



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ**

**ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΧΑΛΚΟΥ ΑΠΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ  
ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κάτσαρη Χριστίνα-Μαρία**

**Επιβλέπων: Γεώργιος Αναστασάκης**

**Καθηγητής ΕΜΠ**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2015**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ

## **ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΧΑΛΚΟΥ ΑΠΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κάτσαρη Χριστίνα-Μαρία**

**Επιβλέπων: Γεώργιος Αναστασάκης**

**Καθηγητής ΕΜΠ**

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 23/10/2015

Γεώργιος Αναστασάκης, Καθηγητής, .....

Στυλιανή Αγατζίνη-Λεονάρδου, Καθηγήτρια .....

Κωνσταντίνος Τσακαλάκης, Καθηγητής, .....

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....

ΚΑΤΣΑΡΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ – ΜΑΡΙΑ

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων –Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

© 2015 – All rights reserved



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη δυνατότητα ανάκτησης χαλκού από άχρηστα ηλεκτρικά καλώδια χρησιμοποιώντας παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι από την αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία δεν βρέθηκαν αναφορές σχετικά με τη χρήση της παλλόμενης τράπεζας στον διαχωρισμό χαλκού από πλαστικό, προερχόμενα από ανακύκλωση ηλεκτρικών καλωδίων. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, διερευνήθηκε η επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων της παλλόμενης τράπεζας στο αποτέλεσμα του διαχωρισμού του χαλκού από το πλαστικό, με σκοπό τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών. Οι παράγοντες που μελετήθηκαν ήταν η παροχή του νερού τροφοδοσίας, η κλίση του καταστρώματος και η συχνότητα της παλμικής κίνησης.

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δυο δείγματα με διαφορετική περιεκτικότητα σε χαλκό, το ένα με μεγάλη περιεκτικότητα (35-40% χαλκός) και το άλλο με μικρότερη (3-5% χαλκός), τα οποία χορηγήθηκαν ευγενώς από την εταιρεία «METAL SCRAP».

Υπάρχουν πολλοί άνθρωποι που βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και θα ήθελα να τους ευχαριστήσω τον καθένα ξεχωριστά.

Πρώτα και κύρια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ Γεώργιο Αναστασάκη, ο οποίος μου ανέθεσε ένα καινοτόμο και ενδιαφέρον θέμα για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη την διάρκειά της, όπως επίσης και οι χρήσιμες συμβουλές που μου έδωσε για την πειραματική διαδικασία και τη συγγραφή της εργασίας αποτελούν τα θεμέλια της άριστης συνεργασίας που είχαμε.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων, Διευθυντής του οποίου είναι ο κ. Κωνσταντίνος Τσακαλάκης και Ειδικό Τεχνικό Εργαστηριακό Προσωπικό ο κ. Ηλίας Σαμμάς. Θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους δύο, οι οποίοι με έκαναν από την πρώτη στιγμή να νιώσω μέλος του εργαστηρίου και ιδιαίτερα τον κ. Σαμμά, ο οποίος εξασφάλισε τόσο την ασφαλή εργασία μου μέσα στο χώρο όσο και την αμέριστη βοήθεια κατά τη χρήση των μηχανημάτων.

Οι συμβουλές και υποδείξεις της κας Στυλιανής Αγατζίνη- Λεονάρδου, καθηγήτρια του Τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, σε θέματα μεταλλουργίας του χαλκού κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας υπήρξαν πολύτιμες και θα ήθελα να την ευχαριστήσω θερμά.

Για την ανάλυση του υλικού ήταν απαραίτητη η χρήση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) και του Περιθλασίμετρου Ακτίνων-X (XRD), τα οποία ανέλαβε ο κ. Πέτρος Τσακίριδης, Ειδικό Τεχνικό Εργαστηριακό Προσωπικό του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, τον οποίο και ευχαριστώ ιδιαίτερα.

Από το γειτονικό εργαστήριο της Τεχνικής Γεωλογίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη, ο οποίος μας δάνεισε το κλισίμετρο για τη μέτρηση και ρύθμιση της κλίσης του καταστρώματος της παλλόμενης τράπεζας.

Επίσης, θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τους κ. Δημήτρη Σκούρα και Δημήτρη Σωτηρίου, χωρίς την συμβολή των οποίων θα ήταν αδύνατη η προμήθεια των δειγμάτων.

Οι άνθρωποι οι οποίοι με καταλάβαιναν περισσότερο από όλους και με βοήθησαν με τις συμβουλές και την αγάπη τους είναι οι τρεις φίλοι, συμφοιτητές και πλέον συνάδελφοί μου, οι Κωνσταντίνος Κοργιόπουλος, Γιάννης Μπέλλος και Παναγιώτης Ξανθόπουλος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου Μιχάλη και Βίκυ και τον αδερφό μου Αντρέα, οι οποίοι με στηρίζουν πάντα σε όλες μου τις επιλογές. Αποτελούν πηγή έμπνευσης για μένα και για αυτό τους αφιερώνω την παρούσα εργασία, με πολλή αγάπη.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των σύγχρονων κοινωνιών είναι η διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Τα απόβλητα περιέχουν χρήσιμα υλικά, τα οποία με κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά, με αποτέλεσμα να εξοικονομούνται πρώτες ύλες, ενέργεια και να προστατεύεται το περιβάλλον. Τα ηλεκτρονικά απόβλητα (όπως τα ηλεκτρικά καλώδια) περιέχουν μέταλλα, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η δυνατότητα ανάκτησης χαλκού από ηλεκτρικά καλώδια με βαρυτομετρική μέθοδο διαχωρισμού χρησιμοποιώντας παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις. Το μηχάνημα αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων πλην όμως δεν υπάρχουν αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία για εφαρμογή του στο διαχωρισμό χαλκού από πλαστικό κατά την ανακύκλωση ηλεκτρικών καλωδίων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, προκύπτει ότι είναι δυνατό να εφαρμοστεί η παραπάνω μέθοδος για αυτό το σκοπό αλλά και γενικότερα στο πεδίο της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων.

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο δείγματα με διαφορετική περιεκτικότητα σε χαλκό, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα.

Οι παράγοντες που μελετήθηκαν ήταν η παροχή του νερού της τροφοδοσίας, η κλίση του καταστρώματος και η συχνότητα της παλμικής κίνησης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο διαχωρισμός του χαλκού από το πλαστικό των ηλεκτρικών καλωδίων είναι εφικτός. Ειδικότερα, για το πλούσιο υλικό οι βέλτιστες συνθήκες διαχωρισμού ήταν μεγάλη κλίση, μεσαία συχνότητα και μεσαία παροχή νερού ενώ για το φτωχό μεσαία κλίση, μικρή παροχή νερού και μεσαία συχνότητα.

Η μέθοδος είναι απόλυτα φιλική προς το περιβάλλον και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση διαχωρισμού χαλκού από πλαστικό προκειμένου για ανακύκλωση απορριμμάτων ηλεκτρικών καλωδίων.

# **COPPER RECOVERY FROM ELECTRIC CABLE RECYCLING**

## **ABSTRACT**

Waste management is one of the main issues that modern society has to cope with. Solid wastes often contain useful materials. By using the appropriate recycling method, these materials can be recovered and reused. As a result, primary raw materials are saved, less energy is consumed and the environment is protected. Electronic wastes – such as electrical cables – contain various metals that can be recovered.

The current Diploma Thesis examines the possibility of copper recovery from electrical cables using shaking table. This equipment is commonly used in mineral processing; however there is no evidence referred to its application on copper separation from plastic during electric cables recycling. Taking into account the results of the current work, it derives that its application for the aforementioned purpose is feasible, as well as in any other case of solid waste separation with significant density difference of the waste constituents.

For the experimental procedure, two samples were used, with different copper content each, in order to compare the process efficiency in respect to copper content of the feed. One sample was of high grade in copper (35-45%) while the other was of low (3-5%).

The process factors examined were:

- a) water flow-rate
- b) table slope
- c) table reciprocating speed

The results clearly show that the separation of copper from plastic derived from electric cables is feasible. Also, the separation is much more efficient for high-grade waste feed than the corresponding of low copper grade. For the high-grade feed, optimum results were obtained for table slope 10°, water flow-rate 1.5 l/min, and table speed 340-360 strokes/min. Correspondingly for the low grade feed, optimum separation conditions were determined to be: table slope 8°, water



flow-rate 1 l/min, and table speed 340-360 strokes/min. Especially for the high-grade feed, there were obtained concentrates (heavy products) with high copper grade (higher than 95%) and high recovery (higher than 90%). On the contrary, in the case of low-grade feed, there were obtained heavy products with high copper grade (in many cases higher than 94%) but with lower recovery, ranging from 16% to 88%. In conclusion, gravity separation of copper from plastic on shaking table derived from electric cable recycling operations seems feasible, and generally presents a good prospect for application in metal separation from the light material of solid waste.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	iii
ABSTRACT.....	iv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	ix
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ.....	1
1.1 Ανακύκλωση Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού(ΑΗΗΕ).....	2
1.2. Οφέλη της ανακύκλωσης.....	3
Περιβαλλοντικά οφέλη .....	3
Οικονομικά οφέλη .....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ .....	5
2.1 Κατασκευή.....	5
2.2 Ανακύκλωση ηλεκτρικών καλωδίων .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΛΑΣΤΙΚΑ.....	7
3.1 Ορισμός.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΛΚΟΣ.....	9
4.1 Ιστορικό .....	9
4.2 Ιδιότητες.....	9
4.3 Μεταλλουργία Χαλκού .....	10
4.4 Ανακύκλωση χαλκού .....	11
4.5 Εφαρμογές κραμάτων χαλκού .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΤΡΑΠΕΖΕΣ .....	16
5.1 Συγκέντρωση με τράπεζες - Βασικές αρχές και μηχανισμός λειτουργίας .....	16
5.2 Απλές τράπεζες συγκέντρωσης.....	16
5.3 Παλλόμενες τράπεζες συγκέντρωσης.....	17
5.4 Εφαρμογές τραπεζών .....	20

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	22
6.1 Εισαγωγή.....	22
6.2 Υλικά.....	23
6.3 Δειγματοληψία .....	23
6.4 Ταυτοποίηση υλικών.....	25
6.4.1 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης.....	25
6.4.2 Περίθλαση Ακτίνων-Χ.....	27
6.5 Ρύθμιση παραγόντων μελέτης.....	28
6.6 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας .....	30
6.6.1 Ανακύκλωση απορρίμματος πρώτου διαχωρισμού .....	30
6.6.2 Συλλογή προϊόντων.....	30
6.6.3 Διήθηση – Ξήρανση - Ζύγιση .....	31
6.6.4 Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε μέταλλο των προϊόντων.....	34
6.7 Εξισώσεις που συνδέουν τα προϊόντα και την τροφοδοσία μεταξύ τους .....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	36
7.1 Αποτελέσματα Ανάλυσης στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM).....	36
7.1.1 Μέταλλο.....	36
7.1.2 Δείγμα πλαστικού .....	45
7.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης XRD.....	47
7.3 Προσδιορισμός των ειδικών βαρών των υλικών.....	48
7.4 Παλλόμενη Τράπεζα.....	49
7.4.1 ΠΛΟΥΣΙΟ ΥΛΙΚΟ ( Περιεκτικότητα 35-45% σε Cu).....	49
7.4.2 ΦΤΩΧΟ ΥΛΙΚΟ ( Περιεκτικότητα 3-5% σε Cu) .....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	70

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1:Θέση του χαλκού στον Περιοδικό Πίνακα.....	9
Εικόνα 2:Χρήσεις του χαλκού στην Ευρώπη .....	13
Εικόνα 3: Κράματα Χαλκού .....	15
Εικόνα 4:Πορεία τεμαχίων στο κατάστρωμα της τράπεζας .....	20
Εικόνα 5: Ιδανική κατανομή τεμαχίων διαφορετικού ειδικού βάρους και μεγέθους στο κατάστρωμα τράπεζας (Richards).....	20
Εικόνα 6 : Παλλόμενη τράπεζα .....	22
Εικόνα 7:Δειγματολήπτης Jones .....	24
Εικόνα 8: Δειγματολήπτης Jones με το υλικό.....	24
Εικόνα 9: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης(SEM) .....	25
Εικόνα 10: Κλισίμετρο στην τράπεζα.....	30
Εικόνα 11: Συγκέντρωση απορρίμματος .....	31
Εικόνα 12: Διήθηση.....	32
Εικόνα 13: Διηθητικά χαρτιά.....	32
Εικόνα 14: Ζυγαριά.....	32
Εικόνα 15: Συμπύκνωμα - Απόρριμμα .....	33
Εικόνα 16: Ζυγαριά ακριβείας.....	34
Εικόνα 17: Δείγμα μετάλλου στο SEM .....	36
Εικόνα 18: Σημείο χημικής ανάλυσης .....	37
Εικόνα 19: Φάσμα ανάλυσης EDS κόκκου χαλκού .....	38
Εικόνα 20: Ίνα μετάλλου .....	38
Εικόνα 21:Φάσμα ανάλυσης EDS Cu-Sn .....	39
Εικόνα 22: Κόκκος μετάλλου .....	39
Εικόνα 23:Φάσμα ανάλυσης EDS Cu-Zn.....	40
Εικόνα 24:Σημείο στοιχειακής ανάλυσης.....	41
Εικόνα 25:Φάσμα ανάλυσης EDS Sn-Pb.....	41
Εικόνα 26:Σημείο στοιχειακής ανάλυσης.....	42
Εικόνα 27: Φάσμα ανάλυσης EDS χαλκού.....	43
Εικόνα 28: Σημείο στοιχειακής ανάλυσης.....	43
Εικόνα 29: Φάσμα ανάλυσης EDS Cu-Al .....	44
Εικόνα 30: Κομμάτια πλαστικού .....	45
Εικόνα 31: Περιοχή και φάσμα στοιχειακής ανάλυσης.....	46
Εικόνα 32:Ακτινοδιάγραμμα XRD.....	48
Εικόνα 33: Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	51
Εικόνα 34: Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος στην ανάκτηση χαλκού για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	52
Εικόνα 35: Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	54

Εικόνα 36: Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας στην ανάκτηση χαλκού για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	55
Εικόνα 37: Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	57
Εικόνα 38: Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης στην ανάκτηση χαλκού για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	58
Εικόνα 39: Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	60
Εικόνα 40: Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας στην ανάκτηση χαλκού για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	61
Εικόνα 41: Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	63
Εικόνα 42: Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος στην ανάκτηση χαλκού για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	64
Εικόνα 43: Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	66
Εικόνα 44: Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης στην ανάκτηση χαλκού για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία .....	67
Εικόνα 45: Πλαστικό που παρασύρεται προς το συμπύκνωμα .....	68

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ίνες χαλκού .....	37
Πίνακας 2: Σημειακή ανάλυση κράματος Cu-Sn.....	39
Πίνακας 3: Στοιχειακή ανάλυση Cu-Zn.....	40
Πίνακας 4: Στοιχειακή ανάλυση Sn-Pb .....	41
Πίνακας 5: Στοιχειακή ανάλυση 100% Cu .....	42
Πίνακας 6: Στοιχειακή ανάλυση Cu-Al .....	44
Πίνακας 7: Στοιχειακή ανάλυση πλαστικού .....	46
Πίνακας 8: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 6° (πλούσιο υλικό).....	50
Πίνακας 9: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 8° (πλούσιο υλικό).....	50
Πίνακας 10: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 10° (πλούσιο υλικό).....	51
Πίνακας 11: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 1l/min (πλούσιο υλικό) .....	53
Πίνακας 12: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 1,5 l/min (πλούσιο υλικό) .....	53
Πίνακας 13: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 2l/min (πλούσιο υλικό) .....	54
Πίνακας 14: Αποτελέσματα δοκιμής με μικρή συχνότητα παλμικής κίνησης (πλούσιο υλικό).....	56
Πίνακας 15: Αποτελέσματα δοκιμής με μεσαία συχνότητα παλμικής κίνησης (πλούσιο υλικό).....	56
Πίνακας 16: Αποτελέσματα δοκιμής με μεγάλη συχνότητα παλμικής κίνησης (πλούσιο υλικό) .....	57
Πίνακας 17: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 1l/min (φτωχό υλικό).....	59
Πίνακας 18: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 1,5 l/min (φτωχό υλικό).....	59
Πίνακας 19: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 2l/min (φτωχό υλικό).....	60
Πίνακας 20: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 6° (φτωχό υλικό) .....	62
Πίνακας 21: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 8° (φτωχό υλικό) .....	62
Πίνακας 22: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 10° (φτωχό υλικό) .....	63

Πίνακας 23: Αποτελέσματα δοκιμής με μικρή συχνότητα παλμικής κίνησης (φτωχό υλικό) .....	65
Πίνακας 24: Αποτελέσματα δοκιμής με μεσαία συχνότητα παλμικής κίνησης (φτωχό υλικό).....	65
Πίνακας 25: Αποτελέσματα δοκιμής με μεγάλη συχνότητα παλμικής κίνησης (φτωχό υλικό) .....	66

# **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ**

Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα των αναπτυγμένων χωρών στις μέρες μας είναι η διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Η αύξηση του πληθυσμού και η συγκέντρωσή του στα μεγάλα αστικά κέντρα, ταυτόχρονα με την κοινωνική και τεχνολογική ανάπτυξη αποτελέσαν τα κύρια αίτια για την υπερκατανάλωση προϊόντων και, κατά συνέπεια, τη βάση του προβλήματος της διαχείρισης των απορριμμάτων.

Η Ευρώπη κάθε χρόνο παράγει 1,3 δις τόννους αποβλήτων πάσης φύσεως. Η Ε.Ε. έχει θεσπίσει όρους για την σωστή διαχείριση των αποβλήτων, θέτοντας στα μέλη της στόχους με συγκεκριμένα ποσοστά και ημερομηνίες επίτευξης των στόχων. Το Έκτο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον είχε θέσει ως στόχο την μείωση της παραγωγής αποβλήτων κατά 20% για το 2010 και κατά 50% έως το 2050. Επίσης, έχουν τεθεί στόχοι για αύξηση της ανακύκλωσης έως το 2020.

Η περιβαλλοντικά και κοινωνιολογικά ορθολογική διαχείριση των απορριμμάτων στην εποχή μας κρίνεται πλέον απαραίτητη για την συνέχιση της ανθρώπινης επιβίωσης. [1]–[4]

## 1.1 Ανακύκλωση Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού(ΑΗΗΕ)

Η ανακύκλωση γενικά είναι μια διαδικασία, κατά την οποία τα απορριπτόμενα υλικά συλλέγονται, ταξινομούνται, μετατρέπονται σε πρώτη ύλη και στην συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων προϊόντων.

Πρόκειται για εκείνη την παραγωγική διαδικασία, κατά την οποία τα υλικά είτε χρησιμοποιούνται και πάλι για τον ίδιο σκοπό είτε μετατρέπονται σε τελείως διαφορετικά προϊόντα. Έτσι, δημιουργείται ένας οικονομικός κύκλος, ο οποίος εξοικονομεί πρώτες ύλες και ενέργεια ενώ ταυτόχρονα προστατεύει το περιβάλλον.

Τα ανακυκλώσιμα υλικά ("recyclables" ή "recyclates") προέρχονται από πολλές πηγές: σπίτια, δημόσιες υπηρεσίες, εμπορικά καταστήματα, βιομηχανίες κ.α.

Σ' αυτά περιλαμβάνονται:

- Το γυαλί
- Το χαρτί
- Τα ηλεκτρονικά απόβλητα: οικιακές συσκευές, εξοπλισμός πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, τηλεοράσεις, ραδιόφωνα, ηλεκτρικά εργαλεία και εξοπλισμός, κ.λπ.
- Τα φωτιστικά είδη, π.χ. λαμπτήρες
- Οι μπαταρίες
- Το αλουμίνιο
- Άλλα μέταλλα: χαλκός, λευκοσίδηρος, σίδηρος, χάλυβας
- Η άσφαλτος
- Τα πλαστικά

Οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές είναι ανακυκλώσιμες, όχι μόνο γιατί επιβαρύνουν το περιβάλλον αλλά και γιατί βλάπτουν την υγεία των ανθρώπων.



Στόχος της ανακύκλωσης είναι ο διαχωρισμός των συστατικών των στερεών αποβλήτων κατά είδος. Με εξαίρεση τα πλαστικά, δεν υπάρχουν σημαντικά προβλήματα στο διαχωρισμό τους, ούτε στην τεχνολογία ανακύκλωσής τους ή στην απορρόφηση τους από τις ελληνικές βιομηχανίες, εφόσον τηρούνται οι προϋποθέσεις καθαρότητας των υλικών.

## **1.2. Οφέλη της ανακύκλωσης**

### **Περιβαλλοντικά οφέλη**

Μέσω της ανακύκλωσης, οι ποσότητες των απορριμμάτων που οδηγούνται σε χωματερές και ΧΥΤΑ μειώνονται σε μεγάλο ποσοστό και έτσι επιτυγχάνεται μικρότερη ρύπανση του εδάφους, των υδάτων και της ατμόσφαιρας.

Επί πλέον, η μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για εξόρυξη, μεταφορά, επεξεργασία πρώτων υλών και παραγωγή προϊόντων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων.

### **Οικονομικά οφέλη**

Τα υλικά που ανακυκλώνονται έχουν συνήθως μεγάλη αξία ώστε να συμφέρει η διαδικασία της ανακύκλωσης. Τα μέταλλα κατέχουν την πρώτη θέση και ακολουθούν το χαρτί και το χαρτόνι. Τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, λόγω των σπάνιων μετάλλων που περιέχουν, προσφέρουν μεγάλα οικονομικά οφέλη. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται πως το όφελος από τη διαχείρισή τους θα φτάσει τα 5,6 δις ευρώ μέχρι το 2020.

Το πολυτιμότερο από τα μέταλλα των ηλεκτρικών συσκευών είναι ο χαλκός, του οποίου η τιμή μπορεί να φτάσει τα 3.000 ευρώ/τόννο.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση επενδύει στην ανακύκλωση των αποβλήτων ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού προκειμένου να αυξήσει την ανταγωνιστικότητά της. Μετατρέποντας τα απόβλητα σε πρώτες ύλες για τη βιομηχανία, μειώνεται η ανάγκη εξόρυξης των αντίστοιχων πρωτογενών ορυκτών πρώτων υλών.

Η Ελλάδα βρίσκεται στις τελευταίες θέσεις των χωρών της Ε.Ε. σε θέματα ανακύκλωσης. Στην Ολλανδία, τη Δανία, τη Σουηδία και το Βέλγιο - σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος- καταλήγει στους ΧΥΤΑ μόλις το 10% των απορριμμάτων που παράγονται. Ταυτόχρονα, οι πολίτες έχουν καταφέρει να ανακυκλώνουν περισσότερο από το 50% των απορριμμάτων.

Παρόλα αυτά, η χώρα το 2014 βρέθηκε εντός του ποσοτικού στόχου που θέτει η Ε.Ε. σχετικά με την ανακύκλωση ηλεκτρικών συσκευών (4 κιλά ανά κάτοικο ετησίως). Σύμφωνα με τον Διευθύνοντα Σύμβουλο της εταιρείας «Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε.», η χώρα είναι εδώ και χρόνια εντός ποιοτικού στόχου και αναμένεται να ισχύσει το ίδιο και το 2015. [5]–[7]

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ**

### **2.1 Κατασκευή**

Τα ηλεκτρικά καλώδια παράγονται από ράβδους χαλκού ή αλουμινίου, μέσω διεργασιών ολκής, οι οποίες αποσκοπούν στην αύξηση του μήκους και τη μείωση της διατομής της ράβδου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από ράβδο διαμέτρου 4/10 in παράγεται καλώδιο διαμέτρου 8/100 in.

Στη συνέχεια, επτά τέτοια καλώδια πλέκονται από ειδικές μηχανές και σχηματίζουν ένα αγωγό, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως αγωγός χαμηλής τάσης (1000V) και χρησιμοποιείται ευρέως σε οικιακές εγκαταστάσεις.

Ο αγωγός καλύπτεται με πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), για να μονωθεί, με το πάχος της μόνωσης να ελέγχεται με ακτίνα LASER και στη συνέχεια ψύχεται με εμβάπτιση σε νερό. Το χρώμα της μόνωσης ορίζεται από τον πελάτη.

Συχνά, πολλά τέτοια καλώδια χρησιμοποιούνται μαζί, με σκοπό το σχηματισμό ενός καλωδίου μεσαίας τάσης (1000-6000V). Για τον έλεγχο βραχυκυκλώματος, τα καλώδια αυτά συνδέονται σε κύκλωμα και βυθίζονται σε νερό. Η μόνωση τους γίνεται όπως και στα καλώδια χαμηλής τάσης. [8]–[10]

### **2.2 Ανακύκλωση ηλεκτρικών καλωδίων**

Για την ανακύκλωση των ηλεκτρικών καλωδίων χρησιμοποιούνται αποφλοιωτές και τεμαχιστές. Οι αποφλοιωτές που υπάρχουν στην αγορά έχουν τη δυνατότητα να διαχειριστούν καλώδια κάθε τύπου, από τριχοειδή μέχρι και διαμέτρου 100mm. Μπορούν να πετύχουν απόλυτο διαχωρισμό και μεγάλη παραγωγή (από 200 - 700kg/h ).

Εκτός από τους αποφλοιωτές, στην αγορά υπάρχουν έτοιμα συγκροτήματα, τα οποία περιλαμβάνουν τεμαχιστή και μηχανήμα διαχωρισμού (συνήθως αεροδιαχωριστή) για να πετύχουν διαχωρισμό χαλκού και πλαστικού ακόμα και στα τηλεφωνικά ή στα καλώδια δικτύου (UTP) υπολογιστών.

Ακόμη, ερευνητικές προσπάθειες που έγιναν για τον διαχωρισμό του χαλκού από το μονωτικό υλικό των καλωδίων με εφαρμογή ηλεκτροστατικού διαχωρισμού, κατά τον οποίο αναπτύσσονται υψηλής έντασης ηλεκτροστατικά πεδία, έδειξαν ότι ο διαχωρισμός είναι δυνατός. Η τεχνολογία αυτή όμως δεν έχει τύχει πρακτικής εφαρμογής στην ανακύκλωση χαλκού από καλώδια προς το παρόν, αποτελεί όμως μια πιθανή μέθοδο διαχωρισμού στο μέλλον. [1], [5], [11]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΛΑΣΤΙΚΑ

## 3.1 Ορισμός

Τα πολυμερή είναι ενώσεις, οι οποίες συνίστανται από πολύ μεγάλα μόρια και τα οποία, με τη σειρά τους, αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες θεμελιώδεις μονάδες. Τα πλαστικά αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία των πολυμερών.

Η ανακύκλωση των πλαστικών αποτελεί μια δύσκολη και συχνά ασύμφορη διαδικασία. Από περιβαλλοντικής άποψης όμως είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς πολλά πλαστικά περιέχουν χλώριο στην αλυσίδα του μορίου τους, και, όταν καίγονται, παράγουν πολύ τοξικές ενώσεις (διοξίνες και φουράνες) ενώ, εάν αποθεθούν, τα περισσότερα πλαστικά διασπώνται δύσκολα.

Τα πιο διαδεδομένα είδη πλαστικών προς ανακύκλωση είναι:

- PVC - Πολυβινυλοχλωρίδιο
- HDPE - Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας
- LDPE - Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας
- PP - Πολυπροπυλένιο
- PS - Πολυστυρένιο

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των πλαστικών, είναι η σχέση βάρους:όγκος που φτάνει μέχρι και 1:3. Υπάρχουν πολλά προβλήματα με τα πλαστικά από άποψης δυνατότητας για ανακύκλωση, τα οποία οφείλονται στο ότι:

(α) υπάρχουν πολλές ποιότητες και τύποι πλαστικών με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση,

(β) είναι αρκετά δύσκολο να αναγνωρισθούν εύκολα, ακόμα και εάν φαίνονται ίδια (π.χ. πλαστικά μπουκάλια),

(γ) υπάρχουν σε αυτά πολλές προσμίξεις.

Λόγω των προβλημάτων που υπάρχουν, οι προσπάθειες για ανάκτηση πλαστικού έχουν εστιασθεί στα είδη που ανακυκλώνονται ευκολότερα (PET και HDPE). Αν και τα θερμοπλαστικά διαθέτουν

τη δυνατότητα επαναθέρμανσης και επαναδιαμόρφωσης, η επαναθέρμανση τελικά τα υποβαθμίζει.

Η ανακύκλωση σε μονάδες κατεργασίας πλαστικού είναι πιο εύκολη σε πολλές περιπτώσεις. Εκεί, το άχρηστο πλαστικό τεμαχίζεται σε λεπτά τεμάχια, αναμιγνύεται με παρθένους κόκκους πλαστικού (ρητίνες) και τήκεται σύμφωνα με την κανονική διαδικασία κατασκευής πλαστικού. Σε πολλές περιπτώσεις, η επαναχρησιμοποίηση πλαστικού είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία. Η διάθεση ρητίνης γνωστού μοριακού βάρους χωρίς προσμίξεις είναι βασικό συστατικό της ανακύκλωσης των πλαστικών.

Λόγω των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, η ανακύκλωση των πλαστικών βρίσκεται ακόμη σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Οι πηγές παραγωγής απορριμμάτων πλαστικών είναι [1], [3], [12], [13] :

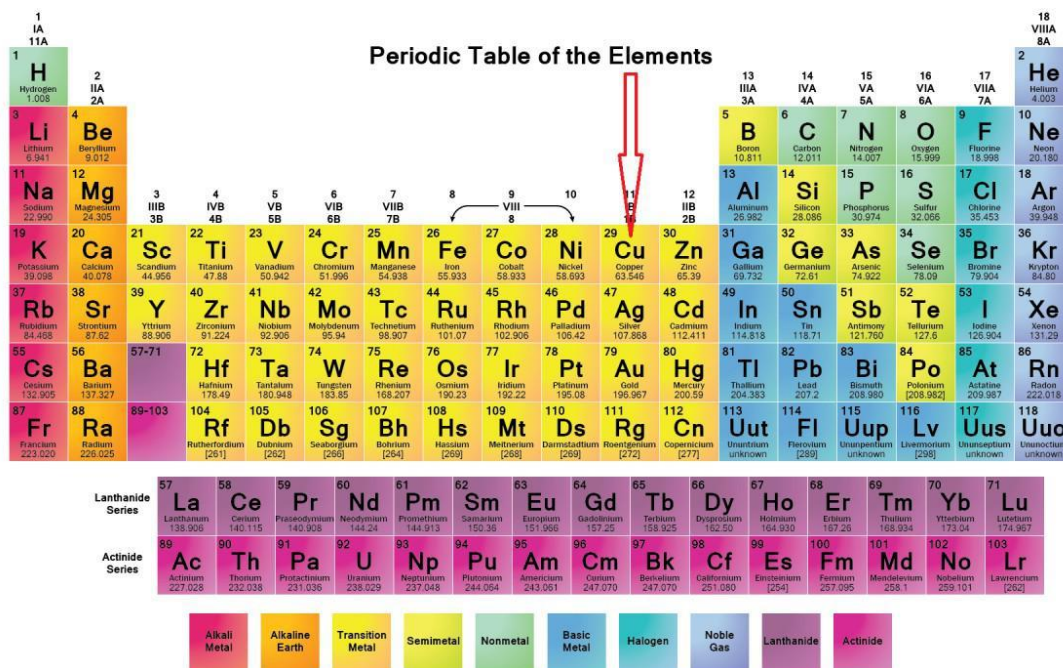
1. Μεταφορικά μέσα, όπως: αυτοκίνητα, ποδήλατα, μοτοσυκλέτες, φορτηγά κλπ.
2. Υλικά συσκευασίας, όπως: μπουκάλια, δοχεία τροφίμων, σακούλες και πλαστικά περιτυλίγματα.
3. Υλικά οικοδομών και κατασκευών, όπως: σωλήνες, αποχετεύσεις, πατώματα, μονώσεις, πόρτες και παράθυρα.
4. Ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, όπως: καλώδια και συσκευές επικοινωνίας.
5. Είδη επίπλωσης, όπως: οικιακά έπιπλα, χαλιά, κουρτίνες, έπιπλα γραφείου και καλύμματα τοίχων.
6. Καταναλωτικά αγαθά, όπως: τσάντες, παιχνίδια, εργαλεία κήπων και εξοπλισμός εργαστηρίων.
7. Βιομηχανικά είδη.
8. Θερμοκήπια.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΛΚΟΣ

## 4.1 Ιστορικό

Ο χαλκός αποτελεί το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο. Διαπιστώθηκε σύντομα ότι ο χαλκός μπορούσε εύκολα να σφυρηλατηθεί σε φύλλα, τα οποία με τη σειρά τους μπορούσαν να υποστούν επεξεργασία σε πιο περίπλοκα σχήματα. Με την εισαγωγή του μπρούντζου (κράμα χαλκού-κασσιτέρου), δημιουργήθηκε ένα ευρύ φάσμα από προϊόντα χύτευσης. Ωστόσο, ο χαλκός και τα κύρια κράματα του, όπως ο μπρούντζος και ο ορείχαλκος (κράμα χαλκού-ψευδαργύρου), ήταν πάντα κάτι περισσότερο από διακοσμητικά υλικά.

## 4.2 Ιδιότητες



Εικόνα 1: Θέση του χαλκού στον Περιοδικό Πίνακα

Το χημικό του σύμβολό του είναι Cu. Ανήκει στην ομάδα της 1ης κύριας σειράς των στοιχείων μετάπτωσης, έχει ατομικό αριθμό 29 και ατομικό βάρος 63,546. Τήκεται στους 1084,6 °C ενώ η θερμοκρασία βρασμού του αγγίζει τους 2567 °C.

Ο μεταλλικός χαλκός έχει κοκκινωπό χρώμα, είναι σχετικά μαλακός, ελατός και όλκιμος και ταυτόχρονα έχει εξαιρετική αντοχή.

Κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (FCC).

### 4.3 Μεταλλουργία Χαλκού

Ο χαλκός συνήθως συμμετέχει σε μεταλλεύματα με τη μορφή οξειδίων ή σουλφιδίων, ενώ πιο σπάνια εμφανίζεται και ως αυτοφυής χαλκός. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα μεταλλεύματα έχουν μικρή περιεκτικότητα σε Cu, συνήθως μικρότερη από 1%.

Η μεταλλουργική επεξεργασία των μεταλλευμάτων του χαλκού ποικίλει και εξαρτάται από το είδος των μεταλλευμάτων. Σε εκείνα που ο χαλκός βρίσκεται σε μορφή οξειδίων, επικρατέστερη μέθοδος είναι η εκχύλιση σε σωρούς (heap leaching) με θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ). Το προϊόν της εκχύλισης αναμειγνύεται με οργανικούς διαλύτες, ώστε ο χαλκός να εξαχθεί εκλεκτικά από την οργανική φάση. Στη συνέχεια, η φορτωμένη με τον χαλκό οργανική φάση αναμειγνύεται με ένα καθαρό υδατικό διάλυμα, συνήθως θειϊκού ή υδροχλωρικού οξέος, και ο χαλκός μεταβαίνει στην υδατική φάση, η οποία και ηλεκτρολύεται για την παραγωγή καθαρού μετάλλου, καθαρότητας 99,99%.

Στα μεταλλεύματα που ο χαλκός βρίσκεται σε μορφή σουλφιδίων, το υλικό, μετά την εξόρυξη, εμπλουτίζεται με επίπλευση, από την οποία λαμβάνεται συμπύκνωμα με περιεκτικότητα 25-30% σε χαλκό. Το συμπύκνωμα του χαλκού αναμειγνύεται με συλλίπασμα πυριτικής άμμου. Το μείγμα οδηγείται σε κάμινο, όπου και τήκεται. Η άμμος τήκεται, απορροφεί το σίδηρο και τα άλλα ανεπιθύμητα στοιχεία και απομακρύνεται ως σκωρία. Ο ρευστός χαλκός, καθαρότητας 60%, κατευθύνεται προς τον πυθμένα της καμίνου, όπου και συλλέγεται. Έπειτα από τη στερεοποίησή του, τήκεται εκ νέου σε υψηλότερη θερμοκρασία με σκοπό την αύξηση της καθαρότητάς του, η οποία φτάνει το 99,99%, και χυτεύεται σε φύλλα. Η τελική καθαρότητα επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρόλυσης (electrorefining process), κατά την οποία τα φύλλα λειτουργούν ως άνοδος.



Τα φύλλα χαλκού καθαρότητας 99,99%, ανεξάρτητα από τη παραγωγική διαδικασία από την οποία προήλθαν, τήκονται σε κάμινο και χυτεύονται σε μήτρες.

Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει χύτευση σε ράβδους μικρότερης διατομής, ώστε να διευκολυνθεί η παραγωγή των καλωδίων μέσω διεργασιών ολκής.[14]

#### **4.4 Ανακύκλωση χαλκού**

Ο χαλκός είναι πλήρως ανακυκλώσιμος και παράλληλα είναι το μέταλλο που υφίσταται ανακύκλωση, περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο. Τα μέχρι σήμερα γνωστά παγκόσμια αποθέματα χαλκού υπολογίζονται σε 2,6 δις τόννους, εκ των οποίων μόλις το 12% έχει εξορυχθεί σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας του μετάλλου και της ανθρωπότητας και περίπου αυτή η ποσότητα εξακολουθεί να χρησιμοποιείται. Αυτό οφείλεται στο βαθμό ανακύκλωσης του χαλκού που είναι μεγαλύτερος από οποιοδήποτε άλλο μέταλλο.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, καθώς οι τόννοι που εξορύσσονται (700.000) δεν είναι αρκετοί ώστε να ικανοποιήσουν τη ζήτηση της βιομηχανίας επεξεργασμένου χαλκού (2,3 εκατ.), οι κυριότερες χώρες που παράγουν επεξεργασμένο χαλκό αναγκάζονται να εισάγουν πρώτη ύλη, με μοναδική εξαίρεση την Πολωνία.

Αν εξαιρέσουμε τον χαλκό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή καλωδίων, η κατασκευή των οποίων απαιτεί πολύ μεγάλης καθαρότητας ποιότητα, το υπόλοιπο 75% που χρησιμοποιείται στα εργοστάσια επεξεργασίας χαλκού και ορειχάλκου, τα χυτήρια και άλλες βιομηχανίες, προέρχεται από ανακυκλωμένο μέταλλο (scrap χαλκού). Ο βαθμός ανακύκλωσης του χαλκού είναι τόσο υψηλός, επειδή το scrap της πρωτογενούς ανακύκλωσης διατηρεί κατά 95% τις ιδιότητες και την αξία του μετάλλου από πρωτογενή κοιτάσματα.

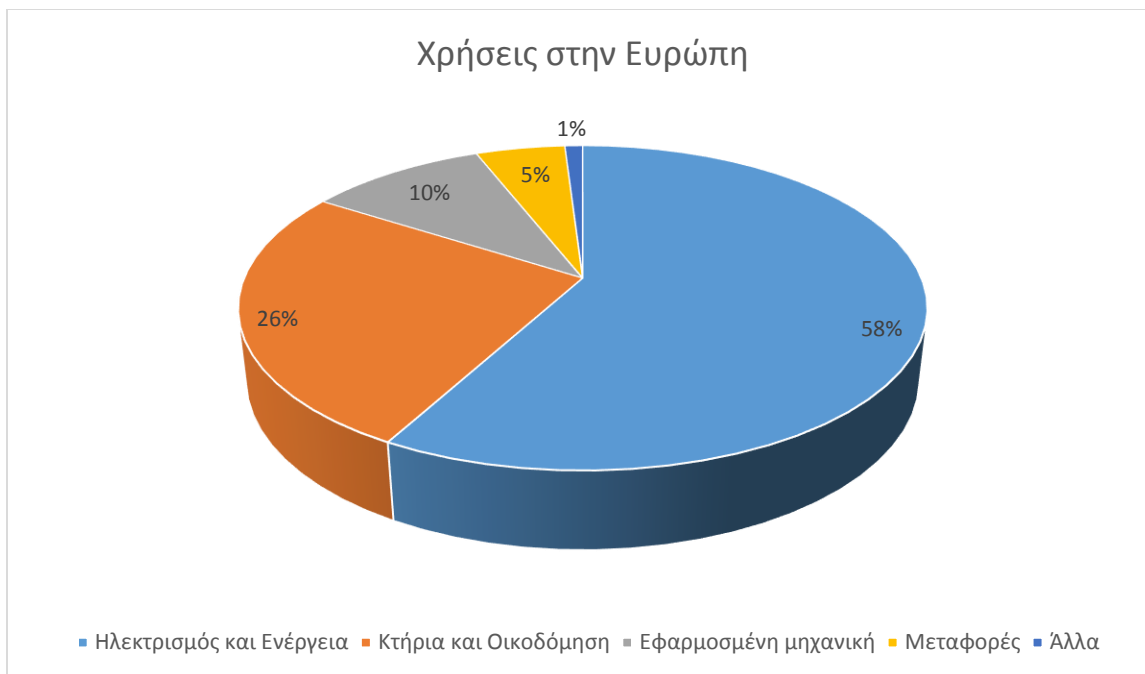
Η ανακύκλωση του χαλκού, σε σχέση με την παραγωγή πρωτογενούς χαλκού από ορυκτά, έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- αποτρέπεται η έκλυση επικίνδυνων αερίων, όπως διοξείδιο του θείου, σκόνη, κλπ.
- εξοικονομείται περίπου το 85% της απαιτούμενης ενέργειας
- περιορίζεται κατά 75% περίπου η εκπομπή CO<sub>2</sub> από καύσιμα, συμβάλλοντας σημαντικά στην παγκόσμια προσπάθεια για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ομάδα Μελέτης Χαλκού (ICSG) και την έκθεση που δημοσίευσε πρόσφατα [15], το 44,8% του χαλκού που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη προέρχεται από ανακύκλωση. Αυτή η θετική εξέλιξη, μπορεί να ικανοποιεί τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση χαλκού, που σημείωσε αύξηση 250% από την δεκαετία του '60. Παράλληλα, μειώνει τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, εξασφαλίζοντας έτσι διαθέσιμες ποσότητες χαλκού για τις επόμενες γενιές. Ένας υπολογιστής περιέχει 1,5 κιλό χαλκού, ένα τυπικό σπίτι περίπου 100 κιλά και μία ανεμογεννήτρια 5 τόννους.

Υπολογίζοντας πως ο χαλκός μπορεί να ανακυκλωθεί απεριόριστες φορές, χωρίς να χάνει την αποδοτικότητά του, υπάρχει μεγάλο κίνητρο να εξασφαλισθεί η σωστή επεξεργασία των αποβλήτων που περιέχουν χαλκό, όταν αυτά αποθεθούν. Η ανακύκλωση του χαλκού, έχει γίνει ένα σημαντικό μέρος της αλυσίδας εφοδιασμού, της διατήρησης των τοπικών πόρων, της απασχόλησης σε τοπικές θέσεις εργασίας, της εξοικονόμησης πρώτων υλών κατά την υγειονομική ταφή σκουπιδιών, και τέλος παρέχει κίνητρα για την ανακύκλωση άλλων υλικών. Ο χαλκός, είναι παντού στον σύγχρονο οικιακό εξοπλισμό και ειδικότερα σε προϊόντα υψηλής τεχνολογίας, ηλεκτρονικές εγκαταστάσεις, μηχανές, ηλιακά συστήματα και σε «έξυπνα κτίρια».

Οι μεγαλύτεροι χρήστες του επεξεργασμένου χαλκού είναι ο τομέας της ενέργειας και η οικοδομική βιομηχανία. Χάρη στις εγγενείς ιδιότητες της ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητάς του, της αντοχής στη διάβρωση και τις δυνατότητες επεξεργασίας του, χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό κλάδο.



Εικόνα 2: Χρήσεις του χαλκού στην Ευρώπη

Στην Ευρώπη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, η χρήση του αναλύεται ως εξής:

- Ηλεκτρισμός και Ενέργεια 58% (συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών καλωδίων και των καλωδίων στην οικοδομή)
- Κτήριο και Οικοδομή 26% (συμπεριλαμβανομένης της αρχιτεκτονικής και των σωλήνων)
- Εφαρμοσμένη μηχανική (applied mechanics) 10% (βιομηχανικές εγκαταστάσεις και μηχανήματα, έπιπλα και κατασκευή νομισμάτων)
- Μεταφορές 5%
- Άλλα 1%

Ο ανακυκλωμένος χαλκός μπορεί να προέρθει από διάφορες πηγές:

- στάχτες και υπολείμματα μεταλλουργικών εργασιών
- σκραπ ημιέτοιμων προϊόντων (φύλλα, ρολά, σωλήνες, καλώδια)
- προϊόντα που έχουν συμπληρώσει τον κύκλο ζωής τους (ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές)

- οικοδομικά υλικά κατεδάφισης (σωλήνες, ηλεκτρικά καλώδια και υδρορροές)

## 4.5 Εφαρμογές κραμάτων χαλκού

Υπάρχουν περισσότερα από 400 κράματα χαλκού (Εικόνα 3), το καθένα με ένα μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων, για να μπορεί ταιριάζει σε πολλές εφαρμογές, διαδικασίες παραγωγής και περιβάλλοντος.

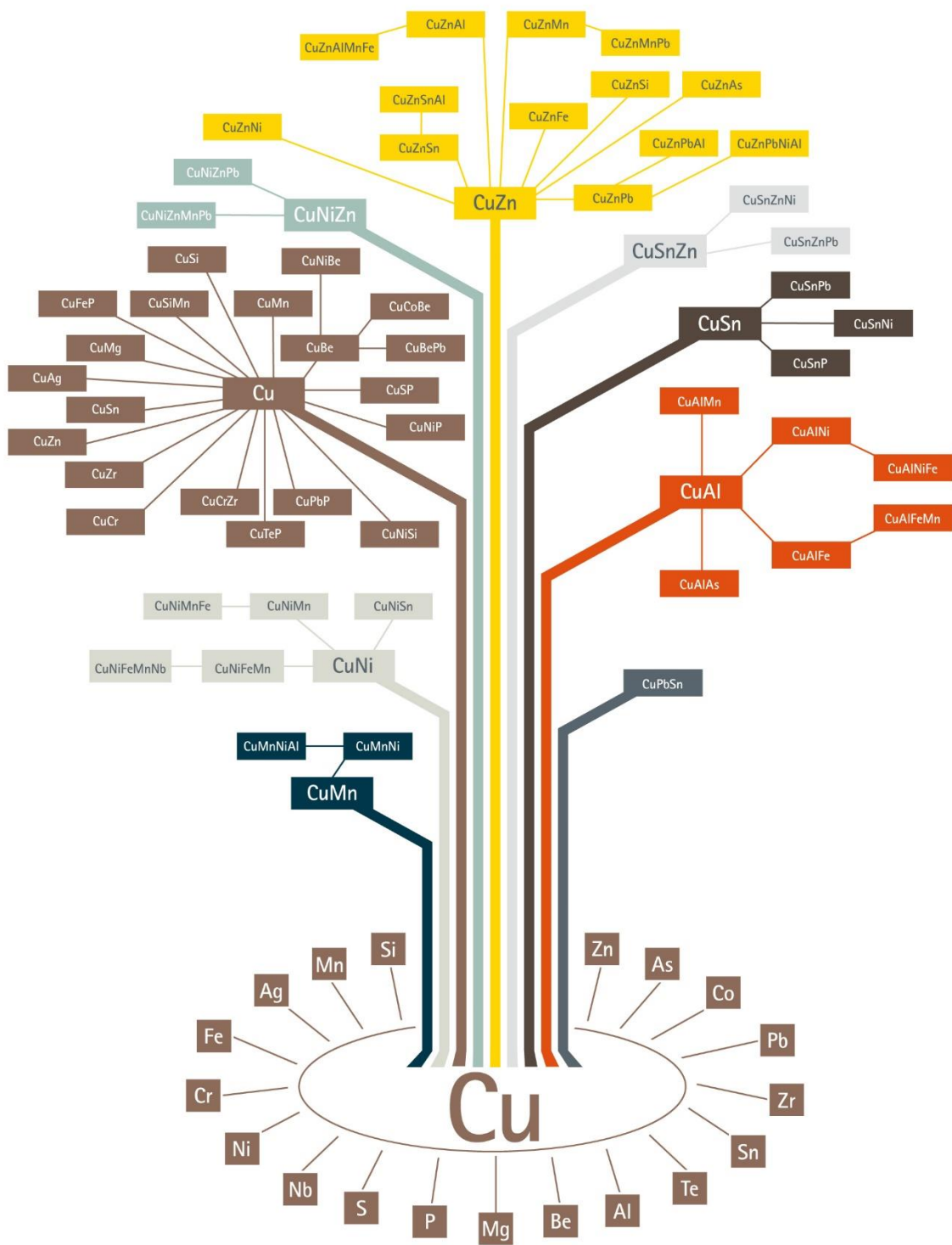
Ο καθαρός χαλκός έχει την καλύτερη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα από κάθε άλλο μέταλλο του εμπορίου γεγονός που τον χαρακτηρίζει κατάλληλο τόσο για τις ηλεκτρικές (υψηλή αγωγιμότητα) όσο και για τις μη ηλεκτρικές (μηχανική) εφαρμογές. Σήμερα, παραπάνω από τη μισή ποσότητα του παραγόμενου χαλκού χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Ορείχαλκος είναι ένας γενικός όρος για μια σειρά από τα κράματα του χαλκού - με διαφορετικούς συνδυασμούς ιδιοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των: κατεργασιμότητα, ολκιμότητα, αντίσταση κατά της φθοράς και της διάβρωσης, σκληρότητα, χρώμα, αντιμικροβιακή δράση, καθώς και υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Το Λευκό Νικέλιο είναι ένα κράμα χαλκού, νικελίου και ψευδαργύρου και μπορεί να θεωρηθεί ως ειδικός ορείχαλκος. Έχει ασημένια εμφάνιση και όχι το μπρούτζινο τυπικό χρώμα.

Ο Μπρούντζος είναι κράμα χαλκού - κασσίτερου, και ήταν το πρώτο κράμα που δημιουργήθηκε, περίπου τέσσερις χιλιάδες χρόνια πριν.

Το χαλκονικέλιο είναι ένα κράμα από χαλκό και νικέλιο και έχει εξαιρετική αντοχή στη θαλάσσια διάβρωση. Η προσθήκη του νικελίου στον χαλκό δεν βελτιώνει μόνο την αντοχή του στην διάβρωση αλλά διατηρεί και την καλή του ολκιμότητα.

Το Βηρύλλιο είναι από το πιο σκληρά και ισχυρά κράματα χαλκού και, εξ αιτίας της επεξεργασίας που έχει υποστεί, χρησιμοποιείται σε ακραίες θερμοκρασίες. Έχει παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες και υψηλή αντοχή με τους χάλυβες αλλά καλύτερη αντοχή στην διάβρωση. [16]–[21]



Εικόνα 3: Κράματα Χαλκού

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΤΡΑΠΕΖΕΣ**

### **5.1 Συγκέντρωση με τράπεζες - Βασικές αρχές και μηχανισμός λειτουργίας**

Η στρωτή ροή μεμβράνης υγρού παρουσιάζει μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες διαχωρισμού μεταλλευμάτων και στείων σύμφωνα με το ειδικό βάρος τους.

Οι ιδιότητες αυτές προέρχονται από τη διαφορά ταχύτητας στα στρώματα που δημιουργούνται. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα στον πυθμένα είναι μηδενική ενώ λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Η διαφορά εξαρτάται από το ιξώδες του υγρού.

Η απλούστερη μορφή της παραπάνω μεθόδου είναι η συγκέντρωση στις τράπεζες, δηλαδή κεκλιμένες επίπεδες επιφάνειες. Όταν στην επιφάνεια της κάθε τράπεζας ρέει νερό που περιέχει τεμάχια μεταλλεύματος ή ορυκτού διαφόρων ειδικών βαρών, τότε τα πιο ελαφριά παρασύρονται ενώ τα πιο βαριά επικάθονται στο κατάστρωμα και συγκεντρώνονται σε μια ευδιάκριτη ζώνη.

Η μορφή της στατικής αυτής τράπεζας ήταν γνωστή από τους αρχαίους Έλληνες στο Λαύριο, ενώ με την εξέλιξη της τεχνολογίας δημιουργήθηκαν οι παλλόμενες τράπεζες με ραβδώσεις.

### **5.2 Απλές τράπεζες συγκέντρωσης**

Οι κυριότεροι τύποι από τις απλές μηχανικές τράπεζες συγκέντρωσης μικρομερών τεμαχίων μεταλλευμάτων είναι οι «κινούμενοι ιμάντες» και οι «κυκλικές περιστρεφόμενες τράπεζες». Αμφότερες οι μηχανές αυτές χρησιμοποιήθηκαν πολύ στο παρελθόν αλλά σχεδόν εγκαταλείφθηκαν ή αντικαταστάθηκαν από άλλες, αποδοτικότερες εξελιγμένες μορφές τους.

### 5.3 Παλλόμενες τράπεζες συγκέντρωσης

Η τράπεζα είναι μια κεκλιμένη επίπεδη επιφάνεια, όπου αποτελεί την απλούστερη μορφή συγκέντρωσης μεταλλεύματος από ροή μεμβράνης. Η τεχνολογική εξέλιξη των τραπεζών σε παλλόμενες με ραβδώσεις τράπεζες αποτελεί σταθμό στο βαρυτομετρικό εμπλουτισμό μικρομερών τεμαχίων μεταλλευμάτων. Η επικράτηση της μεθόδου είναι μεγάλη, αφού οι τράπεζες ίσως είναι αναντικατάστατες σε βασικά πεδία εφαρμογών, όπως ο εμπλουτισμός χρωμίτη, πυρολουσίτη και βαρύτη.

Κατασκευαστικά, οι παλλόμενες τράπεζες είναι ίδιες με τις απλές τράπεζες, αλλά το κατάστρωμα καλύπτεται από ραβδώσεις, δηλαδή από ξύλινες ή πλαστικές λωρίδες πάχους 1-2 cm και ύψους 0,5-1 cm, που προοδευτικά μειώνονται μέχρι απολέπτυνσης στο πέρας της τράπεζας. Οι λωρίδες τοποθετούνται κοντά η μία με την άλλη και σε διαστήματα 2-4 cm, κάθετα ή με μικρή κλίση προς τη ροή.

Η παλμική κίνηση του καταστρώματος είναι ασύμμετρη. Με κατάλληλο μηχανισμό το κατάστρωμα κινείται κάθετα προς τη ροή, με σχετικά μεγαλύτερη ταχύτητα κατά την επιστροφή. Το εύρος της παλμικής κίνησης μεταβάλλεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των τεμαχίων που πρόκειται να εμπλουτιστούν. Ο χώρος μεταξύ δύο γειτονικών ραβδώσεων δημιουργεί συνθήκες παρεμποδιζομένης καταβύθισης και μικρομερούς διείδυσης, με αποτέλεσμα την αύξηση της εκλεκτικότητας του διαχωρισμού.

Πιο αναλυτικά, από την απώλεια της κινητικότητας των τεμαχίων στα αλληπάλληλα στρώματα, τα στρωματωθέντα στον πυθμένα τεμαχίδια, υπόκεινται εντονότερα την παλμική κίνηση του καταστρώματος από εκείνα που βρίσκονται στην επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει, γιατί τα μικρότερα και βαρύτερα βρίσκονται στον πυθμένα και κινούνται ταχύτερα προς την έξοδο από τα μεγαλύτερα ελαφρά. Η μετακίνηση των τεμαχίων εγκάρσια προς τις ραβδώσεις επιτυγχάνεται από τον συνωστισμό, που δημιουργείται από τη νέα τροφοδοσία και αναγκάζει τα ελαφρότερα να ανέρχονται, να υπερχειλίζουν και να υπερπηδούν, τη μία μετά την άλλη, τις ραβδώσεις. Έτσι τα πιο ελαφριά τεμάχια παρασύρονται από την ροή του νερού.

Η συμπεριφορά των τεμαχίων σε κατάστρωμα ροής μεμβράνης νερού εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες

- Την κλίση του καταστρώματος
- Το πάχος της μεμβράνης υγρού
- Τη συχνότητα και το εύρος της παλμικής κίνησης
- Τον συντελεστή τριβής μεταξύ διαφόρων τεμαχιδίων και του καταστρώματος
- Το ειδικό βάρος των τεμαχιδίων
- Το σχήμα και τη μορφή των τεμαχιδίων
- Την ομαλότητα του καταστρώματος

Οι μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζει η στρωτή ροή μεμβράνης υγρού, δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες διαχωρισμού μεταλλευμάτων και στείρων σύμφωνα με το ειδικό τους βάρος. Αυτή η ιδιότητα προέρχεται από την διαφορά της ταχύτητας που έχει το υγρό μεταξύ του πυθμένα και της επιφάνειας της μεμβράνης που ρέει. Στον πυθμένα η ταχύτητα είναι μηδενική, ενώ κάτω από την επιφάνεια της μεμβράνης είναι μέγιστη. Επιπλέον, η ταχύτητα εξαρτάται και από το ιξώδες του υγρού. Το μετάλλευμα συγκεντρώνεται με την επίδραση της μεμβρανοειδούς ροής σε κεκλιμένο κατάστρωμα, από το επάνω μέρος προς τα κάτω, με την εξής κατανομή:

- α) βαριά μικρά τεμαχίδια
- β) βαριά μεγάλα και ελαφρά μικρά τεμαχίδια
- γ) ελαφρά μεγάλα τεμαχίδια

Το μέγιστο μέγεθος των τεμαχιδίων δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 4 mm. Πέρα από το μέγεθος των τεμαχιδίων, για την ιδανική λειτουργία της τράπεζας θα πρέπει να ρυθμιστούν επίσης:

- η κλίση του καταστρώματος,
- η παροχή του νερού,
- η σχέση μεταξύ επιτάχυνσης και χρόνου,



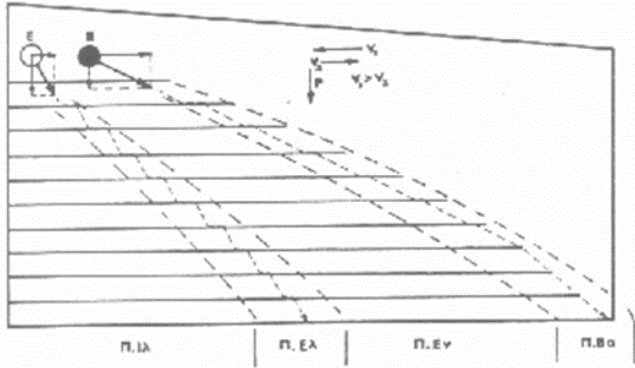
- ο συντελεστής τριβής μεταξύ τεμαχιδίων και καταστρώματος,
- οι ραβδώσεις

Γενικά, επιβάλλεται η αυστηρή ταξινόμηση της τροφοδοσίας σε κλάσματα. Όσο αυξάνει η διαφορά του ειδικού βάρους μεταλλεύματος και στείρου, τόσο αυξάνει και η δυναμικότητα της τράπεζας.

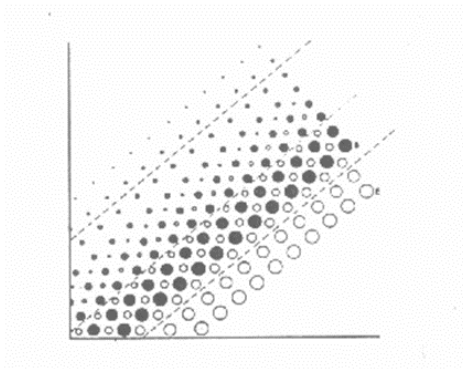
Η δυναμικότητα της τράπεζας, δηλαδή η υπό επεξεργασία ποσότητα τροφοδοσίας ανά ώρα εξαρτάται από :

- το μέγεθος των τεμαχίων,
- τη μέθοδο του διαχωρισμού (χονδροειδής ή καθαρός),
- τη διαφορά των ειδικών βαρών μεταξύ μεταλλεύματος και στείρου,
- τη σχετική αφθονία δεσμευμένων τεμαχίων,
- τη μέση τιμή του ειδικού βάρους του μεταλλεύματος

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 2 γειτονικών ραβδώσεων δημιουργεί συνθήκες παρεμποδιζόμενης καταβύθισης και μικρομερούς διείδυσης με αποτέλεσμα την αύξηση της εκλεκτικότητας του διαχωρισμού.



Εικόνα 4: Πορεία τεμαχίων στο κατάστρωμα της τράπεζας



Εικόνα 5: Ιδανική κατανομή τεμαχίων διαφορετικού ειδικού βάρους και μεγέθους στο κατάστρωμα τράπεζας (Richards)

## 5.4 Εφαρμογές τραπεζών

Σήμερα οι τράπεζες βρίσκουν εφαρμογή:

- Στον εμπλουτισμό ορισμένων σιδηρομεταλλευμάτων
- Στον εμπλουτισμό του λιθάνθρακα
- Στον προεμπλουτισμό μικτών θειούχων (ένα προϊόν), όταν η αποδέσμευση είναι σε χονδρομερή τεμάχια
- Στον εμπλουτισμό χαλαζιακής άμμου, χρωμίτη, πυρολουσίτη, βολφραμίτη κ.α.
- Στη συγκέντρωση χρυσού

- Στον εμπλουτισμό του κασσίτερου
- Στην παράλληλη επεξεργασία ανάκτησης χρυσού από επίπλευση ή κυάνωση
- Στον άμεσο έλεγχο εργοστασίων επίπλευσης (ελέγχει μέρος του απορρίμματος και μακροσκοπικά εκτιμάται η απώλεια)
- Στην απόληψη παραπροϊόντων σε μεταλλουργικές επεξεργασίες
- Ως μέσο εμπλουτισμού στη μεμβρανοειδή επίπλευση ή επίπλευση συσσωματωμάτων [22]

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 6.1 Εισαγωγή

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της δυνατότητας διαχωρισμού χαλκού από πλαστικό με παλλόμενη τράπεζα (Εικόνα 6). Κατά την πειραματική διαδικασία μελετήθηκε η επίδραση των εξής παραγόντων: παροχή νερού τροφοδοσίας, κλίση του καταστρώματος και συχνότητα παλμικής κίνησης καταστρώματος.



Εικόνα 6 : Παλλόμενη τράπεζα

## 6.2 Υλικά

Η προμήθεια των υλικών έγινε από την εταιρεία ανακύκλωσης «METAL SCRAP». Στη συγκεκριμένη εταιρεία, ο διαχωρισμός του χαλκού των ηλεκτρικών καλωδίων από το πλαστικό γίνεται με αεροδιαχωρισμό, αφού προηγουμένως τα καλώδια υποστούν κατάτμηση.

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δύο δείγματα με διαφορετική περιεκτικότητα σε χαλκό. Το πρώτο αποτελείται από πρωτογενώς τεμαχισμένα και αποσχισμένα καλώδια, τα οποία τροφοδοτούσαν το μηχάνημα του αεροδιαχωρισμού κατά την παραγωγική διαδικασία της εταιρείας. Το δεύτερο δείγμα ελήφθη από το απόρριμμα του αεροδιαχωρισμού. Το πρώτο δείγμα, όπως είναι προφανές, είναι πιο πλούσιο σε μέταλλο από το δεύτερο. Τα δυο δείγματα ελήφθησαν ταυτόχρονα από το προσωπικό της εταιρείας κατά τη λειτουργία των μηχανημάτων.

## 6.3 Δειγματοληψία

Στη συνέχεια, τα αρχικά δείγματα χωρίστηκαν σε μικρότερα εφαρμόζοντας δειγματοληψία με τη μέθοδο Jones. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο δειγματολήπτης λεπτομερών τεμαχιδίων τύπου Gilson του εργαστηρίου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές μέχρις ότου τα τελικά δείγματα για τις δοκιμές να έχουν το κατάλληλο βάρος

Για το κάθε υλικό το βάρος της τροφοδοσίας της παλλόμενης τράπεζας ήταν διαφορετικό, καθώς στο πιο φτωχό σε μέταλλο υλικό η ποσότητα της τροφοδοσίας έπρεπε να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη για να μπορέσει να δώσει μετρήσιμα αποτελέσματα. Έτσι, για το πλούσιο σε μέταλλο υλικό τα δείγματα ήταν των 260 γραμμαρίων περίπου, ενώ για το πιο φτωχό υλικό τα δείγματα ήταν περίπου 320 γραμμάρια το καθένα.



*Εικόνα 7: Δειγματολήπτης Jones*



*Εικόνα 8: Δειγματολήπτης Jones με το υλικό*

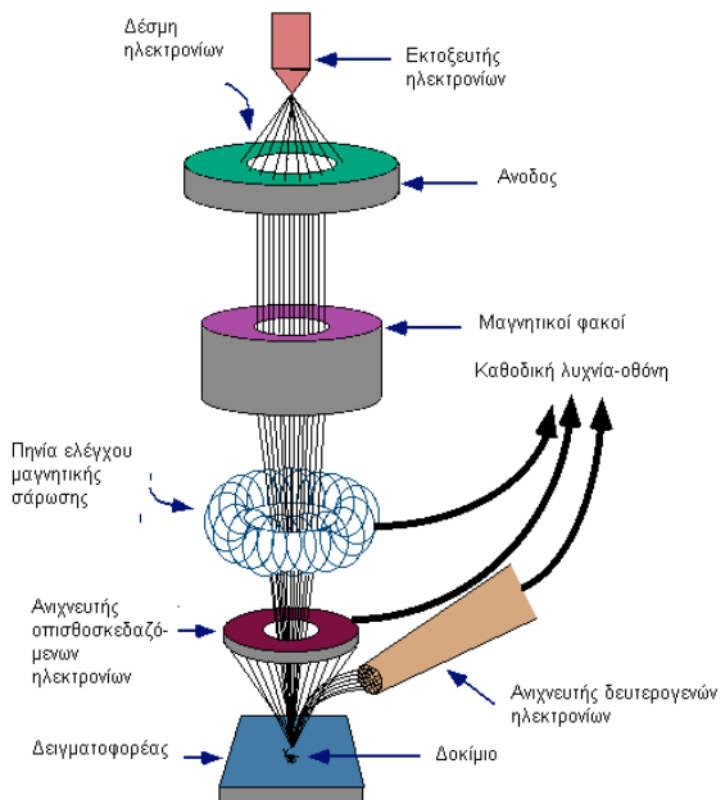
## 6.4 Ταυτοποίηση υλικών

Εξ αιτίας της διαφορετικής προέλευσης των καλωδίων από πλευράς εφαρμογών, κρίθηκε απαραίτητος ο χαρακτηρισμός του μείγματος πλαστικών και μετάλλου.

Η ταυτοποίηση των υλικών πραγματοποιήθηκε με περίθλαση ακτίνων-X (XRD) και με χρήση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM).

### 6.4.1 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) ανήκει στις μεθόδους χαρακτηρισμού των υλικών. Η δομή του φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης(SEM)

Η στήλη παραγωγής και εστίασης ηλεκτρονίων λειτουργεί υπό κενό. Η πηγή των ηλεκτρονίων δημιουργεί μία δέσμη πρωτογενών ηλεκτρονίων, η οποία διερχόμενη μέσω μιας σειράς

μαγνητικών φακών, επιταχύνεται, συγκεντρώνεται και εστιάζεται πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το υπό εξέταση δοκίμιο σαρώνεται από την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων, τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια του δοκιμίου ηλεκτρόνια συλλέγονται ενισχύονται έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα οπτικό σήμα σε μια οθόνη που σαρώνεται με την ίδια συχνότητα. Το είδος της εκπεμπόμενης από την επιφάνεια του δοκιμίου ακτινοβολίας, εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων του υλικού, και μπορεί να είναι:

- Ηλεκτρόνια Auger

Το φάσμα αυτών των ηλεκτρονίων είναι κατάλληλο για στοιχειομετρικές χημικές αναλύσεις της επιφάνειας του υλικού.

- Δευτερογενή ηλεκτρόνια

Η ένταση του σήματος από τη δέσμη των δευτερογενών ηλεκτρονίων αφορούν κυρίως στην τοπογραφία της επιφάνειας.

- Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια

Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, αφορούν στη χημική σύνθεση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της αναλυόμενης επιφάνειας.

- Ακτίνες-X

Η ανάλυση των εκπεμπομένων ακτίνων-X οδηγεί σε χημική ανάλυση της επιφάνειας (γνωστή και ως μικροανάλυση ακτίνων-X), η οποία γίνεται συνήθως παράλληλα με την παρατήρηση στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης.

Η χρησιμοποίηση του ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων παράγει μια μεγάλης ευκρίνειας τοπογραφική εικόνα του δείγματος. Αντίθετα ο ανιχνευτής των οπισθοσκεδαζομένων ηλεκτρονίων παράγει μια εικόνα που είναι χρήσιμη κατά τον καθορισμό της σύνθεσης του δείγματος. Σε αυτή κάθε στοιχείο στο δείγμα εμφανίζεται ως διαφορετική σκιά, από σχεδόν άσπρο έως μαύρο.

Στη βάση της στήλης παραγωγής και εστίασης της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι τοποθετημένοι ειδικοί ανιχνευτές που σκοπό έχουν να συλλέγουν τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια του



δοκιμίου ηλεκτρόνια. Ο χειριστής του μικροσκοπίου έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ποιόν ανιχνευτή θα χρησιμοποιήσει κάθε φορά.

Για την ανάλυση των δειγμάτων με SEM χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα Jeol 6380. Οι ανιχνευτές που διαθέτει το Jeol 6380 είναι ανιχνευτές δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI) και ανιχνευτής οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BSE). επίσης, είναι εξοπλισμένο με φασματοφωτόμετρο (SiLi), με τον οποίο ανιχνεύουμε ενεργειακή διασπορά ακτίνων - X (Energy Dispersive Spectrometer, EDS), διαμέσου ανιχνευτή διόδου λιθίου – πυριτίου.

Τα δείγματα εγκιβωτίστηκαν, λειάνθηκαν, στιλβώθηκαν και προσβλήθηκαν χημικά ώστε να είναι έτοιμα για την ανάλυση στο SEM. Αντίστοιχη διαδικασία, χωρίς το τελικό στάδιο της χημικής προσβολής, πραγματοποιήθηκε και για την ανάλυση στο XRD. [23]

#### **6.4.2 Περίθλαση Ακτίνων-X**

Το XRD χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό:

- της κρυσταλλικής δομής αγνώστου υλικού και ταυτοποίηση φάσεων
- της ενδοπλεγματικής απόστασης  $d$
- του προσανατολισμού ενός κρυστάλλου
- μεγέθους κόκκων
- εσωτερικών τάσεων περιοχών κρυστάλλων.

Όπως είναι προφανές, η ανάλυση με XRD χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του αγνώστου υλικού, ακολουθώντας τα παρακάτω στάδια:

A. Λήψη διαγράμματος ακτίνων-X.

B. Μέτρηση των γωνιών όπου εμφανίστηκαν μέγιστα και, με την βοήθεια της εξίσωσης Bragg ( $2d(\sin\theta)=\lambda_0$ ), υπολογισμός των τιμών  $d$  των επιπέδων από τα οποία προήλθαν τα αντίστοιχα μέγιστα.

Γ. Σύγκριση των τιμών  $d$  που βρέθηκαν από τους υπολογισμούς με γνωστά δεδομένα, τα οποία είναι αποθηκευμένα σε τράπεζες δεδομένων (JCPDS file) και ταυτοποίηση του υλικού.

Στο συγκεκριμένο μηχάνημα XRD χρησιμοποιείται λάμπα χαλκού με  $\lambda=1,5406\text{\AA}$ . [24]

## 6.5 Ρύθμιση παραγόντων μελέτης

Όπως αναφέρθηκε και στη θεωρία (Κεφάλαιο 5), οι παράγοντες που μπορούν να μεταβληθούν γενικά στις παλλόμενες τράπεζες είναι :

- η κλίση του καταστρώματος,
- η παροχή του νερού,
- η σχέση μεταξύ επιτάχυνσης και χρόνου,
- ο συντελεστής τριβής μεταξύ τεμαχιδίων και καταστρώματος,
- οι ραβδώσεις

Στην παλλόμενη τράπεζα τύπου Denver-Wilfley του εργαστηρίου Εμπλουτισμού οι παράγοντες που μπορούσαν να ρυθμιστούν είναι:

1. Η παροχή του νερού της τροφοδοσίας
2. Η κλίση του καταστρώματος
3. Η συχνότητα της παλμικής κίνησης

Ταυτόχρονα, οι παρακάτω παράμετροι θεωρήθηκαν σταθερές καθ' όλη την πειραματική διαδικασία:

- Η παροχή νερού έκπλυσης του καταστρώματος
- Η τροφοδοσία
- Οι ραβδώσεις

Κατά την πειραματική διαδικασία, κάθε φορά μεταβαλλόταν ένας μόνο παράγοντας σε τρία διαφορετικά επίπεδα τιμών. Τα πειράματα αυτά χωρίστηκαν σε κύκλους -κάθε παράγοντας ανήκει σε ένα κύκλο- για διευκόλυνση της παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Για τον κάθε παράγοντα που μεταβαλλόταν σε ένα κύκλο, οι άλλοι δύο έμεναν σταθεροί. Η βέλτιστη τιμή του μεταβλητού παράγοντα σε ένα κύκλο πειραμάτων παρέμενε σταθερή στον επόμενο κύκλο. Με την

ολοκλήρωση των τριών κύκλων, προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές για τον διαχωρισμό του πλαστικού από το μέταλλο. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα δύο δείγματα (πλούσιο, πτωχό).

Κατά την πειραματική διαδικασία τα επίπεδα τιμών των παραγόντων που εξετάστηκαν είναι:

- Κλίση καταστρώματος (μοίρες)

6°

8°

10°

- Παροχή νερού τροφοδοσίας (l/min)

1

1.5

2

- Συχνότητα παλμικής κίνησης (παλινδρομήσεις/min)

Μικρή (280 - 300)

Μεσαία (340 - 360)

Μεγάλη (400 - 420)

Οι παραπάνω τιμές επιλέχθηκαν μετά από προκαταρκτικά πειράματα.

Για να μετρηθεί η κλίση του καταστρώματος χρησιμοποιήθηκε κλισίμετρο -πυξίδα από το εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας.



Εικόνα 10: Κλισίμετρο στην τράπεζα

Η παροχή νερού της τροφοδοσίας μετρήθηκε με τη χρήση χρονομέτρου. Κάθε κύκλος της κόκκινης βελόνας αντιστοιχεί σε ένα λίτρο, οπότε με τη βοήθεια του χρονομέτρου μετρήθηκε σε πόσο χρόνο έπεφτε 1 λίτρο.

## 6.6 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

### 6.6.1 Ανακύκλωση απορρίμματος πρώτου διαχωρισμού

Από παρατήρηση των προϊόντων στο μικροσκόπιο, διαπιστώθηκε ότι ο διαχωρισμός σε ένα στάδιο δεν ήταν εφικτός. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητη η ανακύκλωση του ενδιάμεσου προϊόντος και του απορρίμματος του πρώτου διαχωρισμού.

### 6.6.2 Συλλογή προϊόντων

Στο αντίστοιχο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα του πρώτου και του καθαριστικού διαχωρισμού. Στο τέλος κάθε πειράματος, υπήρχαν κατά κύριο λόγο τρία προϊόντα: το συμπύκνωμα που περιείχε το μέταλλο, το ενδιάμεσο προϊόν και το απόρριμμα που περιείχε το πλαστικό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, υπήρχε διαβάθμιση της περιεκτικότητας του ενδιάμεσου προϊόντος σε χαλκό στους αντίστοιχους υποδοχείς ενώ σε κάποιες περιπτώσεις υπήρξε απουσία του ενδιάμεσου προϊόντος.

Η συγκέντρωση των διαφόρων προϊόντων ήταν η ακόλουθη: (α) το συμπύκνωμα συγκεντρωνόταν στους υποδοχείς προϊόντων που βρίσκονται στο αριστερό μέρος της τράπεζας (Εικόνα 11α) και στο κατάστρωμα της παλλόμενης τράπεζας (Εικόνα 11β), (β) το ενδιάμεσο προϊόν συγκεντρωνόταν στους υποδοχείς που βρίσκονται στο μέσο του καταστρώματος ενώ (γ) το

απόρριμμα στους υποδοχείς του δεξιού τμήματος της τράπεζας, πλην όμως, εξ αιτίας μεγάλου όγκου νερού και της μικρής πυκνότητας του πλαστικού, για τη συλλογή του απορρίμματος χρησιμοποιήθηκαν μεγάλοι κουβάδες που είχαν τοποθετηθεί κάτω από τους αντίστοιχους υποδοχείς τους (Εικόνα 11γ).



Εικόνα 11: (α) Συγκέντρωση συμπυκνώματος

Εικόνα 11: (β) Συμπύκνωμα στο κατάστρωμα



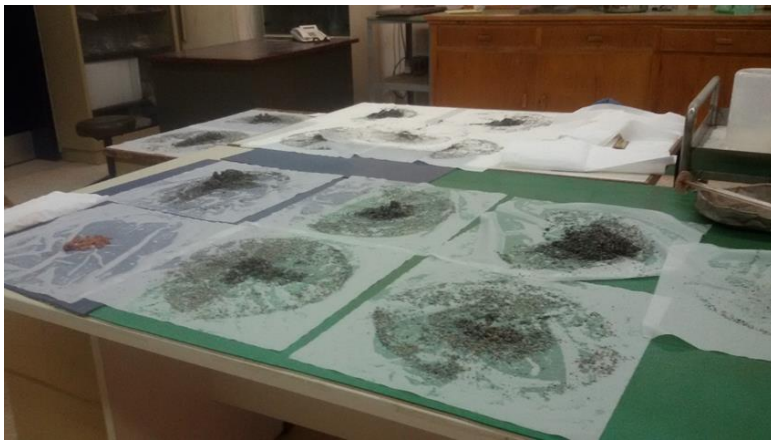
Εικόνα 11: (γ) Συγκέντρωση απορρίμματος

### 6.6.3 Διήθηση – Ξήρανση - Ζύγιση

Ακολουθούσε διαχωρισμός των αντίστοιχων προϊόντων από το νερό με διήθηση σε φίλτρα (Εικόνα 12), ξήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Εικόνα 13) και ζύγιση (Εικόνα 14).



*Εικόνα 12: Διήθηση*



*Εικόνα 13: Διηθητικά χαρτιά*



*Εικόνα 14: Ζυγαριά*

Όπως είναι φυσικό, υπήρχαν κάποιες μικρές απώλειες υλικού από την αρχική τροφοδοσία. Αυτές οφείλονταν:

- Σε υλικό το οποίο κολλούσε στα κουτιά και δεν μπορούσε να μεταφερθεί
- Σε υλικό το οποίο κολλούσε κατά τη μεταφορά στα δοχεία και στους κουβάδες
- Σε υλικό το οποίο κολλούσε ή χυνόταν από το διηθητικό χαρτί
- Σε υλικό το οποίο δεν έπεφτε στα κουτιά των προϊόντων
- Σε υλικό το οποίο κολλούσε στο κουτί της τροφοδοσίας



*Εικόνα 15: Συμπύκνωμα - Απόρριμμα*

#### **6.6.4 Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε μέταλλο των προϊόντων**

Το επόμενο στάδιο ήταν ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε μέταλλο του κάθε προϊόντος. Για το στάδιο αυτό χρησιμοποιήθηκε ξανά ο εργαστηριακός δειγματολήπτης, ώστε να ληφθεί αντιπροσωπευτικό δείγμα από κάθε υλικό. Από αυτό το δείγμα απομακρυνόταν το πλαστικό ή το μέταλλο αντίστοιχα (όποιο ήταν σε μικρότερη περιεκτικότητα) με μία λαβίδα και ζυγίζόταν σε ζυγαριά ακριβείας 4 δεκαδικών ψηφίων (Εικόνα 16). Το βάρος του πλαστικού ή του μετάλλου προς το συνολικό βάρος του αντιπροσωπευτικού δείγματος δίνει την περιεκτικότητα σε αυτό το συστατικό. Έτσι, είτε απευθείας είτε αφαιρώντας το ποσοστό από το 100%, βρίσκουμε την περιεκτικότητα του προϊόντος σε μέταλλο.



*Εικόνα 16: Ζυγαριά ακριβείας*

#### **6.7 Εξισώσεις που συνδέουν τα προϊόντα και την τροφοδοσία μεταξύ τους**

Η τροφοδοσία και τα προϊόντα του διαχωρισμού συνδέονται μεταξύ τους με απλές εξισώσεις. Εάν:

- F: Βάρος τροφοδοσίας
- C: Βάρος συμπυκνώματος
- T: Βάρος απορρίμματος
- M: Βάρος ενδιάμεσων



και

- f: % περιεκτικότητα της τροφοδοσίας σε μέταλλο (Cu)
- c: % περιεκτικότητα του συμπυκνώματος σε μέταλλο (Cu)
- t: % περιεκτικότητα της του απορρίμματος σε μέταλλο (Cu)
- m: % περιεκτικότητα του ενδιάμεσου προϊόντος σε μέταλλο (Cu)

Τότε ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$F=C+M+T \quad (1)$$

$$F*f=C*c+ M*m +T*t \quad (2)$$

Με τον όρο ανάκτηση % (R %) σε μέταλλο (χαλκό) ονομάζουμε το ποσοστό του μετάλλου (χαλκού), το οποίο λήφθηκε στο συμπύκνωμα, από το περιεχόμενο στην τροφοδοσία. Το υπόλοιπο, το οποίο περιέχεται στο απόρριμμα, αποτελεί την απώλεια σε μέταλλο (χαλκό).

Με βάση τον παραπάνω ορισμό ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$R\%= 100* [(C*c)/ (F*f)] \quad (3)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

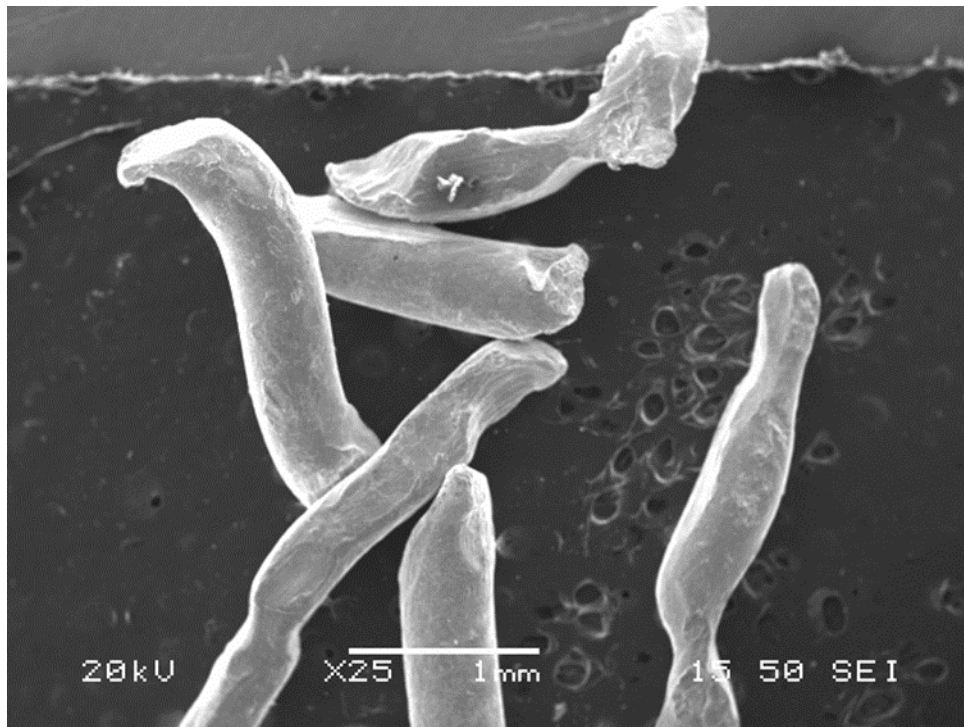
### 7.1 Αποτελέσματα Ανάλυσης στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)

Στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης αναλύθηκαν 3 δείγματα (δύο δείγματα μετάλλου και ένα πλαστικού). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν μαζί με τις αντίστοιχες αναλύσεις του Στοιχειομετρικού Αναλυτή (EDS).

#### 7.1.1 Μέταλλο

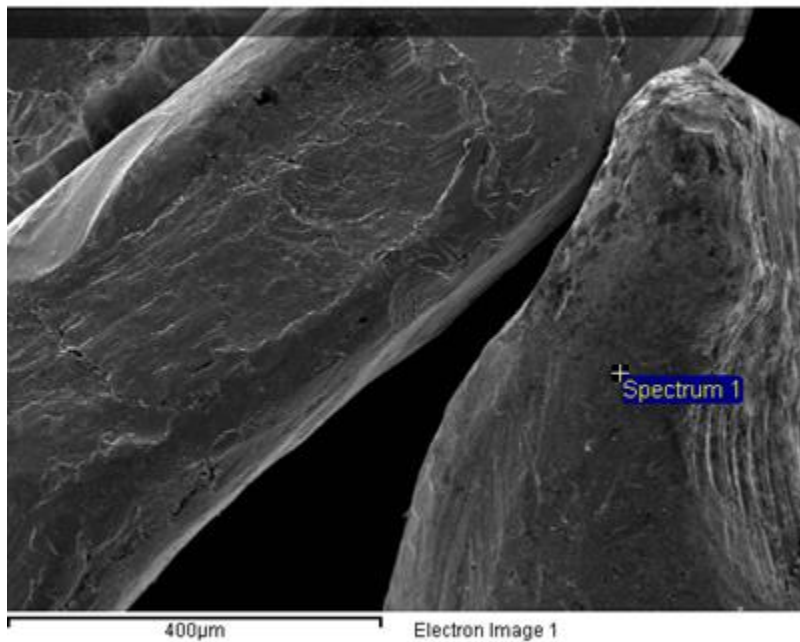
##### Α' δείγμα

Από το συγκεκριμένο δείγμα έγινε ανάλυση σε διάφορα τμήματα του υλικού, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 17: Δείγμα μετάλλου στο SEM

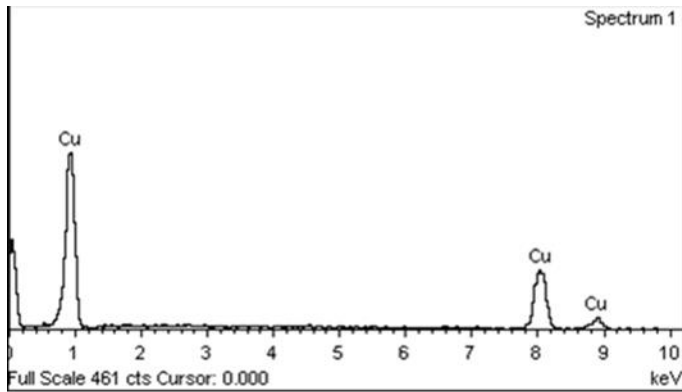
Στην Εικόνα 17 παρατηρούνται σε μεγέθυνση οι ίνες του μετάλλου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση EDS σε τμήμα της προηγούμενης εικόνας υπό μεγέθυνση (Εικόνα 18). Από το φάσμα που ελήφθη (Εικόνα 19, Πίνακας 1) προκύπτει ότι πρόκειται για τεμάχια καθαρού χαλκού.



Εικόνα 18: Σημείο χημικής ανάλυσης

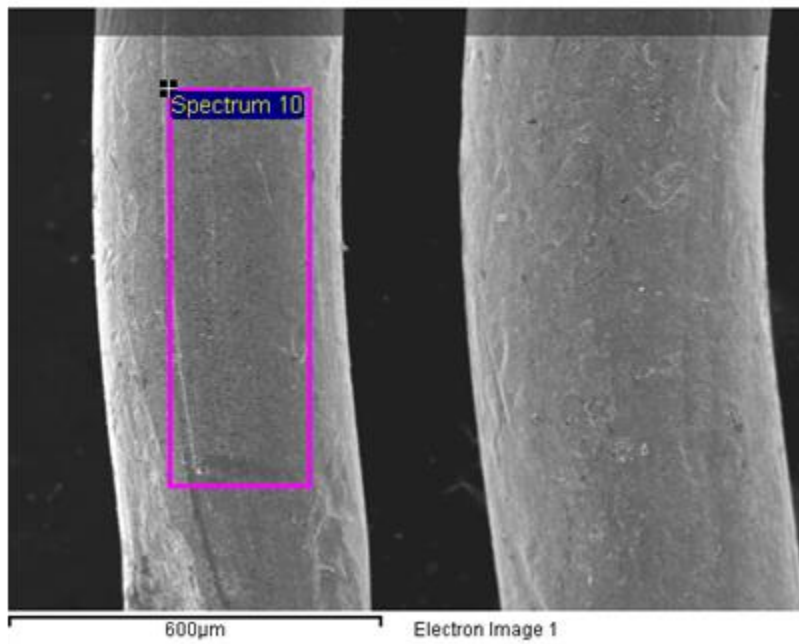
Πίνακας 1: Ίνες χαλκού

Element	Weight%	Atomic%
Cu K	100.00	100.00
Totals	100.00	



Εικόνα 19: Φάσμα ανάλυσης EDS κόκκου χαλκού

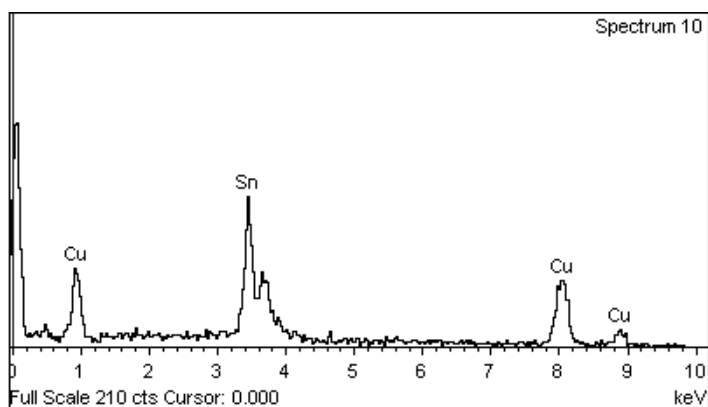
Στην ίνα της Εικόνας 20 το φάσμα που προέκυψε από την ανάλυση EDS (Εικόνα 21, Πίνακας 2) μας δείχνει πως πρόκειται για κράμα χαλκού-κασσιτέρου.



Εικόνα 20: Ίνα μετάλλου

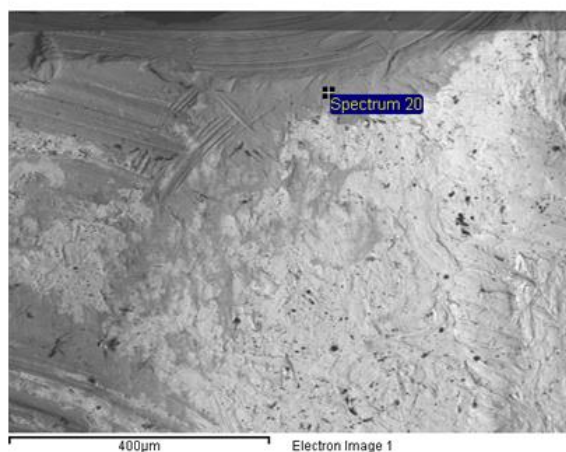
Πίνακας 2: Σημειακή ανάλυση κράματος Cu-Sn

Element	Weight%	Atomic%
Cu K	46.11	61.52
Sn L	53.89	38.48
Totals	100.00	



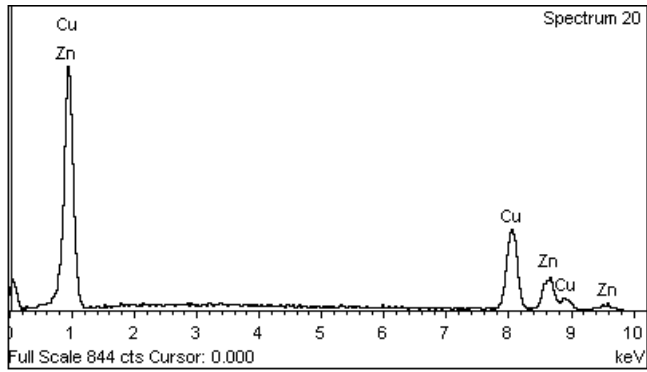
Εικόνα 21: Φάσμα ανάλυσης EDS Cu-Sn

Σε μία τρίτη περιοχή του Α΄ δείγματος που μελετήθηκε με το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Εικόνα 22) παρατηρείται παρουσία κράματος χαλκού-ψευδαργύρου (Εικόνα 23, Πίνακας 3).



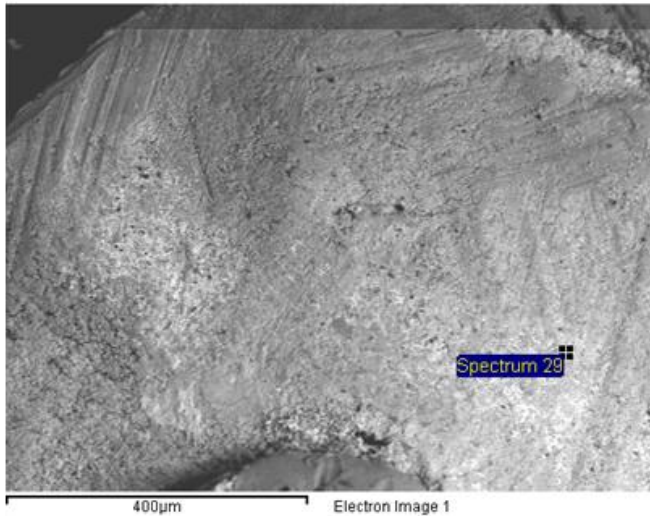
Εικόνα 22: Κόκκος μέταλλου

Πίνακας 3: Στοιχειακή ανάλυση Cu-Zn



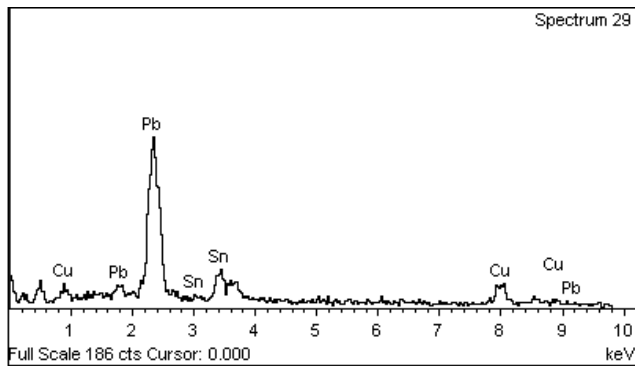
Εικόνα 23: Φάσμα ανάλυσης EDS Cu-Zn

Element	Weight%	Atomic%
Cu K	66.57	67.20
Zn K	33.43	32.80
Totals	100.00	



Εικόνα 24: Σημείο στοιχειακής ανάλυσης

Πίνακας 4: Στοιχειακή ανάλυση Sn-Pb



Εικόνα 25: Φάσμα ανάλυσης EDS Sn-Pb

Element	Weight %	Atomic %
Cu K	15.32	33.21
Sn L	21.22	24.62
Pb M	63.46	42.17
Totals	100.00	

Σε αυτό το σημείο (Εικόνα 24) παρατηρείται κράμα κασσιτέρου- μολύβδου (Sn-Pb). Στο φάσμα της Εικόνας 25 και στον Πίνακα 4 φαίνονται οι κορυφές και η ανάλυση που έδωσε το EDS.

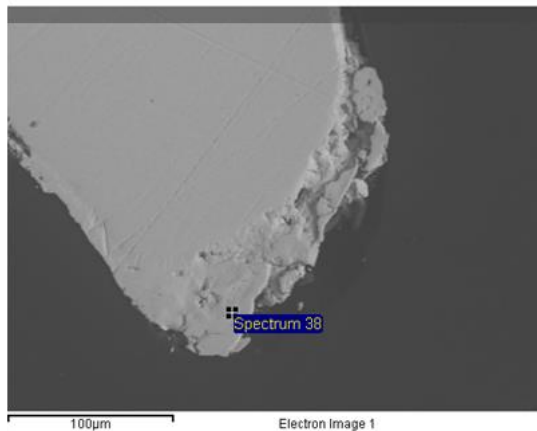
Στους περισσότερους κόκκους που είχαν ινώδες σχήμα η ανάλυση του EDS έδωσε σε ποσοστό μεγαλύτερο του 99% χαλκό. Επίσης, παρατηρήθηκαν κρύματα CuSn αλλά και SnPb, τα οποία προέρχονται από συγκόλληση (καλάι), ενώ ανιχνεύτηκε και ορείχαλκος (CuZn).

Από τις παραπάνω αναλύσεις προκύπτει ότι το μέταλλο του υλικού χαρακτηρίζεται ως **χαλκός**.

### **Β' Δείγμα**

Το δεύτερο δείγμα του μετάλλου είναι μια τομή του πρώτου δείγματος. Ενδεικτικά παρουσιάζεται τμήμα μετάλλου (Εικόνα 26), όπου στην ανάλυση EDS και το φάσμα (Πίνακας 5, Εικόνα 27) φαίνονται κορυφές μόνο Cu.

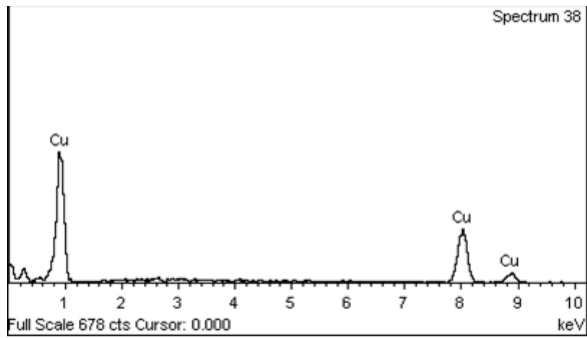
Πίνακας 5: Στοιχειακή ανάλυση 100% Cu



Element	Weight %	Atomic %
Cu K	100.00	100.00
Totals	100.00	

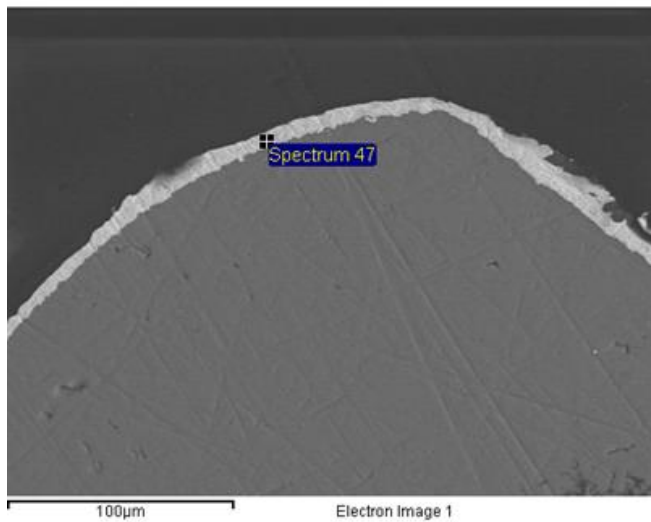
Εικόνα 26: Σημείο στοιχειακής ανάλυσης





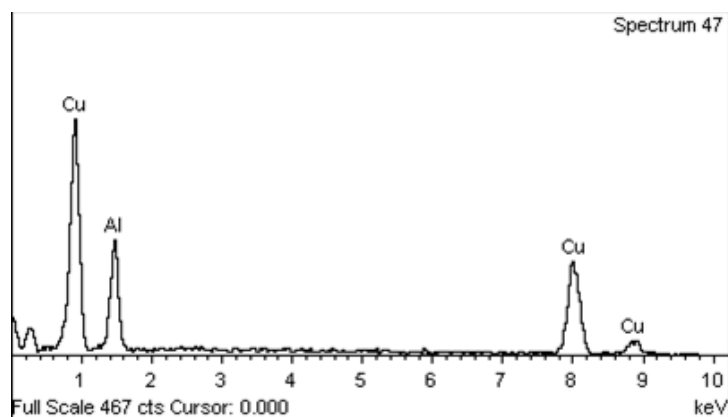
Εικόνα 27: Φάσμα ανάλυσης EDS χαλκού

Ακόμη, σε κάποια τμήματα (Εικόνα 28) παρατηρήθηκε παρουσία αλουμινίου στα κράματα χαλκού:



Εικόνα 28: Σημείο στοιχειακής ανάλυσης

Πίνακας 6: Στοιχειακή ανάλυση Cu-Al



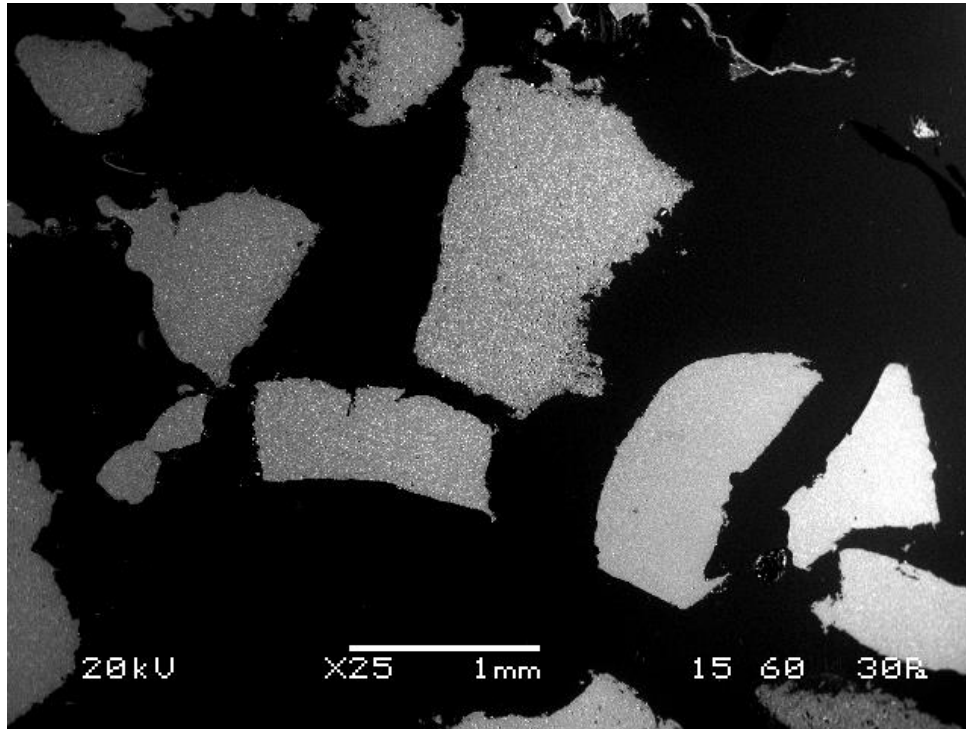
Εικόνα 29: Φάσμα ανάλυσης EDS Cu-Al

Element	Weight %	Atomic %
Al K	26.77	46.26
Cu K	73.23	53.74
Totals	100.00	

Στην ανάλυση του EDS (Πίνακας 6) φαίνεται η σύσταση του κράματος.

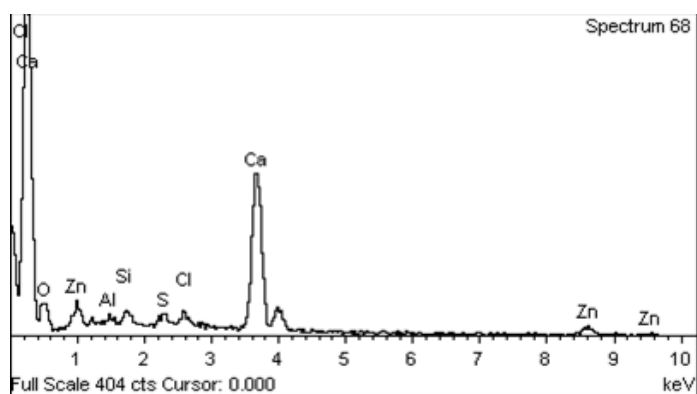
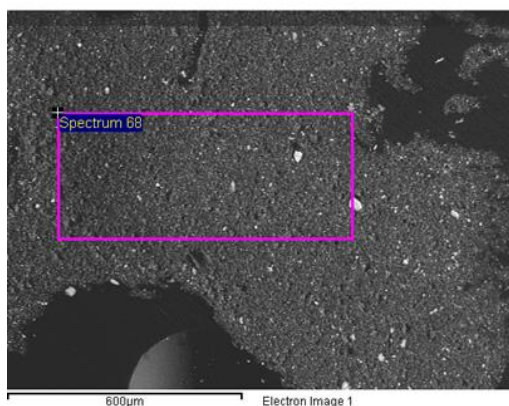
Τα αποτελέσματα από την ανάλυση του δεύτερου δείγματος μετάλλου συμφωνούν με την πρώτη.

### 7.1.2 Δείγμα πλαστικού



*Εικόνα 30: Κομμάτια πλαστικού*

Στην Εικόνα 30 από το SEM σε μεγέθυνση φαίνονται τα κομμάτια του πλαστικού σε διάφορα μεγέθη και σχήματα.



Εικόνα 31: Περιοχή και φάσμα στοιχειακής ανάλυσης

Πίνακας 7: Στοιχειακή ανάλυση πλαστικού

Element	Weight %	Atomic %
O K	53.88	74.95
Al K	1.07	0.89
Si K	1.44	1.14
S K	1.73	1.20
Cl K	1.90	1.19
Ca K	32.70	18.16
Zn K	7.27	2.48
Totals	100.00	

Αντίστοιχα φάσματα με της Εικόνας 31 προκύπτουν από ανάλυση σε πολλούς κόκκους πλαστικού των οποίων η ανάλυση EDS έμοιαζε με την ανάλυση του Πίνακα 7.

Συνοπτικά, από τις αναλύσεις των κόκκων του πλαστικού προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα :

Το πλαστικό αποτελείται πάνω από 95% από PVC.

Ανιχνεύτηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- Πλαστικό χωρίς πληρωτικό μέσο (filler) (μικρό ποσοστό του δείγματος)
- Πλαστικό με filler  $\text{CaCO}_3$  (κυρίως μάζα του δείγματος)
- Πλαστικό με filler που αποτελείται από  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  και  $\text{MgO}$  (μικρό ποσοστό του δείγματος)
- Πλαστικό με filler  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (πολύ μικρό ποσοστό του δείγματος).

Επίσης, θα πρέπει να επισημανθεί η μικρή παρουσία μεταλλικού Al στο πλαστικό, το οποίο δεν διαχωρίστηκε.

Τα διάφορα πληρωτικά υλικά εντός του μακρομοριακού συστήματος του πλαστικού, διαφοροποιούν το ειδικό βάρος, όπως παρατηρήθηκε από τις παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια των πειραμάτων

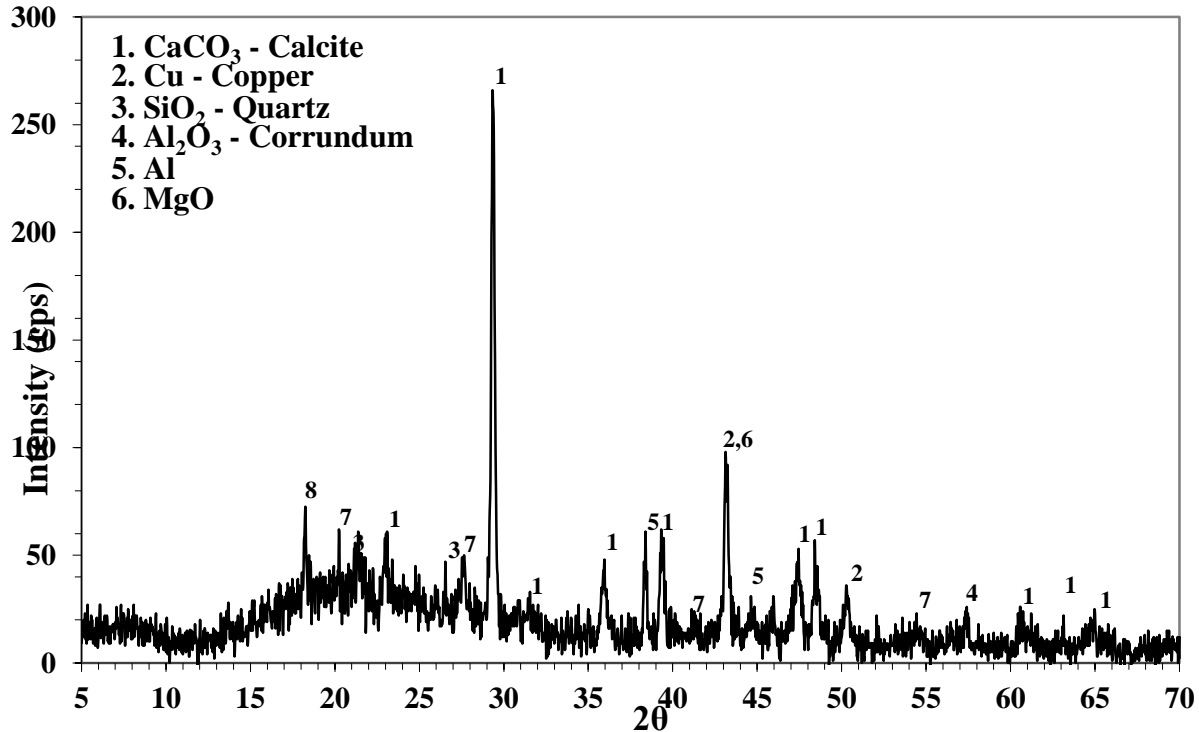
## **7.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης XRD**

Για την παρασκευή του δείγματος για την ανάλυση με το XRD ένα δείγμα πλαστικού λειοτριβήθηκε στο δονητικό λειοτριβέα πεπιεσμένου αέρα του εργαστηρίου και δόθηκε για προετοιμασία και ανάλυση.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε περιθλασίμετρο ακτίνων-X επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης αναφορικά με τα πληρωτικά υλικά καθώς και για το μεταλλικό αλουμίνιο, το οποίο δεν διαχωρίστηκε.

Η κορυφή χαλκού που εμφανίζεται (Εικόνα 32), πιθανότατα οφείλεται σε κάποιο κόκκο μετάλλου που βρέθηκε στη σκόνη του δοκιμίου.

Παρακάτω φαίνεται το φάσμα και οι κορυφές που αντιστοιχούν στην κάθε φάση:



Εικόνα 32: Ακτινοδιάγραμμα XRD

### 7.3 Προσδιορισμός των ειδικών βαρών των υλικών

Ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους του χαλκού και του πλαστικού έγινε σε καθαρά δείγματα των παραπάνω υλικών, έπειτα από προσεκτική διαλογή καθαρών κόκκων από το κάθε υλικό. Στη συνέχεια, για να προσδιοριστεί το ειδικό βάρος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ληκύθου. Με βάση τα αποτελέσματα, το ειδικό βάρος του χαλκού προσδιορίστηκε σε 8.92.

Για το πλαστικό χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος πλην όμως οι κόκκοι του πλαστικού δεν είχαν όλοι την ίδια συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι κάποιοι κόκκοι επέπλεαν ενώ άλλοι βυθιζόντουσαν στο νερό. Προφανώς, τα τεμαχίδια πλαστικού που επιπλέουν έχουν πυκνότητα μικρότερη της μονάδας.

Για να προσδιοριστεί κατά προσέγγιση το ειδικό βάρος του πλαστικού που βυθίζεται χρησιμοποιήθηκε βαρύ υγρό πυκνότητας  $1,7 \text{ g/cm}^3$ , στο οποίο επέπλευσαν σχεδόν όλα τα τεμαχίδια του πλαστικού. Οι κόκκοι πλαστικού που βυθίστηκαν σε αυτό το βαρύ υγρό επέπλευσαν στη συνέχεια σε βαρύ υγρό με πυκνότητα  $2,6 \text{ g/cm}^3$ . Μικροσκοπικές παρατηρήσεις για το πλαστικό με ειδικό βάρος μεταξύ 1,7 και 2,6 έδειξαν ότι αποτελείται από μη αποδεσμευμένους κόκκους, όπου συνυπάρχει το πλαστικό και ο χαλκός.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι το ειδικό βάρος των κόκκων του πλαστικού, αποδεσμευμένοι ή μη, διαφέρει σημαντικά από αυτό του χαλκού. Συνεπώς, τα δυο αυτά υλικά έχουν τη δυνατότητα να διαχωριστούν με τη μέθοδο της παλλόμενης τράπεζας.

## **7.4 Παλλόμενη Τράπεζα**

### **7.4.1 ΠΛΟΥΣΙΟ ΥΛΙΚΟ ( Περιεκτικότητα 35-45% σε Cu)**

#### **7.4.1.1 Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος**

Στον πρώτο κύκλο πειραμάτων για το πλούσιο υλικό, ο παράγοντας που μεταβλήθηκε είναι η κλίση του καταστρώματος, ενώ οι άλλοι δύο παράγοντες διατηρήθηκαν σταθεροί στα παρακάτω επίπεδα:

Συχνότητα παλμικής κίνησης: ΜΕΣΑΙΑ

Παροχή νερού τροφοδοσίας: 1,5 l/min

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στους Πίνακες 8-10.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 6° (πλούσιο υλικό)

Κλίση (μοίρες)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
6	Συμπύκνωμα	33,18	98,82	89,89
	Ενδιάμεσο	7,41	32,36	6,57
	Απόρριμμα	59,41	2,17	3,54
	Τροφοδοσία	100,00	36,48	100,00

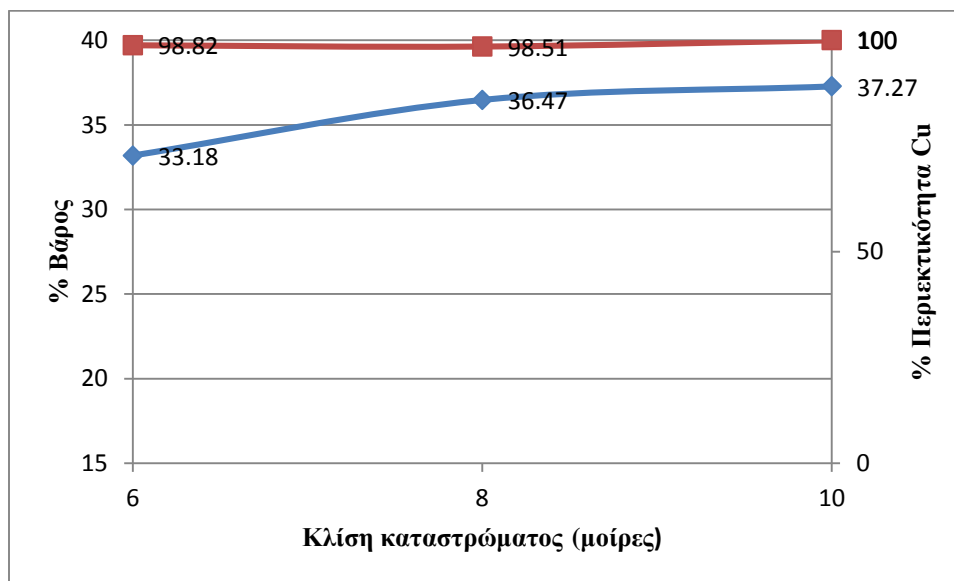
Πίνακας 9: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 8° (πλούσιο υλικό)

Κλίση (μοίρες)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
8	Συμπύκνωμα	36,47	98,51	88,00
	Ενδιάμεσο	5,84	68,67	9,82
	Απόρριμμα	57,69	1,54	2,18
	Τροφοδοσία	100,00	40,825	100,00

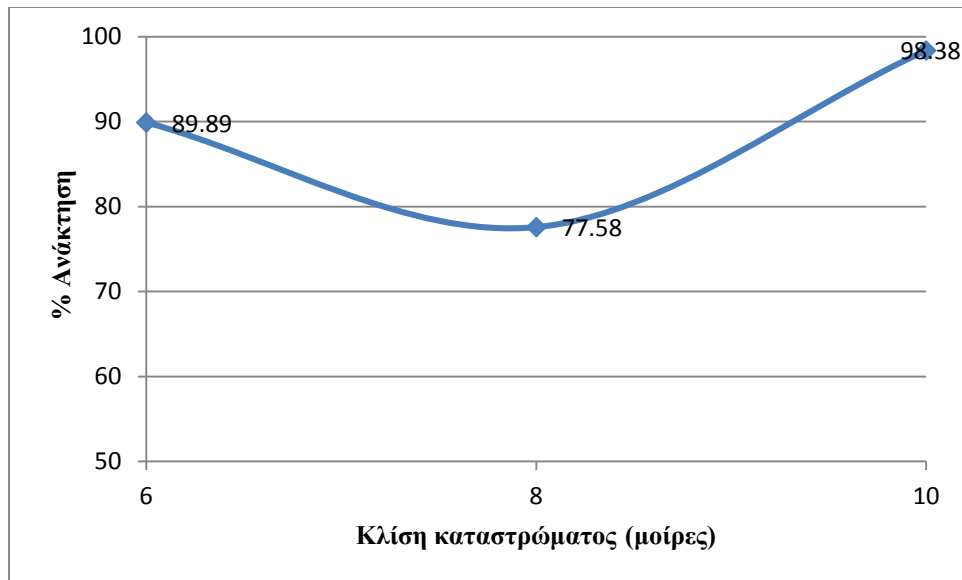


Πίνακας 10: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 10° (πλούσιο υλικό)

Κλίση (μοίρες)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
10	Συμπύκνωμα	37,27	100,00	98,38
	Ενδιάμεσο	1,33	16,49	0,58
	Απόρριμμα	61,4	0,64	1,04
	Τροφοδοσία	100,00	37,87	100,00



Εικόνα 33: Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία



Εικόνα 34: Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος στην ανάκτηση χαλκού για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 8-10 και τα διαγράμματα των Εικόνων 33-34, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Γενικά, σε όλες τις δοκιμές η περιεκτικότητα του συμπυκνώματος (βαρύ προϊόν) έχει πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό, μεγαλύτερη από 98,5%, ενώ για κλίση 10° λαμβάνεται καθαρό συμπύκνωμα. Αντίστοιχα για το απόρριμμα, η περιεκτικότητά του σε χαλκό είναι χαμηλή σε όλες τις περιπτώσεις (μικρότερη από 2,17%) ενώ παρατηρείται μια διαρκής μείωση με την αύξηση της κλίσης.
- Αναφορικά με το βάρος του συμπυκνώματος, παρατηρείται μικρή αύξηση καθώς αυξάνεται η κλίση του καταστρώματος.
- Η ανάκτηση χαλκού στο συμπύκνωμα γενικά είναι πολύ υψηλή, μεγαλύτερη από 88%, με την καλύτερη τιμή να παρατηρείται για κλίση 10°, εξ αιτίας της μέγιστης καθαρότητας του συμπυκνώματος και του αυξημένου βάρους σε σχέση με τις μικρότερες κλίσεις της τράπεζας.

Συμπερασματικά από όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι τα η βέλτιστη κλίση είναι 10°.

#### 7.4.1.2 Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας

Στο δεύτερο κύκλο πειραμάτων για το πλούσιο υλικό ο παράγοντας που μεταβλήθηκε είναι η παροχή νερού τροφοδοσίας ενώ οι δύο παράγοντες που κρατιούνται σταθεροί παίρνουν τις τιμές:

Κλίση καταστρώματος: 10°

Ένταση παλμικής κίνησης: ΜΕΣΑΙΑ

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στους Πίνακες 11-13:

Πίνακας 11: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 1l/min (πλούσιο υλικό)

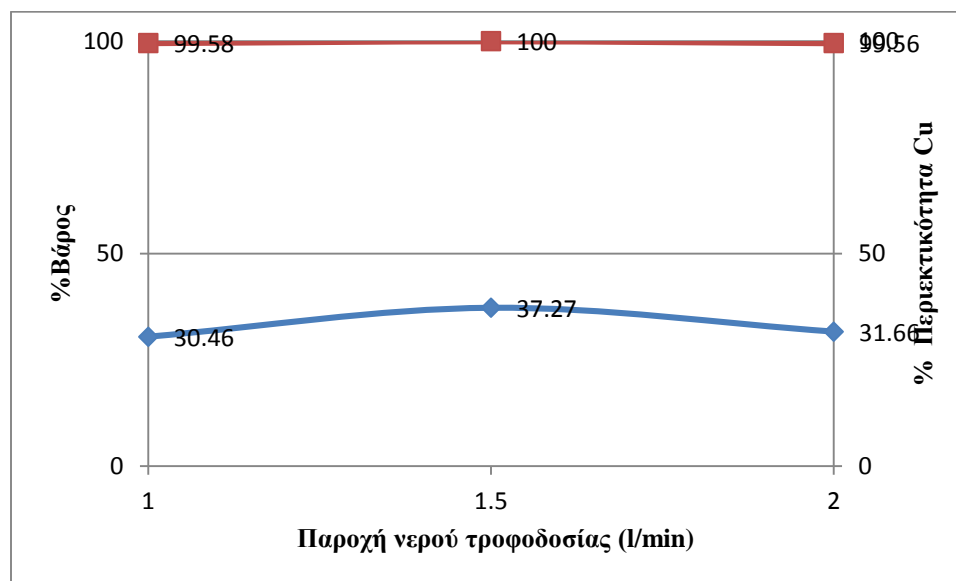
Παροχή ( l/min)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
1	Συμπύκνωμα	30,46	99,58	72,19
	Ενδιάμεσο	13,79	62,77	20,6
	Απόρριμμα	55,75	5,43	7,21
	Τροφοδοσία	100,00	42,01	100,00

Πίνακας 12: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 1,5 l/min (πλούσιο υλικό)

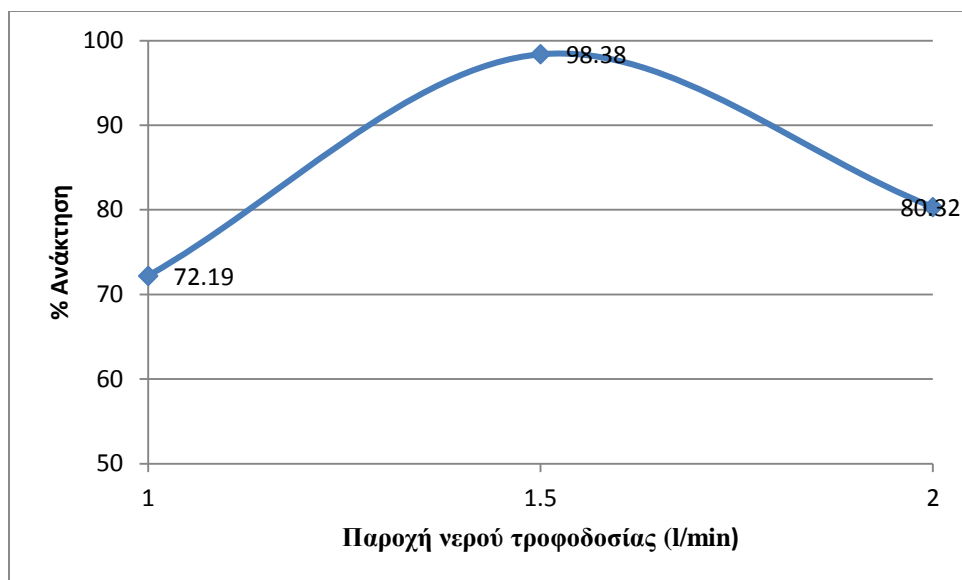
Παροχή (l/min)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
1,5	Συμπύκνωμα	37,27	100,00	98,38
	Ενδιάμεσο	1,33	16,49	0,58
	Απόρριμμα	61,4	0,64	1,04
	Τροφοδοσία	100,00	37,87	100,00

Πίνακας 13: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 2l/min (πλούσιο υλικό)

Παροχή ( l/min)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
2	Συμπύκνωμα	31,66	99,56	80,32
	Ενδιάμεσο	0	0	0
	Απόρριμμα	68,33	11,3	19,68
	Τροφοδοσία	100,00	39,24	100,00



Εικόνα 35: Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία



Εικόνα 36: Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας στην ανάκτηση χαλκού για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 11-13 και τα διαγράμματα των Εικόνων 35-36, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα συμπύκνωμα για παροχή νερού 1 l/min και 2 l/min αντίστοιχα έχει περίπου το ίδιο βάρος και ίδια περιεκτικότητα σε χαλκό. Αντίθετα, για παροχή νερού 1,5 l/min το βάρος του είναι μεγαλύτερο. Η περιεκτικότητα και στα τρία πειράματα είναι πολύ μεγάλη (>99,5%) με τη μέγιστη τιμή (100%) για παροχή νερού τροφοδοσίας 1,5 l/min.
- Αντίστοιχα, η περιεκτικότητα του απορρίμματος σε χαλκό είναι πολύ μικρή για παροχή νερού 1,5 l/min (μόλις 0,64% σε χαλκό) ενώ για τις άλλες τιμές είναι αρκετά υψηλότερη.
- Επίσης, για παροχή νερού 1,5 l/min η ανάκτηση χαλκού στο συμπύκνωμα είναι 98,4%. Η τιμή αυτή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη των υπολοίπων.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή για την παροχή νερού είναι 1,5 l/min.

#### 7.4.1.3 Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης

Στο τρίτο κύκλο πειραμάτων για το πλούσιο υλικό ο παράγοντας που μεταβλήθηκε είναι η συχνότητα της παλμικής κίνησης, ενώ οι άλλοι δύο παράγοντες διατηρήθηκαν σταθεροί στις τιμές:

Κλίση καταστρώματος: 10°

Παροχή νερού τροφοδοσίας: 1,5 l/min

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στους Πίνακες 14-16.

Πίνακας 14: Αποτελέσματα δοκιμής με μικρή συχνότητα παλμικής κίνησης (πλούσιο υλικό)

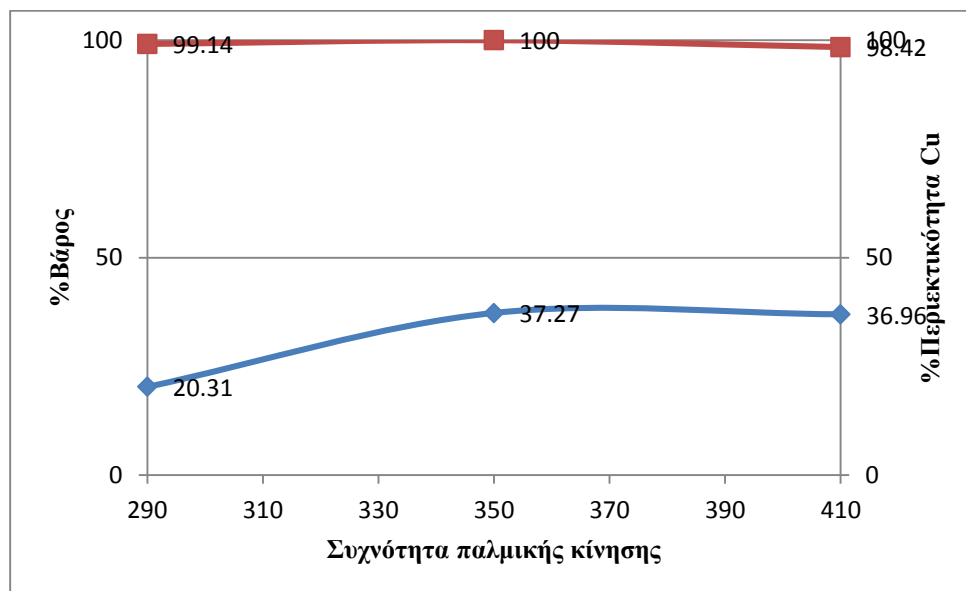
Συχνότητα	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
ΜΙΚΡΗ	Συμπύκνωμα	20,31	99,14	64,11
	Ενδιάμεσο	8,88	42,38	11,99
	Απόρριμμα	70,81	10,6	23,9
	Τροφοδοσία	100,00	31,41	100,00

Πίνακας 15: Αποτελέσματα δοκιμής με μεσαία συχνότητα παλμικής κίνησης (πλούσιο υλικό)

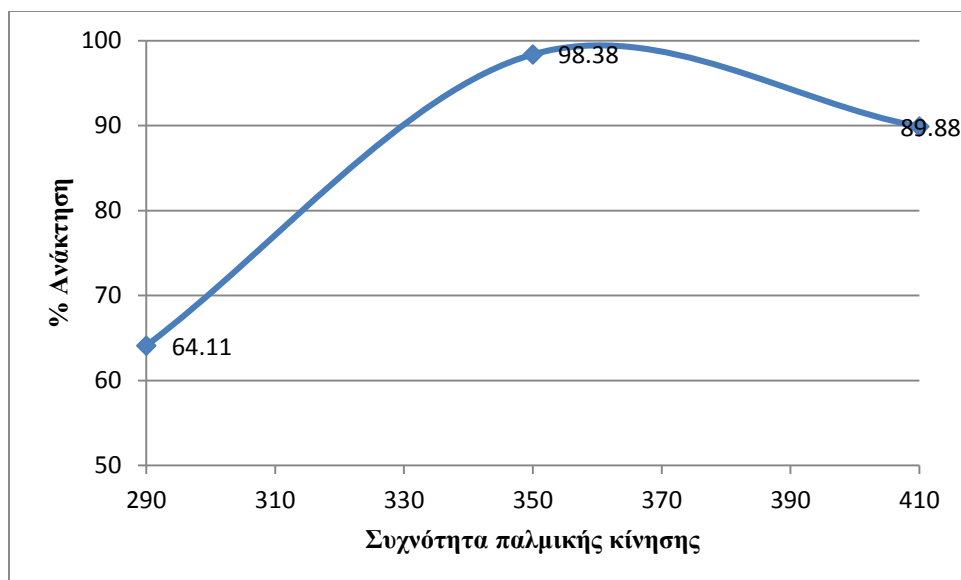
Συχνότητα	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
ΜΕΣΑΙΑ	Συμπύκνωμα	37,27	100	98,38
	Ενδιάμεσο	1,33	16,49	0,58
	Απόρριμμα	61,4	0,64	1,04
	Τροφοδοσία	100,00	37,87	100,00

Πίνακας 16: Αποτελέσματα δοκιμής με μεγάλη συχνότητα παλμικής κίνησης (πλούσιο υλικό)

Συχνότητα	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
ΜΕΓΑΛΗ	Συμπύκνωμα	36,96	98,42	89,88
	Ενδιάμεσο	0	0	0
	Απόρριμμα	63,04	6,27	10,12
	Τροφοδοσία	100,00	39,05	100,00



Εικόνα 37: Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία



Εικόνα 38: Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης στην ανάκτηση χαλκού για μεγάλης περιεκτικότητας τροφοδοσία

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 14-16 και τα διαγράμματα των Εικόνων 37-38, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Για τις συχνότητες της παλμικής κίνησης του καταστρώματος που εξετάστηκαν, προκύπτει ότι η περιεκτικότητα του συμπυκνώματος σε χαλκό είναι πολύ υψηλή και στις τρεις περιπτώσεις (μεγαλύτερη από 98,4%), με τη μέγιστη τιμή (καθαρός χαλκός) να λαμβάνεται για μεσαία τιμή συχνότητας.
- Αναφορικά με το βάρος του συμπυκνώματος, αυτό είναι μικρό για τη χαμηλή συχνότητα (μόλις 20% περίπου) ενώ αυξάνει στο 37% για υψηλότερες συχνότητες.
- Η μέγιστη ανάκτηση χαλκού στο συμπύκνωμα λαμβάνεται για τη μεσαία συχνότητα παλμικής κίνησης του καταστρώματος.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι η βέλτιστη λειτουργία της τράπεζας λαμβάνεται για μεσαία συχνότητα παλμικής κίνησης.



## 7.4.2 ΦΤΩΧΟ ΥΛΙΚΟ ( Περικτικότητα 3-5% σε Cu)

### 7.4.2.1 Επίδραση παροχής νερού τροφοδοσίας

Στον πρώτο κύκλο πειραμάτων για το φτωχό υλικό, ο παράγοντας που μεταβλήθηκε είναι η παροχή νερού τροφοδοσίας, ενώ οι άλλοι δύο παράγοντες διατηρήθηκαν σταθεροί στις τιμές:

Ένταση παλμικής κίνησης: ΜΕΣΑΙΑ

Κλίση καταστρώματος: 8°

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στους παρακάτω Πίνακες 17-19.

Πίνακας 17: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 1l/min (φτωχό υλικό)

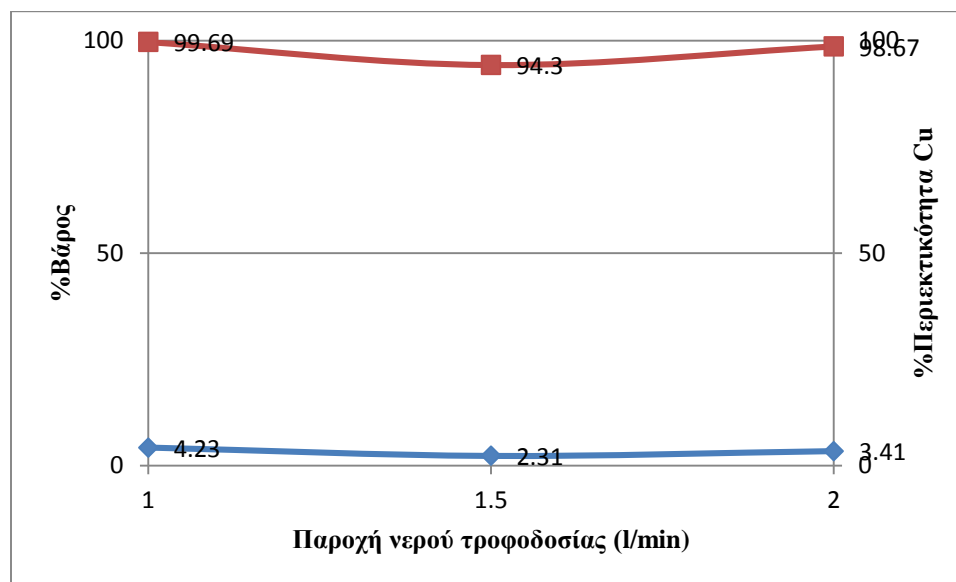
Παροχή ( l/min)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περικτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
1	Συμπύκνωμα	4,23	99,69	88,65
	Ενδιάμεσο	0,38	41,66	3,33
	Απόρριμμα	95,39	0,4	8,02
	Τροφοδοσία	100,00	4,76	100,00

Πίνακας 18: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 1,5 l/min (φτωχό υλικό)

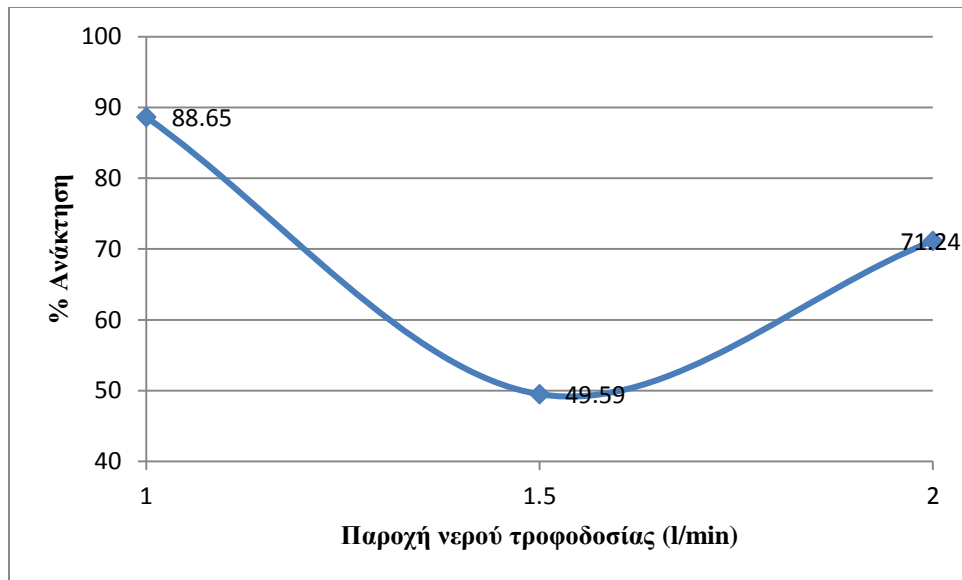
Παροχή ( l/min)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περικτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
1,5	Συμπύκνωμα	2,31	94,3	49,59
	Ενδιάμεσο	1,55	34,99	12,34
	Απόρριμμα	96,13	1,74	38,07
	Τροφοδοσία	100,00	4,39	100,00

Πίνακας 19: Αποτελέσματα δοκιμής με παροχή νερού 2l/min (φτωχό υλικό)

Παροχή (l/min)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
2	Συμπύκνωμα	3,41	98,67	71,24
	Ενδιάμεσο	0,48	60,91	6,18
	Απόρριμμα	96,11	1,11	22,58
	Τροφοδοσία	100,00	4,72	100,00



Εικόνα 39: Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μικρή περιεκτικότητα τροφοδοσία



Εικόνα 40: Επίδραση της παροχής νερού τροφοδοσίας στην ανάκτηση χαλκού για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 14-16 και τα διαγράμματα των Εικόνων 39-40, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Γενικά, για το φτωχό υλικό, το βάρος των συμπυκνωμάτων είναι μικρό ενώ η αντίστοιχη περιεκτικότητα σε χαλκό είναι πολύ υψηλή, με το συμπύκνωμα για παροχή νερού 1 l/min να είναι σχεδόν καθαρό.
- Η αύξηση της παροχής νερού πέραν του 1l/min έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του βάρους των συμπυκνωμάτων αλλά και των αντίστοιχων περιεκτικότητων σε χαλκό. Αυτό πιθανόν οφείλεται στην καλύτερη στρωμάτωση του υλικού μεταξύ των ραβδώσεων για χαμηλή παροχή.
- Η περιεκτικότητα του απορρίμματος για παροχή 1l/min είναι πολύ μικρή ενώ αυξάνει για μεγαλύτερες παροχές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ανακτήσεις να μην ξεπερνούν το 88% περίπου, που αντιστοιχεί για παροχή νερού 1l/min.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή για την παροχή νερού είναι 1 l/min.

#### 7.4.2.2 Επίδραση κλίσης καταστρώματος

Στο δεύτερο κύκλο πειραμάτων για το φτωχό υλικό, ο παράγοντας που μεταβλήθηκε είναι η κλίση του καταστρώματος, ενώ οι άλλοι δύο παράγοντες διατηρήθηκαν σταθεροί στις τιμές:

Παροχή νερού τροφοδοσίας: 1 l/min

Ένταση παλμικής κίνησης: ΜΕΣΑΙΑ

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στους παρακάτω Πίνακες 20-22.

Πίνακας 20: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 6° (φτωχό υλικό)

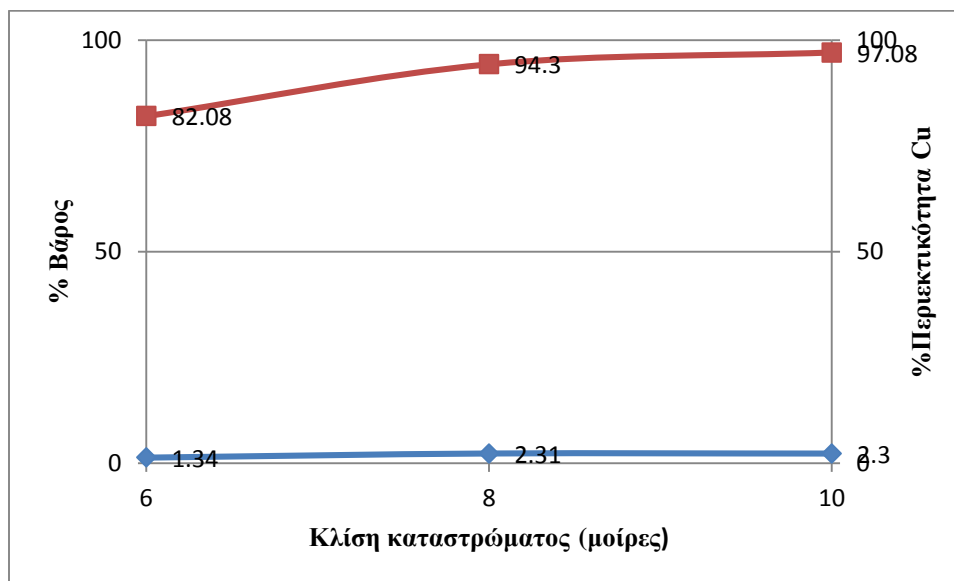
Κλίση καταστρώματος (μοίρες)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
6	Συμπύκνωμα	1,34	82,08	30,33
	Ενδιάμεσο	5,67	6,33	9,90
	Απόρριμμα	92,99	2,33	59,77
	Τροφοδοσία	100,00	3,625	100,00

Πίνακας 21: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 8° (φτωχό υλικό)

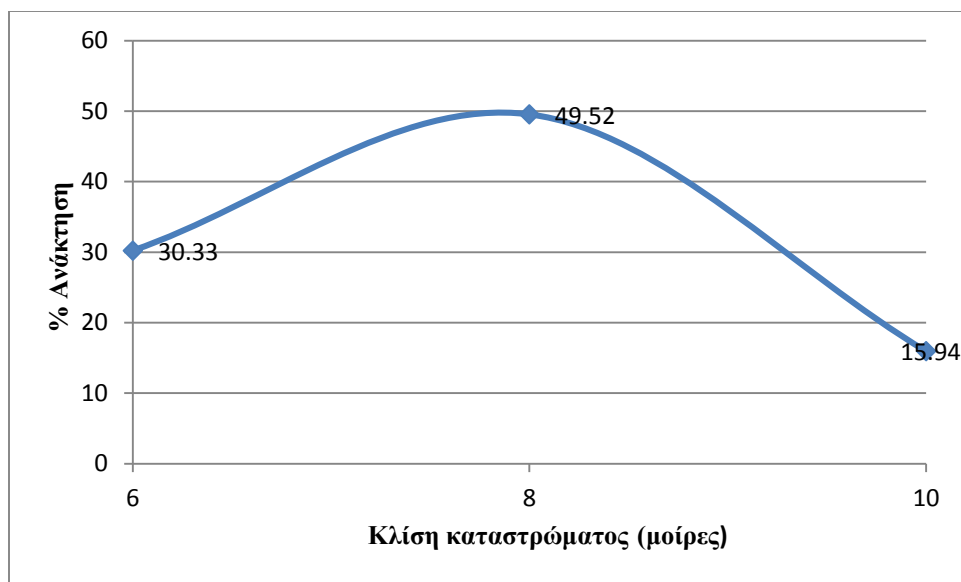
Κλίση καταστρώματος (μοίρες)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
8	Συμπύκνωμα	2,31	94,3	49,52
	Ενδιάμεσο	1,55	34,99	12,34
	Απόρριμμα	96,14	1,75	38,14
	Τροφοδοσία	100,00	4,4	100,00

Πίνακας 22: Αποτελέσματα δοκιμής με κλίση τράπεζας 10° (φτωχό υλικό)

Κλίση καταστρώματος (μοίρες)	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
10	Συμπύκνωμα	2,3	97,08	15,94
	Ενδιάμεσο	9,43	15,3	10,28
	Απόρριμμα	88,26	1,73	73,78
	Τροφοδοσία	100,00	5,21	100,00



Εικόνα 41: Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία



Εικόνα 42: Επίδραση της κλίσης του καταστρώματος στην ανάκτηση χαλκού για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 20-22 και των διαγραμμάτων των Εικόνων 41-42, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η αύξηση της κλίσης προκαλεί αύξηση της καθαρότητας του συμπυκνώματος, επειδή παρασύρεται πιο εύκολα το πλαστικό.
- Σε γενικές γραμμές, τα βάρη των συμπυκνωμάτων είναι μικρά, με τα μεγαλύτερα να επιτυγχάνονται για τιμές κλίσης μεγαλύτερες των 6 μοιρών.
- Μικρή είναι και η ανάκτηση χαλκού στο συμπύκνωμα, με τη μεγαλύτερη τιμή να παρατηρείται για κλίση 8° αλλά να μην ξεπερνά το 50%. Αξίζει να σημειωθεί ότι για κλίση 10° η ανάκτηση είναι της τάξης του 15%. Η αιτία για την χαμηλή ανάκτηση πιθανόν οφείλεται στην παράσυρση των τεμαχιδίων χαλκού για μεγάλες κλίσεις καταστρώματος, με συνέπεια την σχετικά αυξημένη περιεκτικότητα του απορρίμματος σε χαλκό.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή για την κλίση του καταστρώματος είναι 8°.

### 7.4.2.3 Επίδραση συχνότητας παλμικής κίνησης

Στο τρίτο κύκλο πειραμάτων για το φτωχό υλικό ο παράγοντας που μεταβλήθηκε είναι η συχνότητα της παλμικής κίνησης ενώ οι άλλοι δύο παράγοντες διατηρήθηκαν σταθεροί στις τιμές:

Κλίση καταστρώματος: 8°

Παροχή νερού τροφοδοσίας: 1 l/min

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στους Πίνακες 23-25.

Πίνακας 23: Αποτελέσματα δοκιμής με μικρή συχνότητα παλμικής κίνησης (φτωχό υλικό)

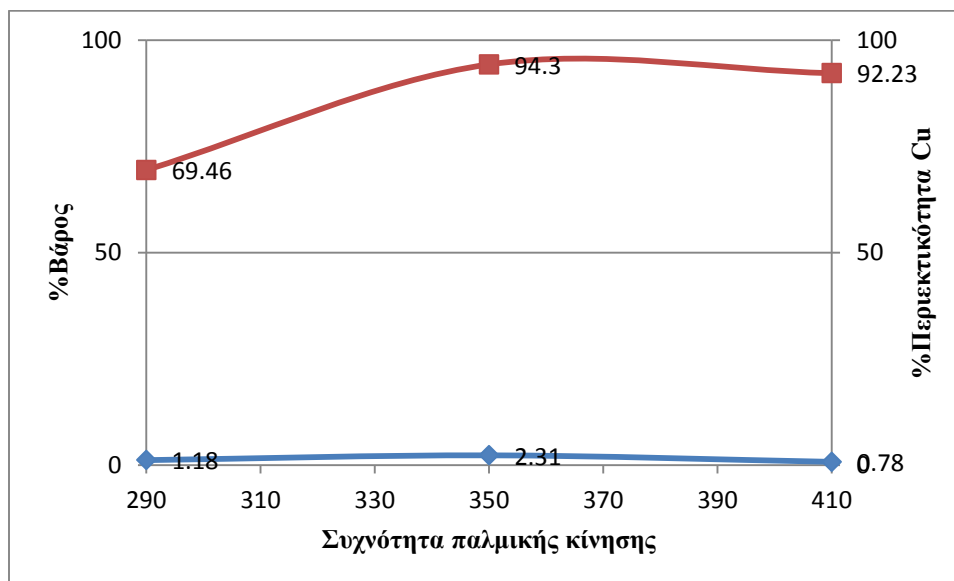
Συχνότητα	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
ΜΙΚΡΗ	Συμπύκνωμα	1,18	69,46	26,19
	Ενδιάμεσο	1,87	3,79	2,26
	Απόρριμμα	96,95	2,31	71,55
	Τροφοδοσία	100,00	3,14	100,00

Πίνακας 24: Αποτελέσματα δοκιμής με μεσαία συχνότητα παλμικής κίνησης (φτωχό υλικό)

Συχνότητα	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
ΜΕΣΑΙΑ	Συμπύκνωμα	2,31	94,3	49,52
	Ενδιάμεσο	1,55	34,99	12,34
	Απόρριμμα	96,14	1,75	38,14
	Τροφοδοσία	100,00	4,4	100,00

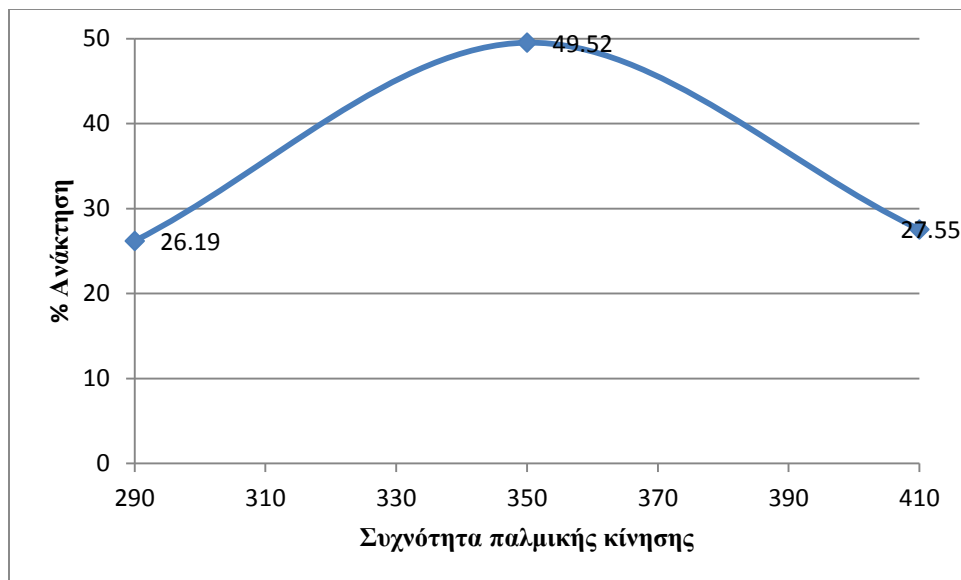
Πίνακας 25: Αποτελέσματα δοκιμής με μεγάλη συχνότητα παλμικής κίνησης (φτωχό υλικό)

Συχνότητα	Προϊόντα	% Βάρος	% Περιεκτικότητα Cu	% Κατανομή Cu
ΜΕΓΑΛΗ	Συμπύκνωμα	0,78	92,23	27,55
	Ενδιάμεσο	0	0	0
	Απόρριμμα	99,22	1,92	72,45
	Τροφοδοσία	100,00	2,62	100,00



Εικόνα 43: Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης στο βάρος και στην περιεκτικότητα του συμπυκνώματος για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία





Εικόνα 44: Επίδραση της συχνότητας της παλμικής κίνησης στην ανάκτηση χαλκού για μικρής περιεκτικότητας τροφοδοσία

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 23-25 και των διαγραμμάτων των Εικόνων 43-44, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Στη χαμηλή συχνότητα παλμικής κίνησης η περιεκτικότητα του συμπυκνώματος είναι πολύ μικρή. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία διαχωρισμού του πλαστικού από το χαλκό με αποτέλεσμα ένα πολύ μεγάλο μέρος του καταλήγει στο συμπύκνωμα (Εικόνα 45). Αντίθετα, η μεγάλη συχνότητα παρασέρνει σημαντική ποσότητα χαλκού στο απόρριμμα. Έτσι, παρόλο που το συμπύκνωμα είναι αρκετά καθαρό, το βάρος του είναι πολύ μικρό.
- Η βέλτιστη τιμή περιεκτικότητας και ποσότητας σε χαλκό παρατηρείται για μεσαία συχνότητα παλμικής κίνησης. Επίσης, μεγαλύτερη ανάκτηση επιτυγχάνεται για τη μεσαία συχνότητα, αν και δεν υπερβαίνει το 50%.



*Εικόνα 45: Πλαστικό που παρασύρεται προς το συμπύκνωμα*

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι η βέλτιστη λειτουργία της τράπεζας επιτυγχάνεται για μεσαία συχνότητα παλμικής κίνησης (340-360 παλινδρομήσεις/min).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία είχε ως σκοπό να διερευνηθεί η δυνατότητα διαχωρισμού του χαλκού από το πλαστικό κατά την διαδικασία ανακύκλωσης καλωδίων χαλκού, εφαρμόζοντας βαρυτομετρικό διαχωρισμό σε παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις. Οι δοκιμές έγιναν σε δείγματα με διαφορετική περιεκτικότητα σε χαλκό. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών, προκύπτουν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- Ο διαχωρισμός του χαλκού από το πλαστικό των ηλεκτρικών καλωδίων είναι εφικτός, δεδομένου ότι το συμπύκνωμα που λαμβάνεται έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλκό και ικανοποιητική ανάκτηση.
- Η περιεκτικότητα της τροφοδοσίας παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του διαχωρισμού, ο οποίος είναι πιο αποδοτικός για το υλικό με μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλκό (35-45%) σε σχέση με το αντίστοιχο μικρής περιεκτικότητας (3-5%).
- Πιο συγκεκριμένα, για το πλούσιο σε χαλκό υλικό ελήφθησαν συμπυκνώματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλκό (μεγαλύτερη από 95%) και μεγάλη ανάκτηση (μεγαλύτερη από 90%) ενώ σε κάποιες το προϊόν ήταν καθαρός χαλκός.
- Αντίθετα, για χαμηλής περιεκτικότητας τροφοδοσία ελήφθησαν συμπυκνώματα μεγάλης περιεκτικότητας σε χαλκό (σε αρκετές περιπτώσεις μεγαλύτερη από 94%) αλλά η ανάκτηση χαλκού κυμάνθηκε γενικά σε χαμηλά επίπεδα (μεταξύ 16 και 88%).
- Οι βέλτιστες συνθήκες διαχωρισμού ήταν: α) κλίση τράπεζας 10°, παροχή νερού έκπλυσης 1,5 λίτρο/λεπτό, συχνότητα παλμικής κίνησης του καταστρώματος 340-360 παλμικές κινήσεις/λεπτό για το πλούσιο υλικό, και β) κλίση τράπεζας 8°, παροχή νερού έκπλυσης 1,0 λίτρο/λεπτό, συχνότητα παλμικής κίνησης του καταστρώματος 340-360 παλμικές κινήσεις/λεπτό για το φτωχό υλικό.
- Γενικά, ο διαχωρισμός σε παλλόμενη τράπεζα με ραβδώσεις αφήνει υποσχέσεις για εφαρμογή και σε άλλες περιπτώσεις διαχωρισμού και ανάκτησης χημικών συστατικών από στερεά απόβλητα με την προϋπόθεση ότι τα προς διαχωρισμό συστατικά έχουν επαρκή διαφορά ειδικού βάρους και το νερό δεν επηρεάζει τις ιδιότητες των συστατικών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γ. Αναστασάκης, *Σημειώσεις Μαθήματος Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001.
- [2] Δ. Καλιαμπάκος, *Σημειώσεις Μαθήματος Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001.
- [3] Γ. Λιόλιος, “Ανακύκλωση Μεταλλικών Υλικών,” ΤΕΙ Κρήτης, 2014.
- [4] “Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε.” [Online]. Available: <http://www.electrocycle.gr/>.
- [5] Ι. Θεοδώρου, “Επεξεργασία αποβλήτων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών μετά το τέλος ζωής. Αποτύπωση της Ελληνικής αγοράς.,” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2012.
- [6] Α. Κασσίμη, “Ανακύκλωση χωρίς απορρύπανση,” *Εφημερίδα Καθημερινή*, 03-Oct-2015.
- [7] “Ελληνική Εταιρεία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων.” [Online]. Available: <http://www.eedsa.gr/>.
- [8] *ASM Metals Handbook - Volume 14: Forming and Forging*. ASM International, 1993.
- [9] *ASM Metals Handbook - Volume 15: Casting*. ASM International, 1993.
- [10] Discovery Channel, *How it's made: Electrical Wires*.
- [11] “Φυλλάδιο εταιρίας RIAK.”
- [12] Δ. Παντελής, *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008.
- [13] *Σημειώσεις Εργαστηρίου Μεταφοράς Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής*.
- [14] Discovery Channel, *How it's made: Copper*.
- [15] “International Copper Study Group (ICSG).” [Online]. Available: <http://www.icsg.org/>.
- [16] *The Long-Term Availability of Copper*. International Copper Association, 2013.
- [17] Κ. Κονοφάγος, *Μεταλλογνωσία, Τόμος I: Τα μέταλλα*. 1973.
- [18] Κ. Κονοφάγος, *Μεταλλογνωσία Τόμος III Βιομηχανικά Κράματα*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1967.
- [19] “Όμιλος ΒΙΟΧΑΛΚΟ.” [Online]. Available: <http://viohalco.com/el/>.
- [20] Γ. Χρυσουλάκης and Δ. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνολογία Μεταλλικών υλικών*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008.
- [21] S. Gloser, M. Soulier, and L. Espinoza, “Dynamic Analysis of global Copper flaws, global stocks, post-consumer material flaws, recycling indicators and

- uncertainty evaluation,” 2013.
- [22] Α. Φραγκίσκος, *Εμπλουτισμός Μεταλλευμάτων και Βιομηχανικών Ορυκτών (Ορυκτουργία)*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1995.
- [23] Β. . Gabriel, *SEM: A user's manual for Material Science*. ASM International, 1985.
- [24] Μ. Όξεκιουν-Πετροπούλου, *Φασματομετρικές Μέθοδοι*. Εκδόσεις Συμμετρία, 2008.