



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάκτηση βαρέων ορυκτών από απορρίμματα εμπλουτισμού.
Η περίπτωση των παραθαλάσσιων άμμων του κόλπου Θορικού, Λαύριο.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παπαναστασίου Αναστάσιος

Επιβλέπων: Γεώργιος Αναστασάκης Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάκτηση βαρέων ορυκτών από απορρίμματα εμπλουτισμού.

Η περίπτωση των παραθαλάσσιων άμμων του κόλπου Θορικού στο Λαύριο.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παπαναστασίου Αναστάσιος

Επιβλέπων: Γεώργιος Αναστασάκης Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 21/10/2021

Γεώργιος Αναστασάκης, Καθηγητής (Υπογραφή)

Κωνσταντίνος Τσακαλάκης, Καθηγητής (Υπογραφή)

Σταύρος Τριανταφυλλίδης, Επίκουρος Καθηγητής (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2020-2021 στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αποτελεί μια προσπάθεια ανάκτησης βαρέων ορυκτών από απορρίμματα διεργασιών εμπλουτισμού από τα μεταλλεία της περιοχή του Λαυρίου, με την μέθοδο της παλλόμενης τράπεζας και με την μέθοδο της επίπλευσης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γιώργο Αναστασάκη για όλη την βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ, ιδιαίτερα, τον κ Σταύρο Τριανταφυλλίδη για την προμήθεια των δειγμάτων για την εργασία, την κα. Ευαγγελία Μυλωνά για τις χημικές αναλύσεις και τον κ. Ηλία Σαμμά για την πάντοτε καλή διάθεση να βοηθήσει και να στηρίζει την όλη προσπάθεια μου, και τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Τσακαλάκη.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Προϊστάμενο μου κ. Γιώργο Κάρκα και στον Διευθυντή μου κ. Δημήτρη Δημητριάδη, για την πολύτιμη συμβολή τους σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, σε όλους τους φίλους μου και συναδέλφους, που μου συμπαραστάθηκαν σε όλη την διάρκεια των προσπαθειών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τις διάφορες διεργασίες εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων δημιουργούνται ποσότητες απορριμμάτων, δηλαδή υλικά τα οποία δεν είναι χρήσιμα ή οικονομικά εκμεταλλεύσιμα και τα οποία καταλήγουν σε ειδικούς χώρους απόθεσης. Τα υλικά αυτά εκτός από απορρίμματα περιέχουν και χρήσιμα συστατικά, τα οποία δεν έγινε δυνατό να ανακτηθούν κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα σχετικά μικρό ποσοστό χρήσιμων συστατικών να χάνεται. Το χρήσιμο αυτό υλικό καθώς και το υλικό που αποτελεί το απόρριμμα, τις περισσότερες φορές περιέχει βαρέα μέταλλα / ορυκτά σε μορφή λεπτομερών τεμαχίων. Τα τεμάχια αυτά εν δυνάμει μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στο περιβάλλον καθώς και στον ανθρώπινο πληθυσμό.

Για το σκοπό της παρούσας πτυχιακής εργασίας συλλέχθηκαν δείγματα από την παραλία Θορικού του Λαυρίου. Τα απορρίμματα εμπλουτισμού της επίπλευσης ανέρχονται σε 5.000.000 τόνους, και καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση των αποθέσεων στην ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου.

Για την ανάκτηση των βαρέων ορυκτών από τα απορρίμματα, έγιναν, σε διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα, τρεις σειρές πειραμάτων. Κατ' αρχή έγιναν προκαταρκτικές δοκιμές με την μέθοδο των βαρέων υγρών, πρώτη δοκιμή σε ειδικό βάρος 2,97 και δεύτερη δοκιμή σε ειδικό βάρος 3,32. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπιστώθηκε ότι ο μέγιστος βαθμός αποδέσμευσης του αρχικού μεταλλεύματος συναντάται στο κοκκομετρικό κλάσμα $-300+150\mu\text{m}$, με μεγαλύτερες κατανομές στο βυθισθέν υλικό, Fe 94,69%, As 97,42%, Pb 90,90%, και Zn 95,30%. Στην συνέχεια έγιναν δοκιμές σε παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις (τύπου Wilfley), από τις οποίες διαπιστώθηκε ότι το υλικό στα κοκκομετρικά κλάσματα $-600+300\mu\text{m}$ με μέσο όρο ανάκτησης 97,24% και $-300+150\mu\text{m}$ με μέσο όρο ανάκτησης 94,82%, είναι δεκτικό προεμπλουτισμού. Τέλος, έγιναν δοκιμές επίπλευσης σε διαφορετικές τιμές pH, τα αποτελέσματα των οποίων έδειξαν ότι στα προϊόντα υπήρξε αύξηση της περιεκτικότητας σε σύγκριση με το αρχικό υλικό, από 0,92% σε 4,87% για τον ψευδάργυρο, από 0,34% σε 0,84% για τον μόλυβδο, από 0,89% σε 1,98% για το αρσενικό, και από 21,71 σε 40,89% για τον σίδηρο, οι ανακτήσεις κινήθηκαν σε μέτρια έως και χαμηλά επίπεδα με ποσοστά κάτω από 52%.

Οι παραπάνω δοκιμές έδειξαν αύξηση της περιεκτικότητας του συμπυκνώματος σε όλα τα ενδιαφέροντα στοιχεία του υλικού, χωρίς όμως την απαραίτητη συγκέντρωση ώστε να καταστεί οικονομικά βιώσιμη περαιτέρω επεξεργασία των απορριμμάτων.

ABSTRACT

During the various mineral processing operations, quantities of waste material are generated, i.e. materials which are not useful or economically exploitable and which end up in tailings disposal sites. In addition, these waste materials contain useful ingredients which could not be collected during processing. As a result, a relatively small percentage of useful ingredients are lost. This useful material as well as the material that constitutes the waste, most often contains heavy metals and minerals in the form of fine pieces. These pieces can potentially create problems for the environment and for the human population.

For the purpose of this Thesis, samples were collected from Thorikos beach of Lavrio area. The tailings from flotation amount to 5.000.000 tons, and occupy the largest area of deposits in the broader area of Lavrio.

For the recovery of the heavy minerals from the tailings, three different series of experiments were performed on different particle size. Initially, preliminary heavy liquid tests were carried out with liquids of specific gravity 2.97 and 3.32, correspondingly. The results of these tests show that the maximum degree of liberation of the original ore is obtained in the particle size of $-300 + 150\mu\text{m}$, with the optimum results on the heavy material, Fe 94,69%, As 97,42%, Pb 90,90%, and Zn 95,30%. Tests were then performed on a laboratory Wilfley shaking table; it was found that the material in the particle size $-600 + 300\mu\text{m}$ with an average recovery of 97,24% and, $-300 + 150\mu\text{m}$ with an average recovery rate of 94,82%, is amenable to pre-concentration. Finally, flotation tests were performed both in alkaline and acidic environment; the results showed that there was an increase of the products content compared to the original material. The best results were, from 0,92% to 4.87% for zinc, from 0,34% to 0.84% for lead, from 0,89% to 1.98% for arsenic, and from 21,71% to 40.89% for iron, but the metal recoveries were moderate to low and below 52%.

The above experiments showed an increase in the content of the concentrate in all the interested elements, but without reaching the necessary concentration to make the material economically viable for further treatment.

Πίνακας περιεχομένων

1: Θεωρητικό μέρος	15
1.1: Ιστορική αναδρομή των μεταλλείων του Λαυρίου	15
2: Μεταλλοφορία του Λαυρίου	16
3: Μεταλλουργικά απορρίμματα και ρύπανση	16
3.1: Απορρίμματα επίπλευσης	18
4: Βαρέα Μέταλλα	18
4.1: Σίδηρος	19
4.2: Αρσενικό	20
4.3: Μόλυβδος	18
4.4: Ψευδάργυρος	23
5: Μέθοδοι εμπλουτισμού	24
5.1: Επίπλευση	24
5.1.1: Λειοτρίβηση του πετρώματος	25
5.1.2: Προοδοποίηση-Αντιδραστήρια	25
5.2: Βαρέα υγρά	26
5.3: Παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις	27
6: Πειραματικό μέρος	29
6.1: Δειγματοληψία	29
6.2: Ορυκτολογική ανάλυση	31
6.3: Χημική ανάλυση	32
7: Μέθοδος βαρέων υγρών	39
7.1: Αποτελέσματα πειράματος με βαρύ υγρό 2,97	41
7.2: Αποτελέσματα πειράματος με βαρύ υγρό 3,32	43
7.3: Συμπεράσματα	45

7.4: Γενικά Συμπεράσματα	53
8: Παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις	54
8.1: Κοκκομετρικό κλάσμα -600+300μm	55
8.1.1: Αποτελέσματα δοκιμών παλλόμενης τράπεζας κλάσματος -600+300μm	56
8.1.2: Παρατηρήσεις	62
8.2: Κοκκομετρικό κλάσμα -300+150μm	63
8.2.1: Αποτελέσματα παλλόμενης τράπεζας κλάσματος -300+150μm	64
8.2.2: Παρατηρήσεις	70
8.3: Γενικά συμπεράσματα	71
9: Επίπλευση	73
9.1: Αντιδραστήρια	73
9.2: Διαδικασία	74
9.3: Αποτελέσματα δοκιμών επίπλευσης	77
9.4: Συμπεράσματα	79
10: Τελικά συμπεράσματα	82
11: Βιβλιογραφία	84

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Δειγματοληψία σε κλάσματα με διαχωριστή Jones	30
Διάγραμμα 2: Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού δείγματος με XRD	32
Διάγραμμα 3α: Περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 ανά κοκκομετρικό κλάσμα	35
Διάγραμμα 3β: Περιεκτικότητα σε Fe ανά κοκκομετρικό κλάσμα	36
Διάγραμμα 4α: Περιεκτικότητα σε As_2O_3 ανά κοκκομετρικό κλάσμα	36
Διάγραμμα 4β: Περιεκτικότητα σε As_2O_3 ανά κοκκομετρικό κλάσμα	37
Διάγραμμα 5α: Περιεκτικότητα σε PbO ανά κοκκομετρικό κλάσμα	37
Διάγραμμα 5β: Περιεκτικότητα σε PbO ανά κοκκομετρικό κλάσμα	38
Διάγραμμα 6α: Περιεκτικότητα σε ZnO ανά κοκκομετρικό κλάσμα	38
Διάγραμμα 6β: Περιεκτικότητα σε Zn ανά κοκκομετρικό κλάσμα	39
Διάγραμμα 7: Αποτελέσματα διαχωρισμού ανά κοκκομετρικό κλάσμα σε ε.β. 2,97	41
Διάγραμμα 8: Αποτελέσματα διαχωρισμού ανά κοκκομετρικό κλάσμα σε ε.β. 3,32	44
Διάγραμμα 9: Περιεκτικότητα Zn σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -600+300 μ m	57
Διάγραμμα 10: Περιεκτικότητα Pb σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -600+300 μ m	57
Διάγραμμα 11: Περιεκτικότητα As σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -600+300 μ m	58
Διάγραμμα 12: Περιεκτικότητα Fe σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -600+300 μ m	58
Διάγραμμα 13: Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της 1 ^{ης} δοκιμής του κλάσματος -600+300 μ m	59
Διάγραμμα 14: Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της 2 ^{ης} δοκιμής του κλάσματος -600+300 μ m	59
Διάγραμμα 15: Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της 3 ^{ης} δοκιμής του κλάσματος -600+300 μ m	60

Διάγραμμα 16: Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της 4 ^{ης} δοκιμής του κλάσματος -600+300 μm	60
Διάγραμμα 17: Περιεκτικότητα Zn σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -300+150μm	65
Διάγραμμα 18: Περιεκτικότητα Pb σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -300+150μm	65
Διάγραμμα 19: Περιεκτικότητα As σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -300+150μm	66
Διάγραμμα 20: Περιεκτικότητα Fe σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -300+150μm	66
Διάγραμμα 21: Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα 1 ^{ης} δοκιμής του κλάσματος -300+150 μm	67
Διάγραμμα 22: Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα 2 ^{ης} δοκιμής του κλάσματος -300+150 μm	67
Διάγραμμα 23: Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα 3 ^{ης} δοκιμής του κλάσματος -300+150 μm	68
Διάγραμμα 24: Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα 4 ^{ης} δοκιμής του κλάσματος -300+150 μm	68
Διάγραμμα 25: Κύκλωμα δοκιμών επίπλευσης	76

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Καθαρός σίδηρος	19
Εικόνα 2: Αιματίτης	19
Εικόνα 3: Αρσενικό	21
Εικόνα 4: Αρσеноπυρίτης	21
Εικόνα 5: Μόλυβδος	22
Εικόνα 6: Αριστερά Μασσικότης, δεξιά Λιθάργυρος	22
Εικόνα 7: Ψευδάργυρος	23
Εικόνα 8: Φωτογραφία στερεοσκοπικού μικροσκοπίου αρχικού δείγματος (μεγέθυνση 25X)	31
Εικόνα 9: Φωτογραφία στερεοσκοπικού μικροσκοπίου αρχικού δείγματος (μεγέθυνση 50X)	32
Εικόνα 10: CH_2Br_4	40
Εικόνα 11: CH_2I_2	40
Εικόνα 12α: Μέγεθος +600 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97	46
Εικόνα 12β: Μέγεθος +600 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32	46
Εικόνα 13α: Μέγεθος -600+300 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97	47
Εικόνα 13β: Μέγεθος -600+300 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32	48
Εικόνα 14α: Μέγεθος -300+150 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97	49
Εικόνα 14β: Μέγεθος -300+150 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32	49
Εικόνα 15α: Μέγεθος -150+75 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97	50

Εικόνα 15β: Μέγεθος -150+75μm, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32	51
Εικόνα 16α: Μέγεθος-75μm, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97	52
Εικόνα 16β: Μέγεθος -75μm, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32	52
Εικόνα 17: Εργαστηριακή παλλόμενη τράπεζα Wilfley	55
Εικόνα 18: Κοκκομετρικό κλάσμα -600+300 μm, απόρριμμα παλλόμενης τράπεζας, 2 ^η δοκιμή	61
Εικόνα 19: Κοκκομετρικό κλάσμα -600+300 μm, ενδιάμεσο προϊόν παλλόμενης τράπεζας, 2 ^η δοκιμή	61
Εικόνα 20: Κοκκομετρικό κλάσμα -600+300 μm, συμπύκνωμα παλλόμενης τράπεζας, 2 ^η δοκιμή	62
Εικόνα 21: Κοκκομετρικό κλάσμα -300+150 μm, απόρριμμα παλλόμενης τράπεζας, 1 ^η δοκιμή	69
Εικόνα 22: Κοκκομετρικό κλάσμα -300+150 μm, ενδιάμεσο προϊόν παλλόμενης τράπεζας, 1 ^η δοκιμή	69
Εικόνα 23: Κοκκομετρικό κλάσμα -300+150 μm, συμπύκνωμα παλλόμενης τράπεζας, 1 ^η δοκιμή	70
Εικόνα 24: Κυψέλη επίπλευσης DENVER	73
Εικόνα 25: Αρχικό λειοτριβημένο υλικό	74
Εικόνα 26: Δοκιμή 4, pH=9.5, περιεκτικότητα Zn 4,87%	80
Εικόνα 27. Δοκιμή 1, pH=8.0, περιεκτικότητα Pb 0,84%	80
Εικόνα 28. Δοκιμή 3, pH=6.0, περιεκτικότητα As 1,98%	81
Εικόνα 29. Δοκιμή 2, pH=8.5, περιεκτικότητα Fe 40,89%	81

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Συνθήκες επεξεργασίας με τράπεζες	28
Πίνακας 2: Κοκκομετρική κατανομή δείγματος	31
Πίνακας 3: Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης των κοκκομετρικών κλασμάτων σε οξείδια	33
Πίνακας 4: Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης των κοκκομετρικών κλασμάτων σε στοιχεία	34
Πίνακας 5: Αποτελέσματα διαχωρισμού με βαρέα υγρά 2,97 C ₂ H ₂ Br ₄	41
Πίνακας 6: Ανάλυση σε Fe με βαρύ υγρό 2,97 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα	42
Πίνακας 7: Ανάλυση σε As με βαρύ υγρό 2,97 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα	42
Πίνακας 8: Ανάλυση σε Pb με βαρύ υγρό 2,97 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα	42
Πίνακας 9: Ανάλυση σε Zn με βαρύ υγρό 2,97 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα	43
Πίνακας 10: Αποτελέσματα διαχωρισμού με βαρύ υγρό 3,32 CH ₂ I ₂	43
Πίνακας 11: Ανάλυση σε Fe με βαρύ υγρό 3,32 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα	44
Πίνακας 12: Ανάλυση σε As με βαρύ υγρό 3,32 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα	44
Πίνακας 13: Ανάλυση σε Pb με βαρύ υγρό 3,32 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα	45
Πίνακας 14: Ανάλυση σε Zn με βαρύ υγρό 3,32 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα	45
Πίνακας 15: Συνθήκες λειτουργίας παλλόμενης τράπεζας κλάσματος -600+300μm	56
Πίνακας 16: Αποτελέσματα σε περιεκτικότητα και κατανομή κοκκομετρικού	

κλάσματος -600+300μm	56
Πίνακας 17: Συνθήκες λειτουργίας παλλόμενης τράπεζας κλάσματος -300+150μm	63
Πίνακας 18: Αποτελέσματα σε περιεκτικότητα διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος -300+150μm	64
Πίνακας 19: Συγκεντρωτικός πίνακας διαχωρισμού του υλικού κατά βάρος, με διαφοροποίηση του pH	77
Πίνακας 20: Αποτελέσματα δοκιμών 1 ^{ης} επίπλευσης	78
Πίνακας 21. Αποτελέσματα δοκιμών 2 ^{ης} επίπλευσης	78
Πίνακας 22. Αποτελέσματα δοκιμών 3 ^{ης} επίπλευσης	78
Πίνακας 23. Αποτελέσματα δοκιμών 4 ^{ης} επίπλευσης	79
Πίνακας 24. Αποτελέσματα δοκιμών 5 ^{ης} επίπλευσης	79

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Αρχαίες και σύγχρονες μεταλλευτικές-μεταλλουργικές εργασίες	17
Σχήμα 2: Μεταλλουργικά απορρίμματα στην περιοχή του Λαυρίου	17
Σχήμα 3: Πορεία τεμαχίων στο κατάστρωμα της τράπεζας	28

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Ιστορική αναδρομή των μεταλλείων του Λαυρίου

Η μεταλλευτική δραστηριότητα της Λαυρεωτικής γης ξεκινά πριν το 3000 π.Χ. από τους αρχαίους Έλληνες. Άνθησε ιδιαίτερα κατά την κλασική αρχαιότητα με την αρχή της Αθηναϊκής Δημοκρατίας το 508 π.Χ. Μετά την περίοδο αυτή ακολουθούν αιώνες αδράνειας και σποραδικής εκμετάλλευσης έως το 1864 που ιδρύθηκε η ιταλογαλλική εταιρία Hilarion Roux et Cie. Σκοπός της εταιρίας ήταν η αξιοποίηση των αρχαίων σκωριών και η εξαγωγή αργυρούχου μολύβδου. Το 1865 εγκαινιάζεται και το πρώτο εργοστάσιο στη θέση Εργαστηριάκια και ξεκινά η σύγχρονη εκμετάλλευση της περιοχής. Ακολούθησε το εργοστάσιο της εταιρίας Compagnie Francaise des Mines du Laurium στη θέση Κυπριανός (Τσάιμου, 1997).

Την περίοδο 1875-1929 κατασκευάζονται και επεκτείνονται οι εγκαταστάσεις που πλέον περιλαμβάνουν διεργασίες αναγωγικής φρύξης, τήξης, επίπλευσης κ.ά. Το 1930 ξεκινά η σταδιακή εξάντληση των κοιτασμάτων και η εταιρία, αντιμετωπίζοντας οικονομικά προβλήματα, εξαγοράζεται από την πολυεθνική Penarroya. Τέλος, με την βιομηχανική κρίση της δεκαετίας του 1970-1980 όλες οι δραστηριότητες στην περιοχή διακόπτονται.

Το 1977 σταμάτησε οριστικά η εξόρυξη των μεταλλείων και το 1989 τερματίστηκε και η δραστηριότητα της μεταλλουργίας (Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου, 2021).

Το επακόλουθο των εκτεταμένων εκμεταλλεύσεων, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, είχε ως επόμενο την πολύ μεγάλη απόθεση μεταλλευτικών και μεταλλουργικών απορριμμάτων στην Λαυρεωτική χερσόνησο. Η απόθεση παντός είδους μεταλλευτικών απορριμμάτων είχε ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη έκθεση της επιφάνειας των ορυκτών στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την προσβολή τους από τον αέρα και το νερό και την αύξηση της διαλυτότητάς τους. Έτσι, επιβάρυναν σημαντικά το οικοσύστημα της περιοχής καθώς είχαν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των μόνιμων κατοίκων της περιοχής (Δημητριάδης κ.ά., 2000).

2. Μεταλλοφορία του Λαυρίου

Η κύρια μεταλλοφορία στο Λαύριο είναι Πολλυμεταλλική μεταλλοφορία υψηλών θερμοκρασιών από αντικατάσταση σε ανθρακικά πετρώματα. Τα μεταλλεύματα αυτά αποτελούνται κυρίως από γαληνίτη, σφαλερίτη, σιδηροπυρίτη, αρσеноπυρίτη και χαλκοπυρίτη. Επιπροσθέτως, απαντά και πλήθος άλλων θειούχων ορυκτών και θειοαλάτων. Σύνδρομα ορυκτά είναι ο φθορίτης, ο ασβεστίτης, ο βαρίτης, ο χαλαζίας και ο ανκερίτης – δολομίτης. Με διεργασίες έκπλυσης και υπεργενετικού εμπλουτισμού σχηματίστηκε ένας μεγάλος αριθμός δευτερογενών ορυκτών (Σολωμός κ.ά., 2004]. Συνολικά έχουν περιγράψει πάνω από 400 διαφορετικά ορυκτά από τα μεταλλεία του Λαυρίου (Κατερινόπουλος και Ζησιμοπούλου, 1994).

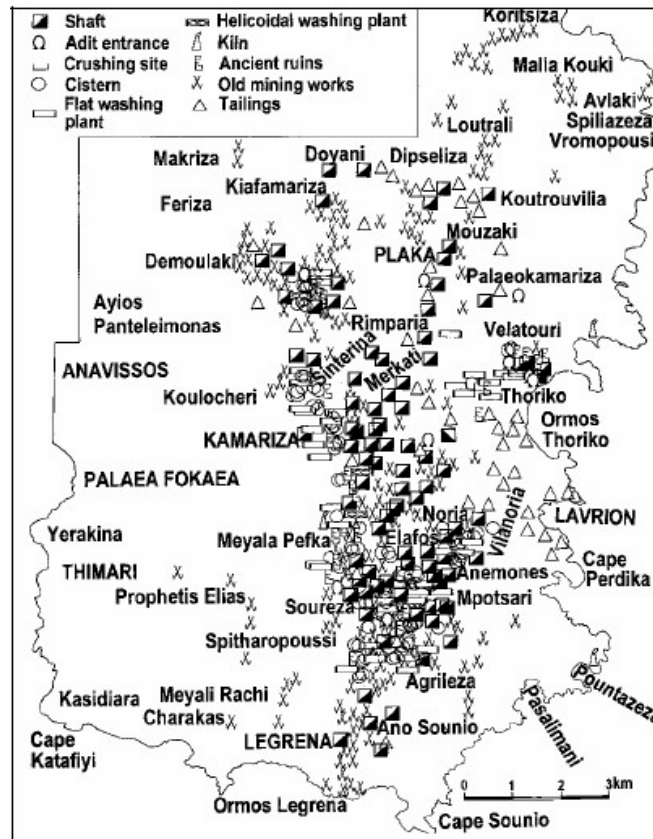
Το μεγαλύτερο τμήμα της μεταλλοφορίας έχει οξειδωθεί και αποτελείται από ερυθρά οξείδια και υδροξείδια σιδήρου, τα οποία συνοδεύονται από χαλαζία. Μακροσκοπικά εντοπίζονται ψευδομορφώσεις οξειδίων σιδήρου έναντι πρωτογενούς σιδηροπυρίτη. Επίσης, σε χαλαζιακά φλεβίδια παρατηρείται ελάχιστος αρσеноπυρίτης, μερικώς οξειδωμένος. Κατά συνέπεια, φαίνεται ότι αρχικά η μεταλλοφορία αποτελείτο κυρίως από σιδηροπυρίτη και αρσеноπυρίτη. Αντίθετα, δεν υπάρχει καμία ένδειξη για την ύπαρξη πρωτογενούς γαληνίτη ή σφαλερίτη. Για παράδειγμα, απουσιάζουν δευτερογενή ορυκτά όπως ο κερουσίτης και ο αγκλεσίτης. Εξαιτίας της χαμηλής διαλυτότητάς τους σε υπεργενετικές συνθήκες παραμένουν επιτόπου ως προϊόντα της οξείδωσης του γαληνίτη (Σολωμός κ.ά., 2004].

3. Μεταλλουργικά απορρίμματα και ρύπανση

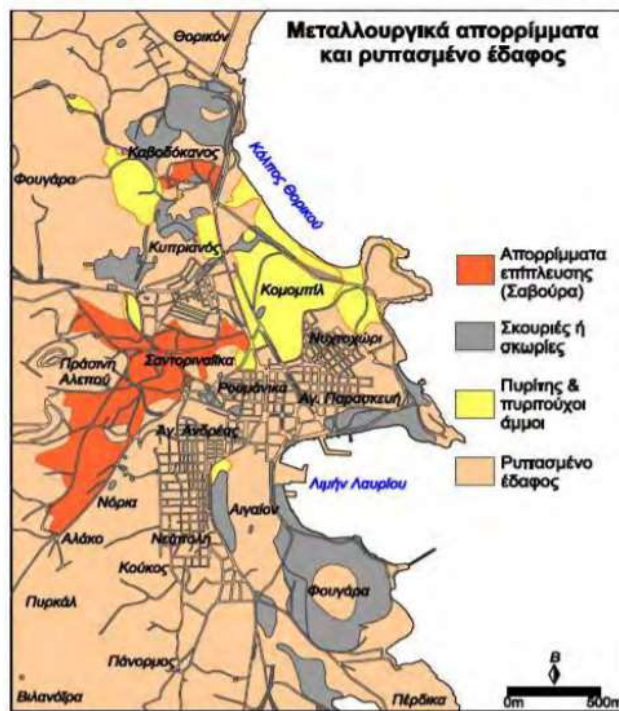
Τα μεταλλουργικά απορρίμματα καταλαμβάνουν περίπου το 25% (7,235km²) της αστικής περιοχής του Λαυρίου και διαχωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Απορρίμματα επίπλευσης ή εμπλουτισμού
- Σκωρίες
- Σιδηροπυρίτες ή πυρίτες

Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 1) απεικονίζεται η ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου με όλες τις μεταλλευτικές και μεταλλουργικές εργασίες που έχουν γίνει κατά το παρελθόν (Δημητριάδης κ.ά., 2000). Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2 φαίνεται η θέση των απορριμμάτων στην ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου.



Σχήμα 1. Αρχαίες και σύγχρονες μεταλλευτικές-μεταλλουργικές εργασίες (Δημητριάδης κ.ά., 2000).



Σχήμα 2. Μεταλλουργικά απορρίμματα στην περιοχή του Λαυρίου (Μαρμάνη Φ. και Μαρμάνη Μ., 2007)

3.1 Απορρίμματα επίπλευσης

Σύμφωνα με απογραφή του Υπουργείου Περιβάλλοντος & Ενέργειας που πραγματοποιήθηκε το 2012, διαπιστώθηκε ότι τα απορρίμματα της επίπλευσης ανέρχονται σε 5.000.000 τόνους, από συνολική ποσότητα απορριμμάτων 7.320,000 τόνων, δηλαδή ποσοστό 68,31% επί του συνόλου και καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση των αποθέσεων (Υπουργείο Περιβάλλοντος 2012).

Η μεγάλη ποσότητα των απορρίμματα της επίπλευσης, τα οποία οι κάτοικοι τα έχουν ονομάσει «σαβούρα», έχουν συντελέσει μαζί με άλλους παράγοντες στη ρύπανση του εδάφους της Λαυρεωτικής χερσονήσου. Αποτελούνται από άμμο και κροκάλες, που είναι τα στεία πετρώματα που έχουν υποστεί επεξεργασία κατάτμησης-λειοτρίβησης και έχουν διαχωριστεί από το μετάλλευμα. Περιέχουν συγκεντρώσεις τοξικών στοιχείων όπως μόλυβδο, αρσενικό, ψευδάργυρο, κ.ά. Ο ντόπιος πληθυσμός έρχεται σε άμεση επαφή με τα συγκεκριμένα απορρίμματα, καθώς μεγάλο μέρος της πόλης του Λαυρίου έχει αναπτυχθεί πάνω σε αυτά. Επίσης, χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά, για οπωροκηπευτικές καλλιέργειες, κ.ά. (Δημητριάδης κ.ά., 2000].

4. Βαρέα Μέταλλα

Με τον όρο βαρέα μέταλλα χαρακτηρίζεται μια μεγάλη ομάδα μετάλλων ή μεταλλοειδών με πυκνότητα από 5,0 g/cm³ και πάνω, ή, κατά άλλους, σχετική ατομική μάζα (ατομικό βάρος) μεγαλύτερη από 20 που είναι η σχετική ατομική μάζα του Ca (Μόσιος και Μπέης, 2011).

Τα βαρέα μέταλλα είναι φυσικά συστατικά του στερεού φλοιού της Γης, πολλά από τα οποία είναι τοξικά για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Σε αντίθεση με τις περισσότερες τοξικές οργανικές ουσίες δεν αποδομούνται εύκολα και παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μπορεί να έχουν φυσική γεωλογική προέλευση ή να έχουν προέλθει από βιομηχανική κατεργασία (Μόσιος και Μπέης, 2011).

Τα βαρέα μέταλλα με την μεγαλύτερη συγκέντρωση που εντοπίζονται στα απορρίμματα επίπλευσης είναι το αρσενικό (As), ο σίδηρος (Fe), ο ψευδάργυρος (Zn) και ο μόλυβδος (Pb).

4.1 Σίδηρος

Ο σίδηρος (Fe) είναι από τα πιο κοινά μέταλλα του φλοιού της γης και παρουσιάζει αρκετά μεγάλο εμπορικό ενδιαφέρον, καθώς χρησιμοποιείται στην παραγωγή χάλυβα και σε πληθώρα άλλων κατασκευών. Έχει σκληρότητα 4 στην κλίμακα Mohs και πυκνότητα $7,874 \text{ g/cm}^3$. Το χρώμα του είναι αργυρό (Εικόνα 1). Οι κυριότερες μορφές που συναντάται είναι μαγνητίτης (Fe_3O_4), αιματίτης (Fe_2O_3), λειμωνίτης ($\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$) καθώς και σε κάποιες άλλες μορφές σε μικρότερα ποσοστά. Ο καθαρός σίδηρος είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί στη φύση. Με βάση τις αναλύσεις από τα δείγματα που συλλέχθηκαν, ο σίδηρος συναντάται στα τέλματα υπό την μορφή του αιματίτη και σιδηροπυρίτη (Εικόνα 2).



Εικόνα 1: Καθαρός σίδηρος (ΕΚΠΑ, 2021)



Εικόνα 2: Αιματίτης (ΕΚΠΑ, 2021)

Ο αιματίτης είναι οξειδίο του τρισθενούς σιδήρου Fe_2O_3 κι έχει σκληρότητα 5,5 έως 6,5 στην κλίμακα Mohs. Έχει πυκνότητα $5,254 \text{ g/cm}^3$ και παρουσιάζει μεταλλική έως ημιμεταλλική λάμψη και χρώματα μεταλλικό σκούρο γκρι, καστανοκόκκινο και μαύρο. Κρυσταλλώνεται στο ρομβικό η ρομβοεδρικό κρυσταλλικό σύστημα και η μοναδιαία κυψελίδα του έχει εξαγωνικό σχήμα. Συχνά παρουσιάζει αντικαταστάσεις του τρισθενούς σιδήρου από ιόντα του ίδιου ή αλλού σθένους. Επίσης, αν και είναι ασθενές μαγνητικό υπό κανονικές θερμοκρασίες δωματίου, η μαγνητική του ιδιότητα επηρεάζεται από την αλλαγή της θερμοκρασίας.

Στη φύση ο αιματίτης είναι ορυκτό που συναντάται σε μεταμορφωμένα, πυριγενή και κυρίως ιζηματογενή πετρώματα. Πολλές φορές περιλαμβάνει άλλα μέταλλα όπως μαγγάνιο, τιτάνιο και αργίλιο. Έχει πληθώρα εφαρμογών στην βιομηχανία ως ημιαγωγός ή ως καταλύτης στις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Έχει κι άλλες εφαρμογές που οφείλονται στο ότι έχει ενδιάμεση έως χαμηλή τοξικότητα. Παρουσιάζει αντοχή στη διάβρωση και έχει σχετικά χαμηλό κόστος στην επεξεργασία του.

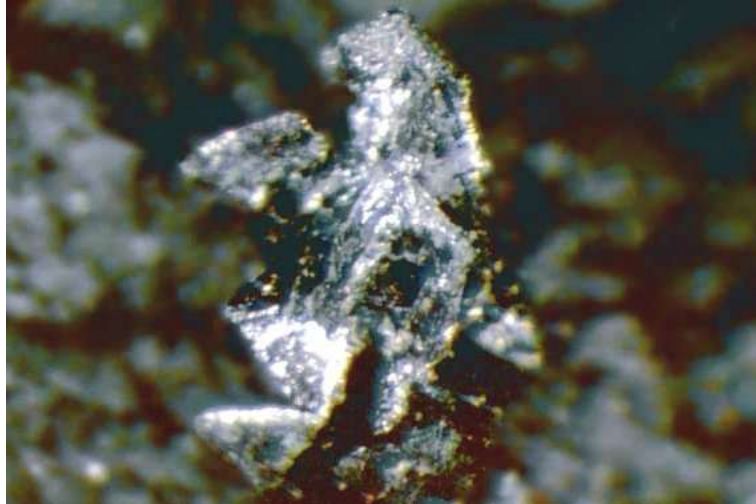
4.2 Αρσενικό

Το αρσενικό είναι ένα χημικό στοιχείο με σύμβολο As. Είναι μεταλλοειδές κι έχει σκληρότητα 3,5 στην κλίμακα Mohs. Έχει πυκνότητα $5,778 \text{ g/cm}^3$ και συναντάται σε πολλά ορυκτά, συνήθως σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα, όπως ο αρσενοπυρίτης (FeAsS) και σε ενώσεις του θείου όπως η σανδαράχη (AsS) άλλα και σε καθαρή στοιχειακή μορφή (Εικόνα 3).

Το Αρσενικό στην ελεύθερη μορφή του έχει γκρι χαλβδόφαιο χρώμα και χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία ως κράμα σε συνδυασμό με το Γάλλιο (Ga) για ημιαγωγικές ηλεκτρονικές συσκευές. Σε συνδυασμό με το χαλκό (Cu) και το μόλυβδο (Pb) χρησιμοποιείται για χρήση σε μπαταρίες αυτοκινήτων και άλλα. Η κύρια φάση του As είναι ο αρσενοπυρίτης και σπανιότερα δευτερογενή αρσενικά του Pb.

Το τριοξείδιο του αρσενικού έχει χημικό τύπο As_2O_3 και πυκνότητα $3,74 \text{ g/cm}^3$. Έχει σκληρότητα 3,5 στην κλίμακα Mohs και χρώμα κυρίως λευκό ή διάφανο (Εικόνα 4). Μπορεί να εμφανίζει και κοκκινωπή ή μπλε απόχρωση ανάλογα τα στοιχεία που περιέχει. Στη φύση συναντάται κυρίως σε δύο μορφές. Κρυσταλλώνεται στο κυβικό σύστημα (αρσενόλιθος ή αρσενολίτης) και στο μονοκλινές (κλωδετίτης). Η εμπορική του εκμετάλλευση λόγω της τοξικότητάς του είναι σχετικά περιορισμένη. Χρησιμοποιείται ως

ποντικοφάρμακο, ως συντηρητικό σε βερνίκια ξύλου, ως χρωστική ουσία σε χρώματα και, τέλος, βρίσκει πολύ μικρή χρήση ως προσθετικό τροφίμων και φαρμάκων.



Εικόνα 3: Αρσενικό (Hudson Institute, 2021)



Εικόνα 4: Τριοξείδιο του Αρσενικού (Hudson Institute, 2021)

4.3 Μόλυβδος

Ο Μόλυβδος είναι ένα χημικό στοιχείο με σύμβολο Pb. Ανήκει στα βαρέα μέταλλα και έχει αρκετά μεγάλη πυκνότητα $11,34 \text{ g/cm}^3$. Έχει γκριζόλευκο χρώμα. Είναι μαλακό μέταλλο με σκληρότητα στην κλίμακα Mohs 1,5. Κρυσταλλώνεται στο κυβικό σύστημα. Εμφανίζει μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και είναι διαμαγνητικό υλικό (Εικόνα 5).

Χρησιμοποιείται στην κατασκευή μπαταριών σε συνδυασμό με το αντιμόνιο. Επίσης, χρησιμοποιείται σε επιστρώσεις σωληνώσεων, σε κατασκευή κρυστάλλων καθώς κι άλλων. Μερικά από τα κυριότερα ορυκτά του είναι ο γαληνίτης (PbS), ο κερουσίτης (PbCO₃) και ο αγγλεσίτης (PbSO₄).

Στα δείγματα που αναλύθηκαν ο μόλυβδος συναντάται ως γαληνίτη, μιμετίτης και άλλες φάσεις (PbO). Συναντάται ως φυσικό ορυκτό ή ως παραπροϊόν μετά από επεξεργασία μολυβδαργυρούχων ορυκτών με την μέθοδο της κυπέλλωσης. Έχει σκληρότητα 2 στην κλίμακα Mohs. Λόγω του ότι είναι διμορφικό ορυκτό, του αποδίδονται δυο διαφορετικές ονομασίες, ανάλογα με το σύστημα που κρυσταλλώνεται. Λιθάργυρος, όταν κρυσταλλώνεται στο τετραγωνικό σύστημα με κοκκινωπό χρώμα, και μασσικότης, όταν κρυσταλλώνεται στο ρομβικό σύστημα με κιτρινωπό χρώμα (Εικόνα 6).



Εικόνα 5: Μόλυβδος (Hudson Institute, 2021)



Εικόνα 6: Αριστερά Μασσικότης, δεξιά Λιθάργυρος (Hudson Institute, 2021)

Οι εφαρμογές και των δύο παραπάνω ορυκτών είναι αρκετές. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κεραμικών υλικών, στην υαλουργία ως προσθετικό χρωστικών ουσιών καθώς κι αλλού.

4.4 Ψευδάργυρος

Ο ψευδάργυρος είναι ένα χημικό στοιχείο με σύμβολο Zn. Είναι γνωστό και ως τσίγκος. Ανήκει στα βαρέα μέταλλα κι έχει πυκνότητα $7,14 \text{ g/cm}^3$. Παρουσιάζει χαμηλή ως μέτρια σκληρότητα 2,5 στην κλίμακα Mohs κι έχει χρώμα γαλαζωπό – λευκό. Κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό σύστημα κι είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Ψευδάργυρος (Eurolab, 2021)

Σπάνια βρίσκεται στη φύση στη μεταλλική του κατάσταση. Περιέχεται σε πολλά εδάφη και πετρώματα σε σημαντική ποσότητα όπως γρανίτης, βασάλτης, και άργιλος. Μπορεί να ανακτηθεί από αυτά. Το πιο σημαντικό μετάλλευμα του ψευδαργύρου είναι ο Σφαλερίτης (ZnS). Είναι το τέταρτο μέταλλο σε εμπορική εκμετάλλευση στον κόσμο μετά τον σίδηρο, το αλουμίνιο και τον χαλκό. Έχει ευρεία χρήση ως επικάλυψη σε άλλα μέταλλα, σε ελάσματα, σε κράματα με άλλα μέταλλα (μπρούτζος, ορείχαλκος) καθώς και ποικίλες άλλες εφαρμογές.

Το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) που βρέθηκε στα δείγματα έχει πυκνότητα $5,606 \text{ g/cm}^3$ και λευκό χρώμα. Κρυσταλλώνεται και αυτό στο εξαγωνικό σύστημα κι έχει μέτρια σκληρότητα στην κλίμακα Mohs 4,5. Είναι ημιαγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος και είναι σχεδόν αδιάλυτο στο νερό και διαλυτό σε οξέα και αλκάλια. Έχει εφαρμογές στη

βιομηχανία σε καλλυντικά και φάρμακα, σε φίλτρα τσιγάρων, σε κυκλώματα με υψηλές θερμοκρασίες καθώς και αλλού.

5. Μέθοδοι εμπλουτισμού

Οι κατεργασίες εμπλουτισμού που γίνονται στα εξορυχθέντα μεταλλεύματα αποσκοπούν στο να αυξήσουν την περιεκτικότητά τους στο χρήσιμο ή στα χρήσιμα συστατικά που περιέχουν, με την απομάκρυνση όσο το δυνατόν περισσότερου στείρου υλικού. Ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες που έχει το υλικό ή που μπορεί να του αποδοθούν με τεχνικές μεθόδους, επιλέγεται η μέθοδος που θα αποδώσει το καλύτερο αποτέλεσμα.

Το υλικό που συλλέχθηκε για τα πειράματα προέρχεται από την παραλία του Θορικού στην περιοχή του Λαυρίου. Πρόκειται για μέταλλευμα το οποίο έχει επεξεργαστεί με τη μέθοδο της επίπλευσης και έχει απομακρυνθεί από αυτό το μεγαλύτερο μέρος των χρήσιμων συστατικών. Παρακάτω αναλύονται τρεις μέθοδοι διαχωρισμού που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάκτηση των ορυκτών βαρέων μετάλλων που έχουν παραμείνει στο απόρριμμα.

5.1 Επίπλευση

Η επίπλευση είναι μια φυσικοχημική μέθοδος εμπλουτισμού που λαμβάνει χώρα μέσα στο νερό. Εκμεταλλεύεται την διαφορά που δημιουργείται στην επιφάνεια μεταξύ του μεταλλεύματος ή μεταλλευμάτων, όταν είναι περισσότερα από ένα, και του στείρου. Η μέθοδος βασίζεται στην δημιουργία κατάλληλων συνθηκών, χρησιμοποιώντας ειδικά αντιδραστήρια που δημιουργούν ή επαυξάνουν την ιδιότητα συγκεκριμένων ορυκτών ή μεταλλευμάτων στο να γίνουν υδρόφιλα ή υδρόφοβα.

Τα υδρόφοβα τεμάχια, όταν έρθουν σε επαφή με τις φυσαλίδες του αέρα, προσκολλώνται και συμπαρασύρονται προς την επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στο ότι το ειδικό βάρος του συστήματος τεμαχιδίου – φυσαλίδας, είναι μικρότερο από το ειδικό βάρος του νερού. Στη συνέχεια απομακρύνονται τα υδρόφιλα τεμαχίδια από το κύκλωμα μέσω της απορροής. Για να είναι αποδοτική η μέθοδος της επίπλευσης είναι απαραίτητο να προηγηθούν κάποια στάδια προετοιμασίας του μεταλλεύματος.

5.1.1 Λειοτρίβηση του πετρώματος

Το στάδιο της λειοτρίβησης δεν αποτελεί στάδιο της επίπλευσης αλλά είναι σημαντικό για να επιτευχθεί ικανοποιητικός βαθμός αποδέσμευσης μεταξύ του στείρου και των συνυπαρχόντων χρήσιμων ορυκτών. Το μέγεθος των τεμαχιδίων πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να συγκρατείται από την φυσαλίδα και να ανέρχεται μαζί της στην επιφάνεια αλλά όχι υπερβολικά μικρό. Το ενδεδειγμένο μέγεθος για την επίπλευση κυμαίνεται μεταξύ 0,8 mm και μερικών μικρών. Τα πολύ ψιλά τεμαχίδια σε πολλές περιπτώσεις, λόγω μεγάλης προσρόφησης των αντιδραστηρίων, δεν συμπεριφέρονται εκλεκτικά. Μπορούν να καθυστερήσουν την επίπλευση και λόγω της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας να αυξήσουν την κατανάλωση. Αυτό έχει ως συνεπακόλουθο την αύξηση του κόστους των αντιδραστηρίων.

5.1.2 Προοδοποίηση-Αντιδραστήρια

Η προοδοποίηση λαμβάνει μέρος πριν την διαδικασία της επίπλευσης και είναι το στάδιο που δημιουργεί συνθήκες υδροφιλίας ή υδροφοβίας στα ορυκτά. Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται για αυτόν το σκοπό (συλλεκτικά), αποτελούνται από μια πολική ομάδα που εφάπτεται στην επιφάνεια των τεμαχιδίων και μια μη πολική που προσανατολίζεται προς τα έξω. Πολλές φορές, για να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα, το στάδιο προοδοποίησης λαμβάνει μέρος αμέσως μετά την λειοτρίβηση ή και κατά την διάρκεια αυτής, επειδή οι καινούργιες επιφάνειες των ορυκτών είναι περισσότερο ενεργές και έχουν μεγαλύτερη προσρόφηση. Άλλες κατηγορίες αντιδραστηρίων επίπλευσης που συντελούν στην επιτυχή εφαρμογή της είναι τα εξής:

- Ενεργοποιητικά αντιδραστήρια: ονομάζονται εκείνα, τα οποία ενεργοποιούν την επιφάνεια των τεμαχιδίων για την προσρόφηση του συλλέκτη.
- Καταβυθιστικά αντιδραστήρια: ονομάζονται αυτά τα οποία δημιουργούν συνθήκες απόθησης του συλλέκτη ώστε να μην γίνει υδρόφοβο και να καταβυθιστεί. Έχουν ιδιαίτερη χρήση, όταν απαιτείται επίπλευση μεικτών μεταλλευμάτων με διαδοχικό διαχωρισμό.
- Ρυθμιστικά αντιδραστήρια: είναι αυτά τα οποία χωρίζονται σε διασποράς, κροκίδωσης, αποσκληρυντικά νερού και ρυθμιστικά pH.

- Αφριστικά: ο ρόλος τους είναι να ελαττώνουν την επιφανειακή τάση του νερού και να δημιουργούν μικρές και πολυάριθμες φυσαλίδες που θα συμπαρασύρουν το επιθυμητό υλικό στην επιφάνεια της δεξαμενής επίπλευσης.

Η μέθοδος της επίπλευσης εγγυάται υψηλές αποδόσεις και ανάκτηση. Είναι εξαιρετική για ανάκτηση φτωχών και πολύ φτωχών κοιτασμάτων. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιπτώσεις που απαιτείται έντονη λειοτριβήση για την αποδέσμευση των ορυκτών.

5.2 Βαρέα υγρά

Η μέθοδος των βαρέων υγρών είναι μια εργαστηριακή μέθοδος διαχωρισμού ορυκτών, η οποία δίνει πληροφορίες αναφορικά με την εμπλουτισσιμότητα ενός μεταλλεύματος. Βασίζεται στη διαφορά ειδικού βάρους των ορυκτών. Με τη χρήση ειδικών βαρέων υγρών δημιουργείται υγρός φορέας, ο οποίος έχει ενδιάμεση πυκνότητα από τα ορυκτά που χρειάζονται διαχωρισμό. Έτσι, οι κόκκοι του ορυκτού με το μικρότερο ειδικό βάρος θα επιπλεύσουν προς την επιφάνεια και οι κόκκοι με μεγαλύτερο ειδικό βάρος θα οδηγηθούν προς τον πυθμένα. Η βιομηχανική μέθοδος διαχωρισμού που αντιστοιχεί στα βαρέα υγρά είναι η μέθοδος των βαρέων διαμέσων, που ανήκει στις πραγματικές μεθόδους διαχωρισμού.

Ανεξάρτητα του τρόπου παρασκευής τους, τα βαρέα υγρά είναι ομογενείς υγρές φάσεις και διατηρούν την πυκνότητά τους σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Εργαστηριακά χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν απελευθερωμένους κόκκους ορυκτών αλλά και συμμίκτους. Για να είναι αποδοτική αυτή η μέθοδος πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

- Τα προς διαχωρισμό ορυκτά πρέπει να έχουν μεταξύ τους διαφορά ειδικού βάρους τουλάχιστον 0,5 και το ειδικό βάρος του υγρού να μην είναι μεγαλύτερο από 4,5 λόγω περιορισμού της αντίστοιχης μέγιστης πυκνότητας βαρέως υγρού.
- Τα όρια μεγέθους που μπορούν να επεξεργαστούν τα βαρέα υγρά για τα μεγάλα τεμάχια εξαρτάτε από το διαθέσιμο βαρύ υγρό, και για τα ψιλά εξαρτάτε από την ταχύτητα καταβύθισης. Όταν τα πολύ ψιλά τεμάχια έχουν μικρή ταχύτητα καταβύθισης μειώνουν την πυκνότητα του πολφού και αυξάνουν το ιξώδες.

Ένα από τα αρνητικά της μεθόδου είναι το μεγάλο κόστος των βαρέων υγρών. Για αυτόν το λόγο δεν χρησιμοποιείται σε βιομηχανική κλίμακα αλλά εφαρμόζεται προκειμένου να

διαπιστωθεί η εμπλουτισσιμότητα μεταλλευμάτων. Επιπροσθέτως, εφαρμόζεται στον έλεγχο αποδοτικότητας εργοστασίου και για συγκριτικά αποτελέσματα με άλλες μεθόδους.

5.3 Παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις

Η παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις ανήκει και αυτή στις βαρυτομετρικές μεθόδους που εκμεταλλεύονται την διαφορά ειδικού βάρους μεταξύ των ορυκτών. Αποτελεί σταθμό στον εμπλουτισμό ψιλών τεμαχιδίων. Η αύξηση της ικανότητας της επεξεργασίας και της εκλεκτικότητας έδωσε μεγάλη ώθηση στις εφαρμογές, οι οποίες βρίσκουν μεγάλη ζήτηση μέχρι και σήμερα.

Η αύξηση της δυναμικότητας της τράπεζας με ραβδώσεις προέρχεται από το γεγονός της επεξεργασίας πολυτεμαχιακού στρώματος τεμαχίων, σε αντίθεση με τις λείες επιφάνειες καταστρωμάτων που επεξεργάζονται μονοτεμαχιακό στρώμα. Κάθε χώρος μεταξύ δύο γειτονικών ραβδώσεων δημιουργεί συνθήκες παρεμποδιζόμενης καταβύθισης και μικρομερούς διείδυσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εκλεκτικότητας του διαχωρισμού.

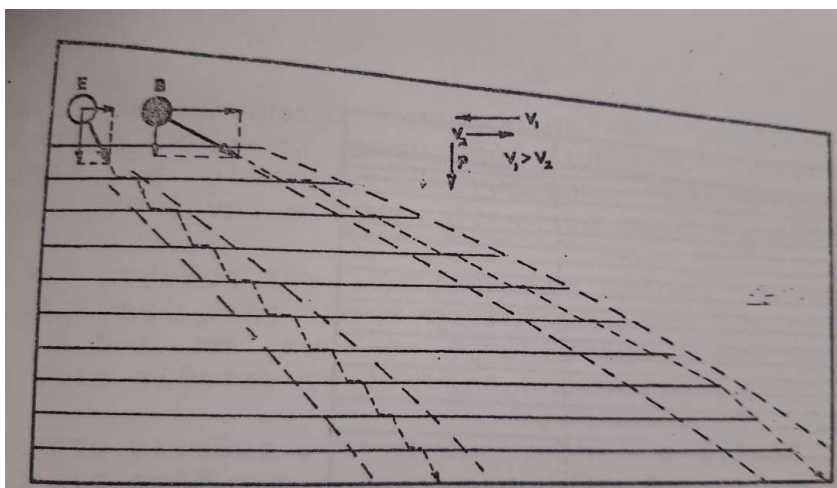
Η αρχή του διαχωρισμού βασίζεται στη ροή ενός στρώματος νερού που ρέει επάνω στην επιφάνεια κεκλιμένης τράπεζας. Το υγρό παρουσιάζει διαφορετική ταχύτητα στον πυθμένα που είναι μηδενική και μέγιστη ταχύτητα λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια του υγρού. Η διαφορά της ταχύτητας εξαρτάται και από το ιξώδες του υγρού. Τα μεγάλα και ελαφριά τεμαχίδια παρασύρονται από τη ροή. Πηδάνε πάνω από τις ραβδώσεις και συλλέγονται στο κάτω μέρος της τράπεζας. Τα βαρύτερα και μικρά τεμαχίδια παγιδεύονται μεταξύ των ραβδώσεων και, με την κατάλληλη κλίση και δόνηση της τράπεζας, συγκεντρώνονται προς την άκρη της. Παρακάτω (Σχήμα 3) εικονίζεται η πορεία των τεμαχίων στο κατάστρωμα της τράπεζας, όπου:

E = ελαφρύ τεμάχιο

B = βαρύ τεμάχιο

P = ροή νερού κάθετη προς την επιφάνεια της τράπεζας

V = ταχύτητα τράπεζας όπου $V_1 > V_2$



Σχήμα 3. Πορεία τεμαχίων στο κατάστρωμα της τράπεζας.

Για την σχεδίαση της ρύθμισης της λειτουργίας μιας τράπεζας εμπλουτισμού πρέπει να υπολογιστούν:

- Κλίση του καταστρώματος.
- Πάχος της μεμβράνης νερού (παροχής νερού).
- Σχέση μεταξύ επιτάχυνσης (παλμικής κίνησης) και χρόνου (ταχύτητα και εύρος).
- Συντελεστής τριβής μεταξύ τεμαχιδίων και καταστρώματος (εάν και εφόσον μπορεί να αλλαχτεί η φύση του καλύμματος του καταστρώματος).
- Ραβδώσεις.

Στον παρακάτω Πίνακα 1 περιγράφονται οι βέλτιστες συνθήκες επεξεργασίας για τις τράπεζες.

Πίνακας 1. Συνθήκες επεξεργασίας με τράπεζες

Σκοπός επεξεργασίας	Συνθήκες επίτευξης διαχωρισμού
Χονδροειδής διαχωρισμός	Περισσότερο νερό - Περισσότερη τροφοδοσία - Μεγαλύτερη κλίση και εύρος παλμικής κίνησης
Καθαρός διαχωρισμός	Λιγότερο νερό – Λιγότερη τροφοδοσία – μικρότερη κλίση και εύρος παλμικής κίνησης
Εμπλουτισμός λεπτομερών τεμαχίων	Λιγότερο νερό – Λιγότερη τροφοδοσία – μεγαλύτερη συχνότητα και μικρότερο εύρος παλμικών κινήσεων
Εμπλουτισμός χονδρομερών τεμαχίων	Περισσότερο νερό – Περισσότερη τροφοδοσία – μικρότερη συχνότητα και μεγαλύτερο εύρος παλμικών κινήσεων

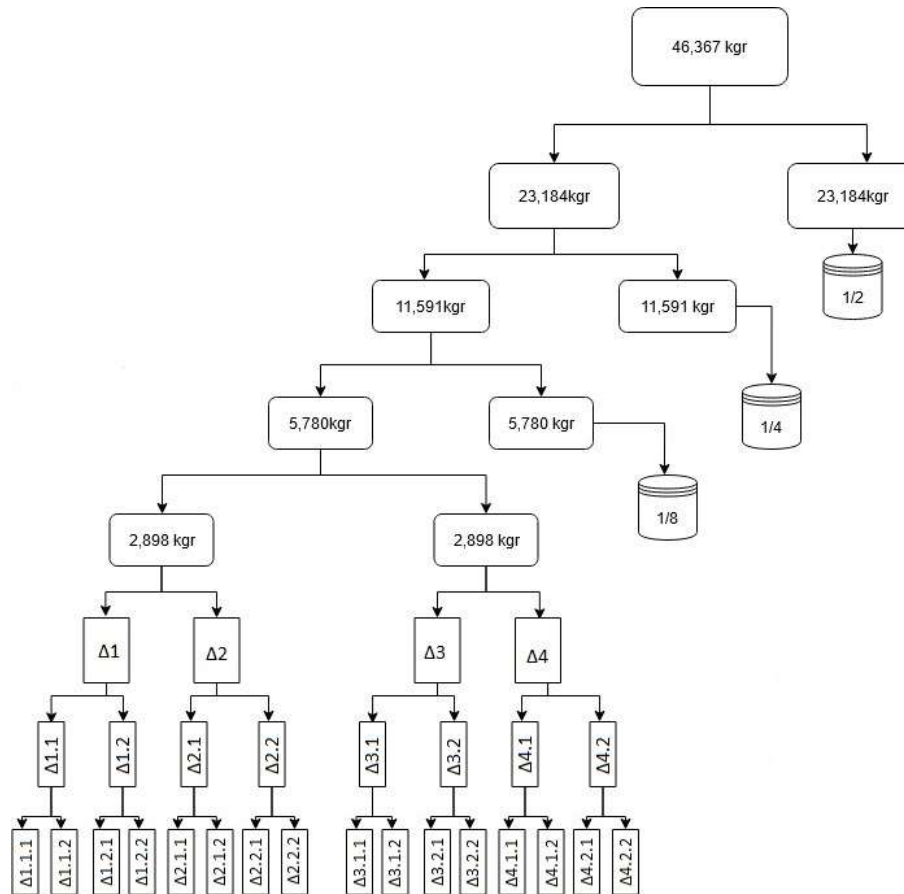
Μια διαπίστωση που γίνεται από τον παραπάνω πίνακα είναι ότι για το καλύτερο αποτέλεσμα είναι απαραίτητο να έχει προηγηθεί κοκκομετρική ταξινόμηση του μεταλλεύματος. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η παρουσία δεσμευμένων τεμαχίων θα δημιουργήσει μια ενδιάμεση ζώνη μεταξύ συμπυκνώματος και στείρου, δηλαδή ένα τρίτο προϊόν, του οποίου το ειδικό βάρος θα κυμαίνεται μεταξύ των δύο άλλων.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 Δειγματοληψία

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας συλλέχθηκε δείγμα από τις αποθέσεις στην περιοχή της παραλίας Θορικού του Λαυρίου. Το απόρριμμα που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από επίπλευση και, όπως ήδη αναφέρθηκε, αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος των αποθέσεων.

Το δείγμα, αφού ξηράθηκε σε κλειστό φούρνο σε θερμοκρασία 105° και ζυγίστηκε, βρέθηκε ότι είναι 46,367 kg. Λόγω της θέσης των απορριμμάτων σε παράκτια περιοχή, το δείγμα περιείχε κατά μέσο όρο αρκετά μεγάλο ποσοστό υγρασίας (περίπου 16-17%). Το δείγμα χωρίστηκε διαδοχικά σε κλάσματα με την συσκευή δειγματοληψίας Jones, με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε διχοτόμηση του υλικού να παράγεται όμοιο κατά βάρος και σύσταση δείγμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω (Διάγραμμα 1). Από τους τρεις πρώτους διαχωρισμούς τα κλάσματα που δημιουργήθηκαν αντιπροσωπεύουν το 1/2 το 1/4 και το 1/8 της αρχικής ποσότητας. Το ένα από τα δυο κλάσματα της ποσότητας 1/8 αποθηκεύτηκε για χρήση σε περαιτέρω πειράματα ενώ στο δεύτερο ο διαχωρισμός συνεχίστηκε για 4 φορές ακόμα έως ότου το βάρος των δειγμάτων φτάσει στα 362 με 363 g.



Διάγραμμα 1. Δειγματοληψία σε κλάσματα με διαχωριστή Jones.

Στη συνέχεια, δείγμα 362,2 g, που επιλέχθηκε τυχαία, διαχωρίστηκε με την μέθοδο της ξηρής κοσκίνισης σε κλάσματα με μέγεθος +600 μm, -600+300 μm, -300+150 μm, -150+75 μm και -75 μm. Τα αποτελέσματα, όπως φαίνεται από τον παρακάτω Πίνακα 2, δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος του απορρίμματος συγκεντρώνεται στο κοκκομετρικό κλάσμα -300+150 μm, κάτι το οποίο είναι λογικό καθότι είναι γνωστό ότι το δείγμα προέρχεται από μετάλλευμα, το οποίο έχει επεξεργαστεί από την διαδικασία της επίλευσης.

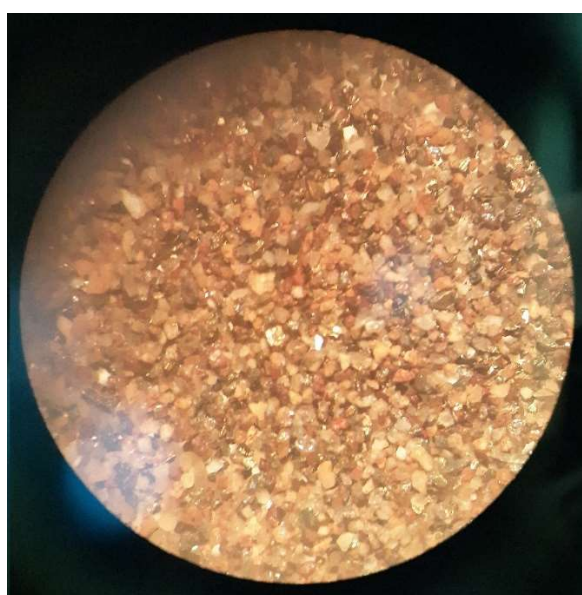
Πίνακας 2. Κοκκομετρική κατανομή δείγματος

Κοκκομετρικά κλάσματα (μm)	Βάρος (g)	Κατανομή (%)
+600	2,1	0,59
-600+300	27,9	7,79
-300+150	324,9	90,73
-150+75	1,5	0,42
-75	1,7	0,47

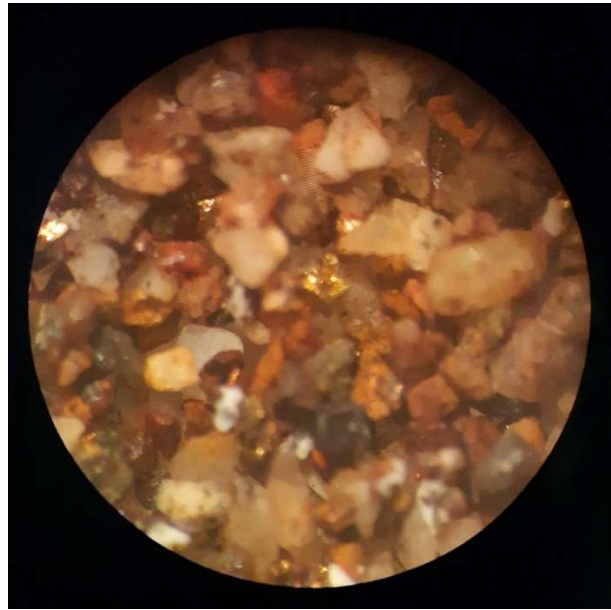
6.2. Ορυκτολογική ανάλυση

Τα δείγματα εξετάστηκαν με στερεοσκοπικό μικροσκόπιο σε διάφορες μεγεθύνσεις για να προσδιοριστεί κατά προσέγγιση η ορυκτολογική του σύσταση, με βάση την ανακλαστικότητα τους. Τα μεταλλικά ορυκτά ανακλούν το φως και προσδίδουν λάμψη ενώ τα μη μεταλλικά είτε απορροφούν το φως είτε είναι διάφανα.

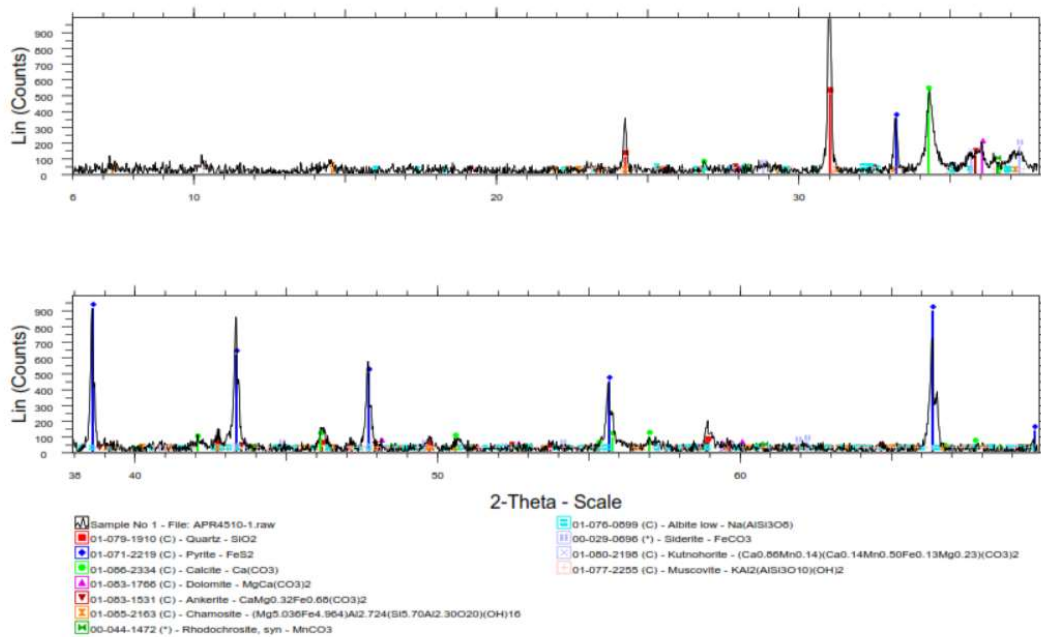
Από το μικροσκόπιο διακρίνεται μεγάλος αριθμός ανθρακικών και πυριτικών ορυκτών, όπως χαλαζίας, ασβεστίτης, (καστανοκόκκινου χρώματος, γαλακτεροί, κίτρινοι, διάφανοι και κρυστάλλиноι κόκκοι), σκωρίες, και θείο με κιτρινωπό χρώμα. Από τα μεταλλικά ορυκτά παρατηρούνται μικτές θειούχες ενώσεις σιδηροπυρίτη ο οποίος επικρατεί στο δείγμα (χαλκοκίτρινος έως χρυσοκίτρινος), αρσеноπυρίτη (με λευκό γκρίζο, διάφανο χρώμα), γαληνίτη (γκρι σκούρος) και σφαλερίτη (μαύρο, κίτρινο, κόκκινο).



Εικόνα 8: Φωτογραφία στερεοσκοπικού μικροσκοπίου αρχικού δείγματος (μεγέθυνση 25X)



Εικόνα 9: Φωτογραφία στερεοσκοπικού μικροσκοπίου αρχικού δείγματος (μεγέθυνση 50X)



Διάγραμμα 2. Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού δείγματος με XRD

6.3. Χημική ανάλυση

Μέρος των διαχωρισμένων σε κλάσματα δειγμάτων, μετά από δειγματοληψία, υποβλήθηκαν σε λειοτρίβηση και χημική ανάλυση. Τα αποτελέσματα των χημικών

αναλύσεων σε οξείδια παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 ενώ στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων σε μορφή στοιχείων.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης των κοκκομετρικών κλασμάτων σε οξείδια

Μέγεθος	+600μm	-600+300μm	-300+150μm	-150+75μm	-75μm
Ποσοστό	%	%	%	%	%
Na ₂ O	>10,55	4,37	4,09	>7,82	>9,06
MgO	3,00	2,28	2,62	2,66	1,23
Al ₂ O ₃	3,11	4,23	4,74	5,02	2,43
SiO ₂	7,20	13,01	15,54	18,19	7,68
P ₂ O ₅	0,25	0,14	0,14	0,20	0,30
SO ₃	28,61	10,06	10,77	22,05	24,48
Cl	0,23	0,12	0,12	0,15	0,41
K ₂ O	0,38	0,68	0,69	0,63	0,22
CaO	24,15	22,54	23,48	16,22	17,21
TiO ₂	0,09	0,16	0,21	0,19	0,07
V ₂ O ₅	0,003	0,01	0,01	<0,003	0,02
Cr ₂ O ₃	0,02	0,03	0,02	0,02	0,005
MnO	1,24	2,17	>2,56	>2,13	0,90
Fe ₂ O ₃	14,55	11,91	15,15	32,34	44,36
CoO	0,02	0,02	0,03	0,06	0,09
NiO	0,004	0,003	0,003	0,002	<0,002
CuO	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07
ZnO	0,98	1,14	1,43	1,29	1,43
Ga	<0,001	<0,000	<0,001	<0,001	<0,001
Ge	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000	<0,001
As ₂ O ₃	>0,53	>0,38	>0,46	>1,29	8,46
Se	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000	<0,001
Br	0,001	0,001	0,001	0,002	0,009
Rb ₂ O	0,002	0,003	0,003	0,002	<0,000
SrO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Y	0,002	<0,000	<0,000	0,002	<0,001
Mo	<0,003	<0,003	<0,003	<0,004	<0,005
Ag	<0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
Cd	0,002	0,003	0,004	0,003	0,001
SnO ₂	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Sb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Te	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
I	0,001	<0,001	<0,001	<0,002	<0,002
BaO	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03
WO ₃	<0,00	<0,00	<0,00	<0,01	<0,01
Hg	0,002	0,000	0,001	0,001	<0,001
Tl	<0,00	<0,000	<0,00	<0,00	<0,001
PbO	0,28	0,28	0,29	0,42	0,86

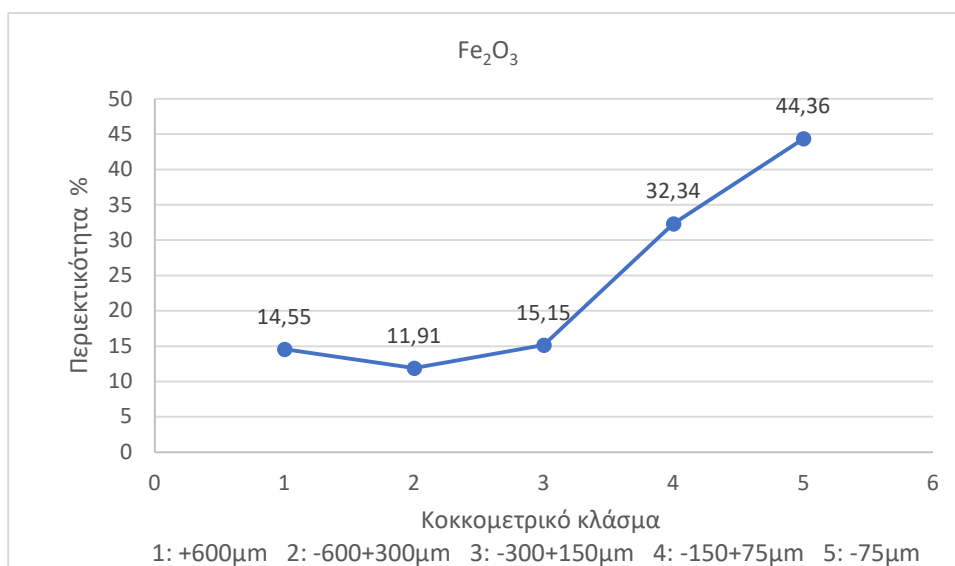
Bi	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	<0,005
Th	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
U	0,00028	<0,00028	<0,00031	<0,00035	<0,00042

Πίνακας 4. Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης των κοκκομετρικών κλασμάτων σε στοιχεία.

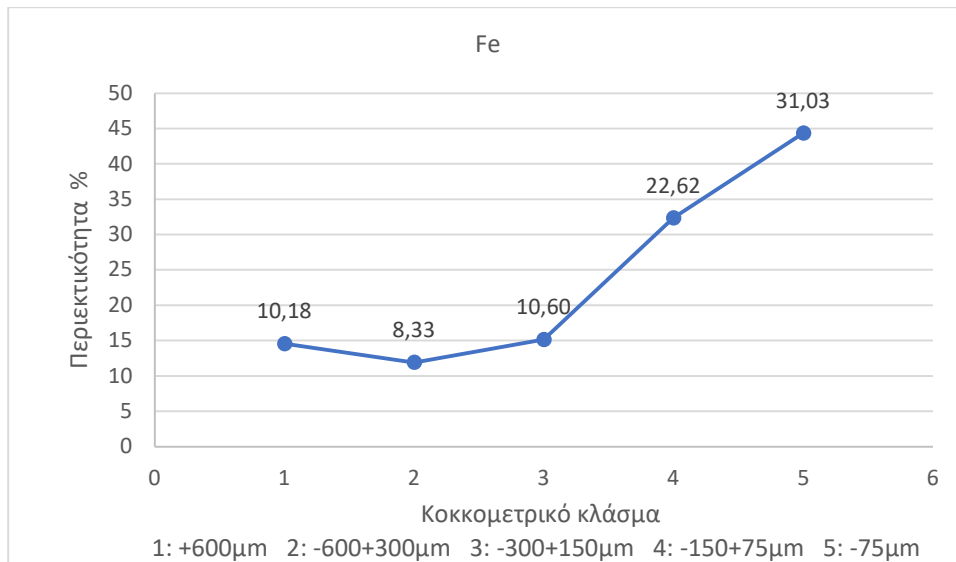
Μέγεθος	+600mm	-600+300mm	-300+150mm	-150+75mm	-75mm
Symbol	%	%	%	%	%
Na	7,83	3,24	3,03	5,80	>6,72
Mg	1,81	1,37	1,58	1,60	0,74
Al	1,65	2,24	2,51	2,66	1,29
Si	3,37	6,08	7,27	8,50	3,59
P	0,11	0,057	0,06	0,09	0,13
S	11,46	4,25	4,14	8,83	9,8
Cl	0,23	0,12	0,12	0,15	0,41
K	0,31	0,57	0,57	0,52	0,19
Ca	17,26	16,11	16,78	11,59	12,30
Ti	0,054	0,099	0,13	0,11	0,04
V	0,00	0,00	0,01	<0,00	0,01
Cr	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00
Mn	0,96	1,68	>1,98	>1,65	0,70
Fe	10,18	8,328	10,60	22,62	31,03
Co	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07
Ni	0,003	0,002	0,002	0,001	<0,001
Cu	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Zn	0,79	0,91	1,15	1,04	1,15
Ga	<0,001	<0,000	<0,001	<0,001	<0,001
Ge	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000	<0,001
As	>0,40	>0,29	0,35	>0,98	6,40
Se	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000	<0,001
Br	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Rb	0,002	0,003	0,003	0,002	<0,000
Sr	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01
Y	0,002	<0,000	<0,000	0,002	<0,001
Mo	<0,003	<0,003	<0,003	<0,004	<0,005
Ag	<0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
Cd	0,002	0,003	0,004	0,003	0,001
Sn	<0,000	<0,001	<0,000	<0,001	<0,001
Sb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Te	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
I	0,001	<0,001	<0,001	<0,002	<0,002
Ba	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
W	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,01
Hg	0,002	0,000	0,001	0,001	<0,001

Tl	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,01
Pb	0,26	0,26	0,27	0,39	0,80
Bi	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	<0,005
Th	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
U	0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0004	<0,0004

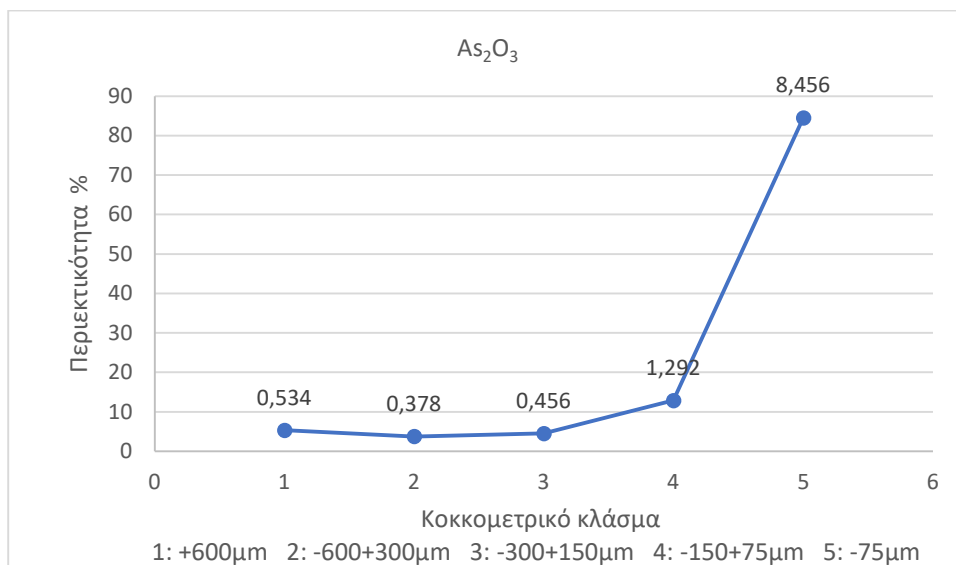
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ξεχωρίζει η συγκριτικά αυξημένη περιεκτικότητα των αποθέσεων σε βαρέα μέταλλα, ψευδάργυρο και μόλυβδο, τα οποία ήταν και ο σκοπός της εξόρυξης, σε αρσενικό και σε σίδηρο. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η συγκέντρωση των στοιχείων και των αντίστοιχων οξειδίων ανά κοκκομετρικό κλάσμα.



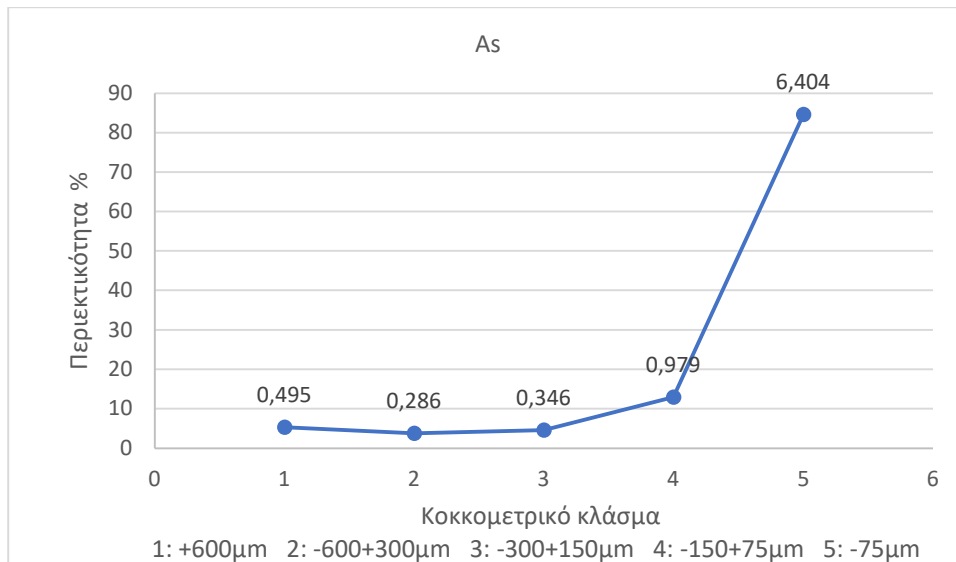
Διάγραμμα 3α. Περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 ανά κοκκομετρικό κλάσμα



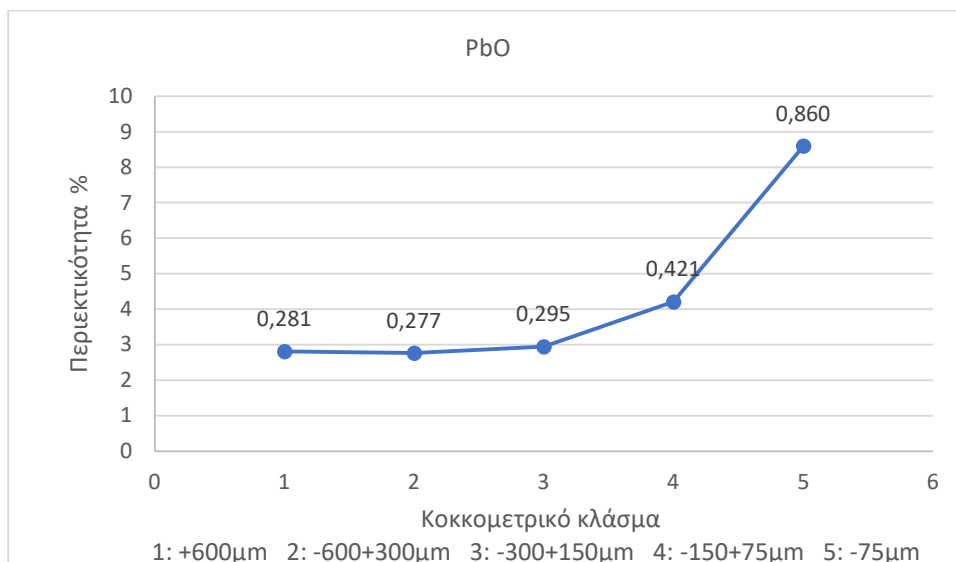
Διάγραμμα 3β. Περιεκτικότητα σε Fe ανά κοκκομετρικό κλάσμα



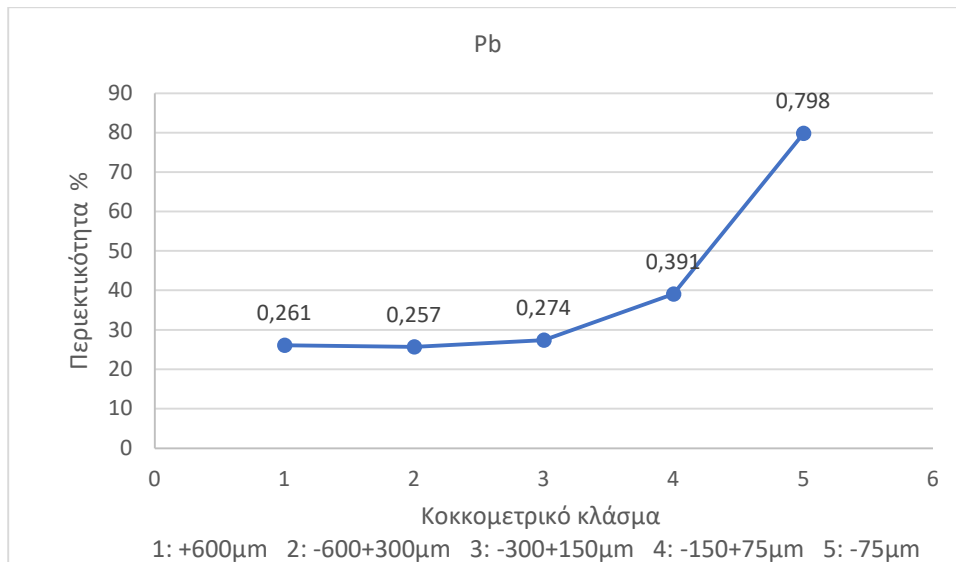
Διάγραμμα 4α. Περιεκτικότητα σε As₂O₃ ανά κοκκομετρικό κλάσμα.



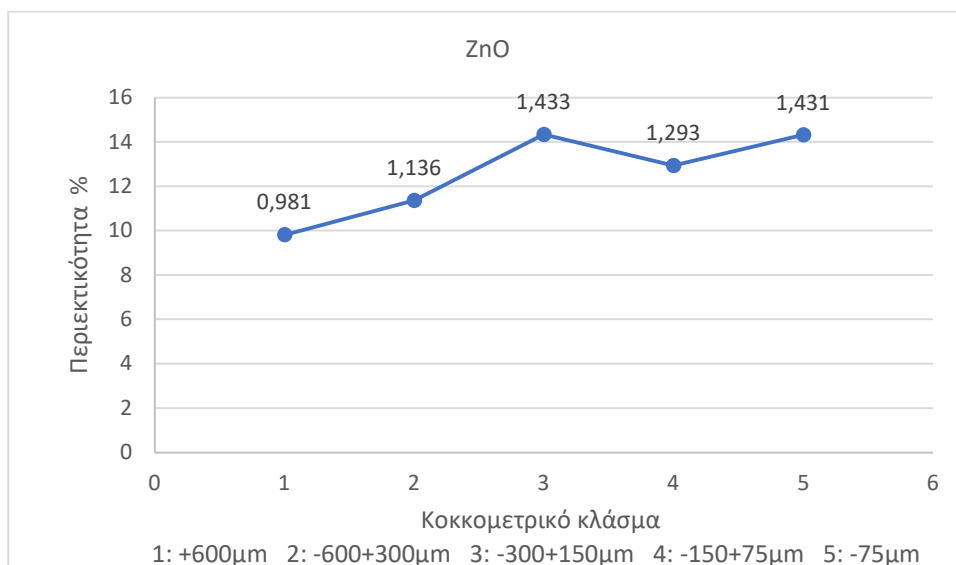
Διάγραμμα 4β. Περιεκτικότητα σε As ανά κοκκομετρικό κλάσμα.



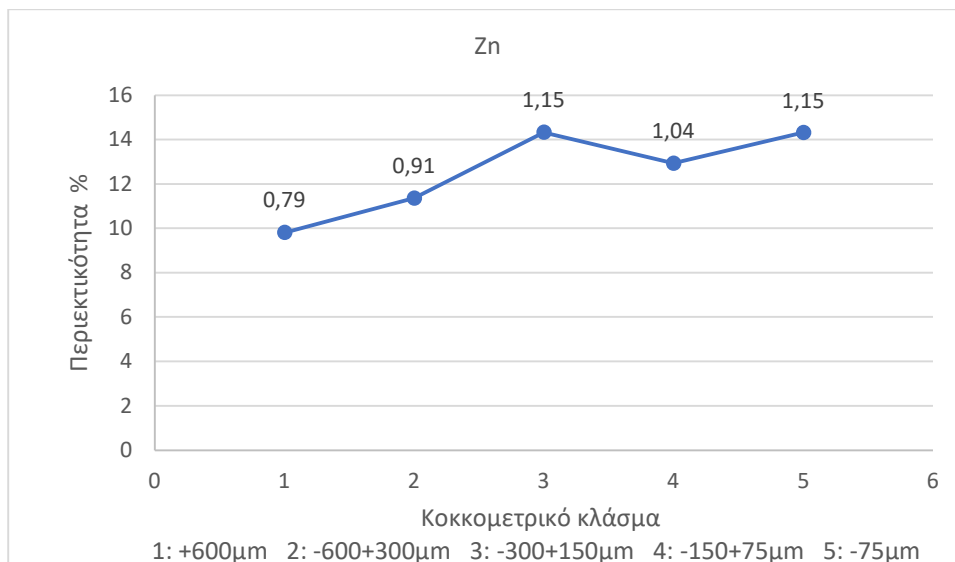
Διάγραμμα 5α. Περιεκτικότητα σε PbO ανά κοκκομετρικό κλάσμα.



Διάγραμμα 5β. Περιεκτικότητα σε Pb ανά κοκκομετρικό κλάσμα.



Διάγραμμα 6α. Περιεκτικότητα σε ZnO ανά κοκκομετρικό κλάσμα.



Διάγραμμα 6β. Περιεκτικότητα σε Zn ανά κοκκομετρικό κλάσμα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνονται τα εξής συμπεράσματα

- Το μεγαλύτερο ποσοστό συγκέντρωσης έχει ο σίδηρος και το αρσενικό, και σε αρκετά μικρότερη συγκέντρωση ακολουθούν ο ψευδάργυρος και ο μόλυβδος.
- Όσο μειώνεται το μέγεθος των τεμαχιδίων τόσο αυξάνεται και η περιεκτικότητα των μετάλλων, γεγονός που οφείλεται κυρίως στον μεγαλύτερο βαθμό αποδέσμευσης στα μικρότερα κλάσματα.
- Η μεγάλη περιεκτικότητα των βαρέων μετάλλων και ιδιαίτερα του αρσενικού 6,404% σε μέγεθος -75mm είναι ιδιαίτερα ανησυχητική για την δημόσια υγεία και το περιβάλλον, αφενός λόγω της μεγάλης τοξικότητας που παρουσιάζει και αφετέρου, λόγω του εξαιρετικά μικρού μεγέθους, μπορεί να παρασυρθεί εύκολα από τον άνεμο και να διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα.

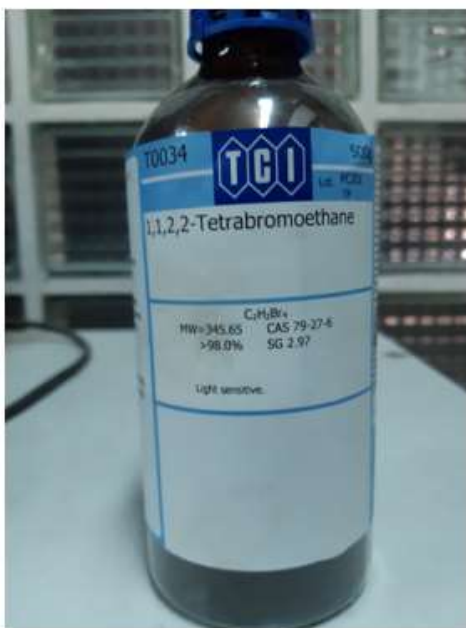
7. Μέθοδος βαρέων υγρών

Γενικά, τα περισσότερα μεταλλικά ορυκτά στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως αρσενοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, σφαλερίτης, γαληνίτης κ.ά., έχουν ειδικό βάρος που κυμαίνεται μεταξύ 4 και 8 g/cm³, ενώ τα μη μεταλλικά όπως χαλαζίας ασβεστίτης μεταξύ 2 και 4 g/cm³. Τα βαρέα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν για τον διαχωρισμό ήταν το

τετραβρωμοαιθάνιο με χημικό τύπο $C_2H_2Br_4$ και ειδικό βάρος 2,97 (Εικόνα 10) και το ιωδιούχο μεθυλένιο με χημικό τύπο CH_2I_2 και ειδικό βάρος 3,32 (Εικόνα 11).

Τα ειδικά βάρη για τα κύρια ορυκτά της απόθεσης είναι

- Αρσеноπυρίτης 6,1
- Σιδηροπυρίτης 5,0
- Σφαλερίτης 3,9 - 4,1
- Γαληνίτης 7,4 - 7,6



Εικόνα 10: $C_2H_2Br_4$



Εικόνα 11: CH_2I_2

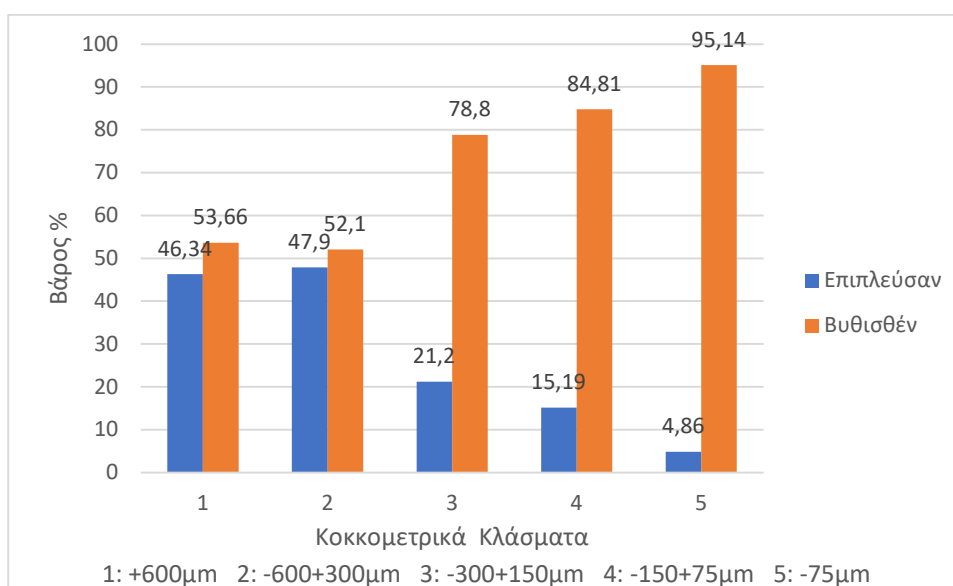
Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν 25 g από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, που πάρθηκαν με δειγματοληψία. Το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε γυάλινο ποτήρι ζέσης, στο οποίο είχε προστεθεί το βαρύ υγρό, αναδεύτηκε ελαφρά, και στη συνέχεια αφέθηκε να ηρεμίσει για περίπου 20 με 30 λεπτά, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων του δείγματος. Στη συνέχεια συλλέχθηκαν τα διαχωρισμένα κλάσματα, το επιπλέυσαν και το βυθισθέν, ξεπλύθηκαν και στάλθηκαν για χημική ανάλυση.

7.1 Αποτελέσματα δοκιμής με βαρύ υγρό 2,97

Στον Πίνακα 5 και στο Διάγραμμα 7 φαίνονται τα βάρη των προϊόντων για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα ενώ στους Πίνακες 6-9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων για τα διάφορα συστατικά.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα διαχωρισμού με βαρέα υγρά 2,97 C₂H₂Br₄

Αρχικό Βάρος g	Βαρύ υγρό C ₂ H ₂ Br ₄	Κλάσμα μm	Επιπλεύσαν g	Βυθισθέν g	Επιπλεύσαν %	Βυθισθέν %
25	2,97	+600	11,4	13,2	46,34	53,66
25	2,97	-600+ 300	11,4	12,4	47,90	52,10
25	2,97	-300+150	5,3	19,7	21,2	78,8
20	2,97	-150+75	2,7	15,1	15,19	84,81
16	2,97	-75	0,7	13,7	4,86	95,14



Διάγραμμα 7. Αποτελέσματα διαχωρισμού ανά κοκκομετρικό κλάσμα σε ε.β. 2,97

Πίνακας 6. Ανάλυση σε Fe με βαρύ υγρό 2,97 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα

Fe	Βάρος %		Περιεκτικότητα %		Μεταλλομονάδες		Κατανομή στο βυθισθέν %
	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	
+600μm	53,66	46,34	8,86	7,69	4,75	3,56	57,16
-600+ 300μm	52,1	47,9	19,83	5,64	10,33	2,70	79,27
-300+ 150μm	78,8	21,2	16,48	3,81	12,99	0,81	94,14
-150+ 75μm	84,81	15,19					
-75μm	95,16	4,84					

Πίνακας 7. Ανάλυση σε As με βαρύ υγρό 2,97 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα

As	Βάρος %		Περιεκτικότητα %		Μεταλλομονάδες		Κατανομή στο βυθισθέν %
	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	
+600μm	53,66	46,34	0,31	0,22	0,17	0,10	62,00
-600+ 300μm	52,1	47,9	0,91	0,15	0,47	0,07	86,84
-300+ 150μm	78,8	21,2	0,58	0,11	0,46	0,02	95,15
-150+ 75μm	84,81	15,19					
-75μm	95,16	4,84					

Πίνακας 8. Ανάλυση σε Pb με βαρύ υγρό 2,97 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα

Pb	Βάρος %		Περιεκτικότητα %		Μεταλλομονάδες		Κατανομή στο βυθισθέν %
	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	
+600μm	53,66	46,34	0,3	0,22	0,16	0,10	61,23
-600+ 300μm	52,1	47,9	0,37	0,17	0,19	0,08	70,30
-300+ 150μm	78,8	21,2	0,4	0,14	0,32	0,03	91,39
-150+ 75μm	84,81	15,19					
-75μm	95,16	4,84					

Πίνακας 9. Ανάλυση σε Zn με βαρύ υγρό 2,97 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα

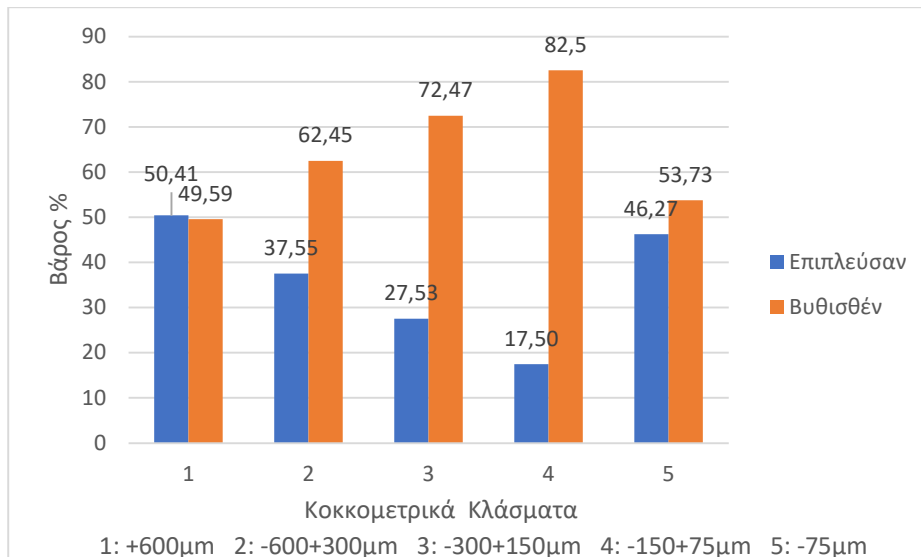
Zn	Βάρος %		Περιεκτικότητα %		Μεταλλομονάδες		Κατανομή στο βυθισθέν %
	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	
+600 μm	53,66	46,34	1,23	0,47	0,66	0,22	75,19
-600+300 μm	52,1	47,9	1,44	0,44	0,75	0,21	78,07
-300+150 μm	78,8	21,2	2,28	0,27	1,80	0,06	96,91
-150+75 μm	84,81	15,19					
-75 μm	95,16	4,84					

7.2 Αποτελέσματα δοκιμής με βαρύ υγρό 3,32

Παρόμοια με την ανάλυση σε ε.β. 2,97, στον Πίνακα 10 και στο Διάγραμμα 8 φαίνονται τα βάρη των προϊόντων για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα ενώ στους Πίνακες 11-14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων για τα διάφορα συστατικά.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα διαχωρισμού με βαρύ υγρό 3,32 CH₂I₂

Αρχικό Βάρος g	Βαρύ υγρό CH ₂ I ₂	Κλάσμα μm	Βυθισθέν g	Επιπλεύσαν g	Βυθισθέν %	Επιπλεύσαν %
25	3,32	+600	12,4	12,2	50,41	49,59
25	3,32	-600+ 300	6,8	17,9	27,53	72,47
25	3,32	-300+150	9,2	15,3	37,55	62,45
24	3,32	-150+75	4,2	19,8	17,50	82,50
15	3,32	-75	6,2	7,2	46,27	53,73



Διάγραμμα 8. Αποτελέσματα διαχωρισμού ανά κοκκομετρικό κλάσμα σε ε.β. 3,32

Πίνακας 11. Ανάλυση σε Fe με βαρύ υγρό 3,32 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα

Fe	Βάρος %		Περιεκτικότητα %		Μεταλλομονάδες		Κατανομή στο βυθισθέν %
	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	
+600μm	49,59	50,41	17,9	9,06	8,88	4,57	66,03
-600+ 300μm	72,47	27,53	16,09	7,13	11,66	1,96	85,59
-300+ 150μm	82,5	17,5	29,51	7,79	24,35	1,37	94,69
-150+ 75μm	62,45	37,55	35,24	6,79	22,01	2,55	89,62
-75μm	53,73	46,27	36,65	14,11	19,69	6,53	75,10

Πίνακας 12. Ανάλυση σε As με βαρύ υγρό 3,32 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα

As	Βάρος %		Περιεκτικότητα %		Μεταλλομονάδες		Κατανομή στο βυθισθέν %
	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	
+600μm	49,59	50,41	0,88	0,3	0,44	0,15	74,26
-600+ 300μm	72,47	27,53	0,66	0,17	0,48	0,05	91,09
-300+ 150μm	82,5	17,5	1,36	0,17	1,12	0,03	97,42
-150+ 75μm	62,45	37,55	1,27	0,15	0,79	0,06	93,37
-75μm	53,73	46,27	9,39	1,75	5,05	0,81	86,17

Πίνακας 13. Ανάλυση σε Pb με βαρύ υγρό 3,32 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα

Pb	Βάρος %		Περιεκτικότητα %		Μεταλλομονάδες		Κατανομή στο βυθισθέν %
	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	
+600 μ m	49,59	50,41	0,35	0,24	0,17	0,12	58,93
-600+ 300 μ m	72,47	27,53	0,42	0,2	0,30	0,06	84,68
-300+ 150 μ m	82,5	17,5	0,53	0,25	0,44	0,04	90,90
-150+ 75 μ m	62,45	37,55	0,53	0,21	0,33	0,08	80,76
-75 μ m	53,73	46,27	1,07	0,72	0,57	0,33	63,31

Πίνακας 14. Ανάλυση σε Zn με βαρύ υγρό 3,32 για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα

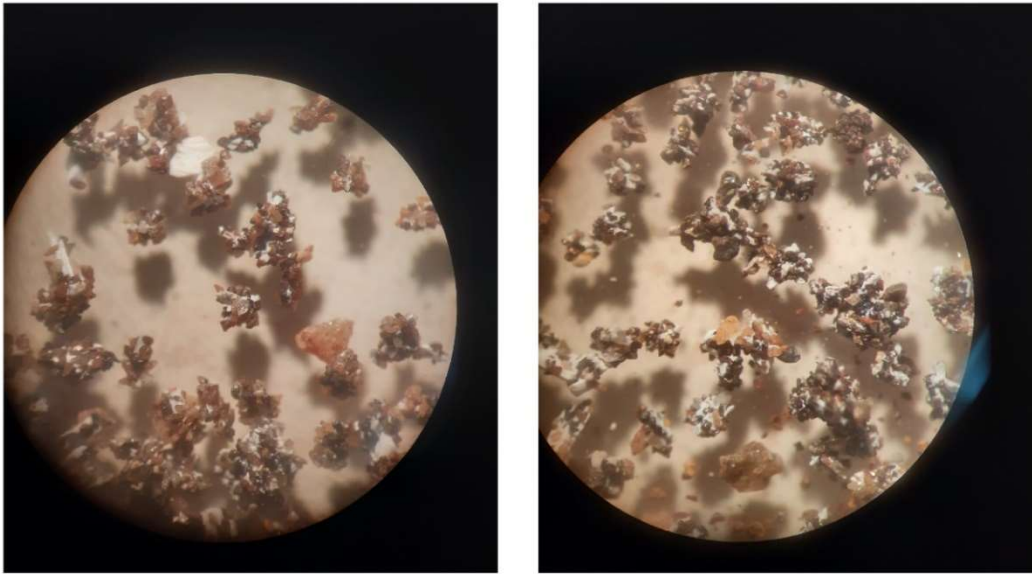
Zn	Βάρος %		Περιεκτικότητα %		Μεταλλομονάδες		Κατανομή στο βυθισθέν %
	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	Βυθισθέν	Επιπλεύσαν	
+600 μ m	49,59	50,41	1,48	0,66	0,73	0,33	68,81
-600+ 300 μ m	72,47	27,53	3,01	0,48	2,18	0,13	94,29
-300+ 150 μ m	82,5	17,5	1,59	0,37	1,31	0,06	95,30
-150+ 75 μ m	62,45	37,55	2,65	0,15	1,65	0,06	96,71
-75 μ m	53,73	46,27	1,61	1,28	0,87	0,59	59,36

7.3 Συμπεράσματα

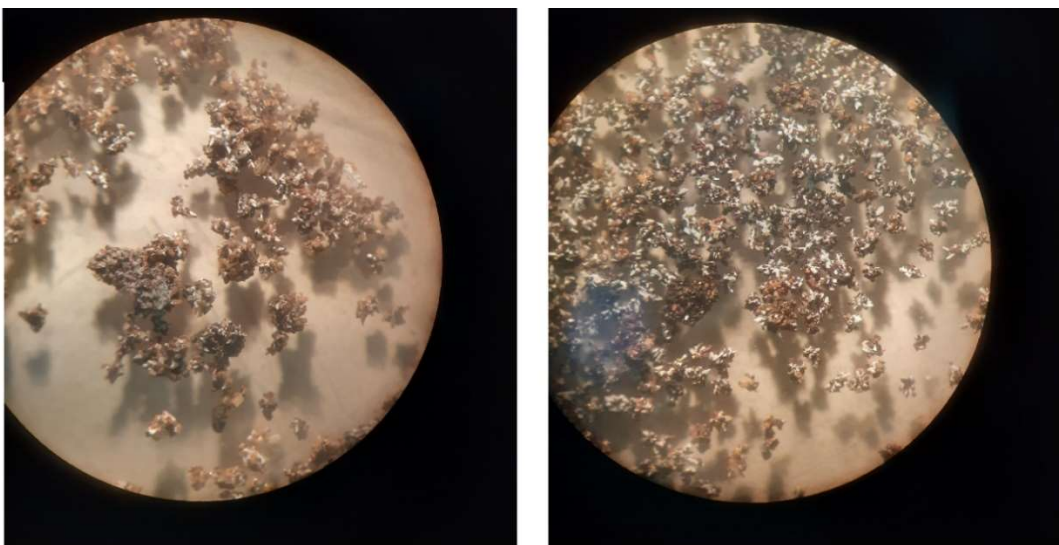
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την βαρυτομετρική ανάλυση με τα δυο βαριά υγρά είναι τα εξής:

- Για το μέγεθος +600 μ m, το υλικό κατανέμεται σχεδόν ισοβαρώς, 46,34% με 53,66 % για το βαρύ υγρό 2,97, και 50,41% με 49,59% για το βαρύ υγρό 3,32. Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι η κατανομή των στοιχείων ενδιαφέροντος είναι μεγαλύτερη στο βυθισθέν και κυμαίνεται από 57,16% έως 75,19% για το βαρύ υγρό 2,97, με το στοιχείο με τη μεγαλύτερη κατανομή να είναι ο ψευδάργυρος με 75,19%. Το ίδιο ισχύει και για το βαρύ υγρό 3,32, με την κατανομή των στοιχείων να κυμαίνεται γενικά μεταξύ 58,80% και 74,76%, με τον ψευδάργυρο να είναι πάλι το στοιχείο με την μεγαλύτερη κατανομή με 94,29%.

- Η διακύμανση του βαθμού ανάκτησης στα ορυκτά οφείλεται στο ότι οι κόκκοι είναι σύμμικτοι και δεν υπάρχει επαρκής βαθμός αποδέσμευσης, με αποτέλεσμα αρκετά μεγάλο ποσοστό μη μεταλλικών στοιχείων με μικρότερο ειδικό βάρος να καταλήγουν στον πυθμένα, αλλά και αρκετή ποσότητα από χρήσιμα ορυκτά να επιπλέουν προσκολλημένα μαζί με ελαφριά τεμάχια. (Εικόνες 12α και 12β).

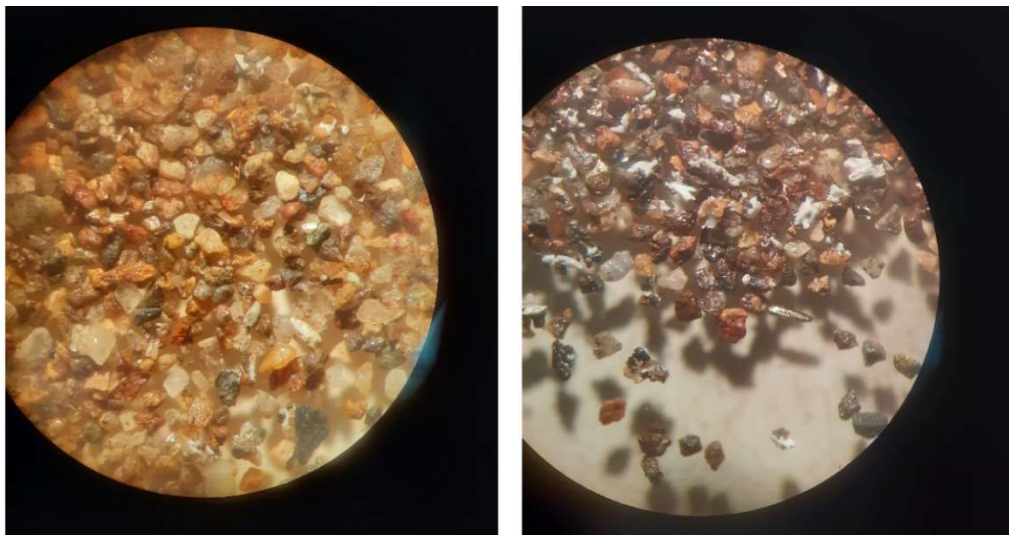


Εικόνα 12α: Μέγεθος +600 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97

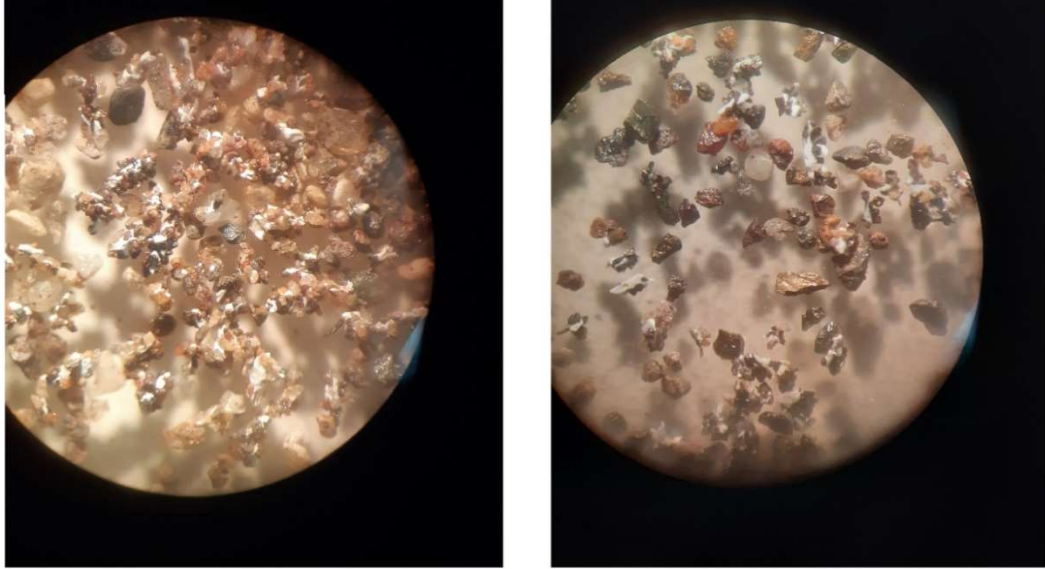


Εικόνα 12β: Μέγεθος +600 μm , επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32

- Για το μέγεθος $-600+300 \mu\text{m}$, το βάρος των προϊόντων του διαχωρισμού στο βαρύ υγρό 2,97 είναι και πάλι σχεδόν ίσο, 47,9% για το ελαφρύ και 52,1% για το βαρύ, ενώ για το βαρύ υγρό 3,32 η διαφορά στα βάρη των προϊόντων αυξάνεται σημαντικά, 27,53% για το επιπλεύσαν και 72,47% για το βυθισθέν. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει ότι η κατανομή των στοιχείων ενδιαφέροντος είναι μεγαλύτερη στο βυθισθέν και κυμαίνεται από 70,30% έως 86,84% για το βαρύ υγρό 2,97, με το αρσενικό να έχει την μεγαλύτερη κατανομή. Για το βαρύ υγρό 3,32, η κατανομή κυμαίνεται μεταξύ 84,68% και 94,29%, με το μεγαλύτερο ποσοστό να ανήκει στον ψευδάργυρο. Και σε αυτό το κλάσμα εντοπίζονται μη αποδεσμευμένοι κόκκοι, αν και σε μικρότερο βαθμό λόγω μικρότερου μεγέθους (Εικόνες 13α και 13β).



Εικόνα 13α: Μέγεθος $-600+300 \mu\text{m}$, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97

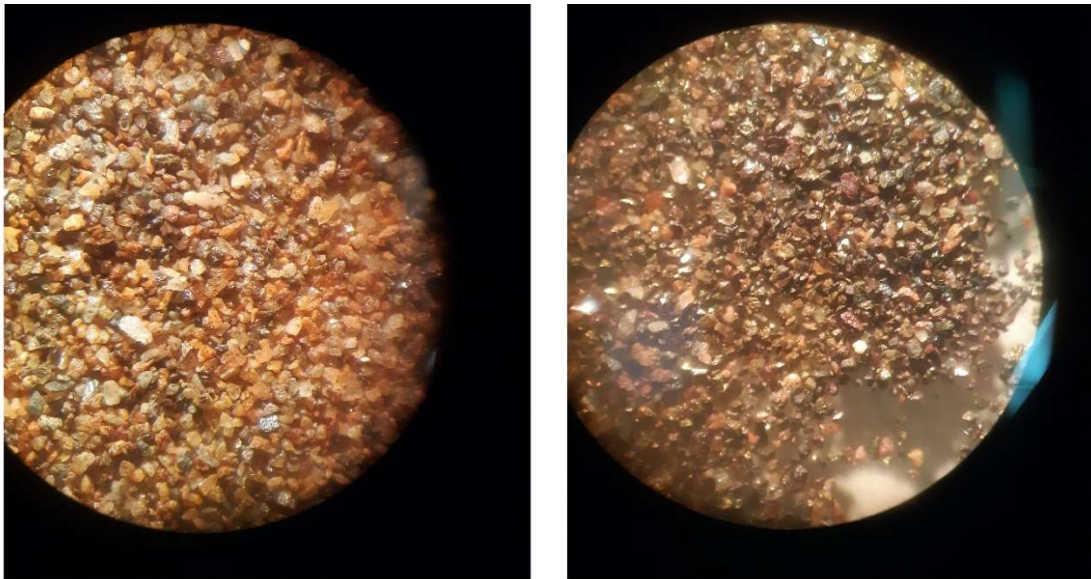


Εικόνα 13β: Μέγεθος $-600+300 \mu\text{m}$, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32

- Για το μέγεθος $-300+150\mu\text{m}$ το βάρος των προϊόντων του διαχωρισμού στο βαρύ υγρό 2,97 είναι από 21,20% για το ελαφρύ και 78,80% για το βαρύ, ενώ για το βαρύ υγρό 3,32 είναι από 17,50% στο επιπλεύσαν και 82,50% στο βυθισθέν. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει ότι η κατανομή των στοιχείων ενδιαφέροντος αυξάνεται στο βυθισθέν και κυμαίνεται, από 91,39% έως 96,91% για το βαρύ υγρό 2,97, με τον σφαιρίτη να έχει την μεγαλύτερη κατανομή. Για το βαρύ υγρό 3,32, η κατανομή κυμαίνεται μεταξύ 90,90% και 97,42% με το μεγαλύτερο ποσοστό να ανήκει στο αρσενικό (Εικόνες 14α και 14β).



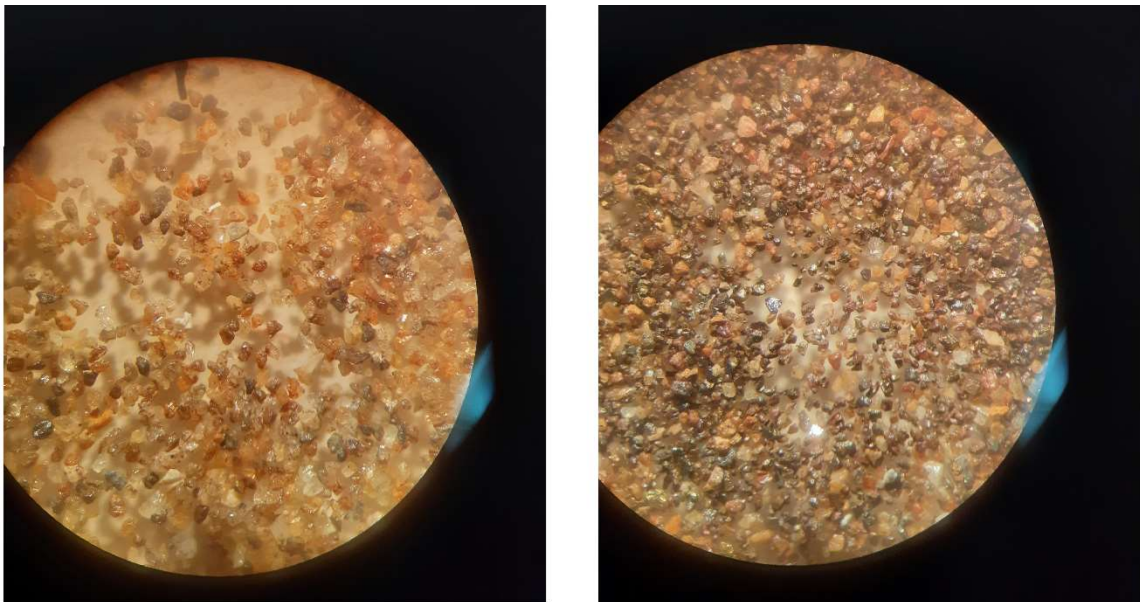
Εικόνα 14α: Μέγεθος $-300+150\ \mu\text{m}$, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97



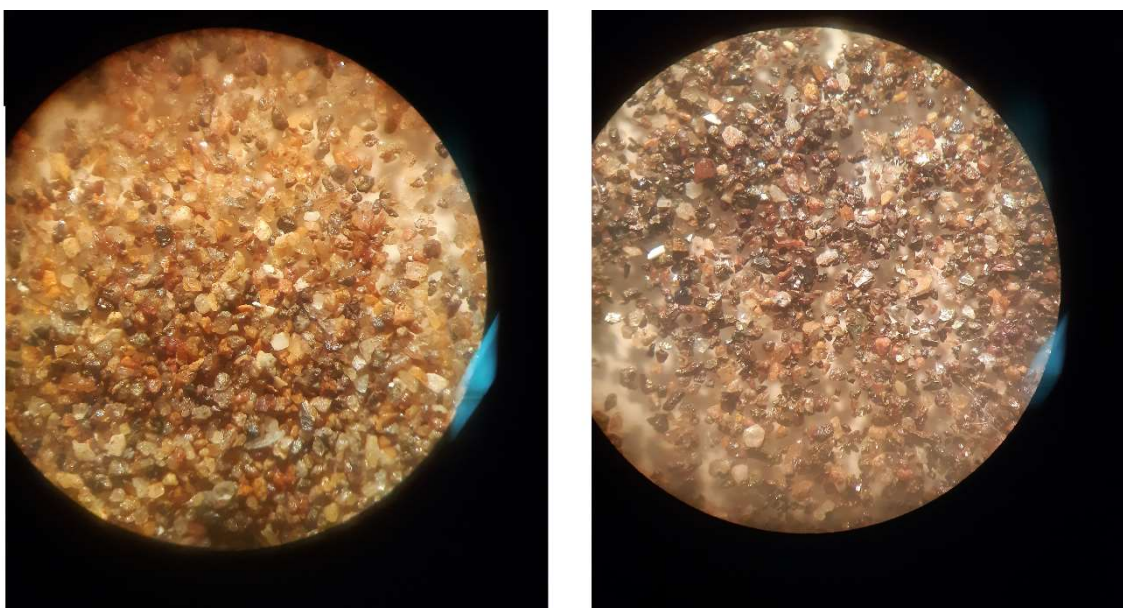
Εικόνα 14β: Μέγεθος $-300+150\ \mu\text{m}$, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32

- Για το μέγεθος $-150+75\ \mu\text{m}$ το βάρος των προϊόντων του διαχωρισμού στο βαρύ υγρό 2,97 είναι, 15,19% για το ελαφρύ και 84,81% για το βαρύ, ενώ για το βαρύ υγρό 3,32 είναι 37,55% για το επιπλεύσαν και 62,45% για το βυθισθέν.

- Κατά την διάρκεια της πρώτης δοκιμής για το μέγεθος $-150+75\mu\text{m}$ παρατηρήθηκε μειωμένη ταχύτητα στην κάθοδο του υλικού προς τον πυθμένα σε σύγκριση με τις προηγούμενες κοκκομετρίες. Επίσης λόγω του λεπτομερούς μεγέθους του υλικού το δείγμα αναδεύτηκε ελαφρά για να επιτευχθεί καλύτερος διαχωρισμός. Το βάρος του ελαφριού υλικού που συλλέχθηκε από την επιφάνεια του δοχείου ανήλθε σε 2,7 g το οποίο δεν ήταν αρκετό για την αναλυτική ικανότητα του εξοπλισμού της σχολής, και δεν κατέστη δυνατόν να αναλυθεί, οπτικά από την παρατήρηση του μικροσκοπίου, ο βαθμός ανάκτησης κατά εκτίμηση κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με την προηγούμενη κοκκομετρία.
- Για το βαρύ υγρό 3,32 χρησιμοποιήθηκε περισσότερο υλικό και η κατανομή κυμάνθηκε μεταξύ 80,76% και 96,71%, με το μεγαλύτερο ποσοστό να ανήκει στον ψευδάργυρο. (Εικόνες 15α και 145β).

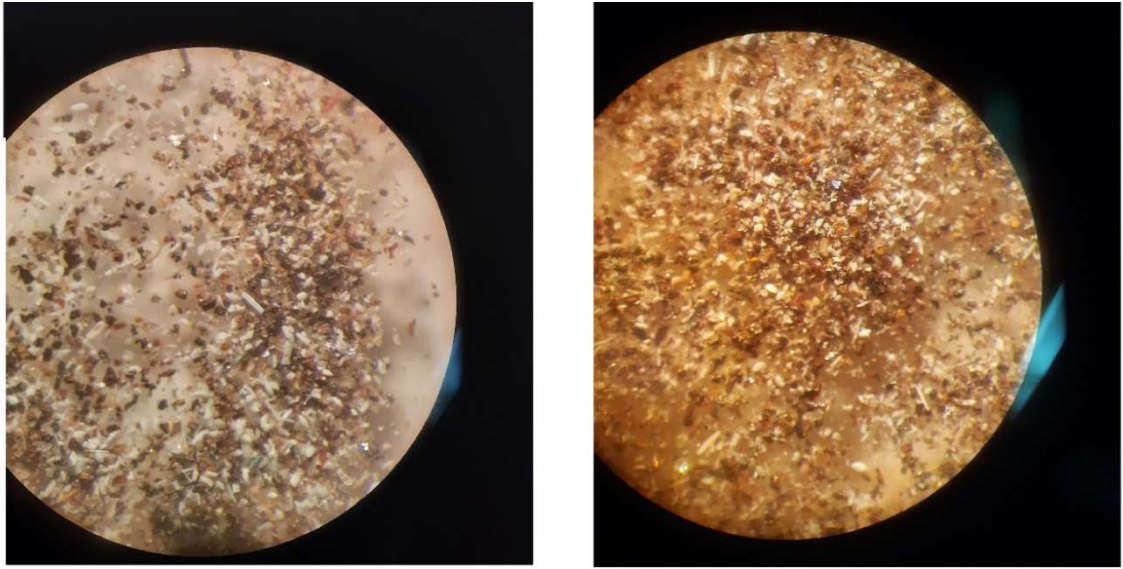


Εικόνα 15α: Μέγεθος $-150+75\mu\text{m}$, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97

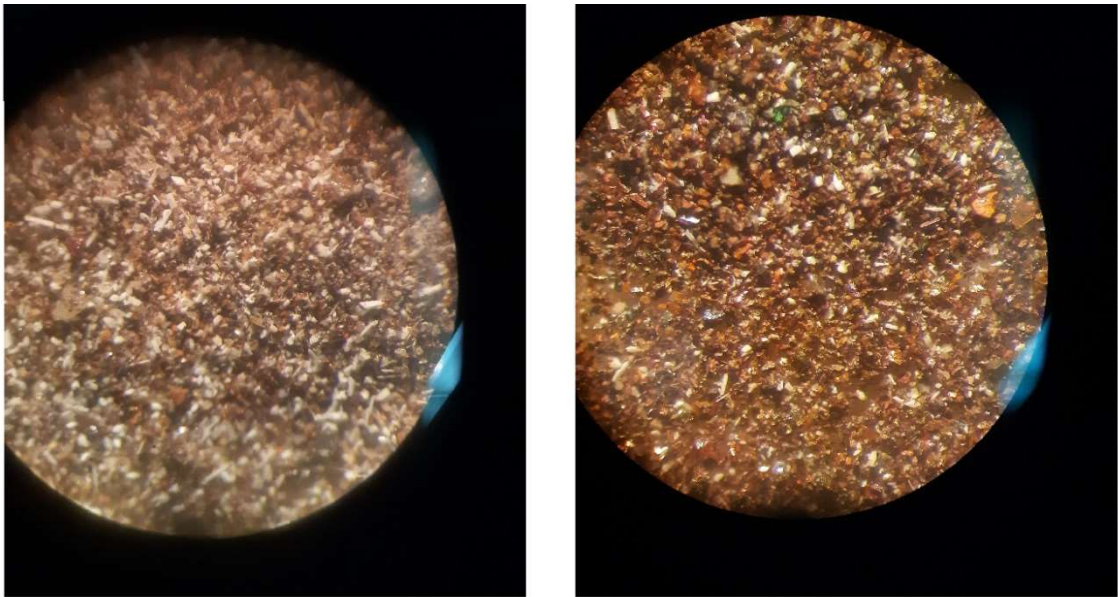


Εικόνα 15β: Μέγεθος $-150+75\mu\text{m}$, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32

- Για το κοκκομετρικό κλάσμα $-75\ \mu\text{m}$, τα τεμαχίδια παρέμειναν για μεγάλο διάστημα σε αιώρηση, και η καταβύθιση ήταν πολύ αργή. Το προϊόν στο βαρύ υγρό 2,97 παρήγαγε 0,7 g στο ελαφρύ, το οποίο δεν επαρκούσε για χημική ανάλυση.
- Για την δοκιμή στο βαρύ υγρό 3,32, προστέθηκε περισσότερη ποσότητα υλικού και παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ταχύτητα καταβύθισης και διαχωριστική ικανότητα. Έτσι κατέστη δυνατό να συγκεντρωθεί περισσότερο υλικό για αναλύσεις. Το βάρος των προϊόντων του διαχωρισμού είναι 46,27% για το ελαφρύ και 53,73% για το βαρύ. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει ότι η κατανομή των στοιχείων ενδιαφέροντος κυμαίνονται από 59,36% και 86,17%, με το μεγαλύτερο ποσοστό να ανήκει στο αρσενικό (Εικόνες 16α και 16β).



Εικόνα 16α: Μέγεθος-75 μ m, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 2,97



Εικόνα 16β: Μέγεθος -75 μ m, επιπλεύσαν (αριστερά) και βυθισθέν (δεξιά) στο 3,32

7.4 Γενικά Συμπεράσματα

Από την ανάλυση με βαρέα υγρά προκύπτει ότι η μεγαλύτερη κατανομή βαρέων μετάλλων αντιστοιχεί στο βυθισθέν προϊόν του κλάσματος $-300+150\mu\text{m}$ και με τα δυο βαρέα υγρά, συγκεκριμένα:

Βαρύ υγρό 2,97	Βαρύ υγρό 3,32
Fe: 94,14%	Fe: 94,69%
As: 95,83%	As: 97,42%
Pb: 91,39%	Pb: 90,90%
Zn: 96,61%	Zn: 95,30%

Στις δοκιμές που έγιναν και με τα δυο βαρέα υγρά, το κοκκομετρικό κλάσμα $+600\mu\text{m}$ παρουσιάζει σχεδόν ίση κατανομή κατά βάρος στο επιπλεύσαν και στο βυθισθέν. Επίσης αρκετά μεγάλο ποσοστό από τα στοιχεία ενδιαφέροντος παραμένει στο επιπλεύσαν υλικό. Ο κυριότερος λόγος για αυτά τα αποτελέσματα εντοπίζεται στον μη επαρκή βαθμό αποδέσμευσης μεταξύ στείρου και χρήσιμου υλικού. Στις δοκιμές που έγιναν και με τα δυο βαρέα υγρά, στα κοκκομετρικά κλάσματα $-150+75\mu\text{m}$ και $-75\mu\text{m}$, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κατανομή των στοιχείων ενδιαφέροντος στο βυθισθέν, μειώνεται σε σύγκριση με το κοκκομετρικό κλάσμα $-300+150\mu\text{m}$. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό της μεθόδου των βαρέων υγρών να επεξεργαστούν πολύ λεπτομερή τεμάχια.

Γνωρίζοντας ότι από την αρχική κοκκομετρική ανάλυση το μεγαλύτερο βάρος των αποθέσεων 90,73 % έχει μέγεθος $-300+150\mu\text{m}$, εξάγονται δυο συμπεράσματα

- Επιβεβαιώνεται ότι ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης/αποδέσμευσης του αρχικού μεταλλεύματος που χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδοσία της επίπλευσης κυμαίνεται σε αυτό το κοκκομετρικό εύρος.
- Επιβεβαιώνεται η χρησιμότητα της ανάλυσης με βαρέα υγρά για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την περαιτέρω επεξεργασία του υλικού.

8. Δοκιμές σε παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις

Τα πειράματα διαχωρισμού έγιναν σε παλλόμενη τράπεζα τύπου Wilfley, η οποία έχει τα ίδια κατασκευαστικά και λειτουργικά πρότυπα με τις αντίστοιχες βιομηχανικές (Εικόνα 17).



Εικόνα 17: Εργαστηριακή παλλόμενη τράπεζα Wilfley

Οι βασικές ρυθμίσεις που απαιτούνται να γίνουν στην τράπεζα για να επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός διαχωρισμός είναι:

- Η κλίση του καταστρώματος
- Η συχνότητα της παλινδρόμησης
- Το πλάτος της παλινδρόμησης
- Η παροχή νερού στο κατάστρωμα

Τα κλάσματα που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική διαδικασία είναι:

- -600+300 μm
- -300+150 μm

Ο λόγος που επιλέχθηκαν αυτά τα δυο κλάσματα είναι επειδή αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό των απορριμμάτων, και με βάση τα αποτελέσματα από τις δοκιμές με βαρέα υγρά παρουσιάζουν ικανοποιητικό βαθμό αποδέσμευσης μεταξύ στείων και

χρήσιμων υλικών, και έχουν το κατάλληλο μέγεθος κόκκων για να χρησιμοποιηθούν στη παλλόμενη τράπεζα.

Για το κοκκομετρικό κλάσμα -600+300 μm έγιναν δοκιμές με κλίσεις:

- 10°
- 15°
- 20°
- 30°

Με ρυθμίσεις στη τράπεζα:

- Συχνότητα παλινδρόμησης: 370 rpm/min
- Πλάτος παλινδρόμησης: 15 mm
- Παροχή νερού: 3,5 L/min

Για το κοκκομετρικό κλάσμα -300+150 μm έγιναν αντίστοιχα δοκιμές με κλίσεις:

- 10°
- 15°
- 20°
- 30°

Με ρυθμίσεις στη τράπεζα:

- Συχνότητα παλινδρόμησης: 380 rpm/min
- Πλάτος παλινδρόμησης: 13 mm
- Παροχή νερού: 3 L/min

Το κάθε δείγμα είχε βάρος 250 g και το καθένα από αυτά αποδίδει τρία προϊόντα:

- Συμπύκνωμα (τεμάχια με μεγαλύτερο ειδικό βάρος)
- Απόρριμμα (τεμάχια με μικρότερο ειδικό βάρος)
- Ενδιάμεσο υλικό (μεικτοί κόκκοι με ενδιάμεσο ειδικό βάρος)

8.1 Κοκκομετρικό κλάσμα -600+300 μm

Παρακάτω περιγράφονται οι συνθήκες, ο αριθμός των δοκιμών, και τα αποτελέσματα για το κοκκομετρικό κλάσμα -600+300 μm .

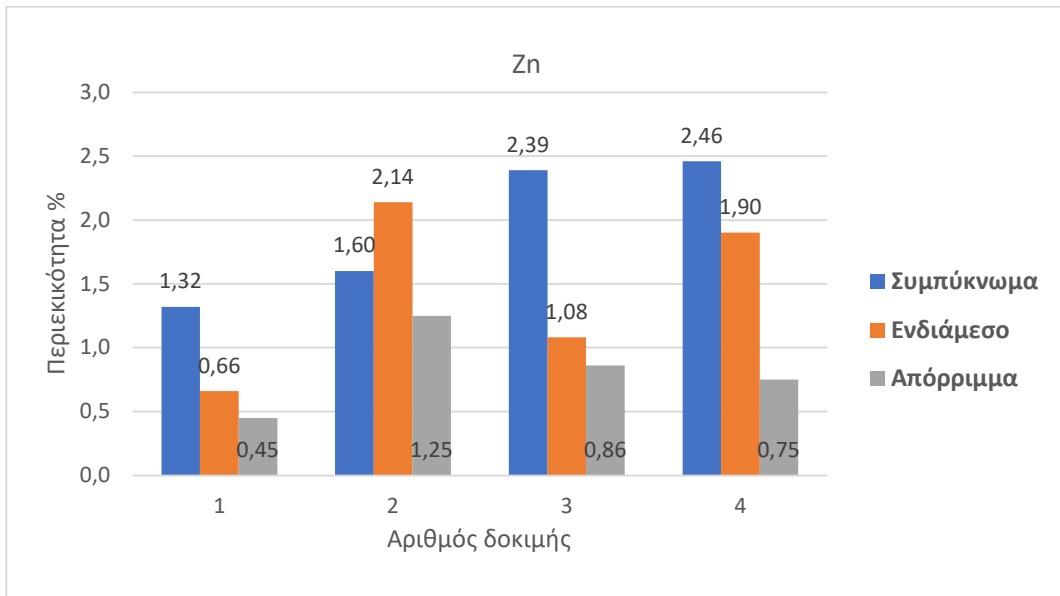
Πίνακας 15. Συνθήκες λειτουργίας παλλόμενης τράπεζας κλάσματος -600+300 μm

Αριθμός Δοκιμής	Κλίση Καταστρώματος Μοίρες	Πλάτος Παλινδρόμησης mm	Συχνότητα Παλινδρόμησης rpm/min	Παροχή Νερού L/min
1	10°	15	370	3,5
2	15°	15	370	3,5
3	20°	16	380	3,5
4	30°	16	380	3,5

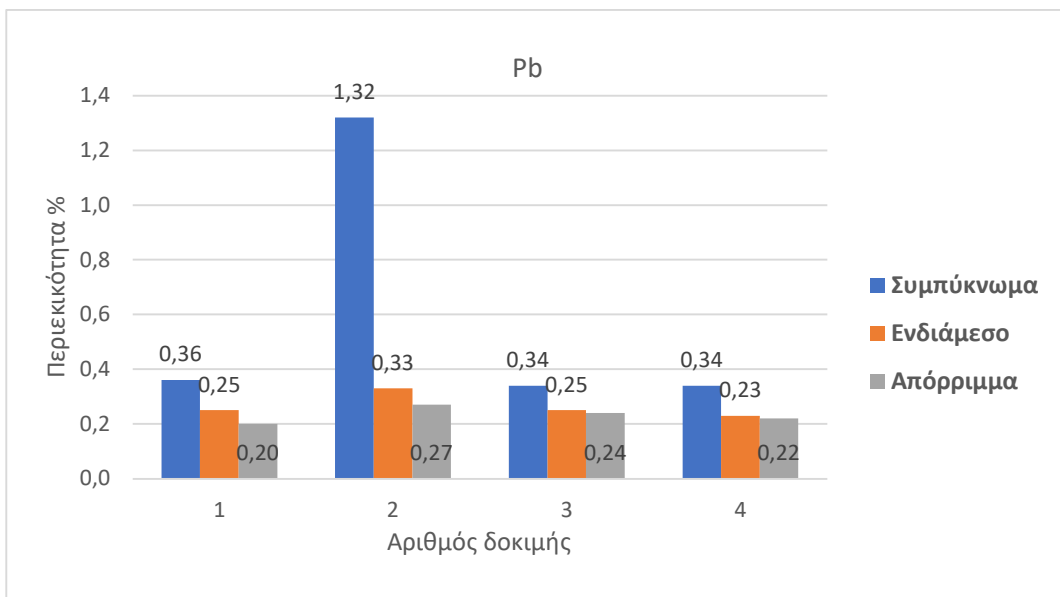
8.1.1 Αποτελέσματα παλλόμενης τράπεζας κλάσματος -600+300 μm

Πίνακας 16. Αποτελέσματα σε περιεκτικότητα και κατανομή κοκκομετρικού κλάσματος -600+300 μm

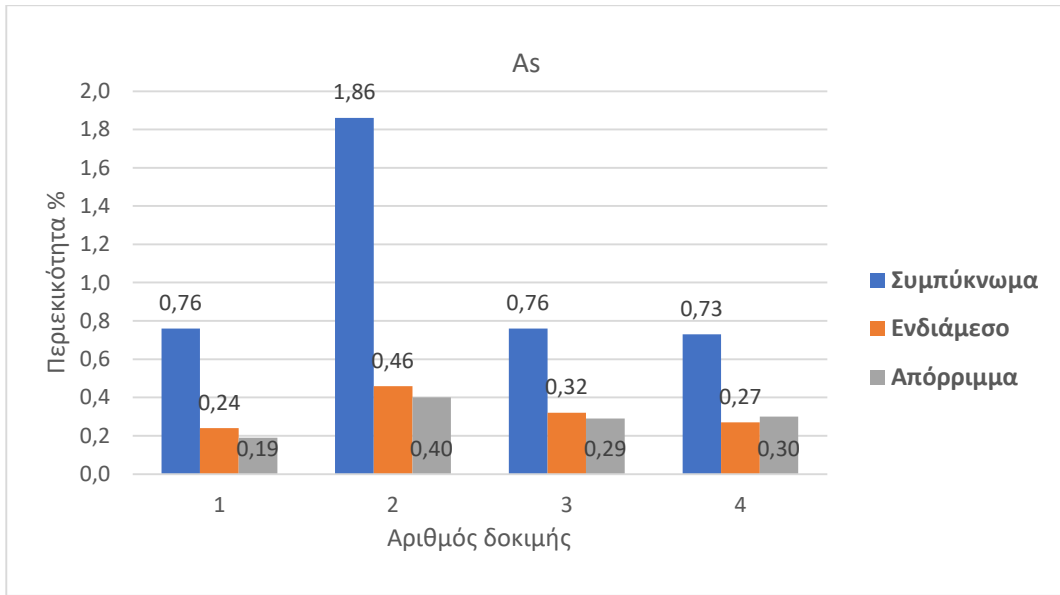
Αριθμός δοκιμής	Προϊόν	Βάρος %	Περιεκτικότητα %				Κατανομή %			
			Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
1 Μοίρες 10°	Συμπύκνωμα	80,57	1,32	0,36	0,76	28,48	89,94	86,22	93,24	91,89
	Ενδιάμεσο	15,00	0,66	0,25	0,24	10,92	8,37	11,14	5,48	6,56
	Απόρριμμα	4,43	0,45	0,20	0,19	8,76	1,69	2,64	1,28	1,55
	Σύνολο	100,00	1,18	0,34	0,66	24,97	100	100	100	100
2 Μοίρες 15°	Προϊόν	Βάρος %	Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
	Συμπύκνωμα	81,35	1,6	1,32	1,86	53,76	78,25	94,79	94,78	93,01
	Ενδιάμεσο	14,46	2,14	0,33	0,46	18,28	18,61	4,21	4,17	5,62
	Απόρριμμα	4,19	1,25	0,27	0,40	15,31	3,15	1,00	1,05	1,36
	Σύνολο	100	1,66	1,13	1,60	47,0	100	100	100	100
3 Μοίρες 20°	Προϊόν	Βάρος %	Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
	Συμπύκνωμα	81,57	2,39	0,34	0,76	28,71	91,40	85,94	91,60	90,99
	Ενδιάμεσο	11,40	1,08	0,25	0,32	12,83	5,77	8,83	5,39	5,68
	Απόρριμμα	7,02	0,86	0,24	0,29	12,2	2,83	5,22	3,01	3,33
	Σύνολο	100	2,13	0,32	0,68	25,74	100	100	100	100
4 Μοίρες 30°	Προϊόν	Βάρος %	Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
	Συμπύκνωμα	79,21	2,46	0,34	0,73	27,61	91,76	85,14	90,80	90,71
	Ενδιάμεσο	12,65	0,9	0,23	0,27	10,67	5,36	9,20	5,36	5,60
	Απόρριμμα	8,14	0,75	0,22	0,30	10,93	2,88	5,66	3,84	3,69
	Σύνολο	100	2,12	0,32	0,64	24,11	100	100	100	100



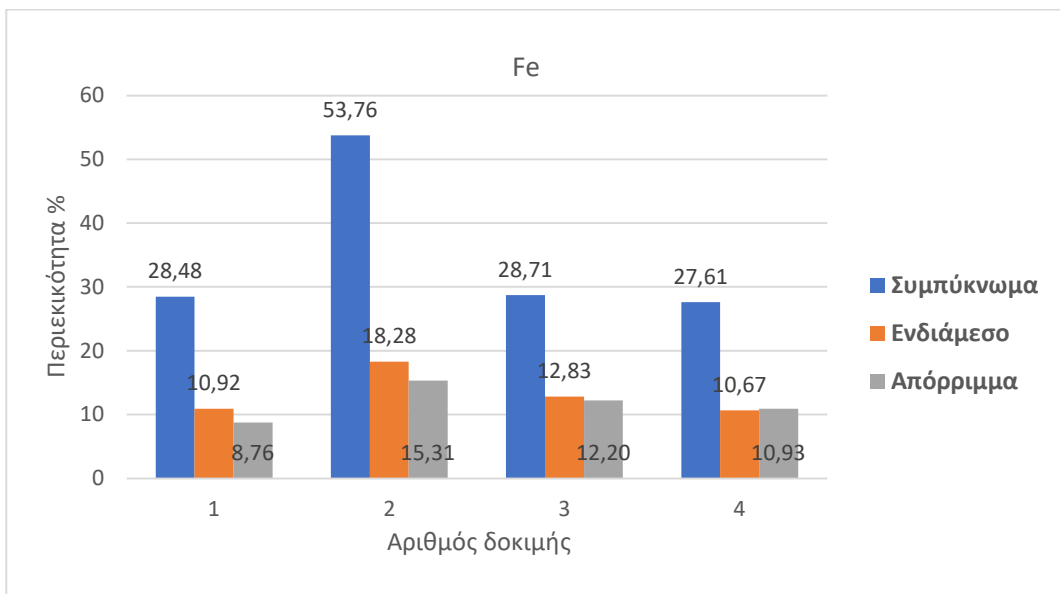
Διάγραμμα 9. Περικτικότητα Zn σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -600+300 μm



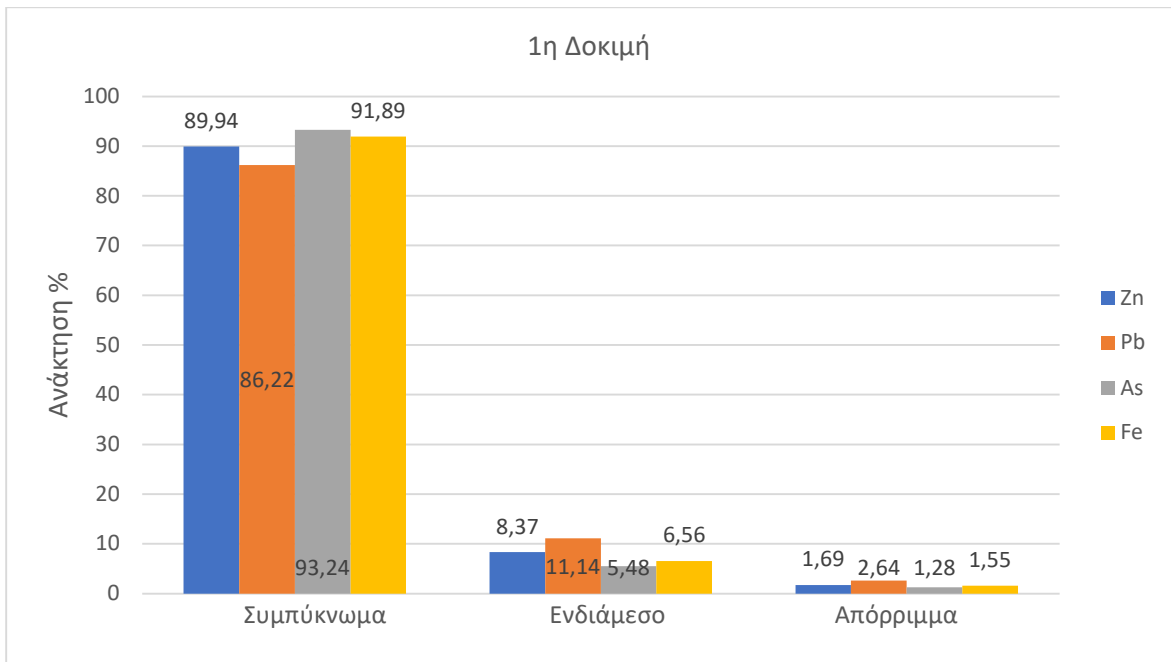
Διάγραμμα 10. Περικτικότητα Pb σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -600+300 μm



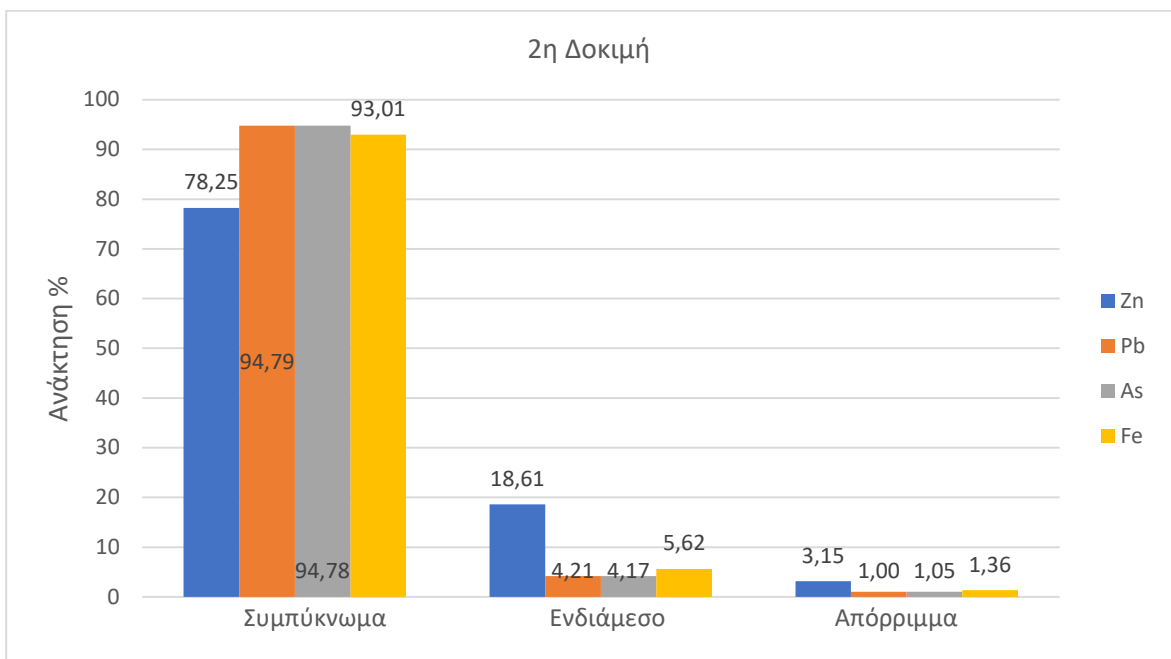
Διάγραμμα 11. Περιεκτικότητα As σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -600+300 μm



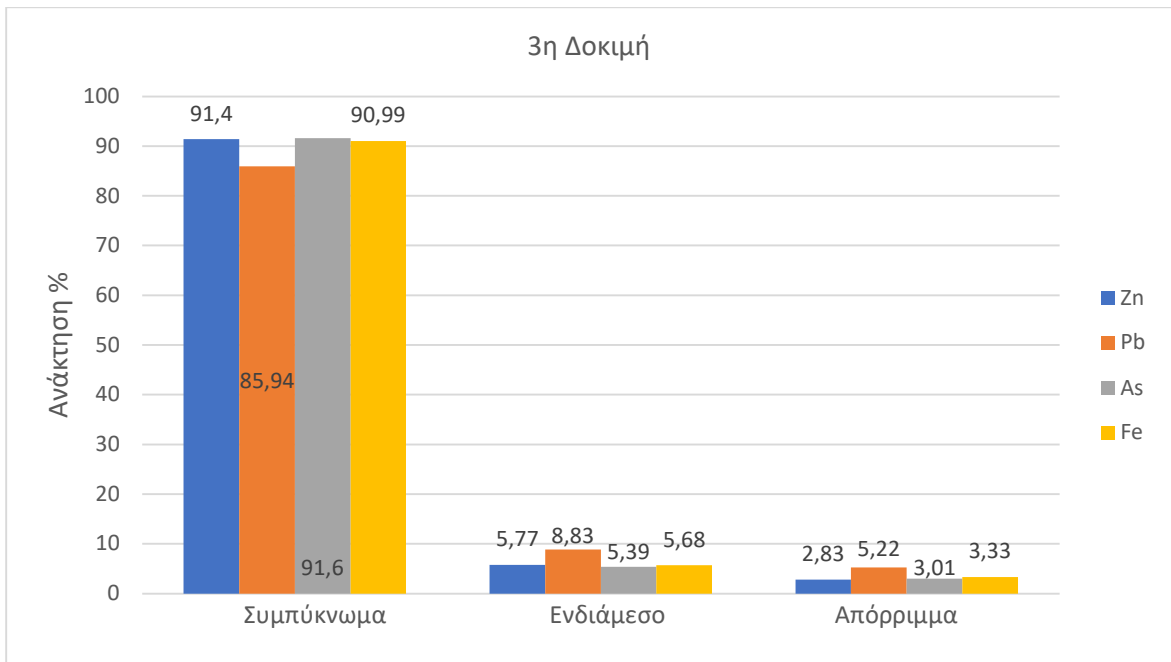
Διάγραμμα 12. Περιεκτικότητα Fe σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -600+300 μm



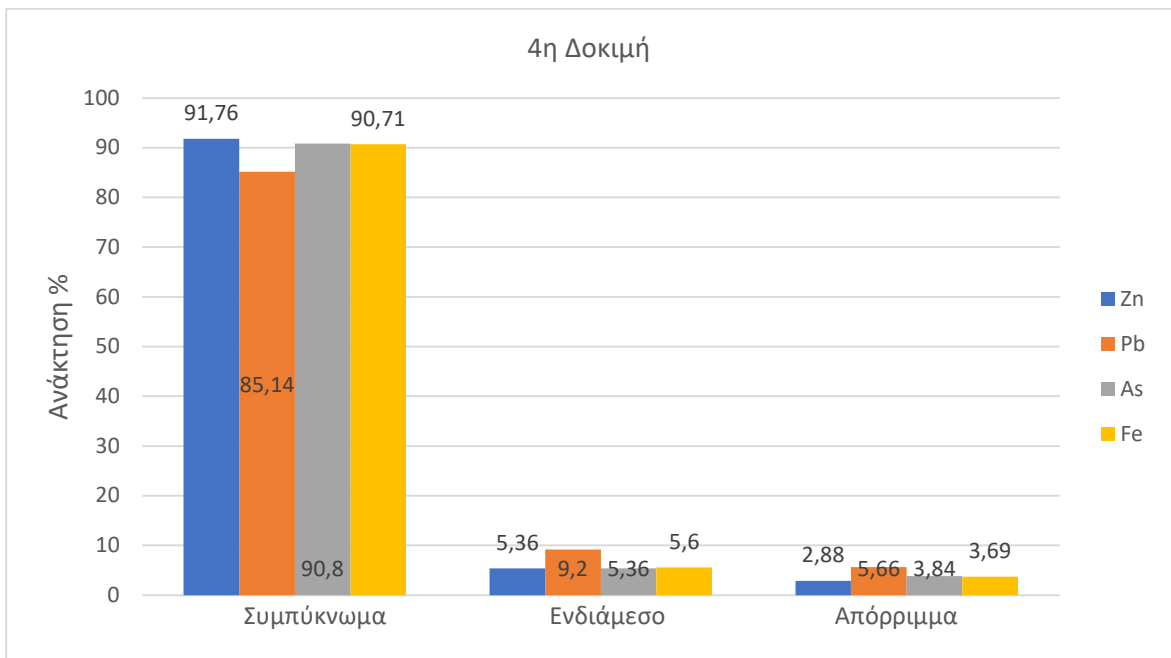
Διάγραμμα 13. Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της 1^{ης} δοκιμής του κλάσματος -600+300 μm



Διάγραμμα 14. Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της 2^{ης} δοκιμής του κλάσματος -600+300 μm



Διάγραμμα 15. Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της 3^{ης} δοκιμής του κλάσματος -600+300 μm



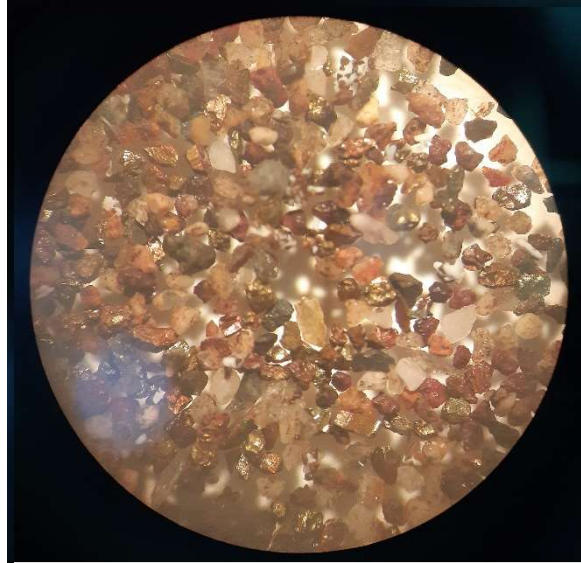
Διάγραμμα 16. Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της 4^{ης} δοκιμής του κλάσματος -600+300 μm



Εικόνα 18: Κοκκομετρικό κλάσμα $-600+300 \mu\text{m}$, απόρριμμα παλλόμενης τράπεζας, 2^η δοκιμή



Εικόνα 19: Κοκκομετρικό κλάσμα $-600+300 \mu\text{m}$, ενδιάμεσο προϊόν παλλόμενης τράπεζας, 2^η δοκιμή



Εικόνα 20: Κοκκομετρικό κλάσμα -600+300 μm , συμπύκνωμα παλλόμενης τράπεζας, 2^η δοκιμή

8.1.2 Παρατηρήσεις

- Το υλικό διαχωρίζεται σε τρία διακριτά υλικά συμπύκνωμα, ενδιάμεσο και απόρριμμα
- Από την μικροσκοπική παρατήρηση των προϊόντων που παράγονται, διακρίνονται πολλοί ελεύθεροι κόκκοι στείρου στο απόρριμμα και μικρός αριθμός χρήσιμων. Στο ενδιάμεσο εντοπίζονται πολλοί κόκκοι στείρου και χρήσιμου υλικού και μεγάλος αριθμός σύμμεικτων κόκκων ενώ στο συμπύκνωμα μικρός αριθμός στείρων και ελάχιστοι μεικτοί κόκκοι.
- Τα ποσοστά της κατανομής παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλες της δοκιμές με τα αποτελέσματα να κυμαίνονται για τον Zn από 91,76% έως 78,25%, για τον Pb από 94,79% έως 85,14%, για το As 94,78% έως 90,80%, και για τον Fe από 93,01% έως 90,71%.
- Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων για την 2^η δοκιμή, που παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα ανάκτησης με εξαίρεση τον ψευδάργυρο, είναι
Zn: 78,25% στο συμπύκνωμα, 18,61% στο ενδιάμεσο, 3,15% στο απόρριμμα.
Pb: 94,79% στο συμπύκνωμα, 4,21% στο ενδιάμεσο, 1,00% στο απόρριμμα.
As: 94,78% στο συμπύκνωμα, 4,17% στο ενδιάμεσο, 1,05% στο απόρριμμα.

Fe: 93,01% στο συμπύκνωμα, 5,62% στο ενδιάμεσο, 3,33% στο απόρριμμα.

- Τα ποσοστά ανάκτησης για το συμπύκνωμα και το ενδιάμεσο προϊόν, συνδυαστικά είναι, για τον Zn 96,85% και αντίστοιχη περιεκτικότητα 1,68%, για τον Pb 99,00% και αντίστοιχη περιεκτικότητα 1,17%, για το As 98,95 και αντίστοιχη περιεκτικότητα 1,65%, για τον Fe 98,64% και αντίστοιχη περιεκτικότητα 48,40%.
- Οι απώλειες σε χρήσιμα συστατικά στα απορρίμματα κυμαίνονται γενικά σε μέτρια έως χαμηλά επίπεδα, με ποσοστά, για τον Zn από 3,15% έως 1,69% και περιεκτικότητες από 1,25% έως 0,45%, για τον Pb από 5,66% έως 1,00% και περιεκτικότητες από 0,27% έως 0,20%, για το As από 3,84% έως 1,05% και περιεκτικότητα από 0,40% έως 0,19%, και για τον Fe από 3,69% έως 1,36% και περιεκτικότητα από 15,31% έως 8,76%.
- Γενικά, τα αποτελέσματα φανερώουν αρκετά μεγάλη ανάκτηση βαρέων μετάλλων στο συμπύκνωμα αλλά δεν μπορεί να θεωρηθούν ικανοποιητικά, γιατί το βάρος του συμπυκνώματος είναι μεγάλο.

8.2 Κοκκομετρικό κλάσμα -300+150 μm

Παρακάτω περιγράφονται οι συνθήκες, ο αριθμός των δοκιμών, και τα αποτελέσματα για το κοκκομετρικό κλάσμα -300+150mm.

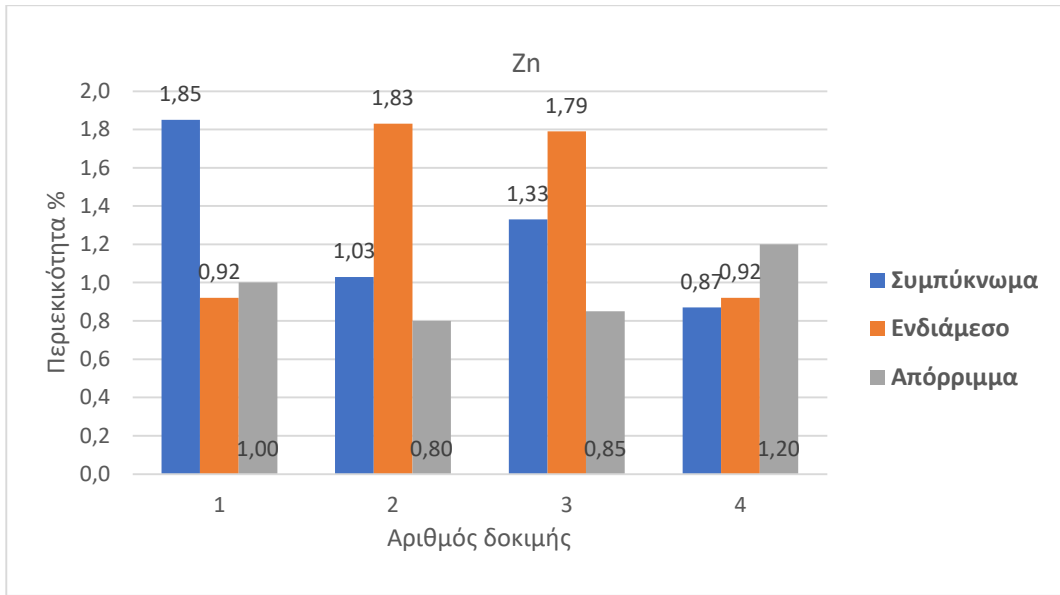
Πίνακας 17. Συνθήκες λειτουργίας παλλόμενης τράπεζας κλάσματος -300+150μm

Αριθμός Δοκιμής	Κλίση Καταστρώματος Μοίρες	Πλάτος Παλινδρόμησης mm	Συχνότητα Παλινδρόμησης rpm/min	Παροχή Νερού L/min
1	10°	13	380	3
2	15°	13	380	3
3	20°	14	390	3
4	30°	14	390	3

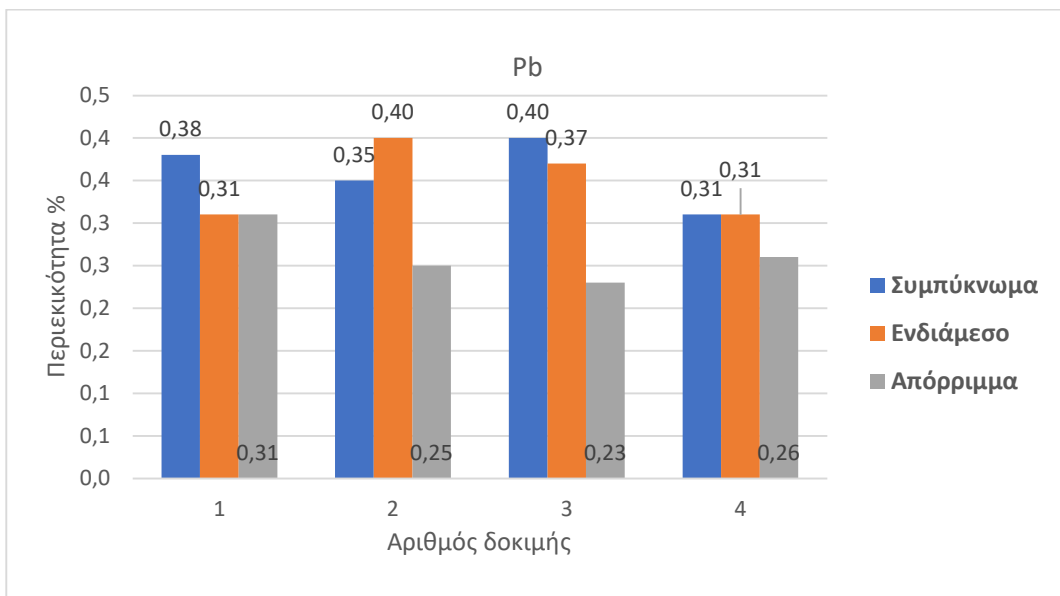
8.2.1 Αποτελέσματα παλλόμενης τράπεζας κλάσματος -300+150 μm

Πίνακας 18. Αποτελέσματα σε περιεκτικότητα διαχωρισμού κοκκομετρικού κλάσματος
-300+150 μm

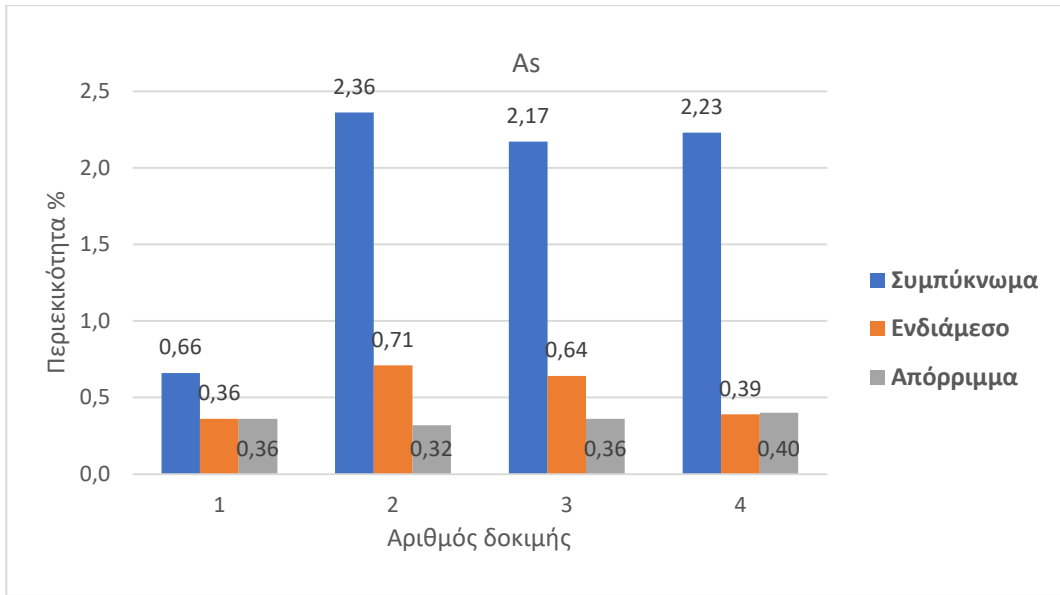
Αριθμός δοκιμής	Προϊόν	Βάρος %	Περιεκτικότητα %				Κατανομή %			
			Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
1 Μοίρες 10°	Συμπύκνωμα	85,56	1,85	0,38	0,66	28,1	91,90	87,90	91,57	91,67
	Ενδιάμεσο	6,23	0,92	0,31	0,36	15,1	3,33	5,22	3,63	3,58
	Απόρριμμα	8,22	1,00	0,31	0,36	15,13	4,77	6,89	4,80	4,74
	Σύνολο	100,00	1,72	0,37	0,62	26,22	100	100	100	100
2 Μοίρες 15°	Προϊόν	Βάρος %	Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
	Συμπύκνωμα	80,61	1,03	0,35	2,36	54,37	76,62	81,80	95,04	92,78
	Ενδιάμεσο	9,53	1,83	0,4	0,71	25,64	16,10	11,06	3,38	5,17
	Απόρριμμα	9,86	0,8	0,25	0,32	9,80	7,28	7,15	1,58	2,05
	Σύνολο	100,00	1,08	0,34	2,00	47,24	100	100	100	100
3 Μοίρες 20°	Προϊόν	Βάρος %	Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
	Συμπύκνωμα	79,42	1,33	0,4	2,17	50,47	79,35	83,62	94,32	90,53
	Ενδιάμεσο	10,63	1,79	0,37	0,64	28,11	14,29	10,35	3,72	6,75
	Απόρριμμα	9,95	0,85	0,23	0,36	12,11	6,36	6,03	1,96	2,72
Σύνολο	100,00	1,33	0,38	1,83	44,28	100	100	100	100	
4 Μοίρες 30°	Προϊόν	Βάρος %	Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
	Συμπύκνωμα	77,56	0,87	0,31	2,23	67,12	74,16	78,86	95,13	93,48
	Ενδιάμεσο	12,22	0,92	0,31	0,39	17,81	12,35	12,42	2,62	3,91
	Απόρριμμα	10,23	1,2	0,26	0,4	14,21	13,49	8,72	2,25	2,61
Σύνολο	100,00	0,91	0,30	1,82	55,69	100	100	100	100	



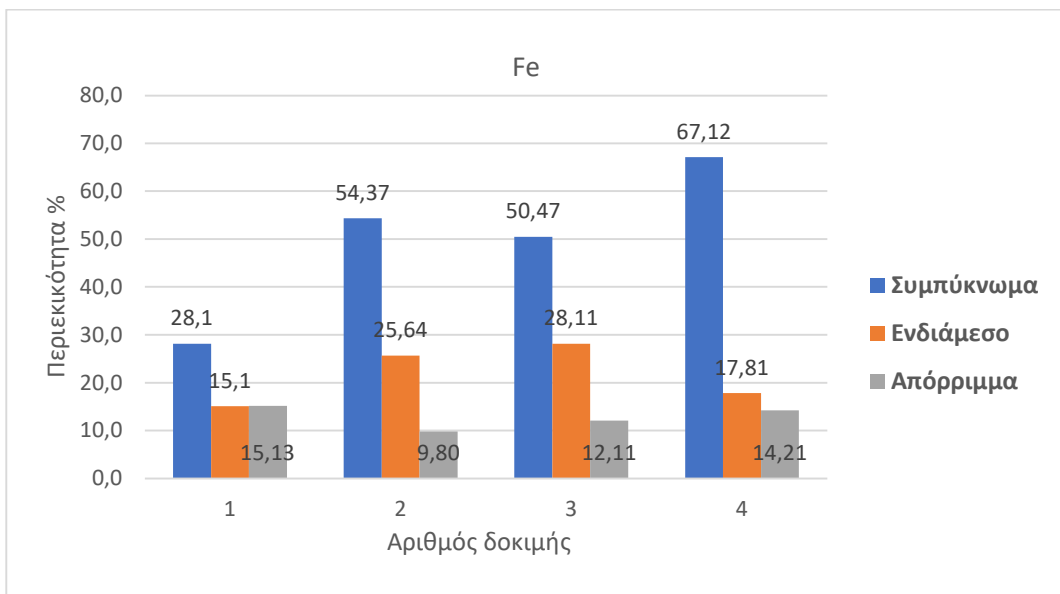
Διάγραμμα 17. Περιεκτικότητα Zn σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -300+150 μ m



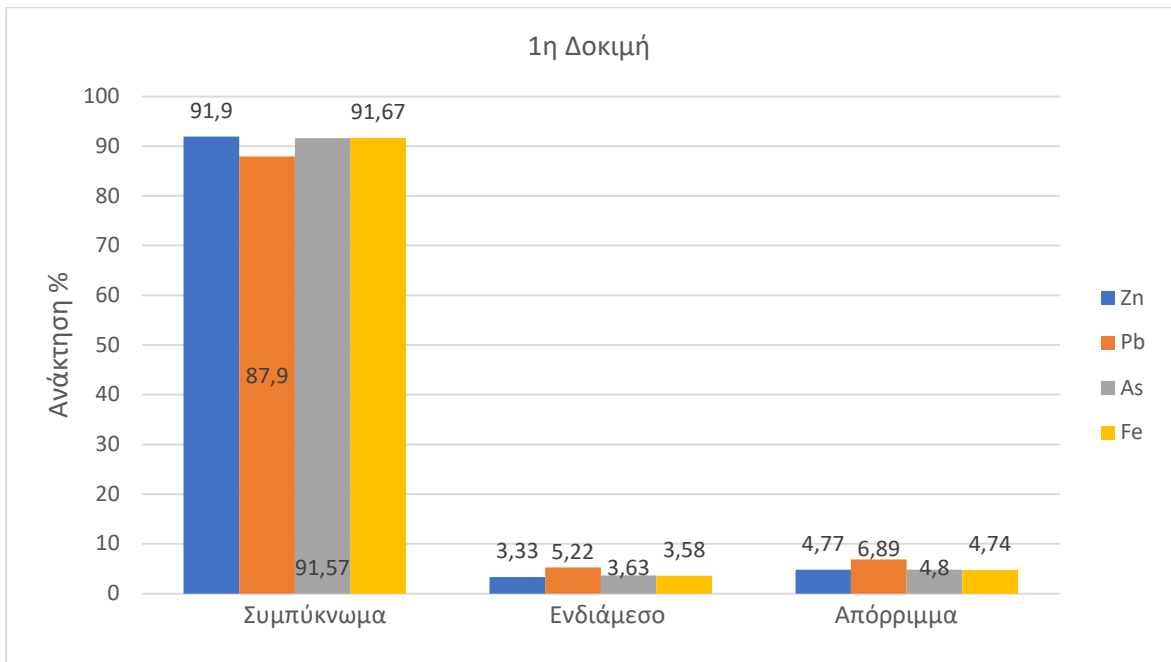
Διάγραμμα 18. Περιεκτικότητα Pb σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -300+150 μ m



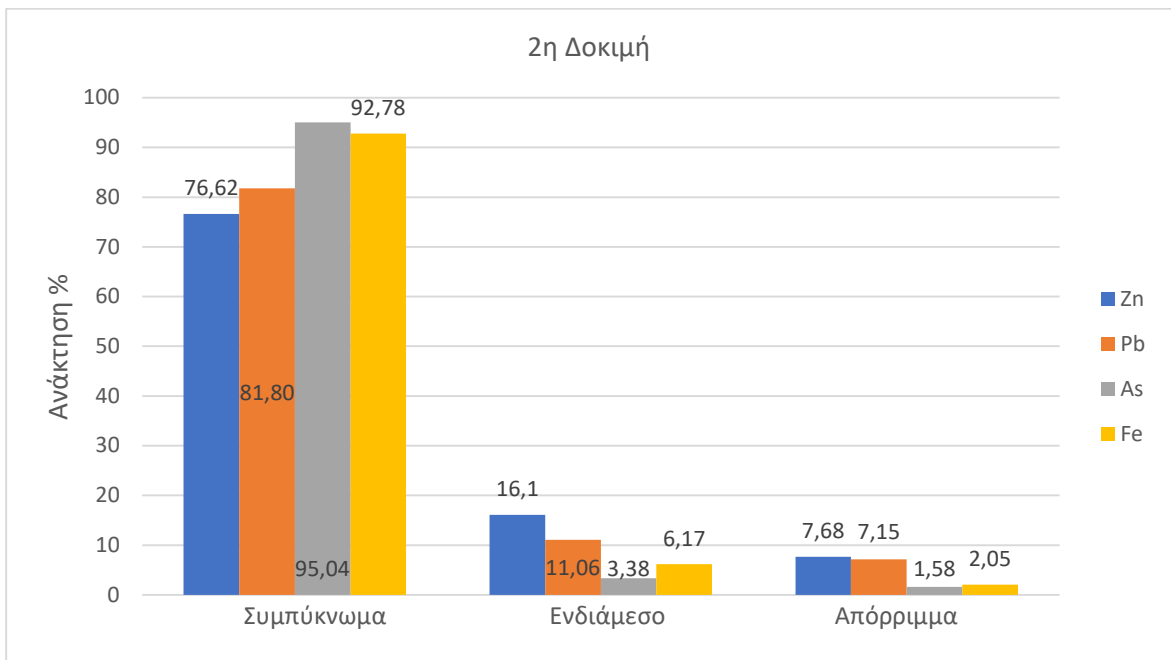
Διάγραμμα 19. Περιεκτικότητα As σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -300+150 μ m



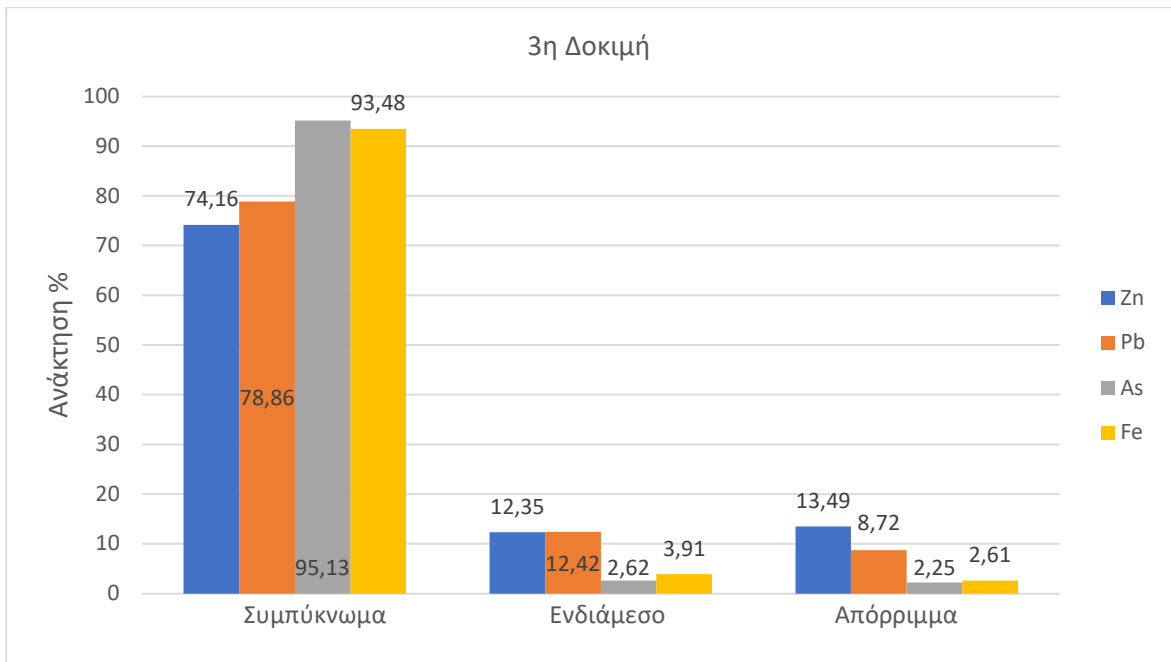
Διάγραμμα 20. Περιεκτικότητα Fe σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, και απόρριμμα κλάσματος -300+150 μ m



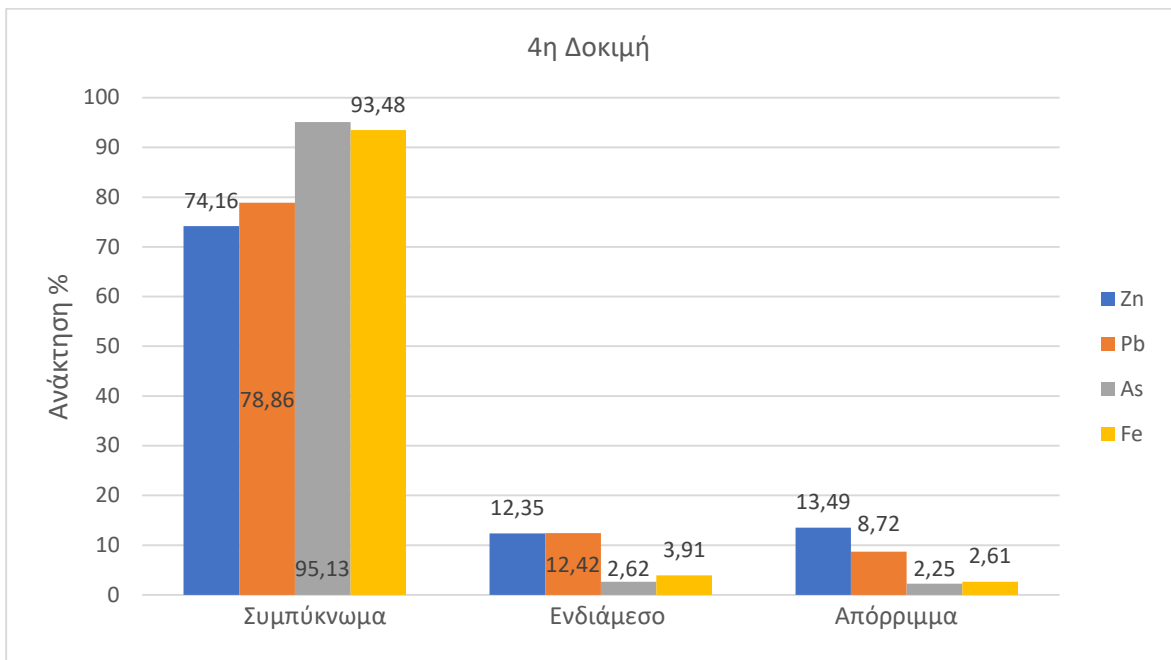
Διάγραμμα 21. Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα 1^{ης} δοκιμής του κλάσματος -300+150 μm



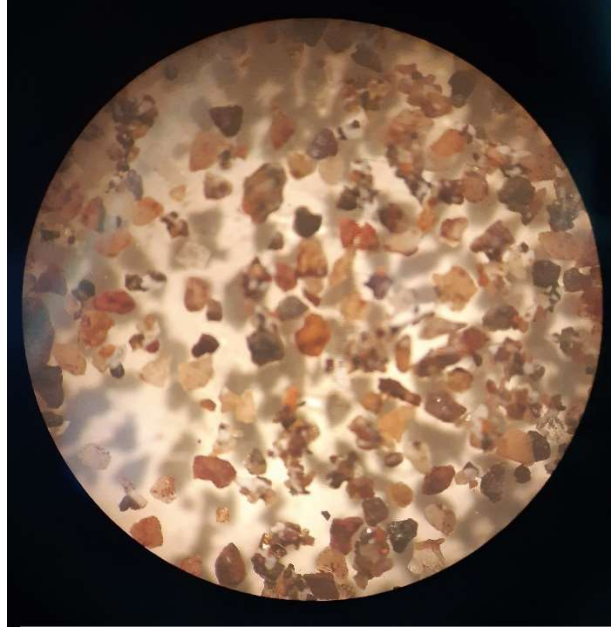
Διάγραμμα 22. Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα 2^{ης} δοκιμής του κλάσματος -300+150 μm



Διάγραμμα 23. Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα 3^{ης} δοκιμής του κλάσματος -300+150 μm



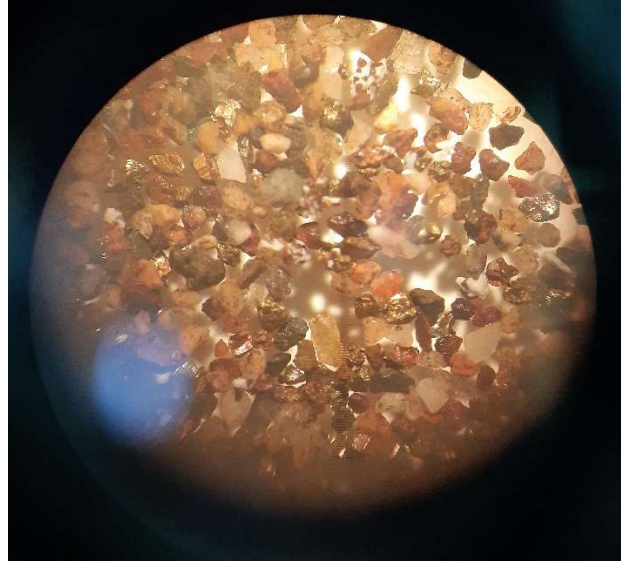
Διάγραμμα 24. Κατανομή βαρέων μετάλλων στα προϊόντα 4^{ης} δοκιμής του κλάσματος -300+150 μm



Εικόνα 21: Κοκκομετρικό κλάσμα $-300+150 \mu\text{m}$, απόρριμμα παλλόμενης τράπεζας, 1^η δοκιμή



Εικόνα 22: Κοκκομετρικό κλάσμα $-300+150 \mu\text{m}$, ενδιάμεσο προϊόν παλλόμενης τράπεζας, 1^η δοκιμή



Εικόνα 23: Κοκκομετρικό κλάσμα -300+150 μm , συμπύκνωμα παλλόμενης τράπεζας, 1^η δοκιμή

8.2.2 Παρατηρήσεις

- Το υλικό διαχωρίζεται σε τρία διακριτά υλικά συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, απόρριμμα
- Από την μικροσκοπική παρατήρηση των προϊόντων που παράγονται, διακρίνονται πολλοί ελεύθεροι κόκκοι στείρου στο απόρριμμα μικρός αριθμός χρήσιμων και μικρός αριθμός σύμμεικτων, στο ενδιάμεσο εντοπίζονται πολλοί κόκκοι στείρου και χρήσιμου υλικού και μεγάλος αριθμός σύμμεικτων κόκκων, στο συμπύκνωμα μικρός αριθμός στείρων και ελάχιστοι μεικτοί κόκκοι.
- Τα ποσοστά κατανομής παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλες τις δοκιμές με τα αποτελέσματα να κυμαίνονται για τον Zn από 91,90 έως 74,16%, για τον Pb από 87,90% έως 78,86%, για το As από 95,13% έως 91,57%, για τον Fe από 93,48% έως 90,53%, και σε αυτό το κοκκομετρικό κλάσμα ο ψευδάργυρος είναι το μόνο υλικό που δεν παρουσιάζει την καλύτερη ανάκτηση
- Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων από την 1^η δοκιμή παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα ανάκτησης, για τον Pb και τον Zn και ικανοποιητικά αποτελέσματα για το As και το Fe.

Zn: 91,90% στο συμπύκνωμα, 3,33% στο ενδιάμεσο, 4,77% στο απόρριμμα.

Pb: 87,90% στο συμπύκνωμα, 5,22% στο ενδιάμεσο, 6,89% στο απόρριμμα.

As: 91,57% στο συμπύκνωμα, 3,63% στο ενδιάμεσο, 4,80% στο απόρριμμα.

Fe: 91,67% στο συμπύκνωμα, 3,58% στο ενδιάμεσο, 4,74% στο απόρριμμα.

- Τα συνδυαστικά ποσοστά περιεκτικότητας για το συμπύκνωμα και το ενδιάμεσο προϊόν είναι, για τον Zn 95,23 και αντίστοιχη περιεκτικότητα 1,79%, για τον Pb, 93,11% και αντίστοιχη περιεκτικότητα 0,38%, για το As, 95,20% και αντίστοιχη περιεκτικότητα 0,64%, και για τον Fe 95,26% και αντίστοιχη περιεκτικότητα 27,22%.
- Οι απώλειες σε χρήσιμα συστατικά στα απορρίμματα κυμαίνονται γενικά σε μέτρια επίπεδα, με ποσοστά, για τον Zn από 13,49% έως 4,77% και περιεκτικότητες από 1,2% έως 0,8%, για τον Pb από 8,72% έως 6,03% και περιεκτικότητες από 0,31% έως 0,23%, για το As από 4,80% έως 1,58% και περιεκτικότητα από 0,40% έως 0,32%, και για τον Fe από 4,74% έως 2,05% και περιεκτικότητα από 15,13% έως 9,80%.

8.3 Γενικά συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών στην παλλόμενη τράπεζα, και για τα δυο κοκκομετρικά κλάσματα -600+300 μm (Πίνακας 16) και -300+150 μm (Πίνακας 19), προκύπτουν τα εξής:

- Το υλικό διαχωρίζεται σε τρία ξεχωριστά προϊόντα, συμπύκνωμα, ενδιάμεσο και απόρριμμα, με το μεγαλύτερο ποσοστό από τα χρήσιμα υλικά να ανακτώνται στο συμπύκνωμα. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι το υλικό είναι δεκτικό προεμπλουτισμού.
- Για το κλάσμα -600+300 μm τα καλύτερα αποτελέσματα εντοπίζονται στην δεύτερη δοκιμή με κλίση 15° και για το κλάσμα -300+150 μm στην πρώτη δοκιμή με κλίση 10°. Και στις δυο δοκιμές ο ψευδάργυρος δεν παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα.
- Το κλάσμα -600+300 μm σε όλες τις δοκιμές παρουσιάζει, με μικρή διαφορά, καλύτερα αποτελέσματα διαχωρισμού στον Zn και στον Pb, σε σχέση με το κλάσμα -300+150 μm . Στο μεγαλύτερο κλάσμα υπάρχει περισσότερη περιεκτικότητα, κυρίως λόγω μικρότερης αποδέσμευσης και ανάκτησης κατά την αρχική (βιομηχανική) διεργασία επίπλευσης.
- Τα ποσοστά χρήσιμου υλικού που καταλήγουν στις ενδιάμεσες κατανομές και στα απορρίμματα και στα δυο πειράματα οφείλονται κατά κύριο λόγο σε μη

αποδεσμευμένους κόκκους, όπως παρατηρείται στις Εικόνες 14 και 15 για το κλάσμα $-600+300 \mu\text{m}$, και στις Εικόνες 17 και 18 για το κλάσμα $300+150 \mu\text{m}$.

- Τα συνδυαστικά ποσοστά συμπυκνώματος και ενδιάμεσου υλικού αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για όλα τα χρήσιμα συστατικά, για το κοκκομετρικό κλάσμα $-600+300 \mu\text{m}$, κατά μέσο όρο 97,24% σε ανάκτηση και απόρριψη υλικού με μέσο όρο 5,95% κατά βάρος, ενώ για το κλάσμα με μέγεθος $-300+150 \mu\text{m}$ κατά μέσο όρο σε ανάκτηση 94,82% και απόρριψη υλικού 9,56% κατά βάρος.
- Τέλος για την σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι, η παροχή του νερού στο κατάστρωμα της τράπεζας δεν ήταν απόλυτα στρωτή, διότι μια σειρά από ψεκαστήρες νερού δεν λειτουργούσε, και ότι η τράπεζα χρειαζόταν συνεχή επανέλεγχο για να διατηρηθεί η επιθυμητή κλίση κατά την διάρκεια των δοκιμών.

9. Επίπλευση

Η μέθοδος της επίπλευσης εκμεταλλεύεται την μικρή κοκκομετρία του υλικού για να πετύχει μεγάλη ανάκτηση και απόδοση. Η τεχνική που ακολουθείται στην πειραματική διαδικασία είναι να εκτελείται η επίπλευση με διαφοροποίηση των συνθηκών επεξεργασίας μέχρι την επίτευξη ικανοποιητικού αποτελέσματος. Για τις δοκιμές επίπλευσης χρησιμοποιήθηκε κυψέλη DENVER, μηχανικής ανάδευσης και δοχείο ανάδευσης 1000 ml (Εικόνα 24), οι φυσαλίδες που δημιουργούνται μέσα στο δοχείο συγκρούονται και ενώνονται με τα υδρόφοβα τεμάχια, τα οποία ανεβαίνουν στην επιφάνεια και απομακρύνονται με τον αφρό.



Εικόνα 24: Κυψέλη επίπλευσης DENVER

9.1 Αντιδραστήρια

Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές ήταν:

Ρυθμιστικά pH: Ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3) με 10% κ.β., Υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) με 10% κ.β., και Θεϊκό οξύ (H_2SO_4) με 10% κ.β.

Συλλέκτης: Νατριούχος αιθυλική ξανθάτη 325.

Αφριστικό: Aerofroth 88.

Ενεργοποιητικό: Θεικός χαλκός (CuSO_4) με 10% κ.β.

9.2 Διαδικασία

Για τις δοκιμές επίπλευσης, αρχικό δείγμα λειοτριβήθηκε για 30 min σε ραβδόμυλο, με σκοπό την αποδέσμευση όλων των μεταλλικών χρήσιμων ορυκτών. Το μέγεθος του κοκκομετρικού κλάσματος $-75\mu\text{m}$ στο προϊόν της λειοτρίβησης ήταν 91,61% σε αυτόν τον χρόνο (Εικόνα 25).



Εικόνα 25: Αρχικό λειοτριβημένο υλικό

Το υλικό της λειοτρίβησης διαχωρίστηκε δειγματοληπτικά με τον διαχωριστή Jones στα εξής 5 κλάσματα:

Δείγμα 1: 261,2 g

Δείγμα 2: 265,1 g

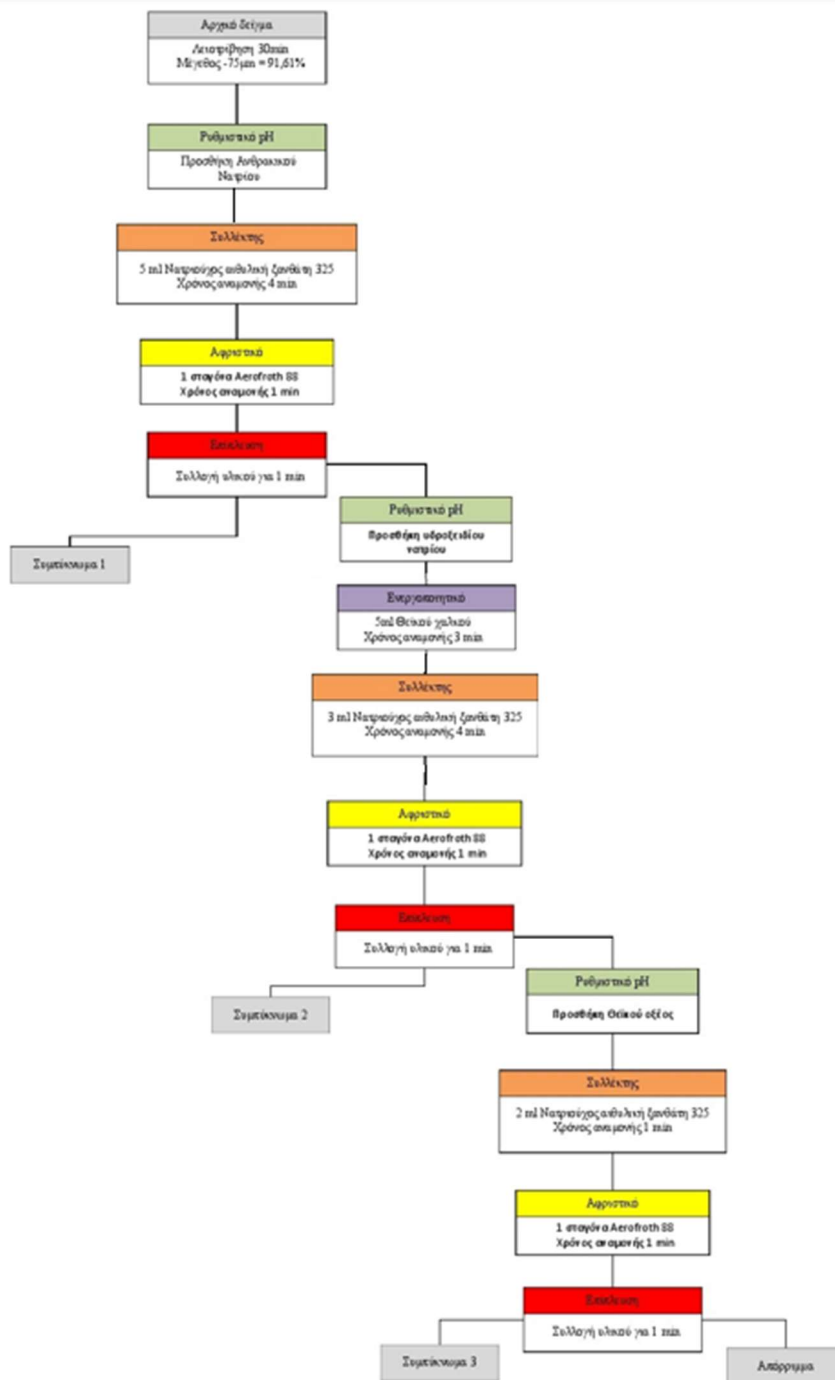
Δείγμα 3: 262,4 g

Δείγμα 4: 264,2 g

Δείγμα 5: 265,6 g

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν κοινή και για τα 5 δείγματα, η μοναδική παράμετρος που διαφοροποιήθηκε ήταν το pH. Η μεταβολή της τιμής του pH είναι βασικός παράγοντας στην επίπλευση ενός ορυκτού ή όχι. Για τις δοκιμές το pH ρυθμίστηκε από τιμές 5.0 έως 11.0, για την δημιουργία κατάλληλων συνθηκών επίπλευσης των μεταλλικών ορυκτών Zn, Pb, As, και Fe.

Το δείγμα τοποθετείται σε κυψέλη επίπλευσης 1000 ml, προστίθεται νερό και ξεκινά η ανάδευση. Η ταχύτητα του αναδευτήρα ρυθμίστηκε στις 900 rpm. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τις δοκιμές επίπλευσης περιγράφονται στο (Διάγραμμα 25).



Διάγραμμα 25. Κύκλωμα δοκιμών επίπλευσης

Συνολικά συλλέχθηκαν 4 διαφορετικά προϊόντα από την κάθε δοκιμή, 2 συμπυκνώματα από διαφορετικό αλκαλικό περιβάλλον, 1 συμπύκνωμα από όξινο περιβάλλον, και το απόρριμμα. Και τα 4 υλικά οδηγήθηκαν για διήθηση, ξήρανση, και στην συνέχεια ζυγίστηκαν.

9.3 Αποτελέσματα δοκιμών επίπλευσης

Παρακάτω περιγράφονται οι συνθήκες, ο αριθμός των δοκιμών, και τα αποτελέσματα των προϊόντων της επίπλευσης.

Πίνακας 19. Συγκεντρωτικός πίνακας διαχωρισμού του υλικού κατά βάρος σε διάφορες τιμές pH

Αριθμός δοκιμής	pH	Βάρος (g)	Βάρος (%)
1	8.0	8,7	3,32
	9.0	75,3	28,71
	7.0	28,1	10,71
	Απόρριμμα	150,2	57,26
	Σύνολο	262,3	100
Αριθμός δοκιμής	pH	Βάρος (g)	Βάρος (%)
2	8.5	54,3	20,55
	9.5	56,3	21,31
	6.5	12,5	4,73
	Απόρριμμα	141,1	53,41
	Σύνολο	264,2	100
Αριθμός δοκιμής	pH	Βάρος (g)	Βάρος (%)
3	9.0	35,7	13,55
	10.0	71,4	27,11
	6.0	18	6,83
	Απόρριμμα	138,3	52,51
	Σύνολο	263,4	100
Αριθμός δοκιμής	pH	Βάρος (g)	Βάρος (%)
4	9.5	17,5	6,59
	10.5	23,3	8,77
	5.5	14,5	5,46
	Απόρριμμα	210,4	79,19
	Σύνολο	265,7	100
Αριθμός δοκιμής	pH	Βάρος (g)	Βάρος (%)
5	10.0	25,3	9,50
	11.0	21,3	8,00
	5.0	18,5	6,94
	Απόρριμμα	201,3	75,56
	Σύνολο	266,4	100

Πίνακας 20. Αποτελέσματα δοκιμών 1^{ης} επίπλευσης

Αριθμός δοκιμής	pH	Προϊόν	Βάρος %	Περιεκτικότητα %				Ανάκτηση %			
				Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
1	8.0	Συμπύκνωμα 1	3,32	1,42	0,84	0,74	15,13	4,24	8,33	2,60	2,09
	9.0	Συμπύκνωμα 2	28,71	1,67	0,28	1,72	38,52	43,19	24,26	52,09	46,00
	7.0	Συμπύκνωμα 3	10,71	0,80	0,48	1,41	28,03	7,70	15,22	15,97	12,49
	Απόρριμμα		57,26	0,87	0,31	0,49	16,55	44,87	52,19	29,34	39,42
	Σύνολο		100	1,11	0,34	0,95	24,04	100	100	100	100

Πίνακας 21. Αποτελέσματα δοκιμών 2^{ης} επίπλευσης

Αριθμός δοκιμής	pH	Προϊόν	Βάρος %	Περιεκτικότητα %				Ανάκτηση %			
				Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
2	8.5	Συμπύκνωμα 1	20,55	2,33	0,29	1,58	40,89	46,56	19,63	38,77	38,72
	9,5	Συμπύκνωμα 2	21,31	0,56	0,33	1,57	31,05	11,60	23,27	39,97	30,48
	6,5	Συμπύκνωμα 3	4,73	0,88	0,69	1,07	22,34	4,06	10,69	6,07	4,87
	Απόρριμμα		53,41	0,73	0,26	0,24	10,54	37,78	46,41	15,19	25,93
	Σύνολο		100	1,03	0,30	0,84	21,71	100	100	100	100

Πίνακας 22. Αποτελέσματα δοκιμών 3^{ης} επίπλευσης

Αριθμός δοκιμής	pH	Προϊόν	Βάρος %	Περιεκτικότητα %				Ανάκτηση %			
				Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
3	9.0	Συμπύκνωμα 1	13,55	3,29	0,33	1,80	36,01	43,31	11,68	27,43	23,94
	10.0	Συμπύκνωμα 2	27,11	0,46	0,27	1,19	28,82	12,14	18,87	36,13	38,33
	6.0	Συμπύκνωμα 3	6,8	0,69	0,55	1,98	28,17	4,56	9,86	15,19	9,44
	Απόρριμμα		52,51	0,78	0,43	0,36	10,98	39,99	59,60	21,24	28,28
	Σύνολο		100	1,03	0,38	0,89	20,38	100	100	100	100

Πίνακας 23. Αποτελέσματα δοκιμών 4^{ης} επίπλευσης

Αριθμός δοκιμής	pH	Προϊόν	Βάρος %	Περιεκτικότητα %				Ανάκτηση %			
				Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
4	9.5	Συμπύκνωμα 1	6,59	4,87	0,68	1,95	15,03	34,84	14,96	18,55	5,42
	10.5	Συμπύκνωμα 2	8,77	1,02	0,51	0,72	14,99	9,70	14,76	9,16	7,19
	5,5	Συμπύκνωμα 3	5,46	1,13	0,57	0,83	15,94	6,70	10,42	6,57	4,76
	Απόρριμμα		79,19	0,57	0,23	0,57	19,07	48,76	59,85	65,71	82,63
	Σύνολο		100	0,92	0,30	0,69	18,28	100	100	100	100

Πίνακας 24. Αποτελέσματα δοκιμών 5^{ης} επίπλευσης

Αριθμός δοκιμής	pH	Προϊόν	Βάρος %	Περιεκτικότητα %				Ανάκτηση %			
				Zn	Pb	As	Fe	Zn	Pb	As	Fe
5	10.0	Συμπύκνωμα 1	9,50	1,66	0,67	0,72	14,03	18,47	20,81	10,15	7,06
	11.0	Συμπύκνωμα 2	8,00	1,11	0,53	0,69	15,07	10,42	13,98	8,19	6,38
	5.0	Συμπύκνωμα 3	6,94	1,06	0,49	0,70	16,1	8,61	11,30	7,21	5,92
	Απόρριμμα		75,56	0,71	0,22	0,66	20,14	62,50	53,91	74,45	80,63
	Σύνολο		100	0,85	0,30	0,67	18,87	100	100	100	100

9.4 Συμπεράσματα

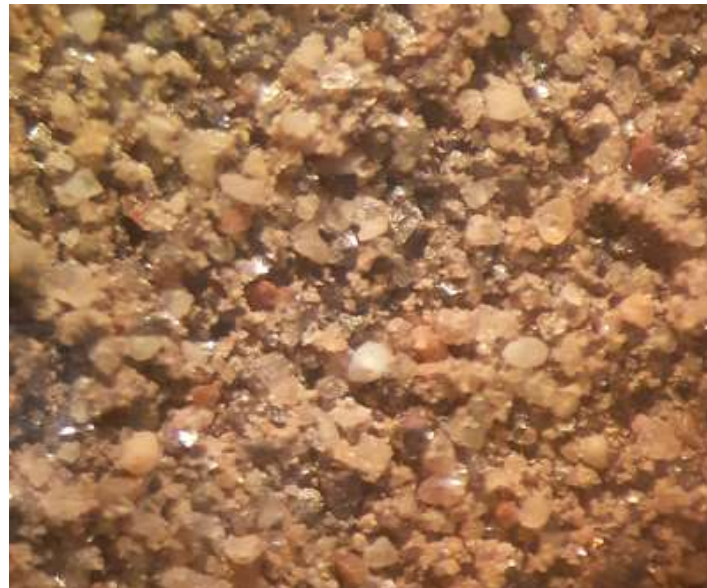
Από τα αποτελέσματα των δοκιμών της επίπλευσης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Για τον Zn, οι περιεκτικότητες κυμαίνονται μεταξύ 4,87% και 0,46%, ενώ η ανάκτηση από 46,56% έως 4,06%. Το προϊόν με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα λαμβάνεται σε τιμή pH=9,5, με αύξηση της περιεκτικότητας από 0,92% σε 4,87% (Εικόνα 26).



Εικόνα 26. Δοκιμή 4, pH=9.5, περιεκτικότητα Zn 4,87%

- Για τον Pb, η περιεκτικότητα κυμαίνεται μεταξύ 0,84% και 0,22%, ενώ η ανάκτηση από 24,26% έως 8,33%. Το προϊόν με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα λαμβάνεται σε τιμή pH=8.0, με αύξηση περιεκτικότητας από 0,34% σε 0,84% (Εικόνα 27).



Εικόνα 27. Δοκιμή 1, pH=8.0, περιεκτικότητα Pb 0,84%

- Για το As, η περιεκτικότητα κυμαίνεται μεταξύ 1,98% και 0,24%, ενώ η ανάκτηση από 52,09% έως 2,60%. Το προϊόν με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα λαμβάνεται σε τιμή pH=6.0, με αύξηση της περιεκτικότητας από 0,89% σε 1,98% (Εικόνα 28).



Εικόνα 28. Δοκιμή 3, pH=6.0, περιεκτικότητα As 1,98%

- Για τον Fe, η περιεκτικότητα κυμαίνεται μεταξύ 40,89% και 10,54%, ενώ η ανάκτηση από 46,00% έως 2,09%. Το προϊόν με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα λαμβάνεται σε pH=8,5, με αύξηση περιεκτικότητας από 21,71% σε 40,89% (Εικόνα 29).



Εικόνα 29. Δοκιμή 2, pH=8.5, περιεκτικότητα Fe 40,89%

Γενικά, οι περιεκτικότητες παρουσιάζουν αύξηση σε σύγκριση με το αρχικό δείγμα στις περισσότερες δοκιμές, αλλά οι ανακτήσεις κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα.

- Οι απώλειες σε χρήσιμα συστατικά στα απορρίμματα κυμαίνονται γενικά σε μέτρια επίπεδα με ποσοστά, για τον Zn από 62,50% έως 37,78% και περιεκτικότητες από 0,87% έως 0,57%, για τον Pb από 59,85% έως 46,41% και περιεκτικότητες από 0,43% έως 0,22%, για το As από 74,45% έως 15,19% και περιεκτικότητες από 0,66% έως 0,24, και για τον Fe από 82,63% έως 25,93% και περιεκτικότητες 20,14% έως 10,54%.

10. Τελικά συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων και πειραματικών διαδικασιών που διεξήχθησαν στα απορρίμματα εμπλουτισμού της παραλίας Θορικού, για την ανάκτηση βαρέων ορυκτών, οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Η περιεκτικότητα του σιδηροπυρίτη είναι μεγαλύτερη έναντι των άλλων ορυκτών ενδιαφέροντος, σφαλερίτη, γαληνίτη, αρσενοπυρίτη, κάτι το οποίο θεωρείται αναμενόμενο, καθώς τα κύρια προϊόντα του εμπλουτισμού ήταν τα συμπκνώματα του ψευδαργύρου και μολύβδου.
- Από τα αποτελέσματα των δοκιμών και με τα δυο βαρέα υγρά με ε.β. 2,97 και 3,32 προκύπτει ότι, όσο ελαττώνεται το μέγεθος των κοκκομετρικών κλασμάτων τόσο αυξάνεται η κατανομή των στοιχείων ενδιαφέροντος στο βυθισθέν υλικό. Και στις δυο περιπτώσεις, τα καλύτερα αποτελέσματα έδωσε το κοκκομετρικό κλάσμα - 300+150 μ m στο βαρύ υγρό 3,32 με κατανομή, για τον Fe 94,69%, για το As 97,42%, για το Pb 90,90%, και για τον Zn 95,30%.
- Από τα αποτελέσματα των δοκιμών στην παλλόμενη τράπεζα, υπάρχει σαφής διαχωρισμός σε τρία ξεχωριστά προϊόντα, συμπύκνωμα, ενδιάμεσο, στείρο. Τα συνδυαστικά ποσοστά συμπκνώματος και ενδιάμεσου αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα Για το κλάσμα -600+300 μ m η ανάκτηση κυμαίνεται στο 97,24% και κατά μέσο όρο το βάρος του υλικού που απορρίπτεται 5,95%, ενώ για το κοκκομετρικό κλάσμα -300+150 μ m κατά μέσο όρο 94,82% και βάρος του υλικού που απορρίπτεται 9,56%. Η διεργασία προεμπλουτισμού με παλλόμενη τράπεζα

αποδίδει αρκετά μεγάλη ανάκτηση βαρέων μετάλλων στο συμπύκνωμα, αλλά δεν θεωρείται ικανοποιητική γιατί το βάρος του συμπυκνώματος είναι μεγάλο.

- Από τα αποτελέσματα των δοκιμών επίπλευσης προκύπτει ότι, το υλικό αυξάνεται σημαντικά σε περιεκτικότητα στα χρήσιμα μεταλλικά στοιχεία, με καλύτερα αποτελέσματα, για τον Zn από 0,92% σε 4,87% σε pH=9,5, για τον Pb από 0,34% σε 0,84% σε pH=8,0, για το As από 0,89% σε 1,98% σε pH=6,0, και για τον Fe από 21,71% σε 40,89% σε pH=8,5. Οι ανακτήσεις γενικά κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, καθώς σε κανένα από τα στοιχεία ενδιαφέροντος δεν ξεπερνά το 52%.
- Το τελικό συμπέρασμα που εξάγεται από τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι ότι, τα στοιχεία ενδιαφέροντος δεν παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη συγκέντρωση για την οικονομική αξιοποίηση του υλικού. Περαιτέρω έρευνα και δοκιμές μπορούν να διενεργηθούν για περιβαλλοντικούς σκοπούς απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) Τμήματος Γεωλογίας
<http://www.geo.auth.gr/106/index.htm> (2021).

Δημητριάδης Αλ. (1999). Γεωχημικός Άτλας της Αστικής Περιοχής του Λαυρείου για Περιβαλλοντική Προστασία και Σχεδιασμό. Στην αποκατάσταση εδάφους στο Δήμο Λαυρίου. Τόμος 2. Έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε. Ε8272 Αθήνα.

Δημητριάδης Α., Βέργου, Αικ., και Βλαχογιάννης, Ν. (2000). Η ρύπανση της Λαυρεωτικής χερσονήσου και του αστικού περιβάλλοντος του Λαυρίου από τα μεταλλευτικά-μεταλλουργικά απορρίμματα και οι επιπτώσεις στην υγεία του τοπικού πληθυσμού σελ. 3,10.

Δημητριάδης Α., Βέργου Αικ., Βλαχογιάννης Ν., (2000) Η ρύπανση της Λαυρεωτικής χερσονήσου και του αστικού περιβάλλοντος του Λαυρίου από τα μεταλλευτικά-μεταλλουργικά απορρίμματα και οι επιπτώσεις στην υγεία του τοπικού πληθυσμού, Πρακτικά Θ επιστημονικής συνάντησης Νοτιοανατολικής Αττικής, Λαύριον, 13-16 Απριλίου 2000, Εταιρία Μελετών, Καλύβια Θορικού Αττικής.

Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ), Τμήμα Χημείας,
http://195.134.76.37/quali/quali_C03_Fe.htm (2021).

Κατερινόπουλος, Α. και Ζησιμοπούλου Ε., (1994) Τα ορυκτά των μεταλλείων του Λαυρίου. Αθήνα, Έκδοση Συλλόγου Ελλήνων Συλλεκτών Ορυκτών και Απολιθωμάτων, σελ. 304.

Μαργαρίτη Ο. (2005) Έλεγχος συμμόρφωσης στερεών βιομηχανικών αποβλήτων με την προτεινόμενη μέθοδο διήθησης σύμφωνα με την 2003/33/ΕΚ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μαρμάνη Μ., Μαρμάνη Φ. (2007) Λαύριο Περιύγηση στην Πόλη, Δημοτική Επιχείρηση Ανάπτυξης του Δήμου Λαυρεωτικής.

Μόσιος Κ Σ., Μπέης Λ Ι., (2011) Ανθεκτικότητα αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών σε μόλυβδο και υδράργυρο, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης.

Σολωμός Χ., Βουδούρης Π., και Κατερινόπουλος Α., (2004). Ορυκτολογική μελέτη μεταλλοφορίας βισμούθιου-χρυσού-αντιμονίου στην περιοχή Καμάριζας Λαυρίου, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας σελ. 388.

Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου.

<https://www.ltcp.ntua.gr/history> (2021).

Τσάμμου, Κ.Γ., (1997). Αρχαιογνωσία των μετάλλων: Αρχαία μεταλλευτική και μεταλλουργική τεχνική. Κ.Γ. Τσάμμου, Αθήνα.

Υπουργείο Περιβάλλοντος, 2012. Απογραφή κλειστών & εγκαταλειμμένων εγκαταστάσεων αποβλήτων (σύμφωνα με άρθρο 20 της οδηγίας 2006/21/ΕΚ, άρθρο 21 της ΚΥΑ 39624/2209/Ε103/2009 -ΦΕΚ Β'2076-).

Αγγλική

Eurolab Laboratory Services

<https://www.laboratuar.com/el/testler/maden/zn-cinko-cevher-mineral-analizi/> (2021).

The Hudson Institute of Mineralogy aba mindat.org

https://www.mindat.org/photoscroll.php?frm_id=pscroll&cform_is_valid=1&searchbox=lead&submit_pscroll=Search (2021).

The Hudson Institute of Mineralogy aba mindat.org

<https://www.mindat.org/min-294.html> (2021).

The Hudson Institute of Mineralogy aba mindat.org

https://www.mindat.org/photoscroll.php?frm_id=pscroll&cform_is_valid=1&searchbox=li tharge&submit_pscroll=Search (2021).

The Hudson Institute of Mineralogy aba mindat.org

https://www.mindat.org/photoscroll.php?frm_id=pscroll&cform_is_valid=1&searchbox=massicot&submit_pscroll=Search (2021).