s
0.154E-04 7.381	Solid flowrate: 65.02 tonne/hr	Percent solids by mass: 100.00 %
0.109E-04 6.747	Water flowrate: 0.00 tonne/h	Percent solids by volume: 100.00 %
0.00 0.000	Slurry flowrate: 18.06 kg/s	Yield of solids: 76.49 %
Stream number: 3	Slurry volumetric flowrate:	Recovery of mineral Chal: 76.48 %
Solid flowrate: 150.01 tonne/hr	0.4516E-02 m ³ /s	Grade of mineral Chal: 6.87 %
Water flowrate: 6.40 tonne/h	Percent solids by mass: 100.00 %	Recovery of mineral Spha: 76.48 %
Slurry flowrate: 43.45 kg/s	Percent solids by volume: 100.00 %	Grade of mineral Spha: 3.86 %
	Yield of solids: 76.49 %	Recovery of mineral Pyri: 76.48 %

Grade of mineral Pyri: 53.57 %	20% passing size: 0.373E-03 m.	0.174E-03	42.516
Recovery of mineral Gang: 76.48 %	Size (m) Passing (%)	0.123E-03	35.287
Grade of mineral Gang: 35.68 %	-(0.505)+(0.223E-01) 100.000	0.870E-04	24.441
Recovery of Cu: 76.48 %	-(0.223E-01)+(0.158E-01) 90.618	0.616E-04	18.715
Grade of Cu: 2.38 %	0.111E-01 73.428	0.435E-04	14.149
Recovery of Zn: 76.48 %	0.789E-02 59.264	0.308E-04	10.461
Grade of Zn: 2.59 %	0.557E-02 50.132	0.218E-04	7.906
Recovery of Fe: 76.48 %	0.394E-02 43.521	0.154E-04	6.321
Grade of Fe: 27.03 %	0.279E-02 38.313	0.109E-04	5.381
Recovery of SiO2: 76.48 %	0.197E-02 33.990	0.00	0.000
Grade of SiO2: 4.64 %	0.139E-02 30.295	Stream number: 10	
Simulated size distribution	0.987E-03 27.083	Solid flowrate: 155.74 tonne/hr	
Number of size classes: 33	0.696E-03 24.266	Water flowrate: 85.68 tonne/h	
80% passing size: 0.169E-01 m.	0.493E-03 21.782	Slurry flowrate: 67.06 kg/s	
50% passing size: 0.101E-01 m.	0.348E-03 19.583	Slurry volumetric flowrate:	
20% passing size: 0.279E-02 m.	0.247E-03 17.632	0.3457E-01 m^3/s	
Size (m) Passing (%)	0.174E-03 15.895	Percent solids by mass: 64.51 %	
-(0.505)+(0.316E-01) 100.000	0.123E-03 14.348	Percent solids by volume: 31.15 %	
-(0.316E-01)+(0.223E-01) 94.695	0.870E-04 12.966	Yield of solids: 183.23 %	
0.158E-01 75.264	0.616E-04 11.729	Recovery of mineral Chal: 183.54%	
0.111E-01 55.033	0.435E-04 10.622	Grade of mineral Chal: 6.89 %	
0.789E-02 38.791	0.308E-04 9.628	Recovery of mineral Spha: 181.94%	
0.557E-02 29.712	0.218E-04 8.735	Grade of mineral Spha: 3.83 %	
0.394E-02 23.998	0.154E-04 7.931	Recovery of mineral Pyri: 186.03 %	
0.279E-02 19.991	0.109E-04 7.207	Grade of mineral Pyri: 54.40 %	
0.197E-02 16.943	0.00 0.000	Recovery of mineral Gang: 179.12%	
0.139E-02 14.503	Stream number: 9	Grade of mineral Gang: 34.89 %	
0.987E-03 12.489	Solid flowrate: 155.74 tonne/hr	Recovery of Cu: 183.54 %	
0.696E-03 10.796	Water flowrate: 85.68 tonne/h	Grade of Cu: 2.38 %	
0.493E-03 9.362	Slurry flowrate: 67.06 kg/s	Recovery of Zn: 181.94 %	
0.348E-03 8.139	Slurry volumetric flowrate:	Grade of Zn: 2.57 %	
0.247E-03 7.093	0.3457E-01 m^3/s	Recovery of Fe: 185.84 %	
0.174E-03 6.195	Percent solids by mass: 64.51 %	Grade of Fe: 27.42 %	
0.123E-03 5.422	Percent solids by volume: 31.15 %	Recovery of SiO2: 179.12 %	
0.870E-04 4.756	Yield of solids: 183.23 %	Grade of SiO2: 4.54 %	
0.616E-04 4.181	Recovery of mineral Chal: 183.54%	Simulated size distribution	
0.435E-04 3.683	Grade of mineral Chal: 6.89 %	Number of size classes: 33	
0.308E-04 3.251	Recovery of mineral Spha: 181.95%	80% passing size: 0.116E-03 m.	
0.218E-04 2.876	Grade of mineral Spha: 3.83 %	50% passing size: 0.577E-04 m.	
0.154E-04 2.549	Recovery of mineral Pyri: 186.04 %	20% passing size: 0.295E-04 m.	
0.109E-04 2.264	Grade of mineral Pyri: 54.40 %	Size (m)	Passing (%)
0.00 0.000	Recovery of mineral Gang: 179.13%	-(0.505)+(0.223E-01)	100.000
Stream's numbers: 6-7-8	Grade of mineral Gang: 34.89 %	-(0.223E-01)+(0.158E-01)	99.771
Solid flowrate: 85.00 tonne/hr	Recovery of Cu: 183.54 %	0.111E-01	99.376
Water flowrate: 6.40 tonne/h	Grade of Cu: 2.38 %	0.789E-02	98.978
Slurry flowrate: 25.39 kg/s	Recovery of Zn: 181.95 %	0.557E-02	98.618
Slurry volumetric flowrate:	Grade of Zn: 2.57 %	0.394E-02	98.280
0.7680E-02 m^3/s	Recovery of Fe: 185.84 %	0.279E-02	97.944
Percent solids by mass: 93.00 %	Grade of Fe: 27.42 %	0.197E-02	97.590
Percent solids by volume: 76.86 %	Recovery of SiO2: 179.13 %	0.139E-02	97.190
Yield of solids: 100.00 %	Grade of SiO2: 4.54 %	0.987E-03	96.708
Recovery of mineral Chal: 100.00%	Simulated size distribution	0.696E-03	96.086
Grade of mineral Chal: 6.87 %	Number of size classes: 33	0.493E-03	95.225
Recovery of mineral Spha: 100.00%	80% passing size: 0.900E-02 m.	0.348E-03	93.946
Grade of mineral Spha: 3.86 %	50% passing size: 0.346E-03 m.	0.247E-03	91.907
Recovery of mineral Pyri: 100.00 %	20% passing size: 0.671E-04 m.	0.174E-03	88.414
Grade of mineral Pyri: 53.58 %	Size (m) Passing (%)	0.123E-03	81.987
Recovery of mineral Gang: 100.00%	-(0.505)+(0.223E-01) 100.000	0.870E-04	70.023
Grade of mineral Gang: 35.69 %	-(0.223E-01)+(0.158E-01) 94.651	0.616E-04	53.644
Recovery of Cu: 100.00 %	0.111E-01 84.874	0.435E-04	35.722
Grade of Cu: 2.38 %	0.789E-02 76.746	0.308E-04	21.321
Recovery of Zn: 100.00 %	0.557E-02 71.403	0.218E-04	12.685
Grade of Zn: 2.59 %	0.394E-02 67.457	0.154E-04	8.314
Recovery of Fe: 100.00 %	0.279E-02 64.280	0.109E-04	6.206
Grade of Fe: 27.03 %	0.197E-02 61.566	0.00	0.000
Recovery of SiO2: 100.00 %	0.139E-02 59.149	Stream number: 11	
Grade of SiO2: 4.64 %	0.987E-03 56.915	Solid flowrate: 159.62 tonne/hr	
Simulated size distribution	0.696E-03 54.756	Water flowrate: 372.60 tonne/h	
Number of size classes: 33	0.493E-03 52.539	Slurry flowrate: 147.84 kg/s	
80% passing size: 0.125E-01 m.	0.348E-03 50.060	Slurry volumetric flowrate: 0.1145	
50% passing size: 0.554E-02 m.	0.247E-03 46.956	m^3/s	

Percent solids by mass: 29.99 %	Grade of Fe: 27.40 %	0.218E-04	19.624
Percent solids by volume: 9.60 %	Recovery of SiO2: 79.12 %	0.154E-04	12.480
Yield of solids: 187.80 %	Grade of SiO2: 4.54 %	0.109E-04	9.081
Recovery of mineral Chal: 187.49%	Simulated size distribution	0.00	0.000
Grade of mineral Chal: 6.86 %	Number of size classes: 33	Stream number: 14	
Recovery of mineral Spha: 184.08%	80% passing size: 0.229E-03 m.	Solid flowrate: 11.06 tonne/hr	
Grade of mineral Spha: 3.78 %	50% passing size: 0.108E-03 m.	Water flowrate: 33.17 tonne/h	
Recovery of mineral Pyri: 193.62 %	20% passing size: 0.493E-04 m.	Slurry flowrate: 12.29 kg/s	
Grade of mineral Pyri: 55.24 %	Size (m) Passing (%)	Slurry volumetric flowrate:	
Recovery of mineral Gang:179.52%	-(0.505)+(0.223E-01) 100.000	0.9900E-02 m^3/s	
Grade of mineral Gang: 34.12 %	-(0.223E-01)+(0.158E-01) 99.481	Percent solids by mass: 25.00 %	
Recovery of Cu: 187.49 %	0.111E-01 98.585	Percent solids by volume: 6.92 %	
Grade of Cu: 2.38 %	0.789E-02 97.682	Yield of solids: 13.01 %	
Recovery of Zn: 184.08 %	0.557E-02 96.866	Recovery of mineral Chal: 68.31 %	
Grade of Zn: 2.54 %	0.394E-02 96.100	Grade of mineral Chal: 36.08 %	
Recovery of Fe: 193.15 %	0.279E-02 95.339	Recovery of mineral Spha: 65.04 %	
Grade of Fe: 27.80 %	0.197E-02 94.535	Grade of mineral Spha: 19.29 %	
Recovery of SiO2: 179.52 %	0.139E-02 93.628	Recovery of mineral Pyri: 10.58 %	
Grade of SiO2: 4.44 %	0.987E-03 92.537	Grade of mineral Pyri: 43.58 %	
Simulated size distribution	0.696E-03 91.126	Recovery of mineral Gang: 0.37 %	
Number of size classes: 33	0.493E-03 89.174	Grade of mineral Gang: 1.03 %	
80% passing size: 0.114E-03 m.	0.348E-03 86.274	Recovery of Cu: 68.31 %	
50% passing size: 0.564E-04 m.	0.247E-03 81.652	Grade of Cu: 12.49 %	
20% passing size: 0.278E-04 m.	0.174E-03 73.734	Recovery of Zn: 65.04 %	
Size (m) Passing (%)	0.123E-03 59.259	Grade of Zn: 12.95 %	
-(0.505)+(0.223E-01) 100.000	0.870E-04 36.475	Recovery of Fe: 15.05 %	
-(0.223E-01)+(0.158E-01) 99.777	0.616E-04 25.597	Grade of Fe: 31.27 %	
0.111E-01 99.391	0.435E-04 17.330	Recovery of SiO2: 0.37 %	
0.789E-02 99.002	0.308E-04 10.780	Grade of SiO2: 0.13 %	
0.557E-02 98.651	0.218E-04 6.494	Simulated size distribution	
0.394E-02 98.322	0.154E-04 4.130	Number of size classes: 33	
0.279E-02 97.994	0.109E-04 3.005	80% passing size: 0.640E-04 m.	
0.197E-02 97.648	0.00 0.000	50% passing size: 0.417E-04 m.	
0.139E-02 97.258	Stream number: 13	20% passing size: 0.219E-04 m.	
0.987E-03 96.788	Solid flowrate: 90.94 tonne/hr	Size (m)	Passing (%)
0.696E-03 96.181	Water flowrate: 297.97 tonne/h	-(0.505)+(0.247E-03)	100.000
0.493E-03 95.341	Slurry flowrate: 108.03 kg/s	-(0.247E-03)+(0.174E-03)	99.999
0.348E-03 94.093	Slurry volumetric flowrate:	0.123E-03	99.927
0.247E-03 92.104	0.8901E-01 m^3/s	0.870E-04	96.682
0.174E-03 88.695	Percent solids by mass: 23.38 %	0.616E-04	77.012
0.123E-03 82.425	Percent solids by volume: 7.01 %	0.435E-04	52.694
0.870E-04 70.751	Yield of solids: 106.99 %	0.308E-04	32.959
0.616E-04 54.770	Recovery of mineral Chal: 106.72%	0.218E-04	19.851
0.435E-04 37.282	Grade of mineral Chal: 6.86 %	0.154E-04	12.575
0.308E-04 23.195	Recovery of mineral Spha: 104.02%	0.109E-04	9.119
0.218E-04 13.973	Grade of mineral Spha: 3.75 %	0.00	0.000
0.154E-04 8.886	Recovery of mineral Pyri: 111.61 %	Stream number: 15	
0.109E-04 6.466	Grade of mineral Pyri: 55.89 %	Solid flowrate: 79.88 tonne/hr	
0.00 0.000	Recovery of mineral Gang:100.40%	Water flowrate: 264.82 tonne/h	
Stream number: 12	Grade of mineral Gang: 33.49 %	Slurry flowrate: 95.75 kg/s	
Solid flowrate: 68.69 tonne/hr	Recovery of Cu: 106.72 %	Slurry volumetric flowrate:	
Water flowrate: 74.48 tonne/h	Grade of Cu: 2.37 %	0.7911E-01 m^3/s	
Slurry flowrate: 39.77 kg/s	Recovery of Zn: 104.02 %	Percent solids by mass: 23.17 %	
Slurry volumetric flowrate:	Grade of Zn: 2.52 %	Percent solids by volume: 7.02 %	
0.2544E-01 m^3/s	Recovery of Fe: 111.23 %	Yield of solids: 93.99 %	
Percent solids by mass: 47.98 %	Grade of Fe: 28.10 %	Recovery of mineral Chal: 8.41 %	
Percent solids by volume: 18.67 %	Recovery of SiO2: 100.40 %	Grade of mineral Chal: 2.81 %	
Yield of solids: 80.81 %	Grade of SiO2: 4.36 %	Recovery of mineral Spha: 38.97 %	
Recovery of mineral Chal: 80.77 %	Simulated size distribution	Grade of mineral Spha: 1.60 %	
Grade of mineral Chal: 6.87 %	Number of size classes: 33	Recovery of mineral Pyri: 101.02 %	
Recovery of mineral Spha: 80.07 %	80% passing size: 0.641E-04 m.	Grade of mineral Pyri: 57.59 %	
Grade of mineral Spha: 3.82 %	50% passing size: 0.419E-04 m.	Recovery of mineral Gang:100.03%	
Recovery of mineral Pyri: 82.02 %	20% passing size: 0.220E-04 m.	Grade of mineral Gang: 37.98 %	
Grade of mineral Pyri: 54.38 %	Size (m) Passing (%)	Recovery of Cu: 38.41 %	
Recovery of mineral Gang: 79.12 %	-(0.505)+(0.247E-03) 100.000	Grade of Cu: 0.97 %	
Grade of mineral Gang: 34.94 %	-(0.247E-03)+(0.174E-03) 99.999	Recovery of Zn: 38.97 %	
Recovery of Cu: 80.77 %	0.123E-03 99.927	Grade of Zn: 1.07 %	
Grade of Cu: 2.38 %	0.870E-04 96.646	Recovery of Fe: 96.18 %	
Recovery of Zn: 80.07 %	0.616E-04 76.810	Grade of Fe: 27.66 %	
Grade of Zn: 2.57 %	0.435E-04 52.356	Recovery of SiO2: 100.03 %	
Recovery of Fe: 81.92 %	0.308E-04 32.576	Grade of SiO2: 4.94 %	

Simulated size distribution
Number of size classes: 33
80% passing size: 0.641E-04 m.
50% passing size: 0.420E-04 m.
20% passing size: 0.221E-04 m.
Size (m) Passing (%)
-(0.505)+(0.247E-03) 100.000
-(0.247E-03)+(0.174E-03) 99.999
0.123E-03 99.926
0.870E-04 96.641
0.616E-04 76.782
0.435E-04 52.309
0.308E-04 32.522
0.218E-04 19.592
0.154E-04 12.467
0.109E-04 9.075
0.00 0.000

Stream number: 16
Solid flowrate: 3.20 tonne/hr
Water flowrate: 9.60 tonne/h
Slurry flowrate: 3.56 kg/s
Slurry volumetric flowrate:
0.2851E-02 m³/s
Percent solids by mass: 25.00 %
Percent solids by volume: 6.44 %
Yield of solids: 3.76 %
Recovery of mineral Chal: 7.18 %
Grade of mineral Chal: 13.10 %
Recovery of mineral Spha: 8.80 %
Grade of mineral Spha: 9.02 %
Recovery of mineral Pyri: 5.46 %
Grade of mineral Pyri: 77.71 %
Recovery of mineral Gang: 0.02 %
Grade of mineral Gang: 1.73 kg/t
Recovery of Cu: 7.18 %
Grade of Cu: 4.54 %
Recovery of Zn: 8.80 %
Grade of Zn: 6.05 %
Recovery of Fe: 5.59 %
Grade of Fe: 40.16 %
Recovery of SiO₂: 0.02 %
Grade of SiO₂: 0.02 %
Simulated size distribution
Number of size classes: 33
80% passing size: 0.637E-04 m.
50% passing size: 0.412E-04 m.
20% passing size: 0.213E-04 m.
Size (m) Passing (%)
-(0.505)+(0.247E-03) 100.000
-(0.247E-03)+(0.174E-03) 99.999
0.123E-03 99.929
0.870E-04 96.742
0.616E-04 77.396
0.435E-04 53.431
0.308E-04 33.929
0.218E-04 20.555
0.154E-04 12.876
0.109E-04 9.241
0.00 0.000

Stream number: 17
Solid flowrate: 76.68 tonne/hr
Water flowrate: 255.20 tonne/h
Slurry flowrate: 92.19 kg/s
Slurry volumetric flowrate:
0.7626E-01 m³/s
Percent solids by mass: 23.10 %
Percent solids by volume: 7.04 %
Yield of solids: 90.22 %
Recovery of mineral Chal: 31.24 %
Grade of mineral Chal: 2.38 %
Recovery of mineral Spha: 30.18 %

Grade of mineral Spha: 1.29 %
Recovery of mineral Pyri: 95.56 %
Grade of mineral Pyri: 56.75 %
Recovery of mineral Gang: 100.01 %
Grade of mineral Gang: 39.56 %
Recovery of Cu: 31.24 %
Grade of Cu: 0.82 %
Recovery of Zn: 30.18 %
Grade of Zn: 0.87 %
Recovery of Fe: 90.58 %
Grade of Fe: 27.14 %
Recovery of SiO₂: 100.01 %
Grade of SiO₂: 5.15 %
Simulated size distribution
Number of size classes: 33
80% passing size: 0.642E-04 m.
50% passing size: 0.420E-04 m.
20% passing size: 0.221E-04 m.

Size (m) Passing (%)
-(0.505)+(0.247E-03) 100.000
-(0.247E-03)+(0.174E-03) 99.999
0.123E-03 99.926
0.870E-04 96.637
0.616E-04 76.757
0.435E-04 52.263
0.308E-04 32.464
0.218E-04 19.552
0.154E-04 12.450
0.109E-04 9.068
0.00 0.000

Stream number: 18
Solid flowrate: 2.06 tonne/hr
Water flowrate: 4.80 tonne/h
Slurry flowrate: 1.90 kg/s
Slurry volumetric flowrate:
0.1448E-02 m³/s
Percent solids by mass: 30.00 %
Percent solids by volume: 7.94 %
Yield of solids: 2.42 %
Recovery of mineral Chal: 2.77 %
Grade of mineral Chal: 7.86 %
Recovery of mineral Spha: 1.88 %
Grade of mineral Spha: 2.99 %
Recovery of mineral Pyri: 4.02 %
Grade of mineral Pyri: 89.02 %
Recovery of mineral Gang: 0.01 %
Grade of mineral Gang: 1.24 kg/t
Recovery of Cu: 2.77 %
Grade of Cu: 2.72 %
Recovery of Zn: 1.88 %
Grade of Zn: 2.01 %
Recovery of Fe: 3.92 %
Grade of Fe: 43.83 %
Recovery of SiO₂: 0.01 %
Grade of SiO₂: 0.02 %
Simulated size distribution
Number of size classes: 33
80% passing size: 0.636E-04 m.
50% passing size: 0.410E-04 m.
20% passing size: 0.211E-04 m.
Size (m) Passing (%)
-(0.505)+(0.247E-03) 100.000
-(0.247E-03)+(0.174E-03) 99.999
0.123E-03 99.929
0.870E-04 96.764
0.616E-04 77.536
0.435E-04 53.697
0.308E-04 34.278
0.218E-04 20.807
0.154E-04 12.984
0.109E-04 9.285

0.00 0.000
Stream number: 19
Solid flowrate: 74.63 tonne/hr
Water flowrate: 250.42 tonne/h
Slurry flowrate: 90.29 kg/s
Slurry volumetric flowrate:
0.7481E-01 m³/s
Percent solids by mass: 22.96 %
Percent solids by volume: 7.02 %
Yield of solids: 87.80 %
Recovery of mineral Chal: 28.47 %
Grade of mineral Chal: 2.23 %
Recovery of mineral Spha: 28.30 %
Grade of mineral Spha: 1.24 %
Recovery of mineral Pyri: 91.54 %
Grade of mineral Pyri: 55.86 %
Recovery of mineral Gang: 100.00 %
Grade of mineral Gang: 40.65 %
Recovery of Cu: 28.47 %
Grade of Cu: 0.77 %
Recovery of Zn: 28.30 %
Grade of Zn: 0.83 %
Recovery of Fe: 86.66 %
Grade of Fe: 26.68 %
Recovery of SiO₂: 100.00 %
Grade of SiO₂: 5.29 %
Simulated size distribution of
Streams 19-20-22
Number of size classes: 33
80% passing size: 0.642E-04 m.
50% passing size: 0.420E-04 m.
20% passing size: 0.221E-04 m.
Size (m) Passing (%)
-(0.505)+(0.247E-03) 100.000
-(0.247E-03)+(0.174E-03) 99.999
0.123E-03 99.926
0.870E-04 96.633
0.616E-04 76.735
0.435E-04 52.223
0.308E-04 32.414
0.218E-04 19.517
0.154E-04 12.435
0.109E-04 9.062
0.00 0.000

Stream number: 20
Solid flowrate: 74.63 tonne/hr
Water flowrate: 18.66 tonne/h
Slurry flowrate: 25.91 kg/s
Slurry volumetric flowrate:
0.1044E-01 m³/s
Percent solids by mass: 80.00 %
Percent solids by volume: 50.35 %
Yield of solids: 87.80 %
Recovery of mineral Chal: 28.47 %
Grade of mineral Chal: 2.23 %
Recovery of mineral Spha: 28.30 %
Grade of mineral Spha: 1.24 %
Recovery of mineral Pyri: 91.54 %
Grade of mineral Pyri: 55.86 %
Recovery of mineral Gang: 100.00 %
Grade of mineral Gang: 40.65 %
Recovery of Cu: 28.47 %
Grade of Cu: 0.77 %
Recovery of Zn: 28.30 %
Grade of Zn: 0.83 %
Recovery of Fe: 86.66 %
Grade of Fe: 26.68 %
Recovery of SiO₂: 100.00 %
Grade of SiO₂: 5.29 %
Stream number: 21
Solid flowrate: 0.00 tonne/hr

Water flowrate: 231.73 tonne/h	0.308E-04 54.345	Simulated size distribution
Slurry flowrate: 64.37 kg/s	0.218E-04 24.486	Number of size classes: 33
Slurry volumetric flowrate: 0.6437E-01 m ³ /s	0.154E-04 11.605	80% passing size: 0.391E-04 m.
Stream number: 22	0.109E-04 6.166	50% passing size: 0.288E-04 m.
Solid flowrate: 74.63 tonne/hr	0.00 0.000	20% passing size: 0.205E-04 m
Water flowrate: 4.76 tonne/h	Stream number: 25	Size (m) Passing (%)
Slurry flowrate: 22.05 kg/s	Solid flowrate: 41.15 tonne/hr	-(0.505)+(0.174E-03) 100.000
Slurry volumetric flowrate: 0.6578E-02 m ³ /s	Water flowrate: 27.22 tonne/h	-(0.174E-03)+(0.123E-03) 99.998
Percent solids by mass: 94.00 %	Slurry flowrate: 18.99 kg/s	0.870E-04 99.831
Percent solids by volume: 79.89 %	Slurry volumetric flowrate: 0.1007E-01 m ³ /s	0.616E-04 97.488
Yield of solids: 87.80 %	Percent solids by mass: 60.18 %	0.435E-04 87.851
Recovery of mineral Chal: 28.47 %	Percent solids by volume: 24.88 %	0.308E-04 58.492
Grade of mineral Chal: 2.23 %	Yield of solids: 48.41 %	0.218E-04 23.074
Recovery of mineral Spha: 28.30 %	Recovery of mineral Chal: 214.59 %	0.154E-04 9.788
Grade of mineral Spha: 1.24 %	Grade of mineral Chal: 30.47 %	0.109E-04 4.361
Recovery of mineral Pyri: 91.54 %	Recovery of mineral Spha: 211.44 %	0.00 0.000
Grade of mineral Pyri: 55.86 %	Grade of mineral Spha: 16.86 %	Stream number: 27
Recovery of mineral Gang: 100.00 %	Recovery of mineral Pyri: 46.82 %	Solid flowrate: 17.20 tonne/hr
Grade of mineral Gang: 40.65 %	Grade of mineral Pyri: 51.82 %	Water flowrate: 108.90 tonne/h
Recovery of Cu: 28.47 %	Recovery of mineral Gang: 1.12 %	Slurry flowrate: 35.03 kg/s
Grade of Cu: 0.77 %	Grade of mineral Gang: 8.22 kg/t	Slurry volumetric flowrate: 0.3129E-01 m ³ /s
Recovery of Zn: 28.30 %	Recovery of Cu: 214.59 %	Percent solids by mass: 13.64 %
Grade of Zn: 0.83 %	Grade of Cu: 10.55 %	Percent solids by volume: 3.32 %
Recovery of Fe: 86.66 %	Recovery of Zn: 211.44 %	Yield of solids: 20.24 %
Grade of Fe: 26.68 %	Grade of Zn: 11.31 %	Recovery of mineral Chal: 83.43 %
Recovery of SiO ₂ : 100.00 %	Recovery of Fe: 59.80 %	Grade of mineral Chal: 28.34 %
Grade of SiO ₂ : 5.29 %	Grade of Fe: 33.39 %	Recovery of mineral Spha: 79.85 %
Stream number: 23	Recovery of SiO ₂ : 1.12 %	Grade of mineral Spha: 15.23 %
Solid flowrate: 0.00 tonne/hr	Grade of SiO ₂ : 0.11 %	Recovery of mineral Pyri: 21.05 %
Water flowrate: 3.89 tonne/h	Simulated size distribution	Grade of mineral Pyri: 55.74 %
Slurry flowrate: 3.86 kg/s	Number of size classes: 33	Recovery of mineral Gang: 0.39 %
Slurry volumetric flowrate: 0.3859E-02 m ³ /s	80% passing size: 0.504E-04 m.	Grade of mineral Gang: 6.91 kg/t
Stream number: 24	50% passing size: 0.357E-04 m.	Recovery of Cu: 83.43 %
Solid flowrate: 58.36 tonne/hr	20% passing size: 0.268E-04 m.	Grade of Cu: 9.81 %
Water flowrate: 136.19 tonne/h	Size (m) Passing (%)	Recovery of Zn: 79.85 %
Slurry flowrate: 54.04 kg/s	-(0.505)+(0.174E-03) 100.000	Grade of Zn: 10.22 %
Slurry volumetric flowrate: 0.4137E-01 m ³ /s	-(0.174E-03)+(0.123E-03) 99.973	Recovery of Fe: 25.88 %
Percent solids by mass: 30.00 %	0.870E-04 98.685	Grade of Fe: 34.57 %
Percent solids by volume: 8.56 %	0.616E-04 89.551	Recovery of SiO ₂ : 0.39 %
Yield of solids: 68.66 %	0.435E-04 71.530	Grade of SiO ₂ : 0.09 %
Recovery of mineral Chal: 298.19 %	0.308E-04 35.931	Simulated size distribution
Grade of mineral Chal: 29.85 %	0.218E-04 7.608	Number of size classes: 33
Recovery of mineral Spha: 291.46 %	0.154E-04 3.303	80% passing size: 0.243E-04 m.
Grade of mineral Spha: 16.39 %	0.109E-04 1.750	50% passing size: 0.189E-04 m.
Recovery of mineral Pyri: 67.91 %	0.00 0.000	20% passing size: 0.120E-04 m.
Grade of mineral Pyri: 53.00 %	Stream number: 26	Size (m) Passing (%)
Recovery of mineral Gang: 1.51 %	Solid flowrate: 41.15 tonne/hr	-(0.505)+(0.616E-04) 100.000
Grade of mineral Gang: 7.84 kg/t	Water flowrate: 27.22 tonne/h	-(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.973
Recovery of Cu: 298.19 %	Slurry flowrate: 18.99 kg/s	0.308E-04 98.393
Grade of Cu: 10.34 %	Slurry volumetric flowrate: 0.1007E-01 m ³ /s	0.218E-04 64.876
Recovery of Zn: 291.46 %	Percent solids by mass: 60.18 %	0.154E-04 31.476
Grade of Zn: 11.00 %	Percent solids by volume: 24.88 %	0.109E-04 16.737
Recovery of Fe: 85.73 %	Yield of solids: 48.41 %	0.00 0.000
Grade of Fe: 33.75 %	Recovery of mineral Chal: 214.59 %	Stream number: 28
Recovery of SiO ₂ : 1.51 %	Grade of mineral Chal: 30.47 %	Solid flowrate: 20.67 tonne/hr
Grade of SiO ₂ : 0.10 %	Recovery of mineral Spha: 211.44 %	Water flowrate: 114.77 tonne/h
Simulated size distribution	Grade of mineral Spha: 16.86 %	Slurry flowrate: 37.62 kg/s
Number of size classes: 33	Recovery of mineral Pyri: 46.82 %	Slurry volumetric flowrate: 0.3312E-01 m ³ /s
80% passing size: 0.436E-04 m.	Grade of mineral Pyri: 51.82 %	Percent solids by mass: 15.26 %
50% passing size: 0.296E-04 m.	Recovery of mineral Gang: 1.12 %	Percent solids by volume: 3.73 %
20% passing size: 0.198E-04 m.	Grade of mineral Gang: 8.22 kg/t	Yield of solids: 24.32 %
Size (m) Passing (%)	Recovery of Cu: 214.59 %	Recovery of mineral Chal: 92.11 %
-(0.505)+(0.174E-03) 100.000	Grade of Cu: 10.55 %	Grade of mineral Chal: 26.03 %
(0.174E-03)+(0.123E-03) 99.981	Recovery of Zn: 211.44 %	Recovery of mineral Spha: 88.45 %
0.870E-04 99.073	Grade of Zn: 11.31 %	Grade of mineral Spha: 14.04 %
0.616E-04 92.635	Recovery of Fe: 59.80 %	Recovery of mineral Pyri: 26.95 %
0.435E-04 79.921	Grade of Fe: 33.39 %	Grade of mineral Pyri: 59.36 %
	Recovery of SiO ₂ : 1.12 %	Recovery of mineral Gang: 0.39 %
	Grade of SiO ₂ : 0.11 %	Grade of mineral Gang: 5.75 kg/t

Recovery of Cu: 92.11 %
 Grade of Cu: 9.01 %
 Recovery of Zn: 88.45 %
 Grade of Zn: 9.42 %
 Recovery of Fe: 31.99 %
 Grade of Fe: 35.55 %
 Recovery of SiO₂: 0.39 %
 Grade of SiO₂: 0.07 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.243E-04 m.
 50% passing size: 0.189E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.

Size (m)	Passing (%)
-(0.505)+(0.616E-04)	100.000
-(0.616E-04)+(0.435E-04)	99.973
0.308E-04	98.405
0.218E-04	64.975
0.154E-04	31.523
0.109E-04	16.756
0.00	0.000

Stream number: 29
 Solid flowrate: 10.61 tonne/hr
 Water flowrate: 22.55 tonne/h
 Slurry flowrate: 9.21 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.6910E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 32.00 %
 Percent solids by volume: 9.37 %
 Yield of solids: 12.48 %
 Recovery of mineral Chal: 75.07 %
 Grade of mineral Chal: 41.34 %
 Recovery of mineral Spha: 37.05 %
 Grade of mineral Spha: 11.46 %
 Recovery of mineral Pyri: 11.00 %
 Grade of mineral Pyri: 47.22 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 75.07 %
 Grade of Cu: 14.31 %
 Recovery of Zn: 37.05 %
 Grade of Zn: 7.69 %
 Recovery of Fe: 15.96 %
 Grade of Fe: 34.56 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.243E-04 m.
 50% passing size: 0.190E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.

Size (m)	Passing (%)
-(0.505)+(0.123E-03)	100.000
-(0.123E-03)+(0.435E-04)	99.973
0.308E-04	98.370
0.218E-04	64.698
0.154E-04	31.392
0.109E-04	16.703
0.00	0.000

Stream number: 30
 Solid flowrate: 10.06 tonne/hr
 Water flowrate: 92.23 tonne/h
 Slurry flowrate: 28.42 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.2621E-01 m³/s
 Percent solids by mass: 9.84 %
 Percent solids by volume: 2.25 %
 Yield of solids: 11.84 %
 Recovery of mineral Chal: 17.04 %
 Grade of mineral Chal: 9.89 %
 Recovery of mineral Spha: 51.40 %

Grade of mineral Spha: 16.76 %
 Recovery of mineral Pyri: 15.94 %
 Grade of mineral Pyri: 72.16 %
 Recovery of mineral Gang: 0.39 %
 Grade of mineral Gang: 1.18 %
 Recovery of Cu: 17.04 %
 Grade of Cu: 3.43 %
 Recovery of Zn: 51.40 %
 Grade of Zn: 11.25 %
 Recovery of Fe: 16.03 %
 Grade of Fe: 36.60 %
 Recovery of SiO₂: 0.39 %
 Grade of SiO₂: 0.15 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.242E-04 m.
 50% passing size: 0.189E-04 m.
 20% passing size: 0.119E-04 m.

Size (m)	Passing (%)
-(0.505)+(0.616E-04)	100.000
-(0.616E-04)+(0.435E-04)	99.974
0.308E-04	98.443
0.218E-04	65.265
0.154E-04	31.661
0.109E-04	16.812
0.00	0.000

Stream number: 31
 Solid flowrate: 7.14 tonne/hr
 Water flowrate: 16.66 tonne/h
 Slurry flowrate: 6.61 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.5075E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 30.00 %
 Percent solids by volume: 8.83 %
 Yield of solids: 8.40 %
 Recovery of mineral Chal: 66.39 %
 Grade of mineral Chal: 54.33 %
 Recovery of mineral Spha: 28.46 %
 Grade of mineral Spha: 13.08 %
 Recovery of mineral Pyri: 5.11 %
 Grade of mineral Pyri: 32.60 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 66.39 %
 Grade of Cu: 18.81 %
 Recovery of Zn: 28.46 %
 Grade of Zn: 8.78 %
 Recovery of Fe: 9.85 %
 Grade of Fe: 31.71 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.244E-04 m.
 50% passing size: 0.190E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.

Size (m)	Passing (%)
-(0.505)+(0.616E-04)	100.000
-(0.616E-04)+(0.435E-04)	99.972
0.308E-04	98.322
0.218E-04	64.335
0.154E-04	31.219
0.109E-04	16.633
0.00	0.000

Stream number: 32
 Solid flowrate: 3.47 tonne/hr
 Water flowrate: 5.89 tonne/h
 Slurry flowrate: 2.60 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.1835E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 37.08 %

Percent solids by volume: 10.86 %
 Yield of solids: 4.08 %
 Recovery of mineral Chal: 8.68 %
 Grade of mineral Chal: 14.61 %
 Recovery of mineral Spha: 8.59 %
 Grade of mineral Spha: 8.12 %
 Recovery of mineral Pyri: 5.89 %
 Grade of mineral Pyri: 77.28 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 8.68 %
 Grade of Cu: 5.06 %
 Recovery of Zn: 8.59 %
 Grade of Zn: 5.45 %
 Recovery of Fe: 6.11 %
 Grade of Fe: 40.41 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.242E-04 m.
 50% passing size: 0.188E-04 m.
 20% passing size: 0.119E-04 m.

Size (m)	Passing (%)
-(0.505)+(0.616E-04)	100.000
-(0.616E-04)+(0.435E-04)	99.974
0.308E-04	98.468
0.218E-04	65.447
0.154E-04	31.747
0.109E-04	16.847
0.00	0.000

Stream number: 33
 Solid flowrate: 3.21 tonne/hr
 Water flowrate: 3.92 tonne/h
 Slurry flowrate: 1.98 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.1289E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 45.00 %
 Percent solids by volume: 15.47 %
 Yield of solids: 3.78 %
 Recovery of mineral Chal: 4.98 %
 Grade of mineral Chal: 9.05 %
 Recovery of mineral Spha: 43.07 %
 Grade of mineral Spha: 44.01 %
 Recovery of mineral Pyri: 3.31 %
 Grade of mineral Pyri: 46.93 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 4.98 %
 Grade of Cu: 3.14 %
 Recovery of Zn: 43.07 %
 Grade of Zn: 29.53 %
 Recovery of Fe: 3.44 %
 Grade of Fe: 24.60 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.243E-04 m.
 50% passing size: 0.190E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.

Size (m)	Passing (%)
-(0.505)+(0.616E-04)	100.000
-(0.616E-04)+(0.435E-04)	99.972
0.308E-04	98.346
0.218E-04	64.543
0.154E-04	31.318
0.109E-04	16.674
0.00	0.000

Stream number: 34
 Solid flowrate: 6.85 tonne/hr

Water flowrate: 88.31 tonne/h
 Slurry flowrate: 26.43 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.2492E-01 m³/s
 Percent solids by mass: 7.20 %
 Percent solids by volume: 1.56 %
 Yield of solids: 8.06 %
 Recovery of mineral Chal: 12.06 %
 Grade of mineral Chal: 10.29 %
 Recovery of mineral Spha: 8.33 %
 Grade of mineral Spha: 3.99 %
 Recovery of mineral Pyri: 12.64 %
 Grade of mineral Pyri: 83.99 %
 Recovery of mineral Gang: 0.39 %
 Grade of mineral Gang: 1.74 %
 Recovery of Cu: 12.06 %
 Grade of Cu: 3.56 %
 Recovery of Zn: 8.33 %
 Grade of Zn: 2.68 %
 Recovery of Fe: 12.59 %
 Grade of Fe: 42.23 %
 Recovery of SiO₂: 0.39 %
 Grade of SiO₂: 0.23 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.242E-04 m.
 50% passing size: 0.188E-04 m.
 20% passing size: 0.119E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.975
 0.308E-04 98.488
 0.218E-04 65.603
 0.154E-04 31.822
 0.109E-04 16.878
 0.00 0.000
Stream number: 35
 Solid flowrate: 2.97 tonne/hr
 Water flowrate: 8.92 tonne/h
 Slurry flowrate: 3.31 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.2650E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 25.00 %
 Percent solids by volume: 6.44 %
 Yield of solids: 3.50 %
 Recovery of mineral Chal: 8.11 %
 Grade of mineral Chal: 15.93 %
 Recovery of mineral Spha: 6.18 %
 Grade of mineral Spha: 6.82 %
 Recovery of mineral Pyri: 5.05 %
 Grade of mineral Pyri: 77.25 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 8.11 %
 Grade of Cu: 5.52 %
 Recovery of Zn: 6.18 %
 Grade of Zn: 4.58 %
 Recovery of Fe: 5.28 %
 Grade of Fe: 40.81 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.242E-04 m.
 50% passing size: 0.188E-04 m.
 20% passing size: 0.119E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.974
 0.308E-04 98.469
 0.218E-04 65.453

0.154E-04 31.750
 0.109E-04 16.849
 0.00 0.000
Stream number: 36
 Solid flowrate: 3.88 tonne/hr
 Water flowrate: 79.38 tonne/h
 Slurry flowrate: 23.13 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.2227E-01 m³/s
 Percent solids by mass: 4.66 %
 Percent solids by volume: 0.99 %
 Yield of solids: 4.56 %
 Recovery of mineral Chal: 3.95 %
 Grade of mineral Chal: 5.96 %
 Recovery of mineral Spha: 2.14 %
 Grade of mineral Spha: 1.81 %
 Recovery of mineral Pyri: 7.59 %
 Grade of mineral Pyri: 89.14 %
 Recovery of mineral Gang: 0.39 %
 Grade of mineral Gang: 3.07 %
 Recovery of Cu: 3.95 %
 Grade of Cu: 2.06 %
 Recovery of Zn: 2.14 %
 Grade of Zn: 1.22 %
 Recovery of Fe: 7.31 %
 Grade of Fe: 43.30 %
 Recovery of SiO₂: 0.39 %
 Grade of SiO₂: 0.40 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.241E-04 m.
 50% passing size: 0.188E-04 m.
 20% passing size: 0.119E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.975
 0.308E-04 98.503
 0.218E-04 65.718
 0.154E-04 31.877
 0.109E-04 16.900
 0.00 0.000
Stream number: 37
 Solid flowrate: 5.90 tonne/hr
 Water flowrate: 9.26 tonne/h
 Slurry flowrate: 4.21 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.2932E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 38.90 %
 Percent solids by volume: 12.25 %
 Yield of solids: 6.94 %
 Recovery of mineral Chal: 11.44 %
 Grade of mineral Chal: 11.33 %
 Recovery of mineral Spha: 61.60 %
 Grade of mineral Spha: 34.27 %
 Recovery of mineral Pyri: 7.04 %
 Grade of mineral Pyri: 54.38 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 11.44 %
 Grade of Cu: 3.92 %
 Recovery of Zn: 61.60 %
 Grade of Zn: 23.00 %
 Recovery of Fe: 7.38 %
 Grade of Fe: 28.76 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.243E-04 m.
 50% passing size: 0.189E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.

Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.973
 0.308E-04 98.377
 0.218E-04 64.769
 0.154E-04 31.426
 0.109E-04 16.717
 0.00 0.000
Stream number: 38
 Solid flowrate: 4.20 tonne/hr
 Water flowrate: 8.16 tonne/h
 Slurry flowrate: 3.43 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.2527E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 33.99 %
 Percent solids by volume: 10.34 %
 Yield of solids: 4.94 %
 Recovery of mineral Chal: 7.35 %
 Grade of mineral Chal: 10.23 %
 Recovery of mineral Spha: 55.96 %
 Grade of mineral Spha: 43.70 %
 Recovery of mineral Pyri: 4.25 %
 Grade of mineral Pyri: 46.11 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 7.35 %
 Grade of Cu: 3.54 %
 Recovery of Zn: 55.96 %
 Grade of Zn: 29.32 %
 Recovery of Fe: 4.49 %
 Grade of Fe: 24.57 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.243E-04 m.
 50% passing size: 0.190E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.972
 0.308E-04 98.344
 0.218E-04 64.524
 0.154E-04 31.310
 0.109E-04 16.670
 0.00 0.000
Stream number: 39
 Solid flowrate: 1.69 tonne/hr
 Water flowrate: 1.10 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.78 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.4046E-03 m³/s
 Percent solids by mass: 60.51 %
 Percent solids by volume: 24.16 %
 Yield of solids: 1.99 %
 Recovery of mineral Chal: 4.08 %
 Grade of mineral Chal: 14.09 %
 Recovery of mineral Spha: 5.63 %
 Grade of mineral Spha: 10.92 %
 Recovery of mineral Pyri: 2.79 %
 Grade of mineral Pyri: 74.99 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 4.08 %
 Grade of Cu: 4.88 %
 Recovery of Zn: 5.63 %
 Grade of Zn: 7.33 %
 Recovery of Fe: 2.89 %
 Grade of Fe: 39.19 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %

Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.242E-04 m.
 50% passing size: 0.188E-04 m.
 20% passing size: 0.119E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.974
 0.308E-04 98.459
 0.218E-04 65.379
 0.154E-04 31.715
 0.109E-04 16.834
 0.00 0.000
Stream number: 40
 Solid flowrate: 1.97 tonne/hr
 Water flowrate: 3.66 tonne/h
 Slurry flowrate: 1.57 kg/s
 Slurry volumetric flowrate:
 0.1147E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 35.01 %
 Percent solids by volume: 11.24 %
 Yield of solids: 2.32 %
 Recovery of mineral Chal: 2.00 %
 Grade of mineral Chal: 5.91 %
 Recovery of mineral Spha: 40.69 %
 Grade of mineral Spha: 67.62 %
 Recovery of mineral Pyri: 1.15 %
 Grade of mineral Pyri: 26.46 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 2.00 %
 Grade of Cu: 2.05 %
 Recovery of Zn: 40.61 %
 Grade of Zn: 45.38 %
 Recovery of Fe: 1.21 %
 Grade of Fe: 14.11 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution of
 Streams 40-48-52
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.244E-04 m.
 50% passing size: 0.191E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.971
 0.308E-04 98.265
 0.218E-04 63.936
 0.154E-04 31.031
 0.109E-04 16.558
 0.00 0.000
Stream number: 41
 Solid flowrate: 0.46 tonne/hr
 Water flowrate: 0.85 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.36 kg/s
 Slurry volumetric flowrate:
 0.2623E-03 m³/s
 Percent solids by mass: 35.00 %
 Percent solids by volume: 10.36 %
 Yield of solids: 0.54 %
 Recovery of mineral Chal: 1.10 %
 Grade of mineral Chal: 14.12 %
 Recovery of mineral Spha: 3.25 %
 Grade of mineral Spha: 23.41 %
 Recovery of mineral Pyri: 0.63 %
 Grade of mineral Pyri: 62.46 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 1.10 %
 Grade of Cu: 4.89 %

Recovery of Zn: 3.25 %
 Grade of Zn: 15.71 %
 Recovery of Fe: 0.66 %
 Grade of Fe: 33.37 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.243E-04 m.
 50% passing size: 0.189E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.435E-04)+(0.616E-04) 99.973
 0.308E-04 98.410
 0.218E-04 65.016
 0.154E-04 31.543
 0.109E-04 16.765
 0.00 0.000
Stream number: 42
 Solid flowrate: 2.23 tonne/hr
 Water flowrate: 4.49 tonne/h
 Slurry flowrate: 1.87 kg/s
 Slurry volumetric flowrate:
 0.1381E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 33.16 %
 Percent solids by volume: 9.60 %
 Yield of solids: 2.62 %
 Recovery of mineral Chal: 5.36 %
 Grade of mineral Chal: 14.04 %
 Recovery of mineral Spha: 15.27 %
 Grade of mineral Spha: 22.48 %
 Recovery of mineral Pyri: 3.11 %
 Grade of mineral Pyri: 63.48 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 5.36 %
 Grade of Cu: 4.86 %
 Recovery of Zn: 15.27 %
 Grade of Zn: 15.09 %
 Recovery of Fe: 3.28 %
 Grade of Fe: 33.82 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.242E-04 m.
 50% passing size: 0.189E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.973
 0.308E-04 98.414
 0.218E-04 65.045
 0.154E-04 31.557
 0.109E-04 16.770
 0.00 0.000
Stream number: 43
 Solid flowrate: 1.24 tonne/hr
 Water flowrate: 0.26 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.42 kg/s
 Slurry volumetric flowrate:
 0.1424E-03 m³/s
 Percent solids by mass: 82.71 %
 Percent solids by volume: 49.55 %
 Yield of solids: 1.46 %
 Recovery of mineral Chal: 2.98 %
 Grade of mineral Chal: 14.07 %
 Recovery of mineral Spha: 2.38 %
 Grade of mineral Spha: 6.32 %
 Recovery of mineral Pyri: 2.16 %

Grade of mineral Pyri: 79.61 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 2.98 %
 Grade of Cu: 4.87 %
 Recovery of Zn: 2.38 %
 Grade of Zn: 4.24 %
 Recovery of Fe: 2.23 %
 Grade of Fe: 41.34 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.242E-04 m.
 50% passing size: 0.188E-04 m.
 20% passing size: 0.119E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.975
 0.308E-04 98.477
 0.218E-04 65.513
 0.154E-04 31.779
 0.109E-04 16.860
 0.00 0.000
Stream number: 44
 Solid flowrate: 8.38 tonne/hr
 Water flowrate: 16.92 tonne/h
 Slurry flowrate: 7.03 kg/s
 Slurry volumetric flowrate:
 0.5218E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 33.12 %
 Percent solids by volume: 9.94 %
 Yield of solids: 9.86 %
 Recovery of mineral Chal: 69.37 %
 Grade of mineral Chal: 48.38 %
 Recovery of mineral Spha: 30.84 %
 Grade of mineral Spha: 12.08 %
 Recovery of mineral Pyri: 7.27 %
 Grade of mineral Pyri: 39.53 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 69.37 %
 Grade of Cu: 16.75 %
 Recovery of Zn: 30.84 %
 Grade of Zn: 8.10 %
 Recovery of Fe: 12.08 %
 Grade of Fe: 33.12 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
 Simulated size distribution of
 Streams 44-47-51
 Number of size classes: 33
 80% passing size: 0.243E-04 m.
 50% passing size: 0.190E-04 m.
 20% passing size: 0.120E-04 m.
 Size (m) Passing (%)
 -(0.505)+(0.616E-04) 100.000
 -(0.616E-04)+(0.435E-04) 99.972
 0.308E-04 98.345
 0.218E-04 64.508
 0.154E-04 31.301
 0.109E-04 16.666
 0.00 0.000
Stream number: 45
 Solid flowrate: 0.00 tonne/hr
 Water flowrate: 14.82 tonne/h
 Slurry flowrate: 4.12 kg/s
 Slurry volumetric flowrate:
 0.4117E-02 m³/s
Stream number: 46
 Solid flowrate: 0.00 tonne/hr

Water flowrate: 3.17 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.88 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.8811E-03 m³/s
Stream number: 47
 Solid flowrate: 8.38 tonne/hr
 Water flowrate: 2.09 tonne/h
 Slurry flowrate: 2.91 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.1100E-02 m³/s
 Percent solids by mass: 80.00 %
 Percent solids by volume: 47.14 %
 Yield of solids: 9.86 %
 Recovery of mineral Chal: 69.37 %
 Grade of mineral Chal: 48.38 %
 Recovery of mineral Spha: 30.84 %
 Grade of mineral Spha: 12.08 %
 Recovery of mineral Pyri: 7.27 %
 Grade of mineral Pyri: 39.53 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 69.37 %
 Grade of Cu: 16.75 %
 Recovery of Zn: 30.84 %
 Grade of Zn: 8.10 %
 Recovery of Fe: 12.08 %
 Grade of Fe: 33.12 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
Stream number: 48
 Solid flowrate: 1.97 tonne/hr
 Water flowrate: 0.49 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.69 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.2660E-03 m³/s
 Percent solids by mass: 80.00 %
 Percent solids by volume: 48.45 %
 Yield of solids: 2.32 %
 Recovery of mineral Chal: 2.00 %
 Grade of mineral Chal: 5.91 %

Recovery of mineral Spha: 40.69 %
 Grade of mineral Spha: 67.62 %
 Recovery of mineral Pyri: 1.15 %
 Grade of mineral Pyri: 26.46 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 2.00 %
 Grade of Cu: 2.05 %
 Recovery of Zn: 40.61 %
 Grade of Zn: 45.38 %
 Recovery of Fe: 1.21 %
 Grade of Fe: 14.11 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
Stream number: 49
 Solid flowrate: 0.00 tonne/hr
 Water flowrate: 1.56 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.43 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.4332E-03 m³/s
Stream number: 50
 Solid flowrate: 0.00 tonne/hr
 Water flowrate: 0.37 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.10 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.1021E-03 m³/s
Stream number: 51
 Solid flowrate: 8.38 tonne/hr
 Water flowrate: 0.53 tonne/h
 Slurry flowrate: 2.48 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.6672E-03 m³/s
 Percent solids by mass: 94.00 %
 Percent solids by volume: 77.74 %
 Yield of solids: 9.86 %
 Recovery of mineral Chal: 69.37 %
 Grade of mineral Chal: 48.38 %
 Recovery of mineral Spha: 30.84 %
 Grade of mineral Spha: 12.08 %
 Recovery of mineral Pyri: 7.27 %

Grade of mineral Pyri: 39.53 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 69.37 %
 Grade of Cu: 16.75 %
 Recovery of Zn: 30.84 %
 Grade of Zn: 8.10 %
 Recovery of Fe: 12.08 %
 Grade of Fe: 33.12 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %
Stream number: 52
 Solid flowrate: 1.97 tonne/hr
 Water flowrate: 0.13 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.58 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.1639E-03 m³/s
 Percent solids by mass: 94.00 %
 Percent solids by volume: 78.64 %
 Yield of solids: 2.32 %
 Recovery of mineral Chal: 2.00 %
 Grade of mineral Chal: 5.91 %
 Recovery of mineral Spha: 40.61 %
 Grade of mineral Spha: 67.62 %
 Recovery of mineral Pyri: 1.15 %
 Grade of mineral Pyri: 26.46 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 2.00 %
 Grade of Cu: 2.05 %
 Recovery of Zn: 40.69 %
 Grade of Zn: 45.38 %
 Recovery of Fe: 1.21 %
 Grade of Fe: 14.11 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %

Δ.2. Αρχεία Τελικών Προϊόντων από τη Βελτιστοποιημένη Προσομοίωση

Stream number: 19
 Solid flowrate: 75.38 tonne/hr
 Water flowrate: 252.29 tonne/h
 Slurry flowrate: 91.02 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.7538E-01 m³/s
 Percent solids by mass: 23.01 %
 Percent solids by volume: 7.03 %
 Yield of solids: 88.69 %
 Recovery of mineral Chal: 28.78 %
 Grade of mineral Chal: 2.23 %
 Recovery of mineral Spha: 28.51 %
 Grade of mineral Spha: 1.24 %
 Recovery of mineral Pyri: 93.16 %
 Grade of mineral Pyri: 56.28 %
 Recovery of mineral Gang: 100.00 %
 Grade of mineral Gang: 40.24 %
 Recovery of Cu: 28.78 %
 Grade of Cu: 0.77 %
 Recovery of Zn: 28.51 %
 Grade of Zn: 0.83 %
 Recovery of Fe: 88.18 %
 Grade of Fe: 26.88 %
 Recovery of SiO₂: 100.00 %
 Grade of SiO₂: 5.23 %

Stream number: 54
 Solid flowrate: 7.61 tonne/hr
 Water flowrate: 0.49 tonne/h
 Slurry flowrate: 2.25 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.6109E-03 m³/s
 Percent solids by mass: 94.00 %
 Percent solids by volume: 77.92 %
 Yield of solids: 8.94 %
 Recovery of mineral Chal: 69.31 %
 Grade of mineral Chal: 53.23 %
 Recovery of mineral Spha: 29.09 %
 Grade of mineral Spha: 12.54 %
 Recovery of mineral Pyri: 5.67 %
 Grade of mineral Pyri: 33.94 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 69.33 %
 Grade of Cu: 18.43 %
 Recovery of Zn: 29.09 %
 Grade of Zn: 8.42 %
 Recovery of Fe: 10.59 %
 Grade of Fe: 32.00 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %

Stream number: 55
 Solid flowrate: 2.02 tonne/hr
 Water flowrate: 0.13 tonne/h
 Slurry flowrate: 0.60 kg/s
 Slurry volumetric flowrate: 0.1680E-03 m³/s
 Percent solids by mass: 94.00 %
 Percent solids by volume: 78.66 %
 Yield of solids: 2.38 %
 Recovery of mineral Chal: 1.83 %
 Grade of mineral Chal: 5.30 %
 Recovery of mineral Spha: 42.32 %
 Grade of mineral Spha: 68.70 %
 Recovery of mineral Pyri: 1.15 %
 Grade of mineral Pyri: 26.01 %
 Recovery of mineral Gang: 0.00 %
 Grade of mineral Gang: 0.00 g/t
 Recovery of Cu: 1.83 %
 Grade of Cu: 1.84 %
 Recovery of Zn: 42.30 %
 Grade of Zn: 46.10 %
 Recovery of Fe: 1.21 %
 Grade of Fe: 13.72 %
 Recovery of SiO₂: 0.00 %
 Grade of SiO₂: 0.00 %

Παράρτημα Ε-Ένθετοι Υπολογισμοί των Αναλύσεων Λειτουργικής Απόδοσης

Για τα επιλεγμένα μεγέθη ενδιαφέροντος των κυκλωμάτων λειοτρίβησης-ταξινόμησης (βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.2.3. *Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης Ι* και 4.4.4.3. *Ανάλυση Λειτουργικής Απόδοσης στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης ΙΙ*) και με βάση τις κοκκομετρικές αναλύσεις, που υπολογίζει το λογισμικό (βλ. Παράρτημα Δ-Δ.Ι.) στις εισόδους και στις εξόδους των σφαιρόμυλων, καθώς και στις υπερχειλίσσεις των υδροκυκλώνων αυτών των κυκλωμάτων, επιλέγονται μεγέθη για τον υπολογισμό των παραμέτρων της κατανομής GGS (βλ. υποσημείωση υπ' αριθμό 15). Σκοπός είναι να εκτιμηθεί το διερχόμενο ποσοστό, σε αυτά τα σημεία του κυκλώματος, από τα επιλεγμένα μεγέθη ενδιαφέροντος.

Ε.1. Υπολογισμοί για -90 μm στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης Ι

Τα μεγέθη που επιλέγονται σε αυτό το κύκλωμα, για την εκτίμηση του διερχομένου ποσοστού από το μέγεθος των 90 μm, είναι τα 123 μm και 87 μm.

Στην είσοδο του πρωτογενή σφαιρόμυλου (*Περίληψη 9*, βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.2. *Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης Ι*) η κοκκομετρική ανάλυση (*Simulated Size Distribution @ Stream Number 9*, βλ. Παράρτημα Δ-Δ.Ι.) έχει $P_{123\mu m} = 35.287\%$ και $P_{87\mu m} = 24.441\%$. Επομένως, από την κατανομή GGS και για τα δύο μεγέθη, ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} P_{123\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.000123}{k} \right)^m = 35.287 \\ P_{87\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.000087}{k} \right)^m = 24.441 \end{aligned} \right\} \frac{35.287}{24.441} = \left(\frac{0.000123}{0.000087} \right)^m \rightarrow 1.4438 = 1.4138^m \rightarrow m = \frac{\ln 1.4438}{\ln 1.4138} \rightarrow m = \frac{0.3673}{0.3463} = 1.05.$$

Ο συντελεστής μεγέθους k , από το μέγεθος των 123 μm, είναι:

$$P_{123\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m \rightarrow 35.287 = 100 * \left(\frac{0.000123}{k} \right)^{1.05} \rightarrow 35.287 = \frac{0.0077}{k^{1.05}} \rightarrow k^{1.05} = 0.00022 \rightarrow k = 0.00022^{0.94} = 0.00033 \text{ m.}$$

Οπότε, για το μέγεθος των 90 μm, προκύπτει:

$$P_{90\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m = 100 * \left(\frac{0.00009}{0.00033} \right)^{1.05} = 100 * 0.2726^{1.05} = 25.53 \text{ \%}.$$

Στην έξοδο του πρωτογενή σφαιρόμυλου (*Περίληψη 10*, βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.2. *Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης Ι*) η κοκκομετρική ανάλυση (*Simulated Size Distribution @ Stream Number 10*, βλ. Παράρτημα Δ-Δ.Ι.) έχει $P_{123\mu m} = 81.987\%$ και $P_{87\mu m} = 70.023\%$. Επομένως, από την κατανομή GGS και για τα δύο μεγέθη, ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} P_{123\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.000123}{k} \right)^m = 81.987 \\ P_{87\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.000087}{k} \right)^m = 70.023 \end{aligned} \right\} \frac{81.987}{70.023} = \left(\frac{0.000123}{0.000087} \right)^m \rightarrow 1.1709 = 1.4138^m \rightarrow m = \frac{\ln 1.1709}{\ln 1.4138} \rightarrow m = \frac{0.1578}{0.3463} = 0.46.$$

Ο συντελεστής μεγέθους k , από το μέγεθος των 123 μm, είναι:

$$P_{123\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m \rightarrow 81.987 = 100 * \left(\frac{0.000123}{k} \right)^{0.46} \rightarrow 81.987 = \frac{1.5899}{k^{0.46}} \rightarrow k^{0.46} = 0.01938 \rightarrow k = 0.01938^{2.16} = 0.00019 \text{ m.}$$

Οπότε, για το μέγεθος των 90 μm, προκύπτει:

$$P_{90\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m = 100 * \left(\frac{0.00009}{0.00019} \right)^{0.46} = 100 * 0.4737^{0.46} = 70.90 \text{ \%}.$$

Στην υπερχειλίση του πρώτου υδροκυκλώνα (*Περίληψη 13*, βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.2. *Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης Ι*) η κοκκομετρική ανάλυση (*Simulated Size Distribution @ Stream Number 13*, βλ. Παράρτημα Δ-Δ.Ι.) έχει $P_{123\mu m} = 99.927\%$ και $P_{87\mu m} = 96.646\%$. Επομένως, από την κατανομή GGS και για τα δύο μεγέθη, ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} P_{123\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.000123}{k} \right)^m = 99.927 \\ P_{87\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.000087}{k} \right)^m = 96.646 \end{aligned} \right\} \frac{99.927}{96.646} = \left(\frac{0.000123}{0.000087} \right)^m \rightarrow 1.0338 = 1.4138^m \rightarrow m = \frac{\ln 1.0338}{\ln 1.4138} \rightarrow m = \frac{0.0331}{0.3463} = 0.096.$$

Ο συντελεστής μεγέθους k , από το μέγεθος των 123 μm , είναι:

$$P_{123\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m \rightarrow 99.927 = 100 * \left(\frac{0.000123}{k} \right)^{0.096} \rightarrow 99.927 = \frac{42.134}{k^{0.096}} \rightarrow k^{0.096} = 0.4215 \rightarrow k = 0.4215^{10.42} = 0.000122 \text{ m.}$$

Οπότε, για το μέγεθος των 90 μm , προκύπτει:

$$P_{90\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m = 100 * \left(\frac{0.00009}{0.000122} \right)^{0.096} = 100 * 0.7376^{0.096} = 97.11 \text{ \%}.$$

Ε.2. Υπολογισμοί για -25 μm στο Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II

Τα μεγέθη που επιλέγονται σε αυτό το κύκλωμα, για την εκτίμηση του διερχομένου ποσοστού από το μέγεθος των 25 μm , είναι τα 30.8 μm και 21.8 μm .

Στην είσοδο του δευτερογενή σφαιρόμυλου (*Περίμα 25*, βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.4. *Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II*) η κοκκομετρική ανάλυση (*Simulated Size Distribution @ Stream Number 25*, βλ. *Παράρτημα Δ-Δ.1.*) έχει $P_{30.8\mu m} = 35.931\%$ και $P_{21.8\mu m} = 7.608\%$. Επομένως, από την κατανομή GGS και για τα δύο μεγέθη, ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} P_{30.8\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.0000308}{k} \right)^m = 35.931 \\ P_{21.8\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.0000218}{k} \right)^m = 7.608 \end{aligned} \right\} \frac{35.931}{7.608} = \left(\frac{0.0000308}{0.0000218} \right)^m \rightarrow 4.7228 = 1.4127^m \rightarrow m = \frac{\ln 4.7228}{\ln 1.4127} \rightarrow m = \frac{1.5523}{0.3454} = 4.48.$$

Ο συντελεστής μεγέθους k , από το μέγεθος των 30.8 μm , είναι:

$$P_{30.8\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m \rightarrow 35.931 = 100 * \left(\frac{0.0000308}{k} \right)^{4.48} \rightarrow 35.931 = \frac{6.15 * 10^{-19}}{k^{4.48}} \rightarrow k^{4.48} = 1.7 * 10^{-20} \rightarrow k = (1.7 * 10^{-20})^{0.223} = 0.000038 \text{ m.}$$

Οπότε, για το μέγεθος των 25 μm , προκύπτει:

$$P_{25\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m = 100 * \left(\frac{0.000025}{0.000038} \right)^{4.48} = 100 * 0.6579^{4.48} = 15.31 \text{ \%}.$$

Στην έξοδο του δευτερογενή σφαιρόμυλου (*Περίμα 26*, βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.4. *Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II*) η κοκκομετρική ανάλυση (*Simulated Size Distribution @ Stream Number 26*, βλ. *Παράρτημα Δ-Δ.1.*) έχει $P_{30.8\mu m} = 58.492\%$ και $P_{21.8\mu m} = 23.074\%$. Επομένως, από την κατανομή GGS και για τα δύο μεγέθη, ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} P_{30.8\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.0000308}{k} \right)^m = 58.492 \\ P_{21.8\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.0000218}{k} \right)^m = 23.074 \end{aligned} \right\} \frac{58.492}{23.074} = \left(\frac{0.0000308}{0.0000218} \right)^m \rightarrow 2.5349 = 1.4127^m \rightarrow m = \frac{\ln 2.5349}{\ln 1.4127} \rightarrow m = \frac{0.9302}{0.3454} = 2.68.$$

Ο συντελεστής μεγέθους k , από το μέγεθος των 30.8 μm , είναι:

$$P_{30.8\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m \rightarrow 58.492 = 100 * \left(\frac{0.0000308}{k} \right)^{2.68} \rightarrow 58.492 = \frac{8.12 * 10^{-11}}{k^{2.68}} \rightarrow k^{2.68} = 1.38 * 10^{-12} \rightarrow k = (1.38 * 10^{-12})^{0.372} = 0.00039 \text{ m.}$$

Οπότε, για το μέγεθος των 25 μm , προκύπτει:

$$P_{25\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k} \right)^m = 100 * \left(\frac{0.000025}{0.000039} \right)^{2.68} = 100 * 0.641^{2.68} = 30.37 \text{ \%}.$$

Στην υπερχειλίση του δεύτερου υδροκυκλώνα (*Περίμα 27*, βλ. υπό-κεφάλαιο 4.4.4. *Κύκλωμα Λειοτρίβησης-Ταξινόμησης II*) η κοκκομετρική ανάλυση (*Simulated Size Distribution @ Stream Number 27*, βλ. *Παράρτημα Δ-Δ.1.*) έχει $P_{30.8\mu m} = 98.393\%$ και $P_{21.8\mu m} = 64.976\%$. Επομένως, από την κατανομή GGS και για τα δύο μεγέθη, ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} P_{30.8\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.0000308}{k} \right)^m = 98.393 \\ P_{21.8\mu m} &= 100 * \left(\frac{0.0000218}{k} \right)^m = 64.976 \end{aligned} \right\} \frac{98.393}{64.976} = \left(\frac{0.0000308}{0.0000218} \right)^m \rightarrow 1.5143 = 1.4127^m \rightarrow m = \frac{\ln 1.5143}{\ln 1.4127} \rightarrow m = \frac{0.4149}{0.3454} = 1.2.$$

Ο συντελεστής μεγέθους k , από το μέγεθος των 30.8 μm , είναι:

$$P_{30.8\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k}\right)^m \rightarrow 98.393 = 100 * \left(\frac{0.0000308}{k}\right)^{1.2} \rightarrow 98.393 = \frac{0.0000386}{k^{1.2}} \rightarrow k^{1.2} = 0.0000038 \rightarrow k = 0.0000038^{0.82} = 0.000031 \text{ m.}$$

Οπότε, για το μέγεθος των 25 μm , προκύπτει:

$$P_{25\mu m} = 100 * \left(\frac{x}{k}\right)^m = 100 * \left(\frac{0.000025}{0.000031}\right)^{1.2} = 100 * 0.8065^{1.2} = 77.24 \text{ \%}.$$

Παράρτημα ΣΤ-Συμπληρωματικές Σημειώσεις και Σχόλια

ΣΤ.1. Μετατροπή Nm^3/h σε Am^3/h

Για πραγματικά αέρια, η καταστατική εξίσωση, είναι:

$$P * V = z * (m/MW) * R * T \text{ όπου,}$$

P : η απόλυτη πίεση (δηλαδή, η πίεση της οποίας η μέτρηση αρχίζει από το τέλειο/απόλυτο κενό), σε Pa,

V : ο όγκος του αερίου, σε m^3

z : ο παράγοντας συμπιεστότητας, που είναι το μέτρο της απόκλισης από την ιδανική συμπεριφορά ενός αερίου, ο οποίος είναι αδιάστατος θετικός ρητός αριθμός. Όταν $z = 1$, πρόκειται για ιδανικό αέριο, ενώ όταν $z \neq 1$, πρόκειται για πραγματικό αέριο,

m : η μάζα, σε kg,

MW : το μοριακό βάρος του αερίου, σε kg-mol,

R : η παγκόσμια σταθερά των αερίων και είναι ίση με $8.3145 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} / \text{mol} \cdot \text{K}$, και

T : η απόλυτη θερμοκρασία, σε K.

Κανονική (Normal) συνθήκη (1): $P_{Nor.} * V_{Nor.} = z_{Nor.} * (m_{Nor.} / MW_{Nor.}) * R * T_{Nor.}$

Πραγματική (Actual) συνθήκη (2): $P_{Act.} * V_{Act.} = z_{Act.} * (m_{Act.} / MW_{Act.}) * R * T_{Act.}$

Διαιρώντας κατά μέλη τις (2) και (1), για σταθερή σύσταση και μάζα αερίου, δηλαδή $MW_{Nor.} = MW_{Act.}$ και $m_{Nor.} = m_{Act.}$ κι επιλύοντας ως προς $V_{Act.}$ (Wong, 2008):

$$V_{Act.} = (z_{Act.} / z_{Nor.}) * (T_{Act.} / T_{Nor.}) * (P_{Nor.} / P_{Act.}) * V_{Nor.}$$

Χρησιμοποιώντας, τον ογκομετρικό ρυθμό Q , ως $V_{Nor.} = Q_{Nor.}$ και $V_{Act.} = Q_{Act.}$, ισχύει:

$$Q_{Act.} = (z_{Act.} / z_{Nor.}) * (T_{Act.} / T_{Nor.}) * (P_{Nor.} / P_{Act.}) * Q_{Nor.}$$

Εφόσον, στην κανονική συνθήκη (1), $z_{Nor.} \approx 1$, $P_{Nor.} = 1 \text{ atm}$, και $T_{Nor.} = 273.15 \text{ K}$ η σχέση που συνδέει το Nm^3/h με το Am^3/h (ή απλά m^3/h), είναι:

$$Q_{Act.} = z_{Act.} * Q_{Nor.} * T_{Act.} / (273.15 * P_{Act.})$$

με $T_{Act.}$ σε K και $P_{Act.}$ σε atm.

ΣΤ.2. Ανακυκλώσεις Νερού στα Διαγράμματα Ροής που Σχεδιάστηκαν

Επιλέχθηκε να μην γίνει ανακύκλωση του νερού οπουδήποτε, για τους εξής λόγους: α) ελαχιστοποίηση των ροών που ανακυκλώνονται, καθώς το λογισμικό την πρώτη φορά που τρέχει οποιαδήποτε προσομοίωση, τις ανακυκλώσεις τις θεωρεί ροές τροφοδοσίας. Αυτό σημαίνει, πως βάζει τυχαίες αυθαίρετες τιμές, έως ότου να βρει λύσεις που να ικανοποιούν το κριτήριο σύγκλισης και τα ισοζύγια. Με αυτόν τον τρόπο όσες περισσότερες είναι οι ανακυκλώσεις, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα του διαγράμματος ροής, η προσομοίωση μπορεί να καθυστερήσει σημαντικά και στη χειρότερη περίπτωση να μην εξάγει αποτελέσματα, β) επειδή ο σχεδιασμός όλου του εργοστασίου, έγινε κομμάτι-κομμάτι, ήταν αναγκαία η τοποθέτηση αυθαίρετων ροών για τη συνέχιση σε κάθε επόμενο στάδιο, μέχρι να φτάσει στην τελική του μορφή και γ) θεωρήθηκε πως η εμφανής διάκριση, μεταξύ του φρέσκου νερού (Fresh Water) και του νερού της διεργασίας (Process Water), στο διάγραμμα ροής, παρουσιάζει καλύτερα στον αναγνώστη τη σειρά των σταδίων και του αποδίδει οπτικά όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, που αφορούν τις ροές μάζας.