



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων διαχωρισμού σε
εργοστάσιο εμπλουτισμού μαγνησίτη**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ξανθάκος Πέτρος

Επιβλέπων: **Γεώργιος Αναστασάκης**
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων διαχωρισμού σε
εργοστάσιο εμπλουτισμού μαγνησίτη**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ξανθάκος Πέτρος

Επιβλέπων: **Γεώργιος Αναστασάκης**
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις / / 2024

Γ. Αναστασάκης, *Καθηγητής Ε.Μ.Π.*

Κ. Μόδης, *Καθηγητής Ε.Μ.Π.*

Σ. Τριανταφυλλίδης, *Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.*

Αθήνα, Μάρτιος 2024

Πρόλογος

Για την παρούσα Δ.Ε. είμαι βαθιά ευγνώμων και θα ήθελα να απευθύνω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες σε μια σειρά ανθρώπων/παρεών, άλλους για την επαφή τους μαζί μου χάρη στην οποία είμαι αυτός που είμαι σήμερα και άλλους για την επαφή που αποκτήσαμε προκειμένου η παρούσα Δ.Ε. να εκπονηθεί και να ολοκληρωθεί.

Ξεκινώντας από την πιο μεγάλη μου παρέα, αυτή των Προσκόπων, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπημένη μου οικογένεια του 1^{ου} Συστήματος Αεροπροσκόπων Παγκρατίου μαζί με την οποία πήρα εμπειρίες και βιώματα τέτοια ώστε να νοιώθω βέβαιος πως μπορώ να καταφέρω όποιον στόχο θέσω. Αλλά και την άλλη μου -μικρότερη- οικογένεια του 26^{ου} Συστήματος Προσκόπων Αμπελοκήπων καθώς και την παρέα του Ιστορικού Αρχείου του Σ.Ε.Π.. Πολλά ευχαριστώ λοιπόν, στους αρχηγούς μου: Δημήτρη «Μπαγκίρα», Ντορίνα «Γλαύκα», Αριστέα «Κίσσα», Βάσια «Αχινό», Κωνσταντίνο «Χάθυ», και τον Χρήστο Σταθόπουλο «Ικκυ» από το Ιστορικό Αρχείο.

Τα χρόνια φοίτησής μου στην ΣΜΜΜ είχα την χαρά να κάνω εξαιρετικά καλούς φίλους συναδέλφους, στα αμφιθέατρα, στα κυλικεία, στη βιβλιοθήκη και στις γενικές συνελεύσεις της Σχολής. Σε αυτούς αλλά και στους εξαιρετους καθηγητές και στο υπόλοιπο προσωπικό της Σχολής οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ, για την κάθε κουβέντα να ανταλλάξαμε και με τον τρόπο της με επηρέασε, να μου έδωσε κουράγιο αλλά και να με πάθιασε με το αντικείμενο των σπουδών μου. Δίχως τις χρήσιμες δεξιότητες που αποκόμισα από τον κ.Ξενίδη από το μάθημα "Τεχνολογία Επεξεργασίας Αερίων Αποβλήτων" σχετικά με την καλή χρήση του Excel αυτή η εργασία θα είχε εκπονηθεί με πολλαπλάσιο κόπο και αυτό είναι αρκετό για ένα ακόμη μεγάλο ευχαριστώ.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στον καθηγητή της Σχολής κ. Γεώργιο Αναστασάκη για τη σημαντική συνεισφορά του, τόσο στο να κατανοήσω και να εμβαθύνω στις έννοιες και στις μεθόδους που σχετίζονται με τον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων αλλά και στην υποστήριξή του ώστε μέσα από την Δ.Ε. να αποκτήσω τις εμπειρίες και τις γνωριμίες που αποκόμισα κατά την διάρκεια των τριών μηνών, του καλοκαιριού του 2021 που εργάστηκα στο εργοστάσιο εμπλουτισμού της εταιρίας *Ελληνικοί Λευκόλιθοι*.

Τέλος, χωρίς τους εξαιρετους συναδέλφους μηχανικούς της εταιρίας *Ελληνικοί Λευκόλιθοι*, που αφιέρωσαν τον πολύτιμο χρόνο τους και με εμπιστεύτηκαν σε συγκινητικό βαθμό, σήμερα δεν θα είχα την σιγουριά πως ολοκληρώνοντας τις προπτυχιακές σπουδές μου θα έχω την αυτοπεποίθηση που έχω για ό,τι θα ακολουθήσει στον επαγγελματικό μου βίο. Στα στελέχη της εταιρείας κ.κ. Δ. Τσακωνίτη (Γενικό Δ/ντη Μεταλλείων και Εργοστασίων), Π. Παπαγεωργίου (Δ/ντη Παραγωγής), Ν. Σιαφάκα, Αθ. Βαλατσό και Ε. Ζαφειριάδου (Μηχανι-

κούς) εκφράζω ένα μεγάλο ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου για όσα έζησα. Κυρίως σε αυτούς αλλά και στους υπόλοιπους ανθρώπους της Γερακινής που με βοήθησαν αυτούς τους 3 μήνες σας αφιερώνω την παρούσα Δ.Ε.

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι να παρουσιαστεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων από την βιομηχανία του εμπλουτισμού μεταλλευμάτων και την επεξεργασία τους με στόχο την αναζήτηση τυχόν συσχέτισης μεταξύ δεικτών που αφορούν την καλή λειτουργία και την αποδοτικότητα μονάδων διαχωρισμού μεταλλευμάτων μαγνησίτη. Οι δείκτες αυτοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: α) σε δείκτες που διαμορφώθηκαν από την εξέταση δειγμάτων με χειροδιαλογή από βιομηχανικού τύπου μηχανήματα διαχωρισμού μεταλλευμάτων και αφορούν στην απόδοση τους, β) σε δείκτες που σχετίζονται με την κατανομή του μεγέθους των τεμαχίων του υλικού προς διαχωρισμό και γ) σε δείκτες που αφορούν την απόδοση του διαχωρισμού και προέρχονται από αναλύσεις των δειγμάτων με την μέθοδο της ανάλυσης με Φθορισμό Ακτίνων-Χ.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη μέθοδο διερεύνησης των διαδικασιών διαχωρισμού κρυπτοκρυσταλλικού μαγνησίτη σε βιομηχανική κλίμακα, η οποία περιλαμβάνει την δειγματοληψία από διάφορα μηχανήματα, την κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων, τη χειροδιαλογή αυτών και τη μετέπειτα ανάλυσή τους με Φθορισμετρία Ακτίνων Χ (XRF) και τέλος τη μελέτη και ανάλυση των δεδομένων αυτών με αποτέλεσμα την δημιουργία συμπερασμάτων σχετικά με πιθανούς τρόπους βελτιστοποίησης της διαδικασίας διαχωρισμού σε βιομηχανική κλίμακα. Στόχος αυτής της έρευνας ήταν να ενισχυθεί η κατανόηση της διαδικασίας μελέτης δεδομένων διαχωρισμού που προέρχονται από πραγματικά δεδομένα της βιομηχανίας και να συμβάλει στην βελτίωση της υφιστάμενης τεχνογνωσίας στον τομέα αυτό, με πιθανά αποτελέσματα τον πιο αποτελεσματικό διαχωρισμό του μαγνησίτη και την πιο οικονομικά βιώσιμη παραγωγή προϊόντων.

Ξεκινώντας με μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η Δ.Ε. περιλαμβάνει τη διερεύνηση των φυσικών ιδιοτήτων και των χρήσεων του μαγνησίτη αλλά και την ανασκόπηση των διαφόρων μηχανημάτων διαχωρισμού συμπεριλαμβανομένων των μαγνητικών και οπτικών διαχωριστών αλλά και του διαχωρισμού με βαρέα διάμεσα. Επιπλέον, η Δ.Ε. διερευνά μεθόδους μέτρησης και παρακολούθησης της αποτελεσματικότητας των συστημάτων διαχωρισμού.

Η μελέτη αναπτύσσει μια εμπειρική ερευνητική μέθοδο για την καλύτερη ερμηνεία των πρωτογενών δεδομένων για την δημιουργία δεικτών που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται με σκοπό την εύρεση συσχετίσεων μεταξύ διαφόρων ιδιοτήτων των δειγμάτων με τη χρήση εργαλείων στατιστικής ανάλυσης, μέσω των οποίων παρέχονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα και την απόδοση των διαδικασιών διαχωρισμού αλλά και την ερμηνεία αυτών μέσω των ιδιοτήτων του κάθε δείγματος.

Αναλυτικότερα, στο 1ο Μέρος της παρούσας Δ.Ε. περιγράφεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που χρειάζεται ο αναγνώστης για να κατανοήσει πλήρως τα αντικείμενά του. Στο 2ο Μέρος εξηγούνται αναλυτικά όλες οι διαδικασίες που χρειάστηκαν για την δημιουργία των δεδομένων από την δειγματοληψία στις εγκαταστάσεις του εργοστασίου. Στο 3ο Μέρος γίνεται σαφής επεξήγηση της στατιστικής ανάλυσης και όλων των υπολογισμών που έγιναν σε υπολογιστικά φύλλα με την χρήση του λογισμικού Microsoft Excel ενώ στο 4ο Μέρος παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της έρευνας, παρέχοντας λεπτομερή ερμηνεία των ευρημάτων, που οδηγούν με τη σειρά τους σε συγκεκριμένα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα αυτό.

Abstract

The present Diploma Thesis (D.T) presents a comprehensive method for the investigation of cryptocrystalline magnesite separation processes on industrial scale, which includes sampling from various separators, particle size analysis of the samples, hand-sorting and subsequent analysis with X-ray fluorescence (XRF), study and analysis of these data, and resulting conclusions on possible ways to optimize the separation processes on an industrial scale. The aim of this research is to enhance the understanding of data processing using industrial data from magnesite processing plant and to contribute to the improvement of the existing knowledge in this field, resulting, so, to magnesite separation more efficiently.

Starting with extensive literature review, the D.T. includes the exploration of the physical properties and uses of magnetite and the review of the various separation machines, among which magnetic and optical separators and separation with heavy media. In addition, the D.T. investigates methods for measuring and monitoring the efficiency of separation systems.

The D.T. develops an empirical research method to better interpret the primary by creating indices that are subsequently used to correlate different properties using statistical analysis tools; the study of these tools provides valuable information on the effectiveness and efficiency of separation procedures and their interpretation through the properties of each sample.

In more detail, Part 1 of this D.T. describes the theoretical background that the reader needs to fully understand the issues. Part 2 explains in detail all the procedures needed to generate the data from on-site sampling. Part 3 provides a clear explanation of the statistical analysis and all the calculations made on spreadsheets using Microsoft Excel software, while Part 4 presents and analyses the results of the research, providing a detailed interpretation of the findings; based on the previous elaboration, case-specific conclusions derive as well as suggestions for future research in this area.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Σκοπός	iii
Περίληψη	iv
Abstract	v
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Σχημάτων	viii
Κατάλογος Πινάκων	ix
Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Διαγραμμάτων	xi
A' Θεωρητικό Μέρος	1
1 Βιβλιογραφική επισκόπηση	2
1.1 Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών	2
1.1.1 Εισαγωγή	2
1.1.2 Συναρτήσεις κατανομής μεγέθους τεμαχίων	4
1.1.3 Μαθηματική έκφραση αποτελεσμάτων εμπλουτισμού	9
1.2 Ο Μαγνησίτης	12
1.3 Φθορισμετρία Ακτίνων X, X-ray fluorescence (XRF)	13
1.4 Ανάλυση συσχέτισης	14
2 Μεθοδολογία	16
2.1 Επισκόπηση της μεθοδολογίας	16
B' Πειραματικό μέρος	19
3 Αντικείμενο πειράματος	20
3.1 Εισαγωγή	20
3.2 Περιγραφή του διαγράμματος ροής του εργοστασίου	21

4	Διαδικασία συλλογής δεδομένων	23
4.1	Συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων	23
4.2	Ταξινόμηση	23
4.3	Χειροδιαλογή	25
4.4	Ανάλυση XRF	25
Γ΄	Επεξεργασία και ανάλυση	28
5	Οργάνωση δεδομένων σε υπολογιστικά φύλλα	29
5.1	Εργαλεία και τεχνικές	29
5.2	Επικύρωση και καθαρισμός δεδομένων	31
6	Επεξεργασία δεδομένων	33
6.1	Υπολογισμοί συντελεστών κοκκομετρίας δειγμάτων	33
6.2	Υπολογισμοί δεικτών από τα αποτελέσματα της χειροδιαλογής	35
6.3	Υπολογισμοί δεικτών από τα αποτελέσματα των αναλύσεων XRF	38
6.4	Υπολογισμός συσχέτισης τιμών	38
Δ΄	Αποτελέσματα και συμπεράσματα	42
7	Ερμηνεία αποτελεσμάτων	43
7.1	Ερμηνεία αποτελεσμάτων ανάλυσης συσχέτισης	43
	7.1.1 Αποτελέσματα ανάλυσης συσχέτισης	43
	7.1.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	53
8	Συμπεράσματα	57
8.1	Συμπεράσματα	57
Ε΄	Βιβλιογραφία	59

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Γραφική απεικόνιση πιθανών αποτελεσμάτων κατάτμησης μεταλλεύματος .	3
1.2	Απλό κύκλωμα διαχωρισμού με δυο προϊόντα (επάνω) και κύκλωμα διαχωρισμού με ενδιάμεσα και ανακύκλωση (κάτω)	4
1.3	Μοντέλο αναπαράστασης φθορισμού ακτίνων-Χ	14
1.4	Σχεδιαγράμματα και δείκτες συσχέτισης για διάφορα θεωρητικά δείγματα .	15
2.1	Διάγραμμα μεθοδολογίας	16

Κατάλογος πινάκων

4.1	Παράδειγμα αποτελεσμάτων χειροδιαλογής δείγματος τροφοδοσίας από τον κυκλώνα, τιμές σε γραμμάρια	26
4.2	Παράδειγμα αποτελεσμάτων ανάλυσης XRF υλικού, κανονικοποιημένο στο 100 %, όπως θα είναι μετά από έψηση.	27
6.1	Πίνακας κοκκομετρικών δεδομένων δείγματος μετά τον υπολογισμό των λογαρίθμων	33
6.2	Συγκεντρωτικός πίνακας δεικτών που αφορούν την κοκκομετρία δείγματος	36
6.3	Συγκεντρωτικός πίνακας δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής . . .	38
7.1	Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής (οριζόντια) με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία (κάθετα) για το σύνολο των δειγμάτων.	44
7.2	Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής (οριζόντια) με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία (κάθετα) για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.	45
7.3	Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής (οριζόντια) με τους δείκτες που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF (κάθετα) για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.	46
7.4	Πίνακας συσχέτισης των δεικτών που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF (οριζόντια) με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία (κάθετα) για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.	47
7.5	Πίνακας συσχέτισης των δεικτών που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.	48
7.6	Πίνακας συσχέτισης των δεικτών που αφορούν την κοκκομετρία, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.	49
7.7	Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.	50
7.8	Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής, μεταξύ τους, για το σύνολο των δειγμάτων.	51
7.9	Πίνακας συσχέτισης των δεικτών που αφορούν την κοκκομετρία, μεταξύ τους, για το σύνολο των δειγμάτων.	52

Κατάλογος εικόνων

3.1	Συγκρότημα προεμπλουτισμού	22
4.1	Εργαστηριακός δειγματολήπτης	23
4.2	Αποτέλεσμα ταξινόμησης δείγματος. Διακρίνονται από τα αριστερά προς τα δεξιά τα κλάσματα $+12,5mm$, $-12,5+10mm$, $-10+8mm$, $-8+6,3mm$, $-4mm$ και από πάνω προς τα κάτω η τροφοδοσία, το απόρριμμα και το προϊόν . .	24
4.3	Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενδιάμεσου, μη αποδεσμευμένου τεμαχίου μεγέθους $\approx 12mm$	25
5.1	Στιγμιότυπα από το περιβάλλον λειτουργίας Microsoft Excel	30

Κατάλογος διαγραμμάτων

5.1	Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης Τροφοδοσίας-Απορρίμματος-Προϊόντος από δείγμα του μαγνητικού διαχωριστή (Δείγμα 7.21-22-23)	31
6.1	Διάγραμμα ανοίγματος βροχίδας x - Αθροιστικού διερχόμενου P % σε ορθοκανονικούς άξονες και σε λογαριθμικό σύστημα αξόνων	34

Μέρος Α΄

Θεωρητικό Μέρος

1. Βιβλιογραφική επισκόπηση

1.1 Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών

1.1.1 Εισαγωγή

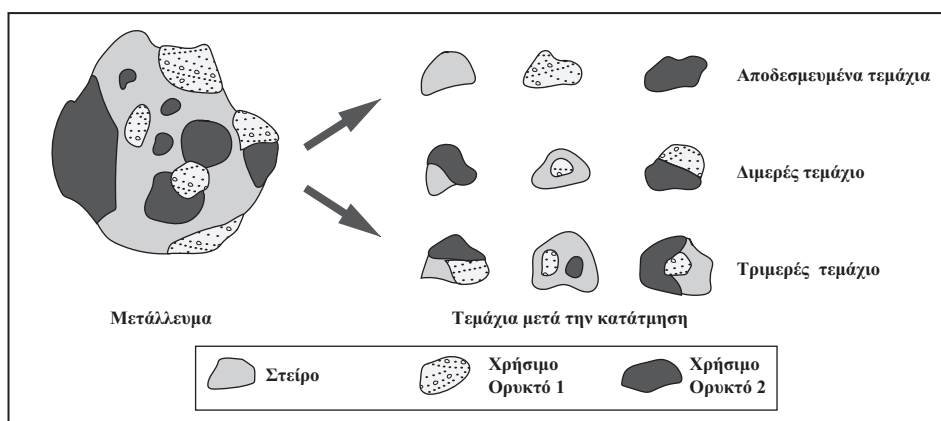
Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη του ανθρώπου για την απόκτηση πρώτων υλών δημιούργησε την ανάγκη να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες για την απόκτησή τους. Η ιστορία της μεταλλουργίας, δηλαδή της παραγωγής μετάλλων και κραμάτων από μεταλλεύματα ή άλλες πρώτες ύλες, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ιστορική εξέλιξη του ανθρώπου. Σύντομα όμως δημιουργήθηκε ένα ενδιάμεσο στάδιο ανάμεσα στην απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι τις διαδικασίες της μεταλλουργίας: αυτό της βελτίωσης των χαρακτηριστικών του μεταλλεύματος, καθώς τα μεταλλεύματα «όπως εξορύσσονται» σπάνια έχουν τη μορφή ή τον βαθμό καθαρότητας που απαιτείται για την παραγωγή των προϊόντων αυτών, ή για την παραγωγή τους με αποδοτικό τρόπο.

Το ίδιο ισχύει σχεδόν για κάθε κοίτασμα που εξορύσσεται ακόμα και εάν αυτό δεν προορίζεται απαραίτητα για την παραγωγή μετάλλων, όπως γίνεται με τα βιομηχανικά ορυκτά αλλά και τα ορυκτά καύσιμα. Το σύνολο αυτών των διαδικασιών, που είναι αναγκαίο να υποστεί ένα ακατέργαστο («όπως εξορύσσεται», *run-of-mine*) μέταλλευμα ή ένα βιομηχανικό ορυκτό ώστε να γίνει εμπορεύσιμο προϊόν, και άρα πρώτη ύλη για μια οποιαδήποτε επόμενη διαδικασία, είναι ένα ενδιάμεσο στάδιο επεξεργασίας του μεταλλεύματος καλείται *εμπλουτισμός*.

Για μια μεγάλη μερίδα μεταλλευμάτων, εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι για τον εμπλουτισμό τους είναι η αύξηση της περιεκτικότητάς τους η οποία επιτυγχάνεται με την απομάκρυνση των στείρων ορυκτών. Αντίστοιχες διαδικασίες εμπλουτισμού χρησιμοποιούνται και όταν θέλουμε να διαχωρίσουμε από ένα μέταλλευμα όχι μόνο το οποιοδήποτε μη-χρήσιμο ορυκτό αλλά και όταν θέλουμε να διαχωρίσουμε μεταξύ τους παραπάνω του ενός χρήσιμα ορυκτά (όπως σε περιπτώσεις μεικτών θειούχων, μεταλλεύματα γαληνίτη-σφαλερίτη κ.ά.). (Φραγκίσκος, 1995)

Για να επιτευχθεί η απομάκρυνση του στείρου υλικού (*gangue material*) προϋπόθεση είναι το υλικό να έχει αρχικά αποδεσμευτεί. Μια ακατέργαστη ορυκτή πρώτη ύλη, ανάλογα με τον τρόπο εξόρυξής της, αποτελείται από τεμάχια διαφόρων μεγεθών, τα οποία ενδέχεται να έχουν προσμίξεις με άλλα ορυκτά. Εάν ένα από τα τεμάχια αυτά που έχουν προσμίξεις κατατμηθεί, τότε ενδέχεται κάποια από τα τεμάχια που θα προκύψουν να είναι εντελώς καθαρά. Ένα τέτοιο τεμάχιο λέγεται αποδεσμευμένο. Η αποδέσμευση δεν είναι απαραίτητα αποτέλεσμα κατάτμησης του υλικού. Το υλικό μπορεί να αποδεσμευτεί από σύνδρομα ορυκτά ή

το μητρικό πέτρωμα με απλή αποκόλληση των μερών. Η κατάτμηση συνήθως είναι η πρώτη



Σχήμα 1.1: Γραφική απεικόνιση πιθανών αποτελεσμάτων κατάτμησης μεταλλεύματος

διαδικασία, στην οποία υποβάλλεται ένα *run-of-mine* υλικό (μπαζομετάλλευμα), όχι μόνο για την μετατροπή μικρών τεμαχίων του σε αποδεσμευμένα, αλλά και να το μορφοποιήσει στο τελικό του μέγεθος προς διάθεση (π.χ. αδρανή υλικά για τον κατασκευαστικό κλάδο).

Η επόμενη φάση είναι η συγκέντρωση του υλικού, δηλαδή η απομάκρυνση των μη επιθυμητών προσμίξεων/στείων τεμαχιδίων από το μίγμα με τα χρήσιμα. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για αυτό τον σκοπό ποικίλλουν και διαρκώς εξελίσσονται, από τα *πλυντήρια*¹ του αρχαίου Λαυρίου μέχρι τις σύγχρονες και περίπλοκες τεχνικές διαφορικής επίπλευσης και των οπτικών διαχωριστών XRT (Gleeson, 2023).

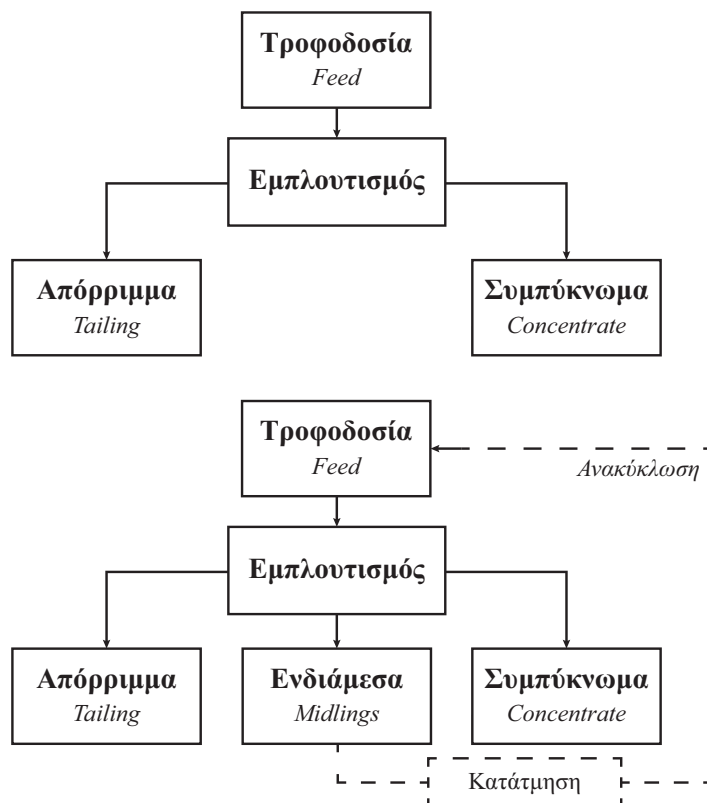
Επειδή όμως κάθε μέθοδος, από τις αρχαιότερες μέχρι τις πιο σύγχρονες, έχει φανεί πως λειτουργεί πιο αποδοτικά σε συγκεκριμένο κοκκομετρικό εύρος, μετά τη φάση της κατάτμησης και πριν την φάση της συγκέντρωσης είναι αναγκαίο το μετάλλευμα να ταξινομηθεί, δηλαδή να διαχωριστεί με βάση το μέγεθός του σε διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα είτε για να ετοιμαστεί για συγκέντρωση/διαχωρισμό ή για να καλύψει τις προδιαγραφές εμπορίας του τελικού προϊόντος (Das & Young, 2019).

Για την συγκέντρωση/εμπλουτισμό του εκάστοτε υλικού επιλέγεται μία φυσική ή χημική ιδιότητα κάποιου εκ των ορυκτών του υλικού που διαφέρει από τα υπόλοιπα. Η διαφορά στο χρώμα, στο ειδικό βάρος, στη μαγνητικότητα ή στις φυσικοχημικές ιδιότητες της επιφάνειάς τους είναι μόνο μερικές από τις ιδιότητες αυτές που μπορεί να επιτύχουν τον διαχωρισμό του χρήσιμου από το στείρο.

Ένα μηχάνημα το οποίο τροφοδοτείται με μετάλλευμα (Feed) και χρησιμοποιεί κάποια μέθοδο διαχωρισμού δημιουργεί τουλάχιστον δυο προϊόντα, το συμπύκνωμα (Concentrate) το οποίο παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο χρήσιμο συστατικό από ό,τι το αρχικό (τροφοδοσία) και το απόρριμμα (Tailing) το οποίο παρουσιάζει χαμηλότερη περιεκτικότητα

¹Πρόκειται για κατασκευές υδρομηχανικού εμπλουτισμού μεταλλευμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τα αρχαία χρόνια στην περιοχή της Λαυρεωτικής.

σε χρήσιμο συστατικό από την τροφοδοσία. Ενδέχεται το μηχάνημα αυτό να παράγει και άλλο προϊόν το οποίο να έχει κάποια ενδιάμεση περιεκτικότητα ή διαφοροποίηση από τα άλλα δύο προϊόντα. Σε αυτό συνήθως συναντώνται μη αποδεσμευμένα τεμαχίδια του υλικού. Στην βιομηχανία το κάθε προϊόν ενός μηχανήματος εμπλουτισμού ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί εκ νέου ως υλικό τροφοδοσίας, είτε στο ίδιο μηχάνημα εμπλουτισμού εάν πρόκειται για ενδιάμεσο προϊόν, είτε σε διαφορετικό μηχάνημα για την περαιτέρω απομάκρυνση των μη-χρήσιμων τεμαχίων του συμπυκνώματος ή για την ανάκτηση χρήσιμων τεμαχιδίων του απορρίμματος. (Σταμπολτζής, 1994).



Σχήμα 1.2: Απλό κύκλωμα διαχωρισμού με δυο προϊόντα (επάνω) και κύκλωμα διαχωρισμού με ενδιάμεσα και ανακύκλωση (κάτω)

1.1.2 Συναρτήσεις κατανομής μεγέθους τεμαχίων

Για να γίνει η μέτρηση του μεγέθους των τεμαχίων ενός υλικού και ο διαχωρισμός του στα μεγέθη αυτά (ταξινόμηση) γίνεται χρήση κοσκίνων με συγκεκριμένο άνοιγμα βροχίδας. Στη συνέχεια, το υλικό που παρέμεινε ανάμεσα σε δυο κόσκινα μπορεί να ζυγιστεί και με βάση αυτές τις μετρήσεις να δημιουργηθεί ένα προφίλ της κατανομής του μεγέθους των τεμαχίων ενός υλικού.

Για την καλύτερη χρήση των δεδομένων μιας κατανομής μεγέθους τεμαχίων αλλά και για μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό του υλικού σε μεγέθη διαφορετικά από αυτά των κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν, εφαρμόζονται συναρτήσεις κατανομής μεγέθους τεμαχίων.

Πρακτικά πρόκειται για έναν αποτελεσματικό τρόπο ώστε η πληροφορία μιας ταξινόμησης να “συμπυκνωθεί” σε μια συνάρτηση με την δημιουργία δυο δεικτών, έναν για την ομοιομορφία του μεγέθους του υλικού και έναν για το μέγεθος (Mular, 2003).

Οι πιο συνήθεις συναρτήσεις κατανομής μεγέθους τεμαχίων είναι η Rossin-Rammler και η Gates-Gaudin-Schumman. Η συνάρτηση RR (Rossin-Rammler) παρέχει το αθροιστικό ποσοστό % R (Remainaning) του συνολικού βάρους του υλικού που παραμένει στο κόσκινο συναρτήσει του μεγέθους x (μέγεθος βροχίδας πλέγματος κόσκινου) ενώ η συνάρτηση GGS (Gates-Gaudin-Schumman) παρέχει το αθροιστικό ποσοστό % P (Passing) του συνολικού βάρους του υλικού που διέρχεται από κόσκινο με μέγεθος βροχίδας x . Οι τιμές $P(x_i)$ και $R(x_i)$ για την ίδια συνάρτηση συνδέονται με την σχέση (Gupta & Yan, 2016):

$$P(x) + R(x) = 100\% \quad (1.1)$$

Η συνάρτηση Rossin-Rammler έχει γενική μορφή:

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^n} \quad (1.2)$$

όπου:

$R(x)$: Το αθροιστικό παραμένον βάρος % από βροχίδα κοσκίνου ανοίγματος x .

x : μέγεθος ανοίγματος βροχίδας κοσκίνου.

k : Συντελεστής μεγέθους.

n : Συντελεστής ομοιομορφίας.

Αντίστοιχα η συνάρτηση Gates-Gaudin-Schumman έχει τη γενική μορφή:

$$P(x) = \left(\frac{x}{k}\right)^m \quad (1.3)$$

όπου:

$P(x)$: Το αθροιστικό διερχόμενο βάρος % από βροχίδα κοσκίνου ανοίγματος x .

x : μέγεθος ανοίγματος βροχίδας κοσκίνου.

k : Συντελεστής μεγέθους.

m : Συντελεστής ομοιομορφίας.

Για να είναι δυνατό και στις δυο περιπτώσεις να γίνει υπολογισμός των συντελεστών μεγέθους και ομοιομορφίας επιλέγεται η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων από τις κοκκομετρικές αναλύσεις που έγιναν για κάθε δείγμα. Όμως, για να γίνει αυτό θα πρέπει και οι δυο συναρ-

τήσεις να μετασχηματιστούν σε γραμμική σχέση της μορφής:

$$y = a \cdot x + b$$

Για την εξίσωση Gates-Gaudin-Schumman αρκεί να λογαριθμίσουμε και να κάνουμε απλή εφαρμογή των ιδιοτήτων των λογαρίθμων και θα έχουμε:

$$\begin{aligned} P(x) &= \left(\frac{x}{k}\right)^m \\ \Rightarrow \log P &= \log \left(\frac{x}{k}\right)^m \\ \Rightarrow \underbrace{\log P}_Y &= m \cdot \underbrace{\log x}_X - \underbrace{m \cdot \log k}_C \\ \Rightarrow y &= m \cdot X - C \end{aligned}$$

Για την εξίσωση Rossin-Rammler, η αντίστοιχη διαδικασία απαιτεί παραπάνω μετασχηματισμούς.

$$\begin{aligned} \text{έστω} \quad a &= e^x \\ \Rightarrow \ln a &= x \end{aligned} \tag{1.4}$$

$$\begin{aligned} \text{αντίστοιχα για} \quad a &= e^x \\ \Rightarrow \log a &= \log e^x \\ \Rightarrow \log a &= x \cdot \log e \\ \Rightarrow \log a &= x \cdot 0,4342944819 \dots \end{aligned} \tag{1.5}$$

Διαιρώντας κατά μέλη την σχέση (1.4) προς την (1.5) θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\ln a}{\log a} &= \frac{1}{0,4342944819 \dots} \\ \Rightarrow \frac{\ln a}{\log a} &\approx 2,3026 \\ \Rightarrow \ln a &= 2,3026 \cdot \log a \end{aligned} \tag{1.6}$$

Μετασχηματίζοντας τη συνάρτηση Rossin-Rammler έχουμε:

$$\begin{aligned}
 R(x) &= e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^n} \\
 \Rightarrow R &= \frac{1}{e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^n}} \\
 \Rightarrow \frac{1}{R} &= e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^n} \\
 \Rightarrow \ln \frac{1}{R} &= \ln e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^n} \\
 \Rightarrow \ln \frac{1}{R} &= \left(\frac{x}{k}\right)^n \\
 \text{για: } a &= \frac{1}{R} && \text{από (1.6)} \\
 \Rightarrow \ln \frac{1}{R} &= 2,3026 \cdot \log \frac{1}{R} \\
 \Rightarrow \left(\frac{x}{k}\right)^n &= 2,3026 \cdot \log \\
 \Rightarrow \log \left(\frac{x}{k}\right)^n &= \log \left(2,3026 \cdot \log \left(\frac{1}{R}\right)\right) \\
 \Rightarrow n \cdot (\log x - \log k) &= \log 2,3026 + \log \left(\log \frac{1}{R}\right) \\
 \Rightarrow n \cdot \log x - n \cdot \log k &= 0,3622 + \log \left(\log \frac{1}{R}\right) \\
 \Rightarrow \underbrace{\log \left(\log \left(\frac{1}{R}\right)\right)}_y &= \underbrace{n \cdot \log x}_X - \underbrace{(n \cdot \log k + 0,3622)}_C \\
 \Rightarrow y &= n \cdot X - C
 \end{aligned}$$

Συνοψίζοντας, οι δύο αυτές συναρτήσεις μπορούν να γραφούν σε γραμμική μορφή ως:

$$\mathbf{GGS:} \quad y = m \cdot X - C \quad y = \log P \quad X = \log x \quad C = m \cdot \log k \quad (1.7)$$

$$\mathbf{RR:} \quad y = n \cdot X - C \quad y = \log \left(\log \frac{1}{R}\right) \quad X = \log x \quad C = n \cdot \log k + 0,3622 \quad (1.8)$$

Η κοκκομετρική "ταυτότητα" ενός υλικού μπορεί να αποτυπωθεί γραφικά με τη χρήση των παραπάνω συναρτήσεων, αρκεί τα διαγράμματα να έχουν τους αντίστοιχους λογαριθμικούς άξονες ($\log P$ και $\log x$ για την GGS και $\log \log \frac{1}{R}$ και $\log x$ για την RR). Σε αυτή την περίπτωση τα ζεύγη τιμών i, y_i για το αθροιστικό διερχόμενο ή το αθροιστικό παραμένον και των αντίστοιχων μεγεθών των κόκκων που πέρασαν ή παρέμειναν στο κόσκινο μεγέθους βροχίδας x δημιουργούν σημεία σε αυτά τα διαγράμματα, από τα οποία σημεία με την μέθοδο

των ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να δημιουργηθεί ευθεία της μορφής $y = a \cdot x + b$. Στην προκειμένη περίπτωση, η κλίση της ευθείας αυτής είναι ο συντελεστής ομοιομορφίας του δείγματος (m για την GGS και n για την RR). Με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, μπορούμε για τις γραμμικές εξισώσεις που προέκυψαν της μορφής $y = m \cdot X - C$ και $y = n \cdot X - C$ να υπολογίσουμε τα n , m και C ως:

$$m, n = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N X_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)}{N \left(\sum_{i=1}^N X_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right)^2}$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - a \left(\sum_{i=1}^N X_i \right)}{N}$$

m, n : Συντελεστές ομοιομορφίας.

C : Οι τιμές των (1.7) και (1.8)

N : Το πλήθος των δεδομένων X_i, y_i

Σημαντικό: Στις παραπάνω σχέσεις, που αφορούν τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τα X και y αντιστοιχούν στις τιμές από τις σχέσεις (1.7) και (1.8) και όχι στις τιμές $P(x)$ και $R(x)$ όπως αυτές θα εμφανίζονταν στα ειδικά γραφήματα με τους λογαριθμικούς άξονες. Οι συντελεστές ομοιομορφίας και μεγέθους των δειγμάτων μπορούν να φανούν πολύ χρήσιμοι για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός υλικού στον διαχωρισμό όπως επίσης και στα δεδομένα που μπορούν να προκύψουν με τη χρήση των συναρτήσεων, όπως ο λόγος μεγέθους των τεμαχίων του δείγματος. Αυτό μπορεί να γίνει εάν χρησιμοποιήσουμε τις παραπάνω συναρτήσεις για να υπολογίσουμε π.χ. $P(x_{min}) = 90\%$ που θα μας δώσει εκτίμηση για το κάτω όριο (μικρό μέγεθος τεμαχίων) και αντίστοιχα $P(x_{min}) = 10\%$ για να έχουμε μια εκτίμηση για το άνω όριο (μεγάλο μέγεθος τεμαχίων) ώστε να υπολογίσουμε τον λόγο υπερμεγέθους προς υπομέγεθους τεμαχίου. Για τον ευκολότερο υπολογισμό τους μπορούμε να λύσουμε ως προς x τις συναρτήσεις Gates-Gaudin-Schumman και Rossin-Rammmler:

Gates-Gaudin-Schumman:

$$\begin{aligned} P(x) &= \left(\frac{x}{k}\right)^m \\ \Rightarrow \frac{x}{k} &= P(x)^{\frac{1}{m}} \\ \Rightarrow x &= k \cdot P(x)^{\frac{1}{m}} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Rossin-Rammler:

$$\begin{aligned} R(x) &= e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^n} \\ \Rightarrow \ln R(x) &= -\left(\frac{x}{k}\right)^n \\ \Rightarrow \left(\frac{x}{k}\right)^n &= -\ln R(x) \\ \Rightarrow \frac{x}{k} &= -\ln R(x)^{\frac{1}{n}} \\ \Rightarrow x &= -k \cdot \ln R(x)^{\frac{1}{n}} \end{aligned} \quad (1.10)$$

1.1.3 Μαθηματική έκφραση αποτελεσμάτων εμπλουτισμού

Για ένα κύκλωμα εμπλουτισμού με δύο προϊόντα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση του ισοζυγίου βαρών και η σχέση ισοζυγίου βαρών και περιεκτικότητας :

$$F = C + T \quad (1.11)$$

$$F \cdot f = C \cdot c + T \cdot t \quad (1.12)$$

όπου:

F : Βάρος τροφοδοσίας (σε τόνους/ώρα).

C : Βάρος συμπυκνώματος (σε τόνους/ώρα).

T : Βάρος απορρίμματος (σε τόνους/ώρα).

f : Περιεκτικότητα επί τοις εκατό σε χρήσιμο ορυκτό στην τροφοδοσία.

c : Περιεκτικότητα επί τοις εκατό σε χρήσιμο ορυκτό στο συμπύκνωμα.

t : Περιεκτικότητα επί τοις εκατό σε χρήσιμο ορυκτό στο απόρριμμα.

Αντίστοιχα για ένα κύκλωμα που διαχωρίζει το υλικό της τροφοδοσίας σε τρεις σωρούς (συμπεριλαμβανομένων και των ενδιάμεσων) οι παραπάνω σχέσεις παίρνουν την εξής μορφή:

$$F \cdot f = C \cdot c + M \cdot m + T \cdot t \quad (1.13)$$

$$F = C + M + T \quad (1.14)$$

όπου:

M : Βάρος ενδιάμεσων (σε τόνους/ώρα).

m : Περιεκτικότητα επί τοις εκατό στο χρήσιμο ορυκτό στα ενδιάμεσα.

Η ποσότητα υλικού τροφοδοσίας σε τόνους που χρειάζεται για την παραγωγή ενός τόνου συμπυκνώματος καλείται λόγος συγκέντρωσης K :

$$K = \frac{F}{C} \quad (1.15)$$

Πολλαπλασιάζοντας τους όρους της εξίσωσης (1.11) επί t έχουμε:

$$F \cdot t = C \cdot t + T \cdot t \quad (1.16)$$

Εάν λύσουμε την (1.12) προς $T \cdot t$ και αντικαταστήσουμε στην (1.16) θα προκύψει:

$$F \cdot t = C \cdot t + F \cdot f - C \cdot c \Rightarrow F(f - t) = C(c - t) \Rightarrow$$

$$K = \frac{c - t}{f - t} \quad (1.17)$$

Ένας απλός τρόπος για να υπολογιστεί η απόδοση του εμπλουτισμού είναι με την χρήση των προηγούμενων δεικτών να υπολογιστεί η Ανάκτηση R και η Απώλεια J . Ανάκτηση % σε μέταλλο (ή χρήσιμο συστατικό) ονομάζεται το ποσοστό του χρήσιμου υλικού, το οποίο λήφθηκε στο συμπύκνωμα, από το περιεχόμενο στην τροφοδοσία. Το υπόλοιπο, το οποίο παραμένει στο απόρριμμα, αποτελεί την απώλεια σε χρήσιμο υλικό. Η Ανάκτηση υπολογίζεται ως:

$$R = \frac{C \cdot c}{F \cdot f} \cdot \% \quad (1.18)$$

Η αλλιώς από την σχέση (1.15):

$$R = \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{K} \cdot \% \quad (1.19)$$

Η απώλεια J , δηλαδή η ποσότητα χρήσιμου υλικού το οποίο κατέληξε στο απόρριμμα, μπορεί να υπολογιστεί αντίστοιχα ως:

$$J = \frac{T \cdot t}{F \cdot f} \cdot \% \quad (1.20)$$

ή αντίστοιχα:

$$J = \frac{c}{f} \cdot K \cdot \% \quad (1.21)$$

Όμως σε μια λειτουργία διαχωρισμού μεταλλευμάτων πέρα από την ανάκτηση R και την απώλεια J , που προσδιορίζουν την δυνατότητα του μηχανήματος υπό ορισμένες συνθήκες να διαχωρίσει τους κόκκους του χρήσιμου ορυκτού, μπορούμε να υπολογίσουμε και την δυνατότητά του ως προς την απομάκρυνση των κόκκων του στείρου. Για αυτό υπολογίζουμε τον λόγο R_g που εκφράζει την κατανομή των κόκκων στείρου της τροφοδοσίας στο προϊόν.¹ (Φραγκίσκος, 1995)

$$R_g = \frac{1 - c}{1 - f} \cdot \frac{1}{K} \cdot \% \quad (1.22)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως τόσο οι παραπάνω δείκτες όσο και αυτοί που ακολουθούν υπολογίζονται για διαχωρισμό μεταλλευμάτων σε δυο προϊόντα, συμπύκνωμα και απόρριμμα (δηλαδή χωρίς κάποιο τρίτο, ενδιάμεσο προϊόν).

Οι δείκτες R και R_g δεν σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους. Θα μπορούσε για παράδειγμα ένα μηχάνημα διαχωρισμού πράγματι να διαχωρίζει στο προϊόν όλη την ποσότητα των χρήσιμων κόκκων του μεταλλεύματος και άρα να επιτυγχάνεται τέλεια ανάκτηση ($R = 100\%$) όμως μαζί με αυτό, στο προϊόν να συγκεντρώνεται και μια μεγάλη ποσότητα στείρων κόκκων. Αντίστοιχα, θα μπορούσε ένα μηχάνημα διαχωρισμού να διαχωρίζει στο απόρριμμα όλη την ποσότητα των στείρων κόκκων και αλλά μαζί με αυτήν στο απόρριμμα να καταλήγει και μεγάλη ποσότητα χρήσιμων κόκκων. Επομένως στο προϊόν, ιδανικά θα θέλαμε, να έχουμε πολύ υψηλή ανάκτηση των χρήσιμων κόκκων (R υψηλό, κοντά στο 100%) και πολύ χαμηλή ανάκτηση στείρων κόκκων (R_g χαμηλό, κοντά στο 0%). Για αυτόν τον λόγο, αξίζει να ορίσουμε έναν νέο δείκτη (SE) που να δίνει με μια τιμή την απόδοση του διαχωρισμού, ώστε να αξιολογείται η επιτυχία του διαχωρισμού. Αυτός ο δείκτης μπορεί να οριστεί ως η διαφορά των δύο ανακτήσεων (R και R_g). Ο δείκτης αυτός δύναται επίσης να παίρνει τιμές από το 0 ως το 1 ενώ, θεωρητικά, σε σπάνιες περιπτώσεις όπου η περικετικότητα σε στείρους κόκκους στο προϊόν είναι πολύ υψηλή ενδέχεται να πάρει και αρνητικές τιμές.

$$SE = R - R_g \quad (1.23)$$

Σχετικά με το εάν ή κατά πόσο ένα ορυκτό έχει αποδεδμευτεί μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις. Ένα ορυκτό του οποίου κανείς κόκκος είναι αποδεδμευμένος, δηλαδή που όλα τα τεμάχια του είναι διμερή, αναφέρεται ως ένα μη αποδεδμευμένο ορυκτό, ενώ αντίστοιχα ένα ορυκτό που κανέναν κόκκος του (κανένα τεμάχιο) δεν είναι διμερές/ενδιάμεσο, μπορούμε να πούμε πως είναι πλήρως αποδεδμευμένο. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να ορίσουμε ως βαθμό αποδεδμευσης (B.A.) τον λόγο του βάρους των αποδεδμευμένων (μονομερών) τεμαχίων του ορυκτού προς το συνολικό βάρος του ορυκτού στο δείγμα (στα

¹ Στην προκειμένη περίπτωση οι ενδιάμεσοι κόκκοι θεωρούνται στείροι καθώς ένα "ιδανικό" αποτέλεσμα διαχωρισμού δεν περιέχει ενδιάμεσους κόκκους

μονομερή και ενδιάμεσα τεμάχια).

$$BA = \frac{\text{Συνολικό βάρος αποδεσμευμένων τεμαχίων}}{\text{Συνολικό βάρος του υλικού στα τεμάχια}} \quad (1.24)$$

1.2 Ο Μαγνησίτης

Ο Μαγνησίτης, ή αλλιώς Λευκόλιθος λόγω του λευκού του χρώματος, είναι ένα ορυκτό που περιέχει κυρίως ανθρακικό μαγνήσιο $MgCO_3$ και η εξόρυξή του αποτελεί κύρια πηγή Μαγνησίου για πολλές βιομηχανίες. Ο Μαγνησίτης στην κρυπτοκρυσταλλική του μορφή (μέγεθος κόκκων 4-10 μm) είναι υψηλότερης καθαρότητας από ό,τι όταν εμφανίζεται σε κρυσταλλική μορφή και υπολογίζεται πως μόνο το 10% των παγκόσμιων αποθεμάτων είναι αυτής της μορφής. Είναι λευκός με συνήθεις ελαφριές αποχρώσεις καστανού ή κίτρινου και δεν έχει λάμψη. Αποτελείται από 47,8% MgO και 52,2% CO_2 , το Mg μπορεί να αντικαθίσταται από Fe ενώ μικρές ποσότητες Mn και Ca υπάρχουν σχεδόν πάντα (Παπαδόπουλος, 2007).

Στην Ελλάδα, το έτος 2019 η παραγωγή μαγνησίτη (εξόρυξη) ξεπέρασε τους 550.000 τόνους. Προϊόντα της εκμετάλλευσης μαγνησίτη μπορούν να είναι (Lynch, 2019):

- Ανθρακικό Μαγνήσιο, ή αλλιώς "ωμός" μαγνησίτης, μετά από εμπλουτισμό του πρωτογενούς μεταλλεύματος και κατάτμησή του εάν χρειάζεται να έχει συγκεκριμένες προδιαγραφές ανάλογα με την βιομηχανική χρήση(κεραμικά, λιπάσματα, ζωοτροφές κ.α.).
- Ως Καυστική Μαγνησία (Calcinated Magnesia), δηλαδή μετά την θερμική του διάσπαση προς MgO σε θερμοκρασίες 800 – 1100°C και απομάκρυνση με αυτόν τον τρόπο του 96 – 98% του CO_2 . Πρόκειται για ενεργή ουσία η οποία διατίθεται στο εμπόριο για χρήση στην αγροτική και χημική βιομηχανία αλλά και αλλού.
- Ως Δίπυρη Μαγνησία (Hard Burned ή Dead Burned) σε θερμοκρασίες ως και 2000°C, λιγότερο ενεργή από ό,τι η Καυστική Μαγνησία, που προορίζεται κυρίως για την βιομηχανία χάλυβα, τσιμέντου, στην υαλουργία αλλά και για την κατασκευή πυρίμαχων μαζών.
- Ποιότητες Τετηγμένης Μαγνησίας (Fused Magnesia) σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 2000°C , που προορίζονται κυρίως στις αγορές των πυρίμαχων υλικών και των ηλεκτρικών μονώσεων.

Τα κοιτάσματα Μαγνησίτη που συναντώνται στην περιοχή της Χαλκιδικής συνυπάρχουν με στείρα, τα οποία κατά κύριο λόγο είναι:

- Σερπεντίνης : $(Mg, Fe)_3SiO_5(OH)_4$

- Ολιβίνης : $(Mg, Fe)_2SiO_4$
- Τάλκης : $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$

Το προφίλ των παραπάνω στείρων δίνει τις εξής δυνατότητες διαχωρισμού:

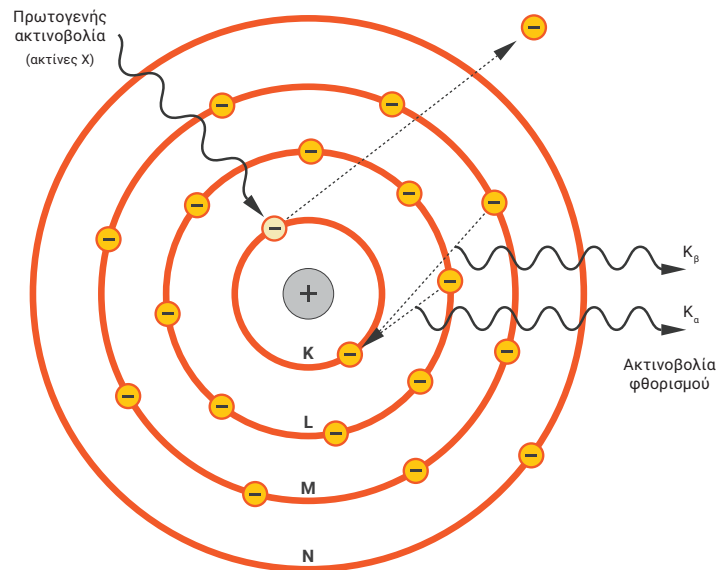
- Λόγω διαφοράς στο χρώμα (λευκό μαγνησίτη και σκούρο-γκρι, καφέ ή λαδί τα σύνδρομα), μπορεί να διαχωριστεί με χειροδιαλογή ή με χρήση οπτικών διαχωριστών.
- Λόγω διαφοράς στο ειδικό βάρος, περίπου $3g/cm^3$ για τον μαγνησίτη και $2,2-2,4g/cm^3$ για τα σείρα, με χρήση βαρυτομετρικών διαχωριστών που εκμεταλλεύονται την διαφορά αυτή και διαχωρίζουν τα τεμάχια σε διαφορετικά προϊόντα.
- Λόγω της αντικατάστασης του Mg στον Σερπεντίνη και στον Δουνίτη από δισθενή Fe με τη χρήση μαγνητικών διαχωριστών.
- Με διαφορετική επίπλευση των κόκκων σε ειδικές κυψέλες μετά από λειοτριβήση του υλικού.

1.3 Φθορισμετρία Ακτίνων X, X-ray fluorescence (XRF)

Η μέθοδος της φασματοσκοπίας με φθορισμετρία ακτίνων X (X-Ray Fluorescence Spectroscopy) είναι μια προηγμένη μη-καταστροφική μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιείται ευρέως στην μεταλλευτική και μεταλλουργική βιομηχανία για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης των ορυκτών και άλλων δειγμάτων. Με τον "βομβαρδισμό" ενός δείγματος με ακτίνες-X, δευτερογενείς ακτίνες-X εκπέμπονται από το δείγμα. Το κάθε χημικό στοιχείο, επανεκπέμπει με τη μορφή ακτίνων-X, ακτινοβολία (χαρακτηριστική για κάθε στοιχείο). Έτσι η ενέργεια αυτών των δευτερογενών ακτίνων-X μπορεί να αναλυθεί για να αναγνωριστούν τα χημικά στοιχεία του δείγματος αλλά και να υπολογιστεί η ποσότητά τους.

Η ανάλυση XRF προσφέρει άμεσα ή σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα δεδομένα για την χημική σύσταση δειγμάτων. Αυτό δίνει την δυνατότητα στις βιομηχανίες, όπως αυτές της μεταλλουργίας, για διαρκή έλεγχο της παραγωγής και, άρα, για άμεση επέμβαση με παραμετροποιήσεις στην παραγωγική διαδικασία.

Οι δυνατότητες της χρήσης XRF για χημικές αναλύσεις ποικίλλουν ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του μηχανήματος ανάλυσης XRF. Εάν αναλύεται η ενέργεια των ακτίνων-X που επανεκπέμπονται, πρόκειται για EDXRF (*Energy Dispersive XRF*) ενώ, εάν αναλύεται το μήκος κύματος των ακτίνων-X για WDXRF (*Wavelength Dispersive XRF*). Η ευαισθησία, το εύρος των στοιχείων που μπορούν να αναλύσουν αλλά και η ταχύτητα της ανάλυσης διαφέρει ανάμεσα στις δύο μεθόδους αλλά στις ρυθμίσεις λειτουργίας τους. Η πλειονότητα των μηχανημάτων EDXRF μπορούν να αναγνωρίσουν στοιχεία με ατομικό αριθμό από 11 έως



Σχήμα 1.3: Μοντέλο αναπαράστασης φθορισμού ακτίνων-X

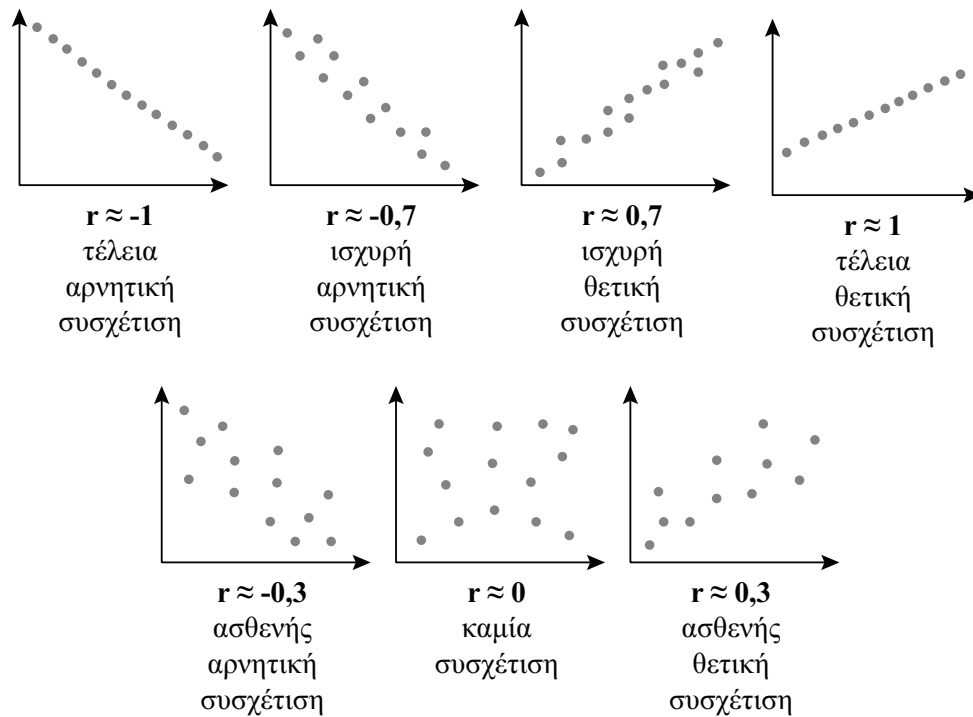
92 (δηλαδή από το Νάτριο ^{11}Na μέχρι το Ουράνιο ^{92}U) ενώ με WDXRF μπορούν να αναγνωριστούν στοιχεία με ατομικό αριθμό από 4 (δηλαδή από Βηρύλλιο ^4Be). Στις περισσότερες περιπτώσεις και για στερεά δείγματα, τα μηχανήματα που διενεργούν τέτοιες αναλύσεις χρειάζεται να τροφοδοτηθούν με δείγμα σε μορφή ταμπλέτας. Στις περιπτώσεις ανάλυσης ορυκτών, αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να έχει προηγηθεί λειτορίβηση του δείγματος και με την χρήση πρέσας η διαμόρφωσή του σε σχήμα του οποίου η επιφάνεια θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λεία.

Σημαντικό είναι να γίνει σαφές πως μια ανάλυση XRF παρέχει πληροφορίες μόνο για τα χημικά στοιχεία που υπάρχουν στο δείγμα και όχι για τις χημικές ενώσεις σε αυτό, παρόλο που σε συνδυασμό με άλλα δεδομένα μπορεί να προκύψει και αυτή η πληροφορία μετά από μια ανάλυση XRF (LeVier, 2019).

1.4 Ανάλυση συσχέτισης

Σε περιπτώσεις που υπάρχουν σύνολα δεδομένων, μεταξύ των οποίων αναζητείται συσχέτιση των τιμών τους, μπορεί να γίνει επιλογή κάποιας μεθόδου στατιστικής ανάλυσης αυτών των τιμών. Για μεθόδους που αφορούν στην εξέταση δεδομένων με πολλές μεταβλητές, η επιστήμη της στατιστικής παρέχει πληθώρα εργαλείων, όπως η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες (Principal Component Analysis), η ανάλυση σε ομάδες (Cluster Analysis) και άλλες. Για περιπτώσεις αναζήτησης συσχέτισης ανάμεσα σε δύο μεταβλητές (bivariate), ο συντελεστής συσχέτισης Pearson είναι μια εύκολη επιλογή (Καρλής, 2003).

Η συσχέτιση Pearson χρησιμοποιείται για την ποσοτική μέτρηση της "ισχύος" της σχέσης μεταξύ δυο μεταβλητών και η χρήση της προορίζεται για δεδομένα, τα οποία είναι συνεχή. Εφαρμόζεται για περιπτώσεις γραμμικής συσχέτισης με τις μεταβλητές να ακολουθούν κα-



Σχήμα 1.4: Σχεδιαγράμματα και δείκτες συσχέτισης για διάφορα θεωρητικά δείγματα

νονικές κατανομές. Η ύπαρξη ακραίων τιμών στο δείγμα υποβαθμίζει την αξιοπιστία χρήσης του συγκεκριμένου δείκτη.

Ο δείκτης συσχέτισης Pearson, όπως υπολογίζεται από την σχέση (1.25), παίρνει τιμές από -1 μέχρι 1 (Berman, 2016). Εάν η τιμή είναι κοντά στο -1 ή στο 1 αυτό σημαίνει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των τιμών. Στην περίπτωση που είναι πιο κοντά στο -0,5 ή το 0,5 υποδηλώνει χαμηλότερη συσχέτιση ενώ εάν η τιμή είναι κοντά στο 0 σημαίνει πολύ χαμηλή ή μηδενική συσχέτιση. Στην κατανόηση των παραπάνω βοηθούν τα διαγράμματα Σχήματος 1.4.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1.25)$$

όπου:

r : Ο συντελεστής ομοιομορφίας Pearson.

\bar{X} : Η μέση τιμή του συνόλου X.

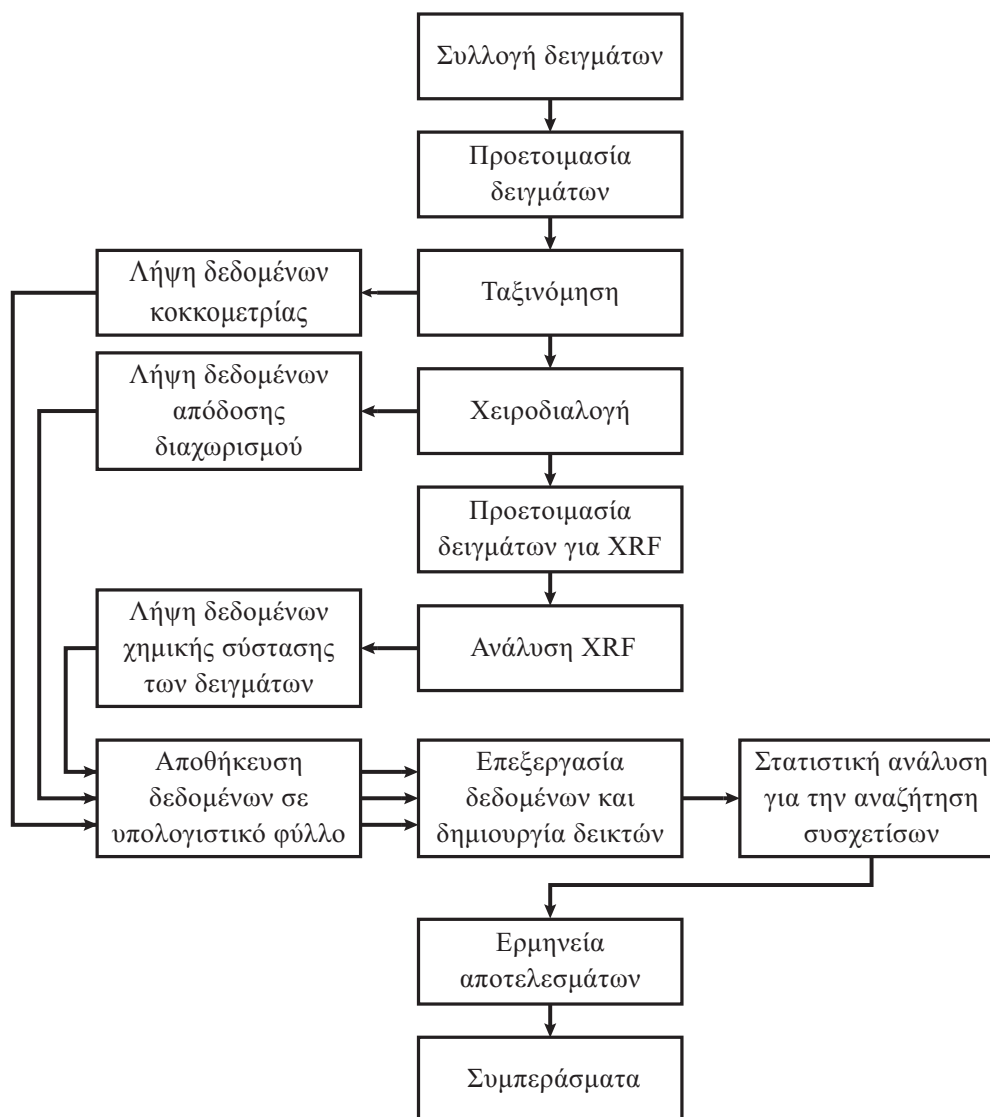
\bar{Y} : Η μέση τιμή του συνόλου Y.

X_i και Y_i : Ξεχωριστές τιμές των συνόλων X και Y αντίστοιχα.

2. Μεθοδολογία

2.1 Επισκόπηση της μεθοδολογίας

Μια σύντομη περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα. Πιο αναλυτικά:



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα μεθοδολογίας

- Με την «συλλογή δειγμάτων» εννοείται η λήψη δειγμάτων από μηχανήματα που κάνουν διαχωρισμό μεταλλεύματος μαγνησίτη. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα τέτοιο μηχάνημα τροφοδοτείται με υλικό και δημιουργεί δύο (συνήθως) προϊόντα

συμπύκνωμα και απόρριμμα. Διαφορετικά μηχανήματα διαχωρίζουν μεταλλεύματα με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με την κατασκευή τους και την φυσική ιδιότητα, επάνω στην οποία βασίζεται ο διαχωρισμός των χρήσιμων από τα στείρα. Μία ολοκληρωμένη διαδικασία περιλαμβάνει λήψη των εξής τριών δειγμάτων (σακούλες με τεμάχια μεταλλεύματος), ένα από την τροφοδοσία, ένα από το συμπύκνωμα και ένα από το απόρριμμα, ενώ ταυτόχρονα σημειώνεται στα δείγματα ο τύπος του διαχωριστή και το ονομαστικό μέγεθος (κοκκομετρικό) του υλικού.

- Με την «**προετοιμασία δειγμάτων**» εννοείται η πλύση τους ώστε να απομακρυνθεί η ποσότητα χώματος και λάσπης που έχουν λόγω των διαδικασιών της εξόρυξης και της διακίνησής τους αλλά και ο τετραμερισμός του δείγματος σε περιπτώσεις που το δείγμα είναι πολύ μεγαλύτερο από ό,τι χρειάζεται για να μπορούν από αυτό να ληφθούν αξιόπιστα δεδομένα.
- Με την «**ταξινόμηση**» εννοείται ο διαχωρισμός του κάθε δείγματος σε επιμέρους κοκκομετρικά κλάσματα και η ζύγισή, τους ώστε να μπορέσουν να δημιουργηθούν δεδομένα για το κοκκομετρικό προφίλ του κάθε δείγματος.
- Με την «**χειροδιαλογή**» εννοείται ο διαχωρισμός του κάθε επιμέρους τεμαχίου σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα στο αντίστοιχο προϊόν. Οι κόκκοι (τεμάχια) κάθε υλικού διαχωρίζονται σε τρεις σωρούς, έναν για τους κόκκους μαγνησίτη, έναν για τους στείρους κόκκους, και έναν για τα τεμάχια εκείνα τα οποία δεν είναι αποδεσμευμένα και αποτελούνται τόσο από μαγνησίτη όσο και από στείρα. Η κάθε τριάδα κάθε κοκκομετρικού κλάσματος ζυγίζεται και, στη συνέχεια, η πληροφορία για το βάρος σημειώνεται σε υπολογιστικό φύλλο. Η χειροδιαλογή, αν και εύκολη σε περιπτώσεις όπως αυτή του μαγνησίτη, καθώς μόνο οι κόκκοι του μαγνησίτη είναι λευκοί, είναι εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά όταν πρόκειται για υλικό λεπτομερούς κοκκομετρίας $< 10mm$.
- Για να προχωρήσει ένα δείγμα σε ανάλυση XRF θα πρέπει να προηγηθεί «**προετοιμασία του δείγματος**». Κάθε επιμέρους δείγμα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος, μετά την ολοκλήρωση της χειροδιαλογής ήταν ταξινομημένο σε κοκκομετρικά κλάσματα, τα οποία με την ολοκλήρωση της χειροδιαλογής τοποθετούνται ξανά στην αρχική τους σακούλα ώστε να προχωρήσει το κάθε δείγμα ακέραιο στην επόμενη διαδικασία. Ταυτόχρονα κρατούνται ελάχιστοι κόκκοι από τις σωρούς των λευκών κόκκων (ενν. κόκκων μαγνησίτη) ώστε να αναλυθούν ξεχωριστά. Στη συνέχεια κάθε δείγμα (T, Π και A) θραύεται και στη συνέχεια τετραμερίζεται, μέχρις ότου η ποσότητά του να είναι επαρκής για ανάλυση XRF. Η ποσότητα αυτή ξηραίνεται για να αφαιρεθεί από αυτήν η υγρασία και, στη συνέχεια, λειοτριβείται, ώστε να οδηγηθεί στην πρέσα για την παρασκευή ταμπλέτας που μπορεί να υποδεχθεί ο αναλυτής XRF.

- Τα δεδομένα από την «**ανάλυση XRF**» για κάθε δείγμα καταχωρούνται άμεσα σε υπολογιστικό φύλλο. Με την χρήση λογισμικού, τα δεδομένα των υπολογιστικών φύλλων μπορούν να εξετασθούν και να γίνουν διορθώσεις σε δεδομένα. Στην συνέχεια τροποποιούνται και δημιουργούνται οι απαραίτητοι δείκτες, οι οποίοι στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση συσχέτισης.
- Με την χρήση λογισμικού τα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω και να γίνει «**στατιστική ανάλυση**», ώστε να εξετασθούν τα σύνολα των δειγμάτων αυτών που προέρχονται από τρεις διαφορετικές πηγές (ταξινόμηση, χειροδιαλογή και ανάλυση XRF) εάν εμφανίζουν συσχέτιση.
- Αρκετά από τα σύνολα των δεδομένων που θα αναλυθούν αναμένεται να έχουν υψηλή συσχέτιση, όπως για παράδειγμα, η ανάκτηση που θα υπολογιστεί από τα δεδομένα της χειροδιαλογής αναμένεται να συσχετίζεται έντονα με την ανάκτηση όπως θα υπολογιστεί από τα αποτελέσματα των αναλύσεων XRF. Η **ερμηνεία** των αποτελεσμάτων αυτών θα εξετάσει εάν επιβεβαιώνονται ή όχι οι θεωρητικές συσχετίσεις και θα οδηγήσει σε **συμπεράσματα**.

Μέρος Β΄

Πειραματικό μέρος

3. Αντικείμενο πειράματος

3.1 Εισαγωγή

Ο εμπλουτισμός κοιτασμάτων μαγνησίτη σε βιομηχανικό επίπεδο εμπεριέχει μια σειρά από διαδικασίες, των οποίων η βελτιστοποίηση μπορεί να φανεί εξαιρετικά χρήσιμη. Η έρευνα αυτή προέκυψε από την ανάγκη για καλύτερη κατανόηση, ανάλυση και εξεύρεση πιθανών περιθωρίων για βελτιστοποίηση των διαδικασιών εμπλουτισμού μαγνησίτη. Σκοπός αυτής της έρευνας είναι η εξέταση των πτυχών του διαχωρισμού μαγνησίτη με την συλλογή δειγμάτων από πραγματική γραμμή παραγωγής βιομηχανικής κλίμακας, και την εξακρίβωση και διερεύνηση πιθανών συσχετίσεων μεταξύ διαφόρων μεγεθών σχετικών με την διαδικασία του διαχωρισμού του μεταλλεύματος. Ο αριθμός των μελετών με βιομηχανικά δεδομένα είναι περιορισμένος και δύσκολα κανείς μπορεί να βρει μελέτες με ολιστική προσέγγιση από διάφορα μηχανήματα και με συνδυασμό πολλών τύπων δεδομένων, όπως αυτά που εξετάζει η παρούσα μελέτη.

Όλη η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις του μεταλλείου και του εργοστασίου εμπλουτισμού της εταιρείας **Ελληνικοί Λευκόλιθοι Α.Μ.Β.Ν.Ε.Ε.** στην Γερακινή Χαλκιδικής σε διάστημα τριών μηνών το καλοκαίρι του 2021. Το εύρος της χρονικής διάρκειας της πειραματικής διαδικασίας διασφάλισε μια ποικιλία στα δεδομένα, καθώς έγινε λήψη πολλών δειγμάτων με διαφορετική σύσταση και συμπεριφορά, διαφορετικών κοκκομετρικών μεγεθών και από διαφορετικά είδη μηχανημάτων διαχωρισμού. Παρότι η παρούσα μελέτη είναι ανεξάρτητη της εταιρείας, οι γνώσεις και η υλικοτεχνική υποστήριξη από τους μηχανικούς και το προσωπικό του εργοστασίου αποδείχθηκαν ανεκτίμητες και εξασφάλισαν την απρόσκοπτη εκτέλεση των πειραματικών δραστηριοτήτων.

Παρότι δεν υπήρχε εξ αρχής σαφής σχεδιασμός της έρευνας άμεσα, με την παρατήρηση κατά την ροή των διαδικασιών της πειραματικής διαδικασίας, ήταν δυνατή η διάκριση συγκεκριμένων στόχων και η δόμηση μιας προσέγγισης για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, δηλαδή της δημιουργίας τριών συνόλων δεδομένων για τα ίδια δείγματα που προέρχονται από την ταξινόμηση, την χειροδιαλογή και την ανάλυση με XRF. Η επιλογή της χρήσης του δείκτη συσχέτισης Pearson έγινε μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας και αφού είχε ολοκληρωθεί το στάδιο της συλλογής όλων των δεδομένων.

Η τεχνογνωσία που συνδέεται με τα δεδομένα και τις διαδικασίες της βιομηχανίας είναι περιορισμένη και δεν αναφέρεται συχνά στην βιβλιογραφία καθώς η διάδοση τέτοιων πληροφοριών μπορεί να σημαίνει την αλλαγή των ισορροπιών στον ανταγωνισμό μεταξύ εταιριών που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον χώρο. Συσχετίσεις όπως αυτή του βέλτιστου λόγου μέ-

γιστου προς ελάχιστο μέγεθος τεμαχίων στην τροφοδοσία μηχανημάτων διαχωρισμού είναι κάτι το οποίο παρότι υπάρχει ως πληροφορία στο δυναμικό της βιομηχανίας παραλείπεται ή είναι εξαιρετικά δυσεύρετο από την διαδεδομένη βιβλιογραφία. Το γεγονός πως η πλειονότητα των δημοσιεύσεων ασχολείται με δεδομένα τα οποία δημιουργούνται σε εργαστήρια πανεπιστημίων ή ερευνητικών κέντρων δημιουργεί ένα χάσμα στη σύνδεση αυτών των δεδομένων με τη βιομηχανία. Τα παραπάνω κενά καλείται να καλύψει η ερευνητική διαδικασία και ανάλυση που θα ακολουθείται στην παρούσα εργασία.

3.2 Περιγραφή του διαγράμματος ροής του εργοστασίου

Χρήσιμο για την σε βάθος κατανόηση του πειράματος και του σκοπού του είναι η περιγραφή και επεξήγηση της λειτουργίας των μηχανημάτων, από τα οποία γινόταν λήψη των δειγμάτων, αλλά και η περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση δεδομένων από αυτά μετά το στάδιο της συλλογής των δειγμάτων.

Το πρωτογενές μετάλλευμα («μπαζομετάλλευμα») που παράγεται στα πεδία εξόρυξης του μεταλλείου οδηγείται αρχικά σε ένα συγκρότημα πρωτογενούς θραύσης και ταξινόμησης. Εκεί με τη χρήση κεκλιμένων σχαρών και δονούμενων κόσκινων, το προϊόν με μέγεθος $-110mm$ διαχωρίζεται σε διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα ενώ τα τεμάχια $+110mm$ θραύονται σε $-110mm$ με τη χρήση σιαγονωτού και κωνικού σπαστήρα. Το συγκρότημα αυτό παράγει προϊόντα μπαζομεταλλεύματος κοκκομετρικών κλασμάτων:

- $70mm - 110mm$
- $30mm - 70mm$
- $18mm - 30mm$
- $10mm - 18mm$
- $4mm - 10mm$
- $0mm - 4mm$

Ανάλογα με την κοκκομετρία τους, τα κλάσματα αυτά ακολουθούν διαφορετική διαδρομή στο στάδιο του προεμπλουτισμού του μεταλλεύματος, με κύριο σκοπό την απομάκρυνση της μεγαλύτερης ποσότητας των στείρων. Εκεί, οι κοκκομετρίες $-18mm$ οδηγούνται σε μαγνητικούς διαχωριστές ενώ οι κοκκομετρίες $+10mm$ σε οπτικούς διαχωριστές (με κάμερα ή με laser). Για την προετοιμασία του υλικού για οπτικό διαχωρισμό απαιτείται η έκπλυσή του για την απομάκρυνση της ιλύος.

Στη συνέχεια το υλικό οδηγείται στις μονάδες εμπλουτισμού στις οποίες θα κατατηθεί σε μέγεθος $-50mm$ και από εκεί θα οδηγηθεί στα συγκροτήματα:



Εικόνα 3.1: Συγκρότημα προεμπλουτισμού

- Διαχωρισμού με βαρέα διάμεσα, χρήση πολφού $FeSi$ ειδικού βάρους $\simeq 2,6\text{g/cm}^3$.
- Οπτικού διαχωρισμού από οπτικούς διαχωριστές με κάμερα.
- Συγκρότημα μαγνητικού διαχωρισμού (EMΩ).

Για την πειραματική διαδικασία έγινε λήψη 23 δειγμάτων, με το κάθε δείγμα να αποτελείται από 3 ποσότητες, μια από την τροφοδοσία, μια από το συμπύκνωμα και μία από το απόρριμμα (σύνολο 69). Αναλυτικότερα:

- 6 δείγματα από τους μαγνήτες του προεμπλουτισμού κοκκομετριών $-18+4\text{mm}$.
- 7 δείγματα από τους οπτικούς διαχωριστές του προεμπλουτισμού κοκκομετρικών $-70+10\text{mm}$.
- 3 δείγματα από τον κυκλώνα βαρέων διαμέσων κοκκομετριών $-20+4\text{mm}$.
- 4 δείγματα από τους οπτικούς διαχωριστές του εμπλουτισμού $-31,5+4\text{mm}$.
- 3 δείγματα από το συγκρότημα μαγνητικού διαχωρισμού (EMΩ).

4. Διαδικασία συλλογής δεδομένων

4.1 Συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων

Η συλλογή των δειγμάτων γινόταν σε συνεργασία με το προσωπικό του εργοστασίου κατευθείαν από τις ταινίες μεταφοράς της γραμμής παραγωγής. Σε αυτό το πρώτο στάδιο, όπως και σε κάθε μετέπειτα στάδιο της επεξεργασίας, γινόταν επιμελής αρίθμηση των δειγμάτων, σημείωση των χαρακτηριστικών τους και καταχώρηση αυτής της πληροφορίας σε υπολογιστικό φύλλο του λογισμικού Microsoft Office Excel. Τα χαρακτηριστικά αυτά στην προκειμένη φάση της λήψης των δειγμάτων ήταν η ημερομηνία και η ώρα λήψης του δείγματος, ο διαχωριστής μεταλλευμάτων από τον οποίο έγινε λήψη του δείγματος, η ονομαστική κοκκομετρία του δείγματος, ο τύπος του δείγματος (τροφοδοσία, συμπύκνωμα ή απόρριμμα) αλλά και ένας ξεχωριστός αύξοντας αριθμός αναγνωριστικός του δείγματος. Τα δείγματα αυτά, που διακινούνταν σε διαφανείς πλαστικές σακούλες, είχαν βάρος από $1kg$ έως $5kg$ ή ακόμα και περισσότερο ανάλογα με την κοκκομετρία του υλικού.

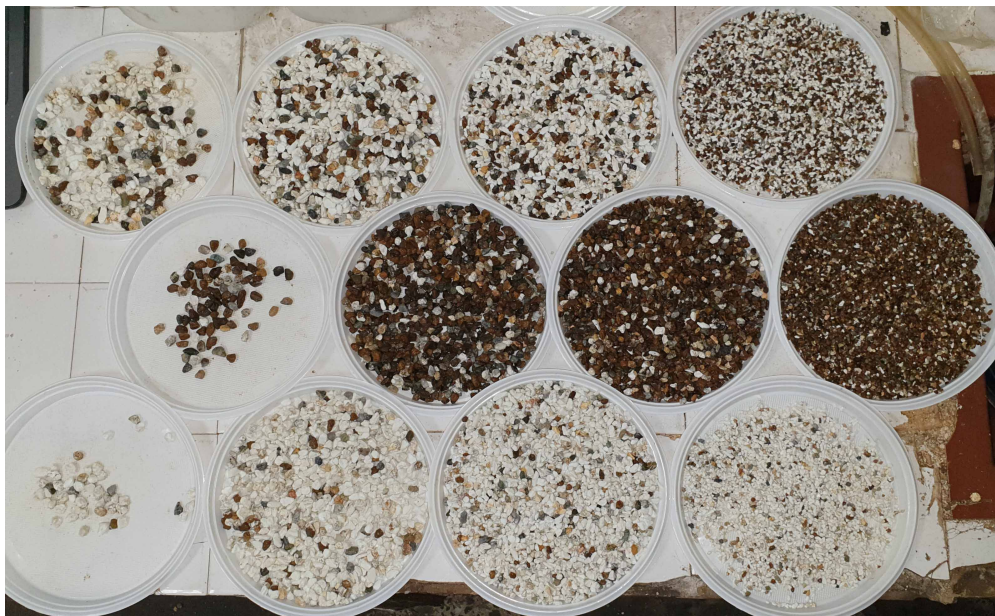
Το μετάλλευμα από την εξόρυξή του μέχρι την δειγματοληψία, λόγω των σταδίων της κατάκτησης, της ταξινόμησης, του διαχωρισμού αλλά και της διακίνησής του, κατέληγε κατά την συλλογή του με ποσότητες λάσπης στην επιφάνεια των κόκκων. Για αυτό ο καθαρισμός των δειγμάτων ήταν αναγκαίος για να μπορέσουν αυτά να προχωρήσουν στα επόμενα στάδια της πειραματικής διαδικασίας και για αυτό πλένονταν με άφθονο νερό στις εγκαταστάσεις του χημείου του εργοστασίου.

4.2 Ταξινόμηση



Εικόνα 4.1: Εργαστηριακός δειγματολήπτης

Όπως αναφέρεται και πιο πάνω, τα δείγματα είχαν μια ονομαστική κοκκομετρία, η οποία χαρακτηρίζεται από το άνοιγμα της βροχίδας των κοσκίνων κατά την ταξινόμησή τους στα συγκροτήματα του προεμπλουτισμού και του εμπλουτισμού του εργοστασίου. Με βάση αυτή την ονομαστική κοκκομετρία γινόταν επιλογή των κοσκίνων με την οποία θα γινόταν η κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων στους χώρους του χημείου του εργοστασίου. Τα συνήθη μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτά των $2mm$, $4mm$, $6.3mm$, $10mm$, $12.5mm$, $14mm$, $16mm$, $18mm$, $20mm$ και $31.5mm$. Προτού ξεκινήσει η διαδικασία της ταξινόμησης το κάθε δείγμα ζυγιζόταν με ζυγαριά ευαισθησίας $1g$ και εάν κρινόταν ότι, λόγω της κοκκομετρίας του, η ποσότητα του δείγματος ήταν περισσότερη από την αναγκαία για να προχωρήσει η ανάλυσή του, διαχωριζόταν με τη χρήση δειγματολήπτη. Στη συνέχεια τοποθετούντο τα κόσκινα σε στοίβα με ένα ταψί κάτω από το τελευταίο κόσκινο για την συλλογή του εναπομείναντος λεπτομερούς υλικού (υπομέγεθος) συχνά είχε κοκκομετρία $-4+0mm$ ή $-2+0mm$. Η κοσκίνηση γινόταν στο χέρι και στη συνέχεια πάλι με χρήση ζυγαριάς ευαισθησίας $1g$, γινόταν η μέτρηση του βάρους κάθε κοκκομετρικού κάσματος και η απευθείας καταχώρηση αυτής της πληροφορίας στο υπολογιστικό φύλλο. Τα υλικά παρέμεναν σε ξεχωριστά ταψιά μετά την ταξινόμησή τους ώστε στη συνέχεια να γίνει χειροδιαλογή των κόκκων επίσης ανά κοκκομετρικό κλάσμα. Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται το αποτέλεσμα της ταξινόμησης ενός δείγματος προτού προχωρήσει στο στάδιο της χειροδιαλογής. Διακρίνονται το υλικό τροφοδοσίας (επάνω), το απόρριμμα (μέση) και το συμπύκνωμα (κάτω) ενώ από τα αριστερά προς τα δεξιά σε φθίνουσα σειρά τα κοκκομετρικά κλάσματα του κάθε ενός.



Εικόνα 4.2: Αποτέλεσμα ταξινόμησης δείγματος. Διακρίνονται από τα αριστερά προς τα δεξιά τα κλάσματα $+12,5mm$, $-12,5+10mm$, $-10+8mm$, $-8+6,3mm$, $-4mm$ και από πάνω προς τα κάτω η τροφοδοσία, το απόρριμμα και το προϊόν

4.3 Χειροδιαλογή

Με τα δείγματα να είναι πλέον ταξινομημένα, γινόταν ο διαχωρισμός των τεμαχίων του κάθε κοκκομετρικού κλάσματος σε τεμάχια λευκόλιθου, τα οποία ήταν εύκολα αναγνωρίσιμα λόγω του χαρακτηριστικού λευκού χρώματος, σε ενδιάμεσα (εικόνα 4.3), δηλαδή μη αποδεσμευμένα τεμάχια, και «μαύρα», δηλαδή τεμάχια που δεν περιείχαν καθόλου λευκόλιθο, και είχαν κατά κύριο λόγο σκούρο καφέ ή γκρι χρώμα. Αξίζει να σημειωθεί πως ακόμα ελάχιστες ποσότητες από στείο υλικό σε τεμάχιο κατά τα άλλα λευκό έκαναν το τεμάχιο να χαρακτηρίζεται ως ενδιάμεσο. Παρότι τα στείρα ήταν κυρίως Σερπεντίνης και Δουνίτης Ολιβίνης, μικρές ποσότητες από επίσης λευκού χρώματος Τάλκη αλλά και μικροί κρύσταλλοι χαλαζία ήταν εμφανείς. Κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, το οποίο διαχωριζόταν σε αυτές τις τρεις σωρούς, δεν επέστρεφε σε κάποια κοινή στοίβα παρά μόνο αφού είχε ζυγιστεί και είχε γίνει λήψη μικρής ποσότητας που προοριζόταν για επιπλέον ανάλυση XRF. Οι ποσότητες αυτές ήταν άσπρων τεμαχίων, τα οποία εμφάνιζαν ιδιαίτερη καθαρότητα, αλλά και ενδιάμεσων τεμαχίων. Οι ποσότητες ήταν της τάξης των 10-20g. Τα αποτελέσματα της χειροδιαλογής καταχωρούνταν στο υπολογιστικό φύλλο, τα οποία σε συνδυασμό με τα δεδομένα από την ταξινόμηση αποκτούσαν μια μορφή όπως αυτά του Πίνακα 4.1.



Εικόνα 4.3: Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενδιάμεσου, μη αποδεσμευμένου τεμαχίου μεγέθους $\approx 12\text{mm}$

4.4 Ανάλυση XRF

Προκειμένου ένα δείγμα να αναλυθεί με την μέθοδο Φθορισμετρίας Ακτίνων X (XRF), έπρεπε πρώτα να λειοτριβηθεί με την βοήθεια μηχανήματος VCM (Vibrating Cup Mill) που

Πίνακας 4.1: Παράδειγμα αποτελεσμάτων χειραδιαλογής δείγματος τροφοδοσίας από τον κυκλώνα, τιμές σε γραμμάρια

a/a	Μηχάνημα Εμπλουτισμού	Είδος δείγματος	Κλάσμα		Άσπρα	Ενδιάμεσα	Μαύρα	Σύνολο
32	Κυκλώνας	Τροφοδοσία	-4					31
32	Κυκλώνας	Τροφοδοσία	-6,3	+4	85	110	65	260
32	Κυκλώνας	Τροφοδοσία	-8	+6,3	140	212	148	503
32	Κυκλώνας	Τροφοδοσία	-10	+8	190	286	241	716
32	Κυκλώνας	Τροφοδοσία	-12,5	+10	223	184	277	685
32	Κυκλώνας	Τροφοδοσία		+12,5	73	181	112	362

διέθετε το παρασκευαστήριο του χημείου. Για την καλύτερη λειοτριβήσή του γίνονταν προσθήκη μίας-δύο σταγόνων τριαιθυλαμίνης ενώ όλα τα δείγματα, πριν την λειοτριβήσή τους, είχαν ξηραθεί σε ηλεκτρικό φούρνο για 5-10min για την απομάκρυνση της υγρασίας τους. Αμφότερες αυτές οι διαδικασίες βοηθούσαν σε σημαντικό βαθμό ώστε το λειοτριβημένο υλικό να μην κολλάει στα τοιχώματα της μήτρας την οποία τοποθετούσαν εντός του μηχανήματος λειοτριβήσης.

Το λειοτριβημένο δείγμα, βάρους $\simeq 20g$, οδηγούνταν στο μηχανήμα ανάλυσης XRF.

Παρότι μια ανάλυση XRF δίνει ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα για τα **χημικά στοιχεία** ενός δείγματος (περιεκτικότητα επί τοις εκατό σε κάποιο μέταλλο), για τις ανάγκες των καθημερινών αναλύσεων του χημείου τα αποτελέσματα δίνονταν σε μορφή οξειδίων που θα έχει το όποιο υλικό, μετά την έψησή του στις περιστροφικές καμίνους του εργοστασίου προς παραγωγή MgO . Ο Λευκόλιθος ή Μαγνησίτης είναι Ανθρακικό Μαγνήσιο $MgCO_3$ (MgO : 52.2% και CO_2 : 47.8%) αλλά στις αναλύσεις XRF εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα μόνο το οξείδιο του Μαγνησίου MgO . Ενδεικτικό παράδειγμα κανονικοποιημένων αποτελεσμάτων μιας τέτοιας ανάλυσης δείγματος φαίνεται στον Πίνακα 4.2.

Για το κάθε δείγμα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος λαμβάνονταν τρία δείγματα προς ανάλυση XRF, ένα από το σύνολο του δείγματος (σημ.: η ποσότητα αυτή απομονωνόταν πριν από το στάδιο της ταξινόμησης του δείγματος αμέσως μετά το στάδιο της πλύσης αυτού για απομάκρυνση της ιλύως), ένα από την σωρό των χειροδιαλεγμένων άσπρων κόκκων του δείγματος και ένα από τους αντίστοιχους ενδιάμεσους κόκκους. Κάθε λειοτριβημένο προς ανάλυση δείγμα τοποθετούνταν σε χάρτινο σακουλάκι, στο οποίο αναγράφονταν ο αριθμός του δείγματος μαζί με σημείωση "Α" εάν επρόκειτο για δείγμα κόκκων λευκόλιθου, με "Ε" εάν αφορούσε ενδιάμεσους κόκκους και με "Σ" εάν αφορούσε το σύνολο του δείγματος. Στο ίδιο χάρτινο σακουλάκι αναγραφόταν η λέξη "ΩΜΟ" προς ενημέρωση του χειριστή του μηχανήματος ανάλυσης πως πρόκειται για δείγμα ωμού μαγνησίτη, δηλαδή που δεν έχει περάσει από την διαδικασία έψησης στις περιστροφικές καμίνους του εργοστασίου.

Όπως είναι ήδη γνωστό, τα στείρα του υλικού (Σερπεντίνης, Ολιβίνης, Τάλκης) περιέχουν και αυτά μαγνήσιο, το οποίο ανιχνεύεται από την ανάλυση XRF. Επομένως η συγκέντρωση σε *MgO* που αναφέρεται από την ανάλυση δεν προκύπτει μόνο από τους κόκκους του μαγνησίτη. Παρόλα αυτά ο μαγνησίτης περιέχει κατά βάρος περισσότερο *Mg* από ό,τι τα σύνδρομα ορυκτά. Έτσι η παρουσία περισσότερων κόκκων μαγνησίτη στο προς ανάλυση δείγμα δίνει υψηλότερες μετρήσεις συγκέντρωσης από ό,τι δείγματα με λιγότερους κόκκους μαγνησίτη.

Πίνακας 4.2: Παράδειγμα αποτελεσμάτων ανάλυσης XRF υλικού, κανονικοποιημένο στο 100 %, όπως θα είναι μετά από έψηση.

Χημική ένωση		Συγκέντρωση		Abs.Error
MgO	<i>Magnesium oxide</i>	98.70	%	0.09
Al ₂ O ₃	<i>Aluminium oxide</i>	0.01511	%	0.0015
SiO ₂	<i>Silicon dioxide</i>	6.600	%	0.006
CaO	<i>Calcium oxide</i>	1.350	%	0.002
MnO	<i>Manganesoxide</i>	29.8	μg/g	0.6
Fe ₂ O ₃	<i>Iron(III) oxide</i>	0.08337	%	0.00047
NiO	<i>Nickeloxide</i>	303.5	μg/g	1.7

Μέρος Γ΄

Επεξεργασία και ανάλυση

5. Οργάνωση δεδομένων σε υπολογιστικά φύλλα

5.1 Εργαλεία και τεχνικές

Κατά την διαδικασία της συλλογής των δεδομένων από την ταξινόμηση και την χειροδιαλογή όλες οι τιμές των βαρών σημειώνονταν κατευθείαν σε υπολογιστικό φύλλο του λογισμικού Microsoft Excel. Σε αυτό, πέραν των δεδομένων που φαίνονται και στον Πίνακα 4.1, σημειωνόταν η ημερομηνία του δείγματος αλλά και των δύο ξεχωριστών αριθμών κάθε δείγματος. Κάθε τριάδα δειγμάτων (τροφοδοσία-προϊόν-απόρριμμα) λάμβανε έναν αύξοντα αριθμό, ενώ κάθε επιμέρους δείγμα λάμβανε επίσης διαφορετικό αύξοντα αριθμό. Η συγκέντρωση όλων των δεδομένων ψηφιακά αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντική για την μετέπειτα επεξεργασία αυτών.

Για την καλύτερη λειτουργία του υπολογιστικού φύλλου στην μετέπειτα χρήση των συναρτήσεων του λογισμικού προτιμήθηκε η μη-χρήση της λειτουργίας συγχώνευσης κελιών καθώς αυτή θα δημιουργούσε στο μέλλον προβλήματα στον εντοπισμό κελιών από άλλες συναρτήσεις. Η καλή οργάνωση ακόμα και ο χρωματισμός των στηλών ήταν εξαιρετικά σημαντικός καθώς το μεγαλύτερο μέρος των εργασιών για την επεξεργασία των δεδομένων έγινε στο λογισμικό αυτό. Το λογισμικό Microsoft Excel δίνει τη δυνατότητα ονομασίας κελιών, στηλών, γραμμών και πινάκων και η οργάνωση των δεδομένων κατά αυτόν τον τρόπο ήταν επίσης καίριας σημασίας για τον ταχύ και αξιόπιστο χειρισμό των δεδομένων. Αντίστοιχα η ενσωματωμένη λειτουργία του λογισμικού που αφορά στην μετατροπή δεδομένων από απλούς πίνακες σε πίνακες με την μορφή που το λογισμικό μπορεί να κάνει αυτόματα υπολογισμούς, αποδείχθηκε επίσης εξαιρετικά σημαντικό στην ανάλυση που ακολούθησε. Χωρίς την καλή γνώση των δυνατοτήτων του λογισμικού όπως των συναρτήσεων, της ανάλυσης πιθανοτήτων, της δημιουργίας πίνακα δεδομένων και της δημιουργίας ετικετών και ονομάτων, η επεξεργασία αυτού του μεγάλου όγκου δεδομένων θα ήταν από εξαιρετικά χρονοβόρα έως ανέφικτη.

Το υπολογιστικό φύλλο οργανώθηκε να έχει τα εξής φύλλα εργασίας:

- **Data_Sort** : Στο οποίο καταχωρήθηκαν όλα τα πρωτογενή δεδομένα από την ταξινόμηση και την χειροδιαλογή, χωρίς να γίνονται υπολογισμοί σε αυτό το φύλλο.
- **Data_XRF** : Στο οποίο καταχωρήθηκαν όλα τα δεδομένα από τις αναλύσεις XRF.
- **Calc_PSD** : Στο οποίο έγιναν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί σχετικά με την ανάλυση των δεδομένων της ταξινόμησης.

Data_Yerakini	1/2/2022 10:43 πμ.
Data_Yerakini v1.1	27/9/2022 8:49 μμ
Data_Yerakini v1.2	30/1/2023 2:44 μμ
Data_Yerakini v1.3	2/2/2023 3:31 πμ
Data_Yerakini v1.4	20/5/2023 2:35 πμ.
Data_Yerakini v1.4.2	20/5/2023 2:41 πμ
Data_Yerakini v1.4.3	20/5/2023 4:19 πμ
Data_Yerakini v1.4.4	20/5/2023 4:19 πμ
Data_Yerakini v1.5	26/5/2023 10:41 πμ
Data_Yerakini v1.6	21/8/2023 5:38 μμ
Data_Yerakini v1.6.1	29/10/2023 6:49 μμ

№	Μερίδιο	Επιχειρηματίας	ΕΠΙΧ	Τύπος	Επιχειρηματίας	Μηνιαίο Κόστος	Αριθμ. αναμετρήσεων	Κόστος	Απομ.	Επιδόσεις	Μηνιαίο	Ποσοστιαίο
210	14	Ομιση Εργαστηρίου	T	Τροφολογία	24/9/2021	51	-15	43	19	16	85	
211	14	Ομιση Εργαστηρίου	T	Τροφολογία	24/9/2021	51	-16	300	300	144	824	
212	14	Ομιση Εργαστηρίου	T	Τροφολογία	24/9/2021	51	-20	10	302	82	1261	
213	14	Ομιση Εργαστηρίου	T	Τροφολογία	24/9/2021	51	-15	300	1000	235	3791	
214	14	Ομιση Εργαστηρίου	T	Τροφολογία	24/9/2021	51	-15	300	1000	235	3791	

Όνομα	Τιμή	Αναφορά σε	Είδος	Σχόλιο
Alpha9	"9.10";"1.30";"3.06";"0.0.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta1	"33.9%";"39.3%";"50.1.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta10	"2.91";"1.99";"1.42";"2.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta2	"41.3%";"44.3%";"53.2.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta3	"98.4%";"78.0%";"71.1.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta4	"236.2%";"296.8%";"4.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta5	"107.1%";"271.9%";"5.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta6	"83.6%";"60.9%";"49.2.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta7	"51.9%";"50.8%";"42.6.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta8	"85.8%";"90.1%";"92.7.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Beta9	"1.22";"1.13";"1.06";"1.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
dekada	"SE";"OE_na";"OE_gpt.."	=Pearson!\$C52:\$L52	βήθιο εργ..	
Delta1	"3.13";"1.99";"2.02";"1.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	
Delta10	"2.00";"3.82";"3.84";"6.."	=Bivariate Analysis!\$S..	βήθιο εργ..	

Δείκτης	Μηνιαίο Δείκτης	Κλάση	Μέγεθος	Α/Ζ Τροφολογίας	Μ/Ζ Τροφολογίας	Α/Ζ Προϊόντος	Μ/Ζ Προϊόντος	Α/Ζ Απορρόφησης	Μ/Ζ Απορρόφησης
7	4	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0%
8	25/9/2022	4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
9	8	28.00%	29.00%	32.00%	37.00%	20.78%	5.85%	20.78%	73.94%
10	8	28.00%	29.00%	32.00%	37.00%	20.78%	5.85%	20.78%	73.94%
11	10	26.50%	33.61%	40.57%	42.65%	4.26%	70.33%	70.33%	86.4
12	10	26.50%	33.61%	40.57%	42.65%	4.26%	70.33%	70.33%	86.4
13	10	26.50%	33.61%	40.57%	42.65%	4.26%	70.33%	70.33%	86.4
14	10	26.50%	33.61%	40.57%	42.65%	4.26%	70.33%	70.33%	86.4
15	10	26.50%	33.61%	40.57%	42.65%	4.26%	70.33%	70.33%	86.4
16	Σύνολο	28.14%	33.86%	38.58%	22.02%	5.59%	71.32%	71.32%	

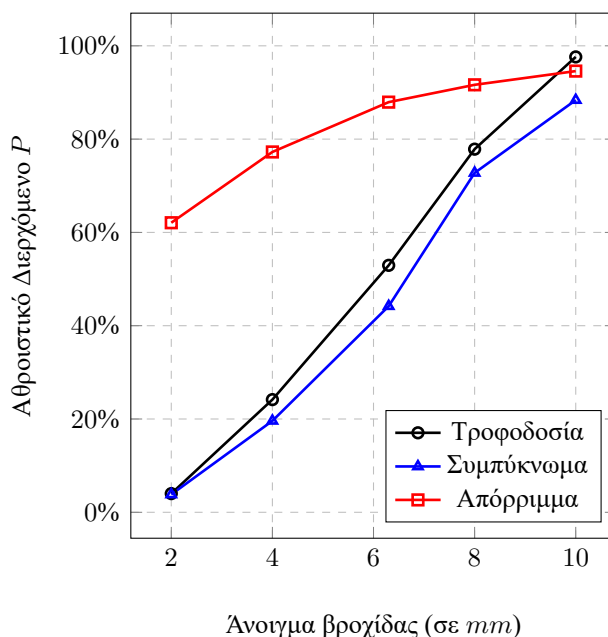
Εικόνα 5.1: Στιγμιότυπα από το περιβάλλον λειτουργίας Microsoft Excel

- **Calc_Bal** : Στο οποίο έγιναν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες σχετικά με τον υπολογισμό των ισοζυγίων κατά τον διαχωρισμό.
- **Calc_Ind** : Στο οποίο έγιναν οι υπολογισμοί διάφορων δεικτών που αφορούν την απόδοση του διαχωρισμού τόσο με τη χρήση των δεδομένων από την χειροδιαλογή όσο και από τις αναλύσεις XRF.
- **All_Calc** : Στο οποίο συγκεντρώθηκαν όλα τα αποτελέσματα των υπολογισμών από τα τρία προηγούμενα φύλλα που αφορούσαν υπολογισμούς.
- **Pearson** : Στο οποίο δημιουργήθηκαν, με τη χρήση ενσωματωμένων εργαλείων του λογισμικού, πίνακες που υπολόγισαν όλες τις πιθανές συσχετίσεις ανάμεσα σε σύνολα δεδομένων, όπως αυτά είχαν οργανωθεί στο φύλλο *All_Calc*.
- **Play** : Στο οποίο γίνονταν δοκιμές και αλλαγές των συναρτήσεων πριν αυτές τοποθετηθούν στα υπόλοιπα φύλλα. Πρακτικά αυτό το υπολογιστικό φύλλο ήταν βοηθητικό ώστε να μην γίνει κάποιο λάθος και προκληθεί "μη-αναστρέψιμη" αλλαγή σε κάποιο από τα υπόλοιπα φύλλα.

5.2 Επικύρωση και καθαρισμός δεδομένων

Το περιβάλλον εργασίας και οι δυνατότητες του λογισμικού έκαναν εύκολο τον εντοπισμό λαθών είτε στην καταχώρηση των δεδομένων ή σε πιθανά "ελαττωματικά δείγματα". Ένα παράδειγμα μιας καλής τέτοιας πρακτικής είναι να ελεγχθεί σε ένα σύνολο δεδομένων ταξι-νόμησης/χειροδιαλογής εάν το άθροισμα των βαρών των λευκών των ενδιάμεσων και των μαύρων κόκκων είναι ίσο με το βάρος του κοκκομετρικού κλάσματος πριν ξεκινήσει η χειροδιαλογή. Σε αυτό το στάδιο μια απόκλιση μερικών γραμμαρίων είναι πιθανή και μπορεί να οφείλεται για παράδειγμα σε λεπτομερές υλικό που μπορεί λόγω της υγρασίας του να έμεινε προσκολλημένο σε κάποιο από τα σκεύη που χρησιμοποιήθηκαν. Μεγαλύτερες διαφορές ανάμεσα σε αυτά τα δύο μεγέθη πρέπει να δημιουργούν προβληματισμό καθώς μειώνουν την αξιοπιστία της διαδικασίας. Φυσικά ένα τέτοιο λάθος μπορεί να οφείλεται και σε λάθος (συχνά λόγω κεκτημένης ταχύτητας) κατά την καταχώρηση των δεδομένων στο υπολογιστικό φύλλο.

Ένα πιο ενδιαφέρον παράδειγμα, αυτή τη φορά εντοπισμού "ελαττωματικού δείγματος", έχει να κάνει με δείγματα μαγνητικού διαχωρισμού, των οποίων η κοκκομετρία του απορρίμματος διαφέρει πολύ από αυτή της τροφοδοσίας και του προϊόντος. Μια τέτοιου είδους επισήμανση δεν έγινε με την παρατήρηση των αριθμητικών τιμών στα κελιά των υπολογιστικών φύλλων, αλλά γραφικά, όταν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό για την δημιουργία γραφικών παραστάσεων της κοκκομετρίας του δείγματος. Το εν λόγω παράδειγμα φαίνεται στο Διάγραμμα 5.1.



Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης Τροφοδοσίας-Απορρίμματος-Προϊόντος από δείγμα του μαγνητικού διαχωριστή (Δείγμα 7.21-22-23)

Το στάδιο αυτό του ελέγχου των δεδομένων για πιθανά σφάλματα είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς με τον εντοπισμό και, όπου είναι δυνατόν, την "διόρθωση" των δεδομένων μειώνεται ο κίνδυνος παραγωγής αποτελεσμάτων που δεν αντικατοπτρίζουν σωστά την πραγματικότητα. Τέτοιου είδους έλεγχοι έγιναν για το σύνολο των δεδομένων με αποτέλεσμα ορισμένα από τα δείγματα να αποκλειστούν από τη συνέχεια της έρευνας. Οι αστοχίες αυτές κρίνεται πως οφείλονται σε λάθη κατά την διαδικασία της δειγματοληψίας.

6. Επεξεργασία δεδομένων

Με την χρήση των συναρτήσεων **VLOOKUP**, **MATCH** και **INDEX** ήταν πολύ εύκολο να γίνεται χρήση των τιμών των κελιών από τα υπολογιστικά φύλλα *Data_Sort* και *Data_XLR*.

6.1 Υπολογισμοί συντελεστών κοκκομετρίας δειγμάτων

Πρώτο βήμα για τον υπολογισμό των συντελεστών που αφορούν τη κοκκομετρία του κάθε δείγματος (Τροφοδοσίας, Προϊόντος, Απορρίμματος) είναι η δημιουργία πίνακα στο υπολογιστικό φύλλο Excel, ο οποίος θα υπολογίζει τις τιμές y και X των συναρτήσεων Rossin-Rammler (1.8) και Gates-Gaudin-Schumman (1.7). Η τιμή X και για τις δυο συναρτήσεις είναι ίδια για κάθε κλάσμα καθώς είναι ο λογάριθμος του μεγέθους, ενώ για τις τιμές y προκύπτουν ξεχωριστές τιμές. Για τον υπολογισμό τους πρώτα πρέπει να δημιουργηθεί στήλη με τις αντίστοιχες για κάθε κλάσμα τιμές του Αθροιστικού Διερχόμενου P και του Αθροιστικού Παραμένου R . Με τη χρήση των παρακάτω συναρτήσεων/εντολών² γίνεται ο υπολογισμός τους και προκύπτει ένας συγκεντρωτικός πίνακας. Ενδεικτικό παράδειγμα αναφέρεται στον Πίνακα 6.1

```
1 =LOG10(LOG10(1/[@Αθροιστικό Παραμένον]))
2 =LOG10(LOG10[@Αθροιστικό Διερχόμενο])
```

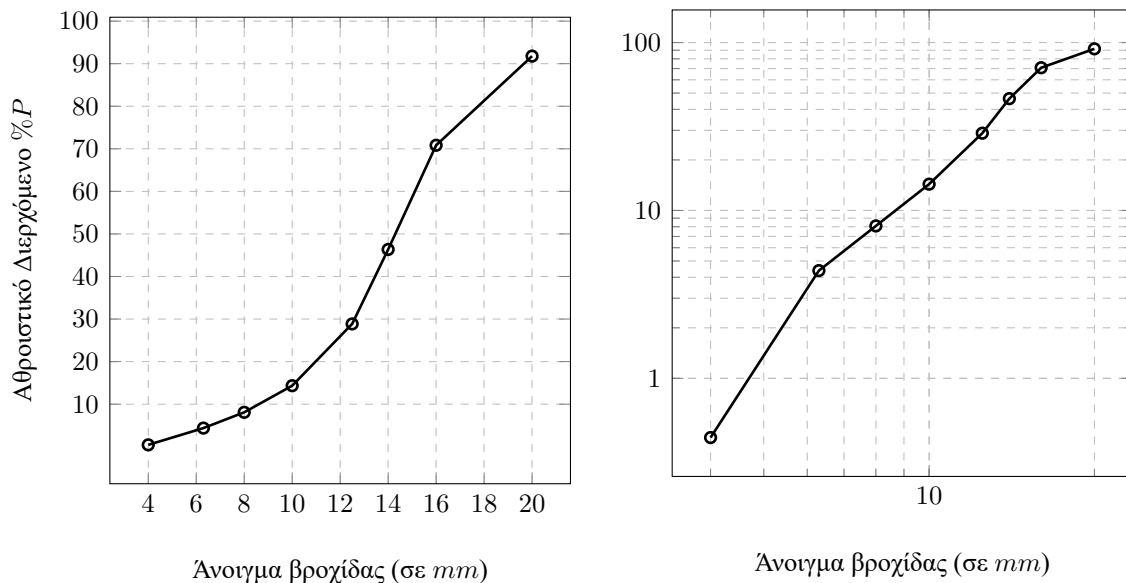
Πίνακας 6.1: Πίνακας κοκκομετρικών δεδομένων δείγματος μετά τον υπολογισμό των λογαρίθμων

Κλάσμα	Μέγεθος Βροχίδας x (mm)	Μάζα (g)	Κοκκομετρική %	Αθροιστικό Διερχόμενο $P\%$	Αθροιστικό Παραμένον $R\%$	$\log x$	$\log(\log \frac{1}{R})$	$\log P$
-4+0	4	277	10,6%	10,6%	89,4%	0,6021	1,3124	0,9743
-6,3+4	6,3	153	5,86%	16,5%	83,53%	0,7993	1,1071	0,7833
-8+6,3	8	397	15,20%	31,7%	68,33%	0,9031	0,7814	0,4993
-10+8	10	606	23,21%	54,9%	45,12%	1,0000	0,4613	0,2606
+10		1178	45,12%	100,0%				

Πλέον τα δεδομένα έχουν μετασχηματιστεί ώστε τα ζεύγη τιμών των στηλών $\log x - \log P$ (Gates-Gaudin-Schumman) να σχηματίζουν μια ευθεία σε ένα διάγραμμα με λογαριθμημένους άξονες, και αντίστοιχα τα ζεύγη τιμών των στηλών $\log x - \log(\log \frac{1}{R})$ (Rossin-Rammler) να σχηματίζουν μια ευθεία σε ένα διάγραμμα με αντίστοιχα λογαριθμημένους άξονες. Παρότι στην πραγματικότητα αυτά τα σημεία δύσκολα θα σχηματίζουν μια τέλεια ευθεία στα

²με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι περιοχές που αντιστοιχούν σε κάποιο κελί αναφοράς, στο περιβάλλον του Microsoft Excel η σύνταξη [*@όνομα στήλης*] αφορά το κελί της ίδιας σειράς της *στήλης* του πίνακα, εάν δεν έχει δημιουργηθεί πίνακας τότε αντί αυτής της σύνταξης βάζουμε το κελί που αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή (π.χ. AD12).

αντίστοιχα διαγράμματα, με την λογαρίθμηση των αξόνων η ευθεία που θα προκύψει από τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων θα είναι αυτή που περιγράφεται από τις σχέσεις (1.7) και (1.8). Οι υπολογισμοί για την κλίση και το σημείο τομής με τον άξονα y μπορεί επίσης



Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα ανοίγματος βροχίδας x - Αθροιστικού διερχόμενου P % σε ορθοκανονικούς άξονες και σε λογαριθμικό σύστημα αξόνων

να υπολογιστεί μέσα από το υπολογιστικό φύλλο με τις παρακάτω συναρτήσεις/εντολές για την συνάρτηση Gates-Gaudin-Shumman¹:

```
3 =SLOPE(Πίνακας[logP];Πίνακας[logx])
4 =INTERCEPT(Πίνακας[logP];Πίνακας[logx])
```

Και για την Rossin-Rammler:

```
5 =SLOPE(Πίνακας[loglog1R];Πίνακας[logx])
6 =INTERCEPT(Πίνακας[loglog1R];Πίνακας[logx])
```

Οι τιμές που θα μας επιστρέψουν οι εντολές **SLOPE** είναι οι συντελεστές ομοιομορφίας m και n ενώ οι τιμές από τις εντολές **INTERCEPT** θα είναι οι αριθμητικές τιμές για την τιμή C όπως παρουσιάζεται στις σχέσεις (1.7) και (1.8). Στη συνέχεια μπορούμε, γνωρίζοντας πλέον τον συντελεστή ομοιομορφίας, να υπολογίσουμε τον συντελεστή μεγέθους k των συναρτήσεων Gates-Gaudin-Schumman και Rossin-Rammler από την τιμή C με τις παρακάτω εντολές²³.

¹ Ανάλογα με τις ρυθμίσεις του λογισμικού Microsoft Excel, μπορεί αντί για σύμβολο του ερωτηματικού ; να αναγνωρίζεται ως διαχωριστικό στις εντολές το σύμβολο "κόμμα",

² Στις εντολές που παρουσιάζονται έχουν σημειωθεί με κόκκινο χρώμα και οι αναφορές σε τιμές από άλλα κελιά με την λειτουργία του Microsoft Excel του "Ορισμού Ονόματος"

³ Η τιμή $-\theta$, 3622 μπορεί επίσης να υπολογιστεί και με τη χρήση της συνάρτησης **=LOG10(LOG10(EXP(1)))**

7

$$=10^{(C_GGS/m)}$$

8

$$=10^{((C_RR-0,3622)/n)}$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε για το δείγμα μας τις τιμές για το "άνω" και "κάτω" όριο του μεγέθους του, που θα μας χρειαστούν για τους μετέπειτα υπολογισμούς μας, θα πρέπει χρησιμοποιήσουμε την λύση των συναρτήσεων Gates-Gaudin-Schumman (1.9) και Rossin-Rammler (1.10) ως προς το μέγεθος x και θα αντικατάστησουμε στα $P(x)$ και $R(x)$ τις τιμές 0,9 και 0,1 ώστε να υπολογίσουμε για ποιο μέγεθος τεμαχίου θα παρέμενε το 90% και για ποιο θα διερχόταν το 90% της ποσότητας του υλικού. Οι αντίστοιχες εντολές στο Microsoft Excel θα είναι για την GGS:

9

$$=k*(0,9)^{(1/m)}$$

10

$$=k*(0,1)^{(1/m)}$$

Ενώ για την RR:

11

$$=-LN(0,1)^{(1/n)}*k$$

12

$$=-LN(0,9)^{(1/n)}*k$$

Με βάση τα παραπάνω, μπορεί πλέον να υπολογιστεί, ο λόγος μέγιστου προς ελάχιστο τεμαχίο και να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη σειρά από δείκτες¹ που αφορούν την κοκκομετρία για κάθε δείγμα (ενδεικτικό παράδειγμα στον Πίνακα 6.2):

6.2 Υπολογισμοί δεικτών από τα αποτελέσματα της χειροδιαλογής

Τα πρωτογενή δεδομένα της χειροδιαλογής είναι της μορφής του Πίνακα 4.1. Από αυτά τα δεδομένα θα πρέπει να υπολογιστούν οι απαραίτητοι δείκτες. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει τα δεδομένα αυτά να μετασχηματιστούν από μάζες σε περιεκτικότητες κατά βάρος. Για να γίνει αυτό αρκεί να διαιρέσουμε τη μάζα των λευκών κόκκων με τη συνολική μάζα του δείγματος, με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό η περιεκτικότητα των λευκών κόκκων στο δείγμα. Φυσικά πρέπει πρώτα να έχει υπολογιστεί το άθροισμα των μαζών του κάθε κοκκομετρικού κλάσματος με τη χρήση των παρακάτω εντολών.

13

$$=SUM(Πίνακας[Άσπρα Τροφοδοσίας])$$

14

$$=SUM(Πίνακας[Ενδιάμεσα Τροφοδοσίας])$$

¹Επειτα από παρατήρηση των δεικτών που αφορούν τον λόγο μεγεθών, προκύπτει πως για το σύνολο των δειγμάτων που εξετάστηκαν ο λόγος αυτός κυμαίνεται από 1,5 ως 3.

Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικός πίνακας δεικτών που αφορούν την κοκκομετρία δείγματος

	Δείγμα 9.35-36-37					
	Τροφοδοσία		Προϊόν		Απόρριμμα	
	GGS	RR	GGS	RR	GGS	RR
Συντελεστής ομοιομορφίας m, n	3,84	4,38	3,70	4,30	4,04	4,69
Συντελεστής μεγέθους k	12,65	11,30	12,60	11,08	12,26	10,85
Διερχόμενο 10% (σε mm)	6,95	6,76	6,76	6,57	6,94	6,72
Διερχόμενο 90% (σε mm)	12,31	13,68	12,24	13,45	11,95	12,96
Λόγος μεγεθών	1,77	2,02	1,81	2,05	1,72	1,93

15 =SUM(Πίνακας[Μαύρα Τροφοδοσίας])
 16 =SUM(Πίνακας[Άσπρα Προϊόντος])
 17 =SUM(Πίνακας[Ενδιάμεσα Προϊόντος])
 18 =SUM(Πίνακας[Μαύρα Προϊόντος])
 19 =SUM(Πίνακας[Άσπρα Απορρίμματος])
 20 =SUM(Πίνακας[Ενδιάμεσα Απορρίμματος])
 21 =SUM(Πίνακας[Μαύρα Απορρίμματος])

Με τα παραπάνω αθροίσματα να έχουν υπολογιστεί μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των συνολικών μαζών¹ κάθε δείγματος²:

22 =SUM(w_f;m_f;b_f)
 23 =SUM(w_c;m_c;b_c)
 24 =SUM(w_t;m_t;b_t)

Και με τα παραπάνω μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των κατά βάρος περιεκτικότητας των άσπρων, ενδιάμεσων και στείων κόκκων του δείγματος:

¹ Παρότι τα δεδομένα της μορφής του Πίνακα 4.1 έχουν στήλη *Σύνολο*, δεν θα υπολογίσουμε το άθροισμα των μαζών όλων των κλασμάτων, καθώς συχνά το μικρότερο κλάσμα αποτελούνταν από ψιλομερείς κόκκους που δεν μπορούσαν να ταξινομηθούν με βάση το χρώμα.

² Στις εντολές για τον υπολογισμό των ποσοστών έχουν ονομαστεί τα αθροίσματα των μαζών με τα γράμματα w, m και b για τους άσπρους κόκκους, τους ενδιάμεσους κόκκους και τους μαύρους κόκκους αντίστοιχα, και με τους δείκτες f, c και t εάν πρόκειται για δείγμα από τροφοδοσία, προϊόν ή απόρριμμα. Αντιστοίχα στη συνέχεια με το γράμμα s αναφέρονται τα αθροίσματα των άσπρων, ενδιάμεσων και μαύρων κόκκων.

25
26
27

```
=w_f/s_f  
=w_c/s_c  
=w_t/s_t
```

Τα παραπάνω είναι οι δείκτες f , c και t της (1.12). Έπειτα με τη χρήση της σχέσης (1.17) μπορούμε να υπολογίσουμε τον λόγο συγκέντρωσης K ως εξής¹:

28

```
=(conc-t)/(f-t)
```

Με τον λόγο συγκέντρωσης να έχει υπολογιστεί, συνεχίζουμε στον υπολογισμό της ανάκτησης R με τη χρήση της σχέσης (1.19), της απώλειας J με τη χρήση της σχέσης (1.21) και τον λόγο R_g με τη χρήση της σχέσης (1.22) με τις αντίστοιχες εντολές που ακολουθούν:

29
30
31

```
=conc/f*indK  
=conc*indK/f  
=(1-conc)/((1-f)*indK)
```

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω, άμεσα μπορούμε να υπολογίσουμε τον δείκτη SE όπως υπολογίζεται από τη σχέση (1.23) με την παρακάτω εντολή:

32

```
=indR-Rg
```

Ο βαθμός αποδέσμευσης μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη σχέση (1.24) για το δείγμα της τροφοδοσίας, του προϊόντος και του απορρίμματος με βάση τις αντίστοιχες εντολές:

33
34
35

```
=SUM(w_f;b_f)/s_f  
=SUM(w_c;b_c)/s_c  
=SUM(w_t;b_t)/s_t
```

Με βάση όλα τα παραπάνω μπορεί πλέον να δημιουργηθεί πίνακας για κάθε δείγμα με όλους τους απαραίτητους δείκτες από την χειροδιαλογή των δειγμάτων, όπως στο ενδεικτικό παράδειγμα του Πίνακα 6.3.

¹ Η λειτουργία του ορισμού ονόματος δεν μπορεί να λειτουργήσει με κεφαλαία γράμματα που θα μπορούσαν να αντιστοιχούν σε ονόματα στηλών όπως το γράμμα R ή K αλλά λειτουργεί με συνδυασμούς κεφαλαίων-πεζών όπως Rg , επίσης δεν λειτουργεί με την χρήση του c και r και c που αντιστοιχούν σε εντολή επιλογής της τρέχουσας σειράς (*row*) και στήλης (*column*) αντίστοιχα. Γι' αυτό τον λόγο παρουσιάζονται οι εντολές με τα κελιά ονοματισμένα ως π.χ. $indK$ αντί για K και $conc$ αντί για c

Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικός πίνακας δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής

Δείγμα 24.87-88-89		
Περιεκτικότητα τροφοδοσίας	f	46,13 %
Περιεκτικότητα προϊόντος	c	53,55 %
Περιεκτικότητα απορρίμματος	t	19,66 %
Λόγος συγκέντρωσης	K	1,28
Ανάκτηση	R	90,68 %
Απώλεια	J	9,32 %
Δείκτης	R_g	67,36 %
Δείκτης	SE	23,31 %
Βαθμός αποδέσμευσης τροφοδοσίας	BA_f	63,99 %
Βαθμός αποδέσμευσης προϊόντος	BA_c	67,25 %
Βαθμός αποδέσμευσης απορρίμματος	BA_t	76,03 %

6.3 Υπολογισμοί δεικτών από τα αποτελέσματα των αναλύσεων XRF

Τα δεδομένα από τις αναλύσεις XRF, όπως αυτά φαίνονται στον Πίνακα 4.2, μπορούν, με τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για τα δεδομένα από την χειροδιαλογή, να φανούν χρήσιμα για την δημιουργία δεικτών αντίστοιχων του Πίνακα 6.3, χωρίς φυσικά να είναι δυνατός ο προσδιορισμός του βαθμού αποδέσμευσης από αυτά.

Οι περιεκτικότητες σε κόκκους μαγνησίτη f , c και t των δειγμάτων τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος αντίστοιχα θα είναι για αυτούς τους υπολογισμούς οι συγκεντρώσεις¹ σε MgO στα δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος, όπως αυτά προέκυψαν από τις αναλύσεις XRF.

Έτσι με δεδομένα τα f , c και t αρκεί να επαναλάβουμε τις εντολές που χρησιμοποιήσαμε πριν για υπολογισμό των K , R , J , R_g και SE στην Ενότητα 6.2.

6.4 Υπολογισμός συσχέτισης τιμών

Για λόγους ευκολίας, αντί να γίνονται όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί ξεχωριστά για κάθε δείγμα, μπορούμε να έχουμε διαμορφώσει έτσι το υπολογιστικό μας φύλλο ώστε να μπορούν οι υπολογισμοί να γίνουν για όλα τα δείγματα. Καθώς όλα τα πρωτογενή δεδομένα (ταξινομήσης, χειροδιαλογής και XRF) βρίσκονται σε διαφορετικά υπολογιστικά φύλλα μπορούμε

¹Όπως είναι ήδη γνωστό, οι μετρήσεις για την συγκέντρωση σε MgO επηρεάζονται και από τα σύνδρομα ορυκτά, όμως αυτά περιέχουν μικρότερες ποσότητες σε Mg και έτσι μειώνουν την συγκέντρωση. Αυτό δεν καθιστά τη μέτρηση μη-αξιοποιήσιμη καθώς για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, που είναι συγκριτική, χρειάζεται να επισημανθεί για την αποφυγή παρανοήσεων.

να ανατρέξουμε σε αυτά με τις συναρτήσεις **VLOOKUP**, **MATCH** και **INDEX**.

Αν ορίσουμε το όνομα ενός κελιού ως **sample** και σε αυτό το κελί έχουμε τον αριθμό του δείγματος, η εντολή

36

```
=VLOOKUP(sample;Πίνακας1[#Όλες];[α/α]:[Μαύρα]);2;FALSE)
```

θα αναζητήσει από τη στήλη **α/α** μέχρι την στήλη **Μαύρα** του **Πίνακας1** του υπολογιστικού φύλλου *Data_Sort* και θα επιστρέψει την τιμή της 2^{ης} στήλης στη σειρά που εντόπισε την τιμή από το κελί **sample**. Με αντίστοιχο τρόπο όλα τα δεδομένα ενός δείγματος μπορούν να εμφανίζονται στο υπολογιστικό φύλλο που γίνονται οι υπολογισμοί και έτσι με απλή αλλαγή της τιμής στο κελί αυτό κάθε φορά να γίνεται ο υπολογισμός όλων των δεικτών.

Για να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των δεικτών συσχέτισης, πρέπει πρώτα να δημιουργήσουμε τα σύνολα όλων αυτών των δεδομένων που θέλουμε ανά δυάδες και να υπολογίσουμε τη συσχέτισή τους. Για να δημιουργήσουμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα όπου θα παρουσιάζονται όλοι οι δείκτες που μας αφορούν από όλα τα δείγματα μπορούμε να κάνουμε χρήση του εργαλείου που παρέχει το λογισμικό Microsoft Excel και βρίσκεται¹ στην καρτέλα **Δεδομένα > Πρόβλεψη > Ανάλυση πιθανοτήτων > Πίνακας δεδομένων...** Για να λειτουργήσει αυτό το εργαλείο θα πρέπει πρώτα να έχουμε φτιάξει έναν κενό πίνακα του οποίου η πρώτη σειρά θα έχει όλους τους δείκτες² που θέλουμε να υπολογίσουμε και η πρώτη στήλη όλους τους αριθμούς των δειγμάτων. Με επιλεγμένο αυτόν τον "κενό" πίνακα επιλέγουμε το εργαλείο "Πίνακας Δεδομένων..." και στο παράθυρο που θα εμφανιστεί επιλέγουμε το κελί **sample** στο κουτί **Κελί εισαγωγής στήλης**. Πατώντας το κουμπί **OK** το Excel θα γεμίσει τις στήλες με τους δείκτες για το δείγμα της κάθε σειράς.

Στη συνέχεια αρκεί να επιλέξουμε την κάθε στήλη με τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν και να τους δώσουμε με τη χρήση λειτουργίας "Ορισμός ονόματος" ένα όνομα. Αυτό παρότι δεν είναι απολύτως απαραίτητο θα κάνει τον υπολογισμό των δεικτών πιο εύκολο και το αποτέλεσμα θα φαίνεται πιο οργανωμένο, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο μπροστά στον δαιδαλώδη όγκο δεδομένων που δημιουργείται.

Η συνάρτηση **CORREL** του Microsoft Excel υπολογίζει τον δείκτη συσχέτισης δυο συνόλων χρησιμοποιώντας την σχέση (1.25). Η σύνταξη για την χρήση της συγκεκριμένης εντολής είναι η εξής:

37

```
=CORREL(σύνολο1, σύνολο2)
```

¹Εαν το περιβάλλον του Microsoft Excel είναι στην αγγλική γλώσσα, το ίδιο εργαλείο εμφανίζεται στην ίδια θέση **Data > Forecast > What-if Analysis > Data Table...**

²Το κάθε κελί θα πρέπει να έχει συνδεδεμένο το κελί του δείκτη που θέλουμε να υπολογίσουμε, εαν π.χ. αυτό το κελί είναι στην θέση **P26** θα εισάγουμε σε αυτό **=R** εαν θέλουμε έχουμε ή αν δεν έχουμε ορίσει όνομα για αυτό, την διεύθυνση του κελιού π.χ. **=H12**

Έστω ό,τι έχουμε ορίσει ως όνομα στο σύνολο των τιμών του δείκτη *SE* **ind_SE** και ως όνομα στο σύνολο των τιμών του συντελεστή ομοιομορφίας *m* (GGS) των δειγμάτων τροφοδοσίας **m_GGS_Feed** τότε η παρακάτω εντολή θα επιστρέψει στο κελί μια τιμή από του συντελεστή συσχέτισης Pearson.

38

```
=CORREL(ind_SE, m_GGS_Feed)
```

Από τα 27 δείγματα της παρούσας μελέτης, οδηγήθηκαν σε ανάλυση XRF αντιπροσωπευτικά δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος μόνο 8 δειγμάτων. Αυτά τα 8 δείγματα διαμορφώνουν τρία σύνολα δεικτών, τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία, τους δείκτες από την χειροδιαλογή και τους δείκτες από την ανάλυση XRF. Για το σύνολο και των 27 δειγμάτων, η ανάλυση συσχέτισης θα γίνει μόνο ανάμεσα στους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία και στους δείκτες από την χειροδιαλογή.

Επομένως, τα σύνολα δεικτών προς ανάλυση συσχέτισης μπορούν να σχηματίσουν τις παρακάτω 5 κατηγορίες:

- **All_Xeir** : Δείκτες από τα δεδομένα της χειροδιαλογής (ανάκτηση, απόδοση, βαθμός αποδέσμευσης κ.α.) και για τα 27 δείγματα.
- **All_PSD** : Δείκτες που αφορούν το κοκκομετρικό προφίλ και των 27 δειγμάτων.
- **XRF_Xeir** : Δείκτες από τα δεδομένα της χειροδιαλογής των 8 δειγμάτων που αναλύθηκαν και με XRF.
- **XRF_PSD** : Δείκτες που αφορούν το κοκκομετρικό προφίλ των 8 δειγμάτων που αναλύθηκαν και με XRF.
- **XRF_XRF** : Δείκτες που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων με XRF από τα 8 δείγματα.

Οι δείκτες που επιλέχθηκαν να συμπεριλαμβάνονται στις κατηγορίες **All_Xeir** και **XRF_Xeir** είναι:

- **f, c, t** : Κατά βάρος περιεκτικότητα % σε τεμάχια αποδεσμευμένου μαγνησίτη στο δείγμα τροφοδοσίας, προϊόντος, απορρίμματος αντίστοιχα
- **K** : Λόγος συγκέντρωσης
- **R** : Ανάκτηση
- **R_g** : Απομάκρυνση στείρων

- **SE** : Απόδοση διαχωρισμού
- **BA_f**, **BA_c**, **BA_t** : Βαθμός αποδέσμευσης στα δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος, απορρίμματος αντίστοιχα

για τις **All_PSD** και **XRF_PSD** είναι:

- **m_{GGS-f}**, **m_{GGS-c}**, **m_{GGS-t}** : Συντελεστής ομοιομορφίας κατά Gates-Gaudin-Schumman στα δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος αντίστοιχα
- **k_{GGS-f}**, **k_{GGS-c}**, **k_{GGS-t}** : Συντελεστής μεγέθους κατά Gates-Gaudin-Schumman στα δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος αντίστοιχα
- **n_{RR-f}**, **n_{RR-c}**, **n_{RR-t}** : Συντελεστής ομοιομορφίας κατά Rossin-Rammler στα δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος αντίστοιχα
- **k_{RR-f}**, **k_{RR-c}**, **k_{RR-t}** : Συντελεστής μεγέθους κατά Rossin-Rammler στα δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος αντίστοιχα
- **λ_{GGS-f}**, **λ_{GGS-c}**, **λ_{GGS-t}** : Λόγος υπερμεγέθους προς υπομέγεθους στα δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος αντίστοιχα
- **λ_{RR-f}**, **λ_{RR-c}**, **λ_{RR-t}** : Λόγος υπερμεγέθους προς υπομέγεθους στα δείγματα τροφοδοσίας, προϊόντος και απορρίμματος αντίστοιχα

για την **XRF_XRF**:

- **c** : Περιεκτικότητα σε *MgO* % στο δείγμα τροφοδοσίας
- **t** : Περιεκτικότητα σε *MgO* % στο δείγμα προϊόντος
- **f** : Περιεκτικότητα σε *MgO* % στο δείγμα απορρίμματος
- **K** : Λόγος συγκέντρωσης
- **R** : Ανάκτηση
- **R_g** : Απομάκρυνση στείρων

Ενδιαφέρον όμως έχει και η αναζήτηση συσχετίσεων ανάμεσα στους δείκτες της ίδιας κατηγορίας. Έτσι, οι απαραίτητοι πίνακες με τους δείκτες συσχέτισης που θα πρέπει να υπολογιστούν θα είναι εννέα, ένας ανάμεσα στις κατηγορίες δεικτών από όλα τα δείγματα, τρεις για τις κατηγορίες από τα δείγματα στα οποία έγινε ανάλυση XRF και άλλες πέντε, για κάθε κατηγορία με τον εαυτό της.

Μέρος Δ΄

Αποτελέσματα και συμπεράσματα

7. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

7.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων ανάλυσης συσχέτισης

7.1.1 Αποτελέσματα ανάλυσης συσχέτισης

Όπως είναι γνωστό από την Ενότητα (1.4), ο συντελεστής συσχέτισης Pearson είναι μια αριθμητική τιμή από -1 έως +1. Οι τιμές που βρίσκονται πιο κοντά στα άκρα (δηλαδή πιο κοντά στο -1 ή στο +1) υποδηλώνουν στην περίπτωση μας πως οι δείκτες που παρουσιάζουν τέτοιο συντελεστή εμφανίζουν κάποια συσχέτιση. Η -κατα τον συντελεστή Pearson- συσχέτιση μπορεί να είναι εν μέρει τυχαία, σίγουρα όμως δεν αποδεικνύει από μόνη της την πραγματική σχέση δύο δεικτών. Στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων λαμβάνεται υπόψη πως:

- Οι δείκτες αυτοί έχουν υπολογιστεί από σχετικά μικρό δείγμα δεδομένων, ειδικά στα δεδομένα από τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF,
- Πως πρόκειται για δείγματα διαφορετικής κοκκομετρίας.
- Πως πρόκειται για δείγματα με διακυμάνσεις ως προς τη σύστασή τους.
- Πως πρόκειται για δείγματα που λήφθηκαν από διαφορετικά μηχανήματα διαχωρισμού που το κάθε ένα αξιοποιεί διαφορετικούς μηχανισμούς για να διαχωρίσει το μέταλλευμα.
- Πως πρόκειται για βιομηχανικά δείγματα.

Με βάση τα παραπάνω:

- Κρίθηκε απαραίτητη η ερμηνεία όχι μόνο των τιμών κοντά στο -1 ή το +1.
- Δείκτες που διαμορφώνουν μεταξύ τους συντελεστή συσχέτισης ακόμα και κοντά στο -0,5 ή το +0,5 (και που αν προέρχονταν από εργαστηριακά δεδομένα δεν θα δημιουργούσαν μεγάλη αξιοπιστία ως προς την ύπαρξη συσχέτισης) χρήζουν αξιολόγησης για πιθανή ισχυρότερη συσχέτιση².

Ακολουθούν οι πίνακες με όλους τους συντελεστές συσχέτισης Pearson με χρωματισμένες τις τιμές που μπορεί να υποδεικνύουν συσχέτιση.

²Για τον ίδιο λόγο, αυτόν της χαμηλής αξιοπιστίας των δεδομένων και οι δείκτες που διαμορφώνουν μεταξύ τους δείκτες συντελεστή συσχέτισης κοντά στο -1 ή το +1 ερμηνεύονται χωρίς να θεωρείται δεδομένο πως υπάρχει πραγματικά ισχυρή συσχέτιση.

Πίνακας 7.1: Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής (οριζόντια) με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία (κάθετα) για το σύνολο των δειγμάτων.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 1										
All_Xeir → All_PSD										
	f	c	t	K	R	R_g	SE	BA_f	BA_c	BA_t
λRR-f	0,128	0,136	0,116	-0,110	-0,174	-0,091	-0,073	0,049	0,340	-0,093
λRR-c	0,461	0,593	0,217	-0,100	0,013	-0,129	0,133	-0,109	0,253	-0,158
λRR-t	0,239	0,399	-0,212	-0,191	0,188	-0,008	0,178	0,171	0,428	0,169
ηRR-f	-0,160	-0,214	-0,034	0,096	0,026	0,066	-0,039	0,097	-0,218	0,099
ηRR-c	-0,312	-0,469	-0,128	0,001	0,002	0,172	-0,160	0,144	-0,177	0,182
ηRR-t	-0,284	-0,374	-0,083	0,253	-0,254	-0,080	-0,154	0,161	-0,062	0,128
λGGS-f	0,222	0,121	0,254	-0,132	-0,103	0,108	-0,202	-0,291	-0,006	-0,271
λGGS-c	0,465	0,571	0,197	-0,050	0,076	-0,079	0,143	-0,220	0,057	-0,179
λGGS-t	0,391	0,438	-0,118	-0,264	0,252	0,177	0,056	-0,005	0,262	0,088
ηGGS-f	-0,031	-0,044	-0,050	0,106	-0,048	-0,024	-0,021	0,157	-0,010	0,018
ηGGS-c	-0,275	-0,442	-0,102	-0,099	-0,073	0,168	-0,225	0,250	0,086	0,180
ηGGS-t	-0,132	-0,268	0,276	0,222	-0,431	-0,092	-0,302	0,116	0,030	-0,090
κRR-f	-0,392	-0,280	-0,227	0,494	0,053	-0,261	0,293	-0,124	-0,662	0,071
κRR-c	-0,470	-0,367	-0,239	0,488	0,052	-0,244	0,276	-0,084	-0,687	0,093
κRR-t	-0,447	-0,314	-0,270	0,552	0,052	-0,286	0,320	-0,096	-0,675	0,094
κGGS-f	-0,352	-0,261	-0,186	0,455	0,071	-0,217	0,273	-0,210	-0,741	0,050
κGGS-c	-0,382	-0,275	-0,180	0,493	0,059	-0,227	0,267	-0,164	-0,720	0,027
κGGS-t	-0,298	-0,180	-0,139	0,498	0,063	-0,236	0,282	-0,212	-0,723	-0,013

Πίνακας 7.2: Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής (οριζόντια) με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία (κάθετα) για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 2										
XRF_Xeir → XRF_PSD										
	f	c	t	K	R	R_g	SE	BA_f	BA_c	BA_t
λRR-f	-0,113	-0,127	0,178	0,017	-0,408	-0,397	-0,129	0,173	0,226	-0,034
λRR-c	0,615	0,715	0,287	-0,067	-0,021	-0,321	0,355	-0,104	0,345	-0,060
λRR-t	-0,507	-0,226	-0,278	0,248	-0,361	-0,639	0,334	-0,252	-0,058	-0,090
nRR-f	0,084	-0,024	-0,120	-0,097	0,384	0,658	-0,219	0,026	-0,204	0,067
nRR-c	-0,540	-0,705	-0,389	-0,183	0,300	0,582	-0,254	0,312	-0,175	0,295
nRR-t	-0,368	-0,361	-0,589	-0,018	0,371	0,408	0,054	0,398	0,160	0,498
λGGS-f	-0,046	-0,098	0,337	0,039	-0,472	-0,402	-0,220	0,052	0,094	-0,183
λGGS-c	0,592	0,718	0,251	-0,004	-0,031	-0,347	0,371	-0,123	0,324	-0,057
λGGS-t	-0,587	-0,268	-0,279	0,360	-0,374	-0,716	0,430	-0,407	-0,255	-0,174
mGGS-f	0,143	0,041	-0,164	-0,170	0,453	0,701	-0,168	0,109	-0,081	0,150
mGGS-c	-0,519	-0,705	-0,396	-0,273	0,339	0,634	-0,257	0,384	-0,096	0,344
mGGS-t	0,605	0,267	0,307	-0,364	0,375	0,755	-0,487	0,324	0,162	0,120
kRR-f	-0,261	-0,005	-0,073	0,822	-0,506	-0,619	-0,009	-0,252	-0,253	-0,201
kRR-c	-0,467	-0,331	0,019	0,823	-0,584	-0,453	-0,325	-0,321	-0,552	-0,359
kRR-t	-0,368	-0,130	-0,167	0,803	-0,449	-0,480	-0,084	-0,231	-0,367	-0,174
kGGS-f	-0,265	-0,015	0,024	0,892	-0,625	-0,697	-0,093	-0,323	-0,327	-0,307
kGGS-c	-0,289	-0,113	0,144	0,911	-0,662	-0,564	-0,308	-0,445	-0,561	-0,475
kGGS-t	-0,116	0,123	0,195	0,930	-0,675	-0,648	-0,235	-0,485	-0,552	-0,506

Πίνακας 7.3: Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής (οριζόντια) με τους δείκτες που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF (κάθεται) για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 3										
XRF_Χειρ → XRF_XRF										
	f	c	t	K	R	R_g	SE	BA_f	BA_c	BA_t
f	0,857	0,883	0,834	0,351	-0,484	-0,280	-0,384	-0,509	-0,162	-0,710
c	0,864	0,806	0,811	0,239	-0,269	-0,001	-0,400	-0,557	-0,328	-0,674
t	0,708	0,611	0,975	0,352	-0,598	-0,219	-0,628	-0,568	-0,405	-0,817
K	-0,405	-0,563	-0,135	-0,193	0,210	0,227	0,039	0,164	-0,184	0,195
R	-0,003	0,245	-0,192	0,287	-0,233	-0,436	0,176	0,085	0,342	0,066
R_g	-0,154	0,047	-0,166	0,263	-0,319	-0,481	0,103	0,201	0,360	0,086
SE	0,456	0,527	-0,027	-0,008	0,325	0,261	0,171	-0,374	-0,151	-0,078

Πίνακας 7.4: Πίνακας συσχέτισης των δεικτών που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF (οριζόντια) με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία (κάθετα) για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 4							
XRF_XRF → XRF_PSD							
	f	c	t	K	R	R_g	SE
λRR-f	0,143	-0,281	0,216	-0,330	0,406	0,611	-0,736
λRR-c	0,589	0,507	0,454	-0,311	0,152	0,030	0,326
λRR-t	-0,037	-0,558	-0,226	-0,432	0,629	0,667	-0,418
ηRR-f	-0,205	0,204	-0,180	0,317	-0,419	-0,560	0,544
ηRR-c	-0,703	-0,441	-0,505	0,522	-0,394	-0,311	-0,139
ηRR-t	-0,533	-0,315	-0,582	0,151	0,012	-0,092	0,357
λGGS-f	0,222	-0,164	0,350	-0,237	0,264	0,493	-0,765
λGGS-c	0,572	0,518	0,427	-0,300	0,158	0,011	0,400
λGGS-t	-0,113	-0,436	-0,228	-0,175	0,382	0,403	-0,244
mGGS-f	-0,181	0,195	-0,202	0,217	-0,331	-0,492	0,578
mGGS-c	-0,700	-0,484	-0,509	0,461	-0,345	-0,245	-0,205
mGGS-t	0,121	0,469	0,266	0,165	-0,408	-0,445	0,312
kRR-f	0,024	0,082	-0,018	0,013	0,198	0,092	0,264
kRR-c	-0,146	-0,057	-0,049	0,235	-0,019	-0,004	-0,041
kRR-t	-0,098	-0,013	-0,143	0,031	0,193	0,082	0,310
kGGS-f	0,081	0,099	0,066	-0,004	0,209	0,133	0,169
kGGS-c	0,059	0,127	0,105	0,114	0,047	0,013	0,089
kGGS-t	0,219	0,298	0,214	0,029	0,090	-0,008	0,305

Πίνακας 7.5: Πίνακας συσχέτισης των δεικτών που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 5							
XRF_XRF → XRF_XRF							
	f	c	t	K	R	R_g	SE
f	1,000	0,837	0,865	-0,555	0,230	0,133	0,229
c	0,837	1,000	0,848	-0,117	-0,261	-0,410	0,523
t	0,865	0,848	1,000	-0,169	-0,163	-0,169	0,064
K	-0,555	-0,117	-0,169	1,000	-0,882	-0,763	-0,112
R	0,230	-0,261	-0,163	-0,882	1,000	0,944	-0,113
R_g	0,133	-0,410	-0,169	-0,763	0,944	1,000	-0,434
SE	0,229	0,523	0,064	-0,112	-0,113	-0,434	1,000

Πίνακας 7.6: Πίνακας συσχέτισης των δεικτών που αφορούν την κοκκομετρία, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 6

XRF_PSD → XRF_PSD

	λ_{RR-f}	λ_{RR-c}	λ_{RR-t}	η_{RR-f}	η_{RR-c}	η_{RR-t}	λ_{GGS-f}	λ_{GGS-c}	λ_{GGS-t}	m_{GGS-f}	m_{GGS-c}	m_{GGS-t}	k_{RR-f}	k_{RR-c}	k_{RR-t}	k_{GGS-f}	k_{GGS-c}	k_{GGS-t}
λ_{RR-f}	1,000	0,219	0,623	-0,841	-0,372	-0,531	0,972	0,144	0,357	-0,798	-0,268	-0,373	-0,275	-0,296	-0,376	-0,184	-0,303	-0,305
λ_{RR-c}	0,219	1,000	0,592	-0,468	-0,892	-0,920	0,212	0,992	0,587	-0,391	-0,875	-0,601	-0,008	-0,508	-0,397	-0,020	-0,301	-0,004
λ_{RR-t}	0,623	0,592	1,000	-0,910	-0,758	-0,984	0,647	0,397	0,924	-0,914	-0,675	-0,917	0,057	0,002	-0,015	0,134	0,034	0,022
η_{RR-f}	-0,841	-0,468	-0,910	1,000	0,681	0,767	-0,847	-0,406	-0,783	0,985	0,624	0,809	0,135	0,267	0,301	0,047	0,204	0,138
η_{RR-c}	-0,372	-0,892	-0,758	0,681	1,000	0,870	-0,392	-0,872	-0,719	0,636	0,988	0,734	-0,046	0,343	0,194	-0,085	0,127	-0,137
η_{RR-t}	-0,531	-0,920	-0,984	0,767	0,870	1,000	-0,678	-0,857	-0,964	0,791	0,825	0,969	0,371	0,392	0,525	0,260	0,257	0,180
λ_{GGS-f}	0,972	0,212	0,647	-0,847	-0,392	-0,678	1,000	0,125	0,404	-0,833	-0,299	-0,420	-0,332	-0,275	-0,444	-0,220	-0,276	-0,296
λ_{GGS-c}	0,144	0,992	0,397	-0,406	-0,872	-0,857	0,125	1,000	0,487	-0,331	-0,869	-0,493	0,100	-0,429	-0,218	0,078	-0,215	0,187
λ_{GGS-t}	0,357	0,587	0,924	-0,783	-0,719	-0,964	0,404	0,487	1,000	-0,840	-0,722	-0,992	0,275	0,253	0,210	0,332	0,267	0,250
m_{GGS-f}	-0,798	-0,391	-0,914	0,985	0,636	0,791	-0,833	-0,331	-0,840	1,000	0,596	0,866	0,093	0,156	0,249	-0,009	0,101	0,061
m_{GGS-c}	-0,268	-0,875	-0,675	0,624	0,988	0,825	-0,299	-0,869	-0,722	0,596	1,000	0,737	-0,158	0,228	0,055	-0,196	0,004	-0,288
m_{GGS-t}	-0,373	-0,601	-0,917	0,809	0,734	0,969	-0,420	-0,493	-0,992	0,866	0,737	1,000	-0,288	-0,267	-0,217	-0,345	-0,276	-0,256
k_{RR-f}	-0,275	-0,008	0,057	0,135	-0,046	0,371	-0,332	0,100	0,275	0,093	-0,158	-0,288	1,000	0,813	0,982	0,988	0,885	0,962
k_{RR-c}	-0,296	-0,508	0,002	0,267	0,343	0,392	-0,275	-0,429	0,253	0,156	0,228	-0,267	0,813	1,000	0,976	0,846	0,969	0,951
k_{RR-t}	-0,376	-0,397	-0,015	0,301	0,194	0,525	-0,444	-0,218	0,210	0,249	0,055	-0,217	0,982	0,976	1,000	0,953	0,948	0,913
k_{GGS-f}	-0,184	-0,020	0,134	0,047	-0,085	0,260	-0,220	0,078	0,332	-0,009	-0,196	-0,345	0,988	0,846	0,953	1,000	0,921	0,972
k_{GGS-c}	-0,303	-0,301	0,034	0,204	0,127	0,257	-0,276	-0,215	0,267	0,101	0,004	-0,276	0,885	0,969	0,948	0,921	1,000	0,994
k_{GGS-t}	-0,305	-0,004	0,022	0,138	-0,137	0,180	-0,296	0,187	0,250	0,061	-0,288	-0,256	0,962	0,951	0,913	0,972	0,994	1,000

Πίνακας 7.7: Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 7										
XRF_Xeir → XRF_Xeir										
	f	c	t	K	R	R_g	SE	BA_f	BA_c	BA_t
f	1,000	0,932	0,667	-0,104	0,008	0,181	-0,205	-0,281	0,053	-0,413
c	0,932	1,000	0,545	0,094	-0,084	-0,086	-0,021	-0,313	0,120	-0,385
t	0,667	0,545	1,000	0,360	-0,613	-0,170	-0,708	-0,576	-0,472	-0,864
K	-0,104	0,094	0,360	1,000	-0,877	-0,746	-0,408	-0,546	-0,531	-0,646
R	0,008	-0,084	-0,613	-0,877	1,000	0,744	0,595	0,528	0,522	0,759
R_g	0,181	-0,086	-0,170	-0,746	0,744	1,000	-0,095	0,284	0,100	0,331
SE	-0,205	-0,021	-0,708	-0,408	0,595	-0,095	1,000	0,444	0,657	0,732
BA_f	-0,281	-0,313	-0,576	-0,546	0,528	0,284	0,444	1,000	0,857	0,863
BA_c	0,053	0,120	-0,472	-0,531	0,522	0,100	0,657	0,857	1,000	0,785
BA_t	-0,413	-0,385	-0,864	-0,646	0,759	0,331	0,732	0,863	0,785	1,000

Πίνακας 7.8: Πίνακας συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής, μεταξύ τους, για το σύνολο των δειγμάτων.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 8										
All_Xeir → All_Xeir										
	f	c	t	K	R	R_g	SE	BA_f	BA_c	BA_t
f	1,000	0,841	0,604	-0,509	-0,005	0,584	-0,550	-0,480	0,243	-0,434
c	0,841	1,000	0,413	-0,245	0,046	0,162	-0,111	-0,173	0,292	-0,221
t	0,604	0,413	1,000	-0,020	-0,588	0,182	-0,684	-0,566	-0,024	-0,825
K	-0,509	-0,245	-0,020	1,000	-0,477	-0,774	0,307	0,109	-0,454	-0,154
R	-0,005	0,046	-0,588	-0,477	1,000	0,390	0,509	0,198	-0,113	0,600
R_g	0,584	0,162	0,182	-0,774	0,390	1,000	-0,594	-0,482	0,011	-0,125
SE	-0,550	-0,111	-0,684	0,307	0,509	-0,594	1,000	0,624	-0,110	0,640
BA_f	-0,480	-0,173	-0,566	0,109	0,198	-0,482	0,624	1,000	0,455	0,762
BA_c	0,243	0,292	-0,024	-0,454	-0,113	0,011	-0,110	0,455	1,000	0,189
BA_t	-0,434	-0,221	-0,825	-0,154	0,600	-0,125	0,640	0,762	0,189	1,000

Πίνακας 7.9: Πίνακας συσχέτισης των δεικτών που αφορούν την κοκκομετρία, μεταξύ τους, για το σύνολο των δειγμάτων.

Πίνακας Αποτελεσμάτων 9

All_PSD → All_PSD

	λ_{RR-f}	λ_{RR-c}	λ_{RR-t}	η_{RR-f}	η_{RR-c}	η_{RR-t}	λ_{GGS-f}	λ_{GGS-c}	λ_{GGS-t}	m_{GGS-f}	m_{GGS-c}	m_{GGS-t}	k_{RR-f}	k_{RR-c}	k_{RR-t}	k_{GGS-f}	k_{GGS-c}	k_{GGS-t}
λ_{RR-f}	1,000	0,378	0,651	-0,882	-0,565	-0,654	0,913	0,267	0,590	-0,669	-0,428	-0,562	-0,410	-0,391	-0,476	-0,298	-0,352	-0,336
λ_{RR-c}	0,378	1,000	0,767	-0,516	-0,855	-0,702	0,293	0,939	0,622	-0,305	-0,773	-0,609	-0,254	-0,446	-0,436	-0,247	-0,334	-0,248
λ_{RR-t}	0,651	0,767	1,000	-0,770	-0,747	-0,798	0,545	0,561	0,890	-0,625	-0,612	-0,741	-0,456	-0,420	-0,509	-0,353	-0,351	-0,346
η_{RR-f}	-0,882	-0,516	-0,770	1,000	0,744	0,802	-0,857	-0,426	-0,715	0,834	0,659	0,751	0,325	0,319	0,391	0,181	0,250	0,214
η_{RR-c}	-0,565	-0,855	-0,747	0,744	1,000	0,760	-0,500	-0,797	-0,645	0,578	0,935	0,696	0,219	0,333	0,313	0,149	0,209	0,133
η_{RR-t}	-0,654	-0,702	-0,798	0,802	0,760	1,000	-0,656	-0,604	-0,723	0,691	0,680	0,982	0,326	0,299	0,397	0,195	0,219	0,197
λ_{GGS-f}	0,913	0,293	0,545	-0,857	-0,500	-0,656	1,000	0,279	0,654	-0,866	-0,477	-0,593	-0,159	-0,121	-0,260	-0,015	-0,066	-0,062
λ_{GGS-c}	0,267	0,939	0,561	-0,426	-0,797	-0,604	0,279	1,000	0,650	-0,262	-0,823	-0,573	0,007	-0,226	-0,074	0,021	-0,088	0,149
λ_{GGS-t}	0,590	0,622	0,890	-0,715	-0,645	-0,723	0,654	0,650	1,000	-0,582	-0,642	-0,726	-0,211	-0,191	-0,296	-0,053	-0,103	-0,089
m_{GGS-f}	-0,669	-0,305	-0,625	0,834	0,578	0,691	-0,866	-0,262	-0,582	1,000	0,576	0,671	0,171	0,152	0,230	-0,051	0,083	0,069
m_{GGS-c}	-0,428	-0,773	-0,612	0,659	0,935	0,680	-0,477	-0,823	-0,642	0,576	1,000	0,678	-0,073	0,050	0,005	-0,165	-0,092	-0,200
m_{GGS-t}	-0,562	-0,609	-0,741	0,751	0,696	0,982	-0,593	-0,573	-0,726	0,671	0,678	1,000	0,090	0,063	0,155	-0,062	-0,011	-0,017
k_{RR-f}	-0,410	-0,254	-0,456	0,325	0,219	0,326	-0,159	0,007	-0,211	0,171	-0,073	0,090	1,000	0,947	0,985	0,986	0,965	0,979
k_{RR-c}	-0,391	-0,446	-0,420	0,319	0,333	0,299	-0,121	-0,226	-0,191	0,152	0,050	0,063	0,947	1,000	0,974	0,949	0,985	0,975
k_{RR-t}	-0,476	-0,436	-0,509	0,391	0,313	0,397	-0,260	-0,074	-0,296	0,230	0,005	0,155	0,985	0,974	1,000	0,958	0,963	0,957
k_{GGS-f}	-0,298	-0,247	-0,353	0,181	0,149	0,195	-0,015	0,021	-0,053	-0,051	-0,165	-0,062	0,986	0,949	0,958	1,000	0,979	0,993
k_{GGS-c}	-0,352	-0,334	-0,351	0,250	0,209	0,219	-0,066	-0,088	-0,103	0,083	-0,092	-0,011	0,965	0,985	0,963	0,979	1,000	0,995
k_{GGS-t}	-0,336	-0,248	-0,346	0,214	0,133	0,197	-0,062	0,149	-0,089	0,069	-0,200	-0,017	0,979	0,975	0,957	0,993	0,995	1,000

7.1.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Η προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων γίνεται ανάμεσα σε δείκτες που εμφανίζουν συσχέτιση, χωρίς όμως να σχολιάζεται η έλλειψη εμφάνισης συσχέτισης ανάμεσα σε δείκτες που θεωρητικά θα έπρεπε να εμφανίζουν συσχέτιση. Σε κάθε περίπτωση, λόγω της φύσης του πειράματος, από την ερμηνεία που ακολουθεί δεν μπορεί να αποδειχθεί σχέση μεταξύ αιτίου και αιτιατού ανάμεσα στους προς εξέταση δείκτες, παρά μόνο να επιβεβαιωθούν υπάρχουσες συσχετίσεις και να αξιολογηθούν πιθανές αποκλίσεις από αυτές. Στην ερμηνεία που ακολουθεί έγινε προσπάθεια αποφυγής σχολιασμού των συσχετίσεων που δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς την δημιουργία συμπερασμάτων.

Υπενθυμίζεται πως η "ένταση" της συσχέτισης δεν εξαρτάται από το πρόσημο (+ ή -) του συντελεστή συσχέτισης αλλά από το πόσο αυτός πλησιάζει τις τιμές -1 ή +1.

Ο όγκος της πληροφορίας των αποτελεσμάτων είναι πολύ μεγάλος. Διαφορετικοί μελετητές ενδέχεται να ερμηνεύσουν διαφορετικά τα παραπάνω δεδομένα και αρκετές χρήσιμες παρατηρήσεις ενδέχεται να παραβλεφθούν λόγω της πολυπλοκότητας και της έκτασης των αποτελεσμάτων.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.1

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία για το σύνολο των δειγμάτων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Παρατηρείται αρνητική συσχέτιση του δείκτη για τον βαθμό αποδέσμευσης στο προϊόν BA_c με τους δείκτες μεγέθους k . Το οποίο συνεπάγεται πως δείγματα μεγαλύτερης κοκκομετρίας δίνουν προϊόντα που περιέχουν αρκετούς ενδιάμεσους κόκκους.
2. Παρατηρείται θετική συσχέτιση του λόγου εμπλουτισμού K με τους δείκτες μεγέθους k .
3. Παρατηρείται αρνητική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών μεγέθους k και της περιεκτικότητας στα δείγματα της τροφοδοσίας f . Αυτό δικαιολογείται καθώς τα δεδομένα προκύπτουν από χειροδιαλογή, που θεωρεί τους ενδιάμεσους κόκκους ως στείρους, με την αύξηση του μεγέθους μειώνεται ο βαθμός αποδέσμευσης και έτσι εμφανίζονται μειωμένες οι περιεκτικότητες.
4. Παρατηρείται θετική συσχέτιση του λόγου μεγεθών στα δείγματα του προϊόντος με την περιεκτικότητα στα δείγματα της τροφοδοσίας. Αυτό μπορεί να σημαίνει πιο επιτυχημένο διαχωρισμό στα ακραία κοκκομετρικά κλάσματα του υλικού.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.2

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Παρατηρείται πως τα δείγματα με υψηλότερους συντελεστές ομοιομορφίας εμφανίζουν χειρότερη συμπεριφορά στην απομάκρυνση των στείων R_g .
2. Παρατηρείται πως δείγματα μεγαλύτερης κοκκομετρίας, εμφανίζουν καλύτερους δείκτες ανάκτησης R , χαμηλότερους δείκτες απομάκρυνσης των στείων R_g .
3. Παρατηρείται πως δείγματα μεγαλύτερης κοκκομετρίας, εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές στον λόγο συγκέντρωσης K .
4. Παρατηρείται πως υπάρχει ισχυρή αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στον λόγο μεγεθών των τεμαχίων στο απόρριμμα και στον δείκτη για την απομάκρυνση των στείων.
5. Παρατηρείται ασθενής αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στο μέγεθος των τεμαχίων k και στον βαθμό αποδέσμευσης.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.3

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής με τους δείκτες που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Παρατηρείται ισχυρή θετική συσχέτιση ανάμεσα στις περιεκτικότητες όπως αυτές υπολογίστηκαν από τα δεδομένα της χειροδιαλογής και από την ανάλυση με XRF. Η μη-”τέλεια” συσχέτιση αιτιολογείται καθώς η περιεκτικότητα όπως υπολογίζεται από την ανάλυση XRF λαμβάνει υπόψη και την ύπαρξη Mg και στα στεία.
2. Παρατηρείται αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στους βαθμούς αποδέσμευσης και στην περιεκτικότητα των δειγμάτων όπως υπολογίστηκε από την ανάλυση XRF.
3. Παρατηρείται ασθενής αρνητική συσχέτιση στους δείκτες R , R_g και SE με τους υπολογισμένους από τα δεδομένα XRF. Η μη-ισχυρή συσχέτισή τους και το γεγονός πως πρόκειται για ασθενή συσχέτιση υποδεικνύει πως στην πράξη πρόκειται για διαφορετικούς δείκτες ανάλογα με το αν υπολογίστηκαν από δεδομένα χειροδιαλογής ή XRF.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.4

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης των δεικτών που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF με τους δείκτες που αφορούν την κοκκομετρία για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Δεν παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή μεγέθους **k** των δειγμάτων με κανέναν από τους δείκτες από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF. Η ανάλυση XRF μετράει και το Μαγνησιο που βρίσκεται και στα ενδιάμεσα τεμάχια, τα οποία είναι περισσότερα όσο το μέγεθος μεγαλώνει.
2. Παρατηρείται αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στους συντελεστές ομοιομορφίας **n** και **m** των δειγμάτων προϊόντος με τις περιεκτικότητες **f**, **c** και **t**. Χαμηλότεροι συντελεστές ομοιομορφίας στο προϊόν σημαίνει πιο ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους απαλλαγμένη ενδεχομένως από μεγαλύτερα τεμάχια που είναι στείρα/ενδιάμεσα.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.5

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης των δεικτών που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα των αναλύσεων XRF, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Παρατηρείται αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στον δείκτη που αφορά την απομάκρυνση των στείρων και της περιεκτικότητας στο προϊόν. Αυτό αν και φαίνεται παράδοξο, είναι λογικό καθώς η αύξηση στην περιεκτικότητα σε *Mg* στο προϊόν μπορεί να προέρχεται και από τις σημαντικές ποσότητες *Mg* που υπάρχουν στα στείρα, τα οποία η ανάλυση με XRF δεν μπορεί να αναγνωρίσει.
2. Η υψηλή συσχέτιση ανάμεσα στις περιεκτικότητες των δειγμάτων δεν παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον μελέτης, επειδή οι τιμές των περιεκτικότητων από αναλύσεις XRF είναι επιβαρυνμένες και από το *Mg* που βρίσκεται στα στείρα. Αυτές οι τιμές παρουσιάζουν ισχυρότερες συσχετίσεις από ό,τι οι αντίστοιχες από τις περιεκτικότητες που υπολογίζονται από τα δεδομένα της χειροδιαλογής.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.6

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης των δεικτών που αφορούν την κοκκομετρία, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Η ύπαρξη πολλών συσχετίσεων ανάμεσα στους συντελεστές ομοιομορφίας και τους λόγους μεγεθών υποδεικνύει πως υπάρχει διαφοροποίηση στην συμπεριφορά των κοκκομετρικών κλασμάτων κατά τον διαχωρισμό.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.7

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης των δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής, μεταξύ τους, για τα 8 δείγματα που αναλύθηκαν και με XRF, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Παρατηρείται θετική συσχέτιση ανάμεσα στους βαθμούς αποδέσμευσης και στους δείκτες **R** και **SE**.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.8

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης δεικτών από τα δεδομένα της χειροδιαλογής, μεταξύ τους, για το σύνολο των δειγμάτων, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Παρατηρείται έλλειψη συσχέτισης ανάμεσα στην ανάκτηση **R** και τις περιεκτικότητες των δειγμάτων τροφοδοσίας και προϊόντος.
2. Παρατηρείται αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στον βαθμό αποδέσμευσης στα δείγματα της τροφοδοσίας και στην απομάκρυνση των στείων **R_g**. Η υψηλή αποδέσμευση στην τροφοδοσία σημαίνει λιγότερα ενδιάμεσα τεμάχια, αυτά θεωρούνται στείρα στους δείκτες από τα δεδομένα της χειροδιαλογής και έτσι με την συγκέντρωσή τους στο απόρριμμα παρουσιάζεται μειωμένος ο δείκτης **R_g**.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.9

Μετά από μελέτη του πίνακα συσχέτισης των δεικτών που αφορούν την κοκκομετρία, μεταξύ τους, για το σύνολο των δειγμάτων, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Παρατηρούνται υψηλές συσχετίσεις ανάμεσα στους κοκκομετρικούς δείκτες των δειγμάτων της τροφοδοσίας και στα δείγματα του απορρίμματος και του προϊόντος. Αυτό υποδεικνύει μεταβολή του κοκκομετρικού προφίλ της τροφοδοσίας στο προϊόν και το απόρριμμα.

8. Συμπεράσματα

8.1 Συμπεράσματα

Από την διαδικασία της ερμηνείας των αποτελεσμάτων από την ανάλυση συσχέτισης προκύπτουν τα παρακάτω:

- Τα δείγματα με υψηλούς δείκτες ομοιομορφίας **n** και **m** που εξετάστηκαν, εμφανίζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε ό,τι αφορά τους δείκτες **R**, **R_g** και **SE** όταν αυτοί υπολογίζονται με δεδομένα από χειροδιαλογή.
- Τα δείγματα με υψηλούς δείκτες ομοιομορφίας **n** και **m** που εξετάστηκαν, εμφανίζουν **όχι καλή** συμπεριφορά σε ό,τι αφορά τους δείκτες **R**, **R_g** και **SE** όταν αυτοί υπολογίζονται με δεδομένα από ανάλυση XRF.
- Τα δείγματα μικρότερης κοκκομετρίας, που εξετάστηκαν, εμφανίζουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδέσμευσης και εμφανίζουν λιγότερα ενδιάμεσα τεμάχια στο προϊόν.
- Για τα δείγματα που εξετάστηκαν, τα δεδομένα από τις αναλύσεις XRF εμφανίζονται ανεπαρκή να αξιολογήσουν την πραγματική απόμάκρυνση των στείων κόκκων.
- Για τα δείγματα που εξετάστηκαν, τα δεδομένα από τις αναλύσεις XRF εμφανίζονται ανεπαρκή να αξιολογήσουν τον βαθμό απόδέσμευσης των υλικών.
- Για τα δείγματα που εξετάστηκαν, οι δείκτες **R**, **R_g** και **SE** δεν φαίνεται να εξαρτώνται σημαντικά από την περιεκτικότητα στα δείγματα τροφοδοσίας.
- Για τα δείγματα που εξετάστηκαν, τα δεδομένα των κοκκομετρικών αναλύσεων εμφανίζουν αυξομειώσεις στην ομοιομορφία και στον λόγο μεγεθών ανάμεσα στα δείγματα της τροφοδοσίας, του προϊόντος και του απόρριμματος. Από την αλλαγή στο κοκκομετρικό προφίλ ανάμεσα στην τροφοδοσία και στο προϊόν, ή ανάμεσα στην τροφοδοσία και στο απόρριμμα, συμπεραίνεται πως κάθε κοκκομετρικό κλάσμα του ίδιου δείγματος τροφοδοσίας εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά στον διαχωρισμό.

Για την αξιολόγηση των παραπάνω αλλά και για μελλοντική μελέτη είναι απαραίτητη η επισήμανση πως:

- Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson δεν είναι το ιδανικό "εργαλείο" για την εύρεση πραγματικών συσχετίσεων, καθώς μπορεί να παρουσιάζει πολύ ισχυρές θετικές ή αρνητικές συσχετίσεις ανάμεσα σε δύο σύνολα, όταν με την αύξηση ή τη μείωση του

ενός, το δεύτερο εμφανίζει πολύ μικρές, αν και σταθερές, αλλαγές. Η μελέτη συσχέτισης πρέπει να επιβεβαιώνεται με τις αντίστοιχες τιμές της κλίσης (slope) που μπορεί να υπολογιστεί με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αν αυτή είναι πολύ κοντά στο μηδέν, τότε η ύπαρξη πραγματικής συσχέτισης πρέπει να απορριφθεί.

- Στο σύνολο της μελέτης δεν αξιοποιήθηκαν πλήρως όλα τα δεδομένα XRF που λήφθηκαν, καθώς εξετάστηκαν μόνο οι συγκεντρώσεις σε MgO . Θα μπορούσε να έχει μελετηθεί η συμπεριφορά και άλλων στοιχείων κατα τον διαχωρισμό, ειδικά του σιδήρου (Fe) για δείγματα που διαχωρίστηκαν με μαγνητικούς διαχωριστές ή η αξιοποίηση των δεδομένων από τα δείγματα των άσπρων και ενδιάμεσων κόκκων που επίσης αναλύθηκαν με την μέθοδο XRF.
- Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση με XRF έχουν χαμηλότερη αξιοπιστία λόγω του μικρότερου αριθμού δειγμάτων από τα οποία διαμορφώθηκαν.
- Η μελέτη είχε περιορισμένο αριθμό δειγμάτων για το εύρος των περιπτώσεων που εξέτασε καθώς στην μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δείγματα που δεν είχαν όλα το ίδιο κοκκομετρικό προφίλ, διαχωρίστηκαν από διαφορετικά μηχανήματα εμπλουτισμού με διαφορετικές αρχές λειτουργίας και δεν είχαν όλα τα δείγματα την ίδια σύσταση. Μια μελέτη μεγαλύτερης έκτασης θα δημιουργούσε πιο ασφαλή συμπεράσματα ειδικά αν περιοριζόταν σε μια μέθοδο εμπλουτισμού.

Μέρος Ε΄

Βιβλιογραφία

Βιβλιογραφία

- Berman, J. J. (2016). Chapter 4 - understanding your data. In J. J. Berman (Ed.), *Data simplification* (p. 168). Morgan Kaufmann. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803781-2.00004-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803781-2.00004-7)
- Das, A., & Young, C. A. (2019). Mineral properties and processing. In R. C. Dunne, S. K. Kawatra, & C. A. Young (Eds.), *Sme mineral processing extractive metallurgy handbook*. Society for Mining, Metallurgy, Exploration.
- Gleeson, D. (2023). Tomra's latest xrt advances open up processing options for miners. *International Mining*. <https://im-mining.com/2023/03/07/tomras-latest-xrt-advances-open-up-processing-options-for-miners/>
- Gupta, A., & Yan, D. S. (2016). *Mineral processing design and operations: An introduction* (2nd ed.). Elsevier.
- LeVier, M. D. (2019). Analytical testing. In R. C. Dunne, S. K. Kawatra, & C. A. Young (Eds.), *Sme mineral processing extractive metallurgy handbook* (pp. 22–23). Society for Mining, Metallurgy, Exploration.
- Lynch, D. C. (2019). Magnesium minerals and metal. In R. C. Dunne, S. K. Kawatra, & C. A. Young (Eds.), *Sme mineral processing extractive metallurgy handbook* (pp. 1855–1856). Society for Mining, Metallurgy, Exploration.
- Mular, A. L. (2003). Size separation. In M. C. Fuerstenau & K. N. Han (Eds.), *Principles of mineral processing* (pp. 119–121). Society for Mining, Metallurgy Exploration.
- Καρλής, Δ. (2003). *Πολυμεταβλητή συστατιστική ανάλυση*. Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Παπαδόπουλος, Α. Α. (2007). Παραγωγή και εφαρμογές εμπορικών τύπων βωξίτη κλεισούρας και μαγνησίτη γερακινής. <https://doi.org/10.26262/HEAL.AUTH.IR.80317>
- Σταμπολτζής, Γ. Α. (1994). *Μηχανική Προπαρασκευή Μεταλλευμάτων Βιομηχανικών Ορυκτών και Πετρωμάτων (Υδροαντοκαθαρισμός - Κατάτμηση - Ταξινόμηση)*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Φραγκίσκος, Α. Ζ. (1995). *Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών (ορυκτοурγία)*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.