



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ**  
**ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**



**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Θεοδωροπούλου Μαρία**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Τσακαλάκης Κωνσταντίνος**

**ΘΕΜΑ:<<Συσχέτιση διεργασιών εμπλουτισμού Cu με την οριακή περιεκτικότητα τροφοδοσίας>>**

## **1. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Τσακαλάκη Κωνσταντίνο κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, και την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της πτυχιακής μου εργασίας. Όπως επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του, για την επίλυση διάφορων θεμάτων.

Επίσης, θα ήθελα επίσης να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου, οι οποίοι στήριξαν τις σπουδές μου με διάφορους τρόπους, φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωση μου όπως επίσης φίλους και συγγενείς για την βοήθειά τους και στήριξή τους.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω το ιατρικό και νοσηλευτικό προσωπικό που εντός αλλά και εκτός των συνόρων της χώρας μας κάνει ότι είναι ανθρωπίνως δυνατόν για την αντιμετώπιση την πανδημίας του COVID-19 που ταλανίζει τον πλανήτη για περισσότερους από 18 μήνες και είμαι σίγουρη πως στο τέλος της ημέρας η έρευνα και η επιστήμη θα νικήσει.

## **2. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των διαδικασιών εμπλουτισμού χαλκού σε σχέση με την οριακή περιεκτικότητα τροφοδοσίας του καθώς και ανάλυση των οικονομικών παραμέτρων για την αποδοτική λειτουργία ενός μεταλλείου χαλκού. Τέλος, γίνεται αναφορά για την ευρεία χρήση του χαλκού, που παρόλο που είναι ένα μέταλλευμα που χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες όλα δείχνουν ότι είναι συνδεδεμένο με τον άνθρωπο και θα συνεχίσει να μας απασχολεί η εκμετάλλευσή του και στο μέλλον.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

1.	Ευχαριστίες	2
2.	Περίληψη	3
#i	Ευρετήριο Εικόνων	7
#ii	Ευρετήριο Διαγραμμάτων	9
#iii	Ευρετήριο Πινάκων	10
3.	Εισαγωγή	11
4.	Ιστορικό περιεχόμενο	13
4.1	Κύπρος	16
4.2	Ο χαλκός σε παγκόσμιο επίπεδο	16
5.	Ο χαλκός ως μέταλλευμα	21
5.1	Μονάδα μέτρησης χαλκού	24
5.2	Όρια εκμεταλλευσιμότητας χαλκού	24
5.3	Εξόρυξη χαλκού	27
5.4	Παραγωγή χαλκού	27
5.5	Εμπλουτισμός χαλκού	28
5.5.1	Υδρομεταλλουργική κατεργασία χαλκού	28
5.5.2	Ανάκτηση χαλκού με την μέθοδο της εκλεκτικής επίπλευσης	31
6.	Βελτίωση βαθμού ανάκτησης του χαλκού	34
6.1	Θραύση-Αποδέσμευση	34
6.2	Οριακή περιεκτικότητα και χαλκός	35
7.	Συνοπτική παρουσίαση της επεξεργασίας του χαλκού	37
8.	Υπολογισμός αποθεμάτων χαλκού	38
8.1	Ορισμός οριακής περιεκτικότητας	39

8.1.1	Υπολογισμός της οριακής % περιεκτικότητας με χρήση «καθαρού» μεταλλουργικού κέρδους <b>NSR</b> (Net Smelter Return)	42
8.1.2	Υπολογισμός της οριακής % περιεκτικότητας με τη μέθοδο Lane	43
8.2	Συμβατικές μέθοδοι	44
8.2.1	Μέθοδος τομών	44
8.2.2	Μέθοδος πολυγώνων	45
8.2.3	Μέθοδος τριγώνων	46
8.2.4	Μέθοδος αντίστροφων αποστάσεων	47
8.3	Μαθηματικο-στατιστικές μέθοδοι	48
8.3.1	Μέθοδος κλασικής στατιστικής	49
8.3.2	Γεωστατιστική	50
8.4	Παράδειγμα εφαρμογής μεθόδων υπολογισμού αποθεμάτων χαλκού	50
9.	Οικονομική σημασία χαλκού	56
9.1	Απόδοση μεταλλείου χαλκού	57
9.2	Άμεσο κέρδος και απώλειες μεταλλείου χαλκού	59
9.2.1	Μαθηματική σχέση κέρδους-απώλειας μεταλλείου χαλκού	60
9.3	Παράδειγμα υπολογισμού οριακής περιεκτικότητας μεταλλεύματος χαλκού	61
9.4	Οριακές % περιεκτικότητες επιφανειακών μεταλλείων (ορυχεία) χαλκού	65
9.5	Οριακή % περιεκτικότητα χαλκού σε ορυχείο περιορισμένης δυναμικότητας	67
10.	Πολυμεταλλικά αποθέματα και χαλκός	70
10.1	Γενικές παραδοχές με βάση τον χαλκό	70
11.	Χαλκός και μέλλον	73
11.1	Ο χαλκός στο διάστημα	73
11.2	Ο χαλκός στου ωκεανούς	74
12.	Χαλκός και περιβάλλον	77

12.1	Χαλκός και Ανακύκλωση	78
13.	Χαλκός και υγεία	78
14.	Επίλογος	80
15.	Βιβλιογραφία	81

## **#iEYPETHPIO EIKONΩN**

<b>EIKONA 1:</b> Ιδιότητες χαλκού	11
<b>EIKONA 2:</b> Υπόγεια στοά του πρώην ορυχείου χαλκού στο Λιμογάρδι με γραμμές Decaville	15
<b>EIKONA 3:</b> Τιμή Χαλκού	18
<b>EIKONA 4:</b> Αυτοφυής χαλκός	21
<b>EIKONA 5:</b> Χαλκοπυρίτης	21
<b>EIKONA 6:</b> Βορνίτης	22
<b>EIKONA 7:</b> Εναργίτης	22
<b>EIKONA 8:</b> Χαλκοσίνης	22
<b>EIKONA 9:</b> Κυπρίτης	22
<b>EIKONA 10:</b> Αζουρίτης	23
<b>EIKONA 11:</b> Μαλαχίτης	23
<b>EIKONA 12:</b> Κοβελλίνης	23
<b>EIKONA 13 :</b> Χρυσόκολλα	23
<b>EIKONA 14:</b> Απευθείας εξαγωγή χαλκού από μέταλλευμα με υδρομεταλλουργική μέθοδο (εκχύλιση σε σωρό)	31
<b>EIKONA 15:</b> Εκλεκτική επίπλευση χαλκοπυρίτη	31
<b>EIKONA 16:</b> Διάγραμμα πυρομεταλλουργικής επεξεργασίας για την παραγωγή αργού χαλκού	33
<b>EIKONA 17:</b> Ορिकाκή % Cu περιεκτικότητα-εκτιμήσεις αποθεμάτων	41
<b>EIKONA 18:</b> Μέθοδος Τομών	45
<b>EIKONA 19:</b> Μέθοδος Πολυγώνων	46
<b>EIKONA 20:</b> Μέθοδος των Τριγώνων	47

<b>ΕΙΚΟΝΑ 21:</b> Μέθοδος των αντίστροφων αποστάσεων	48
<b>ΕΙΚΟΝΑ 22:</b> Κοιτάσματα χαλκού Σκουριώτισσα	51
<b>ΕΙΚΟΝΑ 23:</b> Κοιτάσματα χαλκού-Κύπρος	51
<b>ΕΙΚΟΝΑ 24:</b> Τομές kriging-IDS-«πραγματικότητα»	55
<b>ΕΙΚΟΝΑ 25:</b> Τομές kriging-IDS-«πραγματικότητα»	55
<b>ΕΙΚΟΝΑ 26:</b> Μεταβολή της % οριακής περιεκτικότητας λόγω μεταβολής (μείωση) του λόγου αποκάλυψης (στείρα:μετάλλευμα)	63
<b>ΕΙΚΟΝΑ 27:</b> Εξορυγμένο στείρο-μετάλλευμα-απομένον στείρο	67
<b>ΕΙΚΟΝΑ 28:</b> Ζώνες χαλκού σε μετεωρίτη	74
<b>ΕΙΚΟΝΑ 29:</b> Το ερευνητικό ρομπότ ROV 6000 που ανιχνεύει το θαλάσσιο βυθό μέχρι 6000 μ.	76



## **#iiΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1:</b> Χρήσεις χαλκού στις Η.Π.Α	13
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2:</b> Ποσοστιαία % κατανομή παραγωγής χαλκού ανά χώρα για το 2013	17
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3:</b> Παγκόσμια παραγωγή χαλκού ανά έτος	19
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4:</b> Εκτιμήσεις παραγωγής χαλκού βάσει του μοντέλου Hubert	20
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5:</b> Εύρος περιεχόμενου χρήσιμου μεταλλεύματος	25
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6:</b> Διαχρονική εξέλιξη ελάχιστης % περιεκτικότητας μεταλλευμάτων σε μέταλλο	26
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7:</b> Ανάκτηση % σε χαλκό σε σχέση με την % περιεκτικότητα στο συμπύκνωμα	36
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8:</b> Διάγραμμα ροής χαλκού	38
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9:</b> Διαχρονική εξέλιξη της οριακής περιεκτικότητας (ore grade) μεταλλευμάτων σε Cu % στη Χιλή	40
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10:</b> Διάγραμμα σύγκρισης kriging-IDS-«πραγματικότητα»	54
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11:</b> Διάγραμμα σχέση ποσότητας αποθεμάτων-% περιεκτικότητα σε χρήσιμο	58
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12:</b> Περιεχόμενο μέταλλο στο υλικό περιεκτικότητας $x_{+c} > x_c$ –Οριακή % περιεκτικότητα $x_c$	59
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13:</b> Γραφική εκτίμηση οριακής % περιεκτικότητας επιφανειακού ορυχείου χαλκού (εσωτερικά)	64
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14:</b> Γραφική εκτίμηση οριακής % περιεκτικότητας επιφανειακού ορυχείου χαλκού (εκτός ορίων)	64
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15:</b> Γραφική εκτίμηση οριακής % περιεκτικότητας επιφανειακού ορυχείου χαλκού σε σχέση με τον λόγο αποκάλυψης 1,5:1 (σειρά:μετάλλευμα)	65
<b>ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16:</b> Μέρηδια αγοράς διάφορων υλικών	80

**#iiiΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**

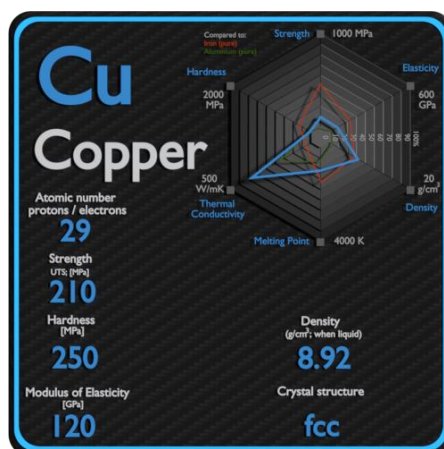
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 1:</b> Παγκόσμια παραγωγή χαλκού ανά χώρα σε μετρικούς τόνους	17
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 2:</b> Παγκόσμια παραγωγή χαλκού ανά έτος	19
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 3:</b> Όρια εκμεταλλευσιμότητας χαλκού	24
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 4:</b> Ερμηνεία μεταβλητών μεθόδου NSR	42
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 5:</b> Λειτουργικές και οικονομικές παραδοχές ορυχείου χαλκού	68
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 6:</b> Ετήσια ταμειακή ροή και παρούσα αξία επένδυσης μεταλλείου χαλκού	69
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 7:</b> Ερμηνεία μεταβλητών εξίσωσης προσδιορισμού «ισοδύναμης» περιεκτικότητας	72
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 8:</b> Οφέλη ανακύκλωσης	78

### 3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χαλκός ήταν το σημαντικότερο μέταλλο κατά την αρχαιότητα (εποχή του χαλκού) με πλήθος εφαρμογών. Η εξαγωγή του από ορυκτά ήταν ευκολότερη σε σχέση με άλλων μετάλλων όπως για παράδειγμα με αυτή του σιδήρου. Από αρχαιολογικά ευρήματα (π.χ σε ναυάγια) αποδεικνύεται ότι διακινείτο εμπορικά ως πλίνθωμα (ingot) τυποποιημένης μορφής και συγκεκριμένου βάρους (τάλαντο) στην ύστερη εποχή του χαλκού (16ος-12ος αι. π.χ). Η ετυμολογία του αγγλικού, γερμανικού, και του γαλλικού όρου για το χαλκό προέρχεται από το Κυπριακό Χαλκό **Aes Cuprium**→**Cuprium**→**copper**→**Kupfer**→**cuiivre**, δηλαδή χαλκός από τη Κύπρο που φημιζόταν για τις εξαγωγές χαλκού.

Ο χαλκός Cu είναι το πρώτο στοιχείο της ομάδας IB του περιοδικού πίνακα και ανήκει στα βαρέα μέταλλα αλλά και στα μέταλλα μετάπτωσης, επομένως χρησιμοποιεί ηλεκτρόνια από τις εσωτερικές στοιβάδες στις χημικές αντιδράσεις. Στη φύση υπάρχουν δύο ισότοπα του χαλκού, ο χαλκός 63 ο οποίος έχει 29 ηλεκτρόνια και πρωτόνια και 34 νετρόνια και ο χαλκός 65 ο οποίος διαφέρει από το 63 έχοντας 2 νετρόνια επιπλέον.

Όσον αφορά, τις φυσικές του ιδιότητες, έχει ένα ιδιαίτερο αντανακλαστικό χρώμα, όμοιο με το κόκκινο του τούβλου. Ταυτόχρονα, είναι ανθεκτικός στη διάβρωση, ελαστικός, εύπλαστος, ανακυκλώσιμος, κατάλληλος για δημιουργία μεγάλου αριθμού μεταλλικών κραμάτων καθώς και εξαιρετικός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού.



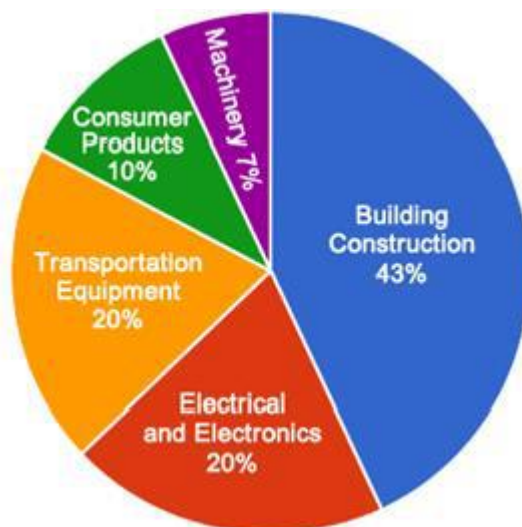
**EIKONA 1: Ιδιότητες χαλκού**

Ο χαλκός είναι μέταλλο με μοναδικές ιδιότητες που βρίσκεται παντού γύρω μας, από τον οικιακό εξοπλισμό, τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές εγκαταστάσεις και συσκευές, τα δίκτυα ύδρευσης, θέρμανσης, ψύξης, κλιματισμού και φυσικού αερίου. Η χρήση και εφαρμογή του είναι διαδεδομένη από απλές κατασκευές και συσκευές της καθημερινότητας του μέσου ανθρώπου, μέχρι και σε μοντέρνα ιατρικά μηχανήματα και νοσοκομειακό εξοπλισμό. Λόγω της αντιμικροβιακής ιδιότητας που έχει ο χαλκός, έχει καταστεί ένα από τα κυρίαρχα υλικά που χρησιμοποιούνται στην βιο-ιατρική τεχνολογία.

Σε επί μέρους πρακτικές εφαρμογές της καθημερινότητας πρέπει να αναφερθεί ότι ένα νοικοκυριό ή μια οικογένεια του δυτικού κόσμου είναι “ιδιοκτήτες” τουλάχιστον μερικών δεκάδων κιλών χαλκού χωρίς καν οι περισσότεροι εξ’ αυτών να το γνωρίζουν. Παραδειγματικά:

- Ένας επιτραπέζιος υπολογιστής περιέχει περίπου 4% χαλκό (για να υπάρχει πιο σαφή εικόνα για αυτό το ποσοστό αξίζει να αναφερθεί ότι ένας υπολογιστής περιέχει 37% σιδηρούχα μεταλλεύματα, 5% αλουμίνιο, 0,01% πολύτιμα μέταλλα, 1% άλλα μη σιδηρούχα μέταλλα, 19% πλαστικά και 34% και άλλα υλικά).
- Ένα συμβατικό αυτοκίνητο ιδιωτικής χρήσης περιέχει 25-40 κιλά χαλκού.
- Ένα τυπικό σπίτι με θέρμανση και εσωτερική εγκατάσταση νερού περίπου 80 κιλά.

Παρακάτω, δίνεται μια διαγραμματική απεικόνιση που αφορά τις ΗΠΑ, η οποία επιβεβαιώνει το πόσο ευρεία είναι η χρήση του χαλκού στους περισσότερους τομείς της ζωής μας και δίνει και μια ποσοτική απεικόνιση σε ποσοστά το πόσο συμμετέχει σε κάθε τομέα. Φαίνεται ότι παίζει ενεργό ρόλο στην μηχανική, στις ηλεκτρονικές συσκευές, στα προϊόντα, στα ΜΜΜ αλλά το κυριότερο ρόλο το διαδραματίζει στις κατασκευές κτιρίων.



#### **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: Χρήσεις χαλκού στις Η.Π.Α το 2019 (Πηγή: <https://www.wikipedia.org>)**

Όλα αυτά είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα τα οποία αποδεικνύουν την χρησιμότητα του συγκεκριμένου μεταλλεύματος. Επιπροσθέτως, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως περίπου **22 εκατομμύρια τόνοι χαλκού** χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία ανά έτος σε παγκόσμιο επίπεδο, είτε από εξόρυξη είτε από <<σκράπ>> (scrap-metal). Περίπου **15 εκατομμύρια τόνοι** από τους παραπάνω προέρχονται από νέα παραγωγή των ορυχείων και περίπου **7 εκατομμύρια τόνοι** από ανακύκλωση (τέλος χρήσης αντικειμένων και απόβλητα παραγωγής). Δεν πρέπει ακόμη να ξεχνάμε ότι ενώ τα κοιτάσματα χαλκού δεν είναι ανανεώσιμες πρώτες ύλες, ο χαλκός ως μέταλλο μπορεί να ανακυκλωθεί στο 100% απεριόριστες φορές, χωρίς να χάνει την αποδοτικότητα του, συνεπώς αποτελεί μια 100% ανανεώσιμη πρώτη ύλη.

#### **4. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ**

Η εξόρυξη και μεταλλουργία του χαλκού ήταν ενεργή στην **Ελλάδα** από τα αρχαία χρόνια και ειδικότερα στο χώρο του Αιγαίου πελάγους. Παρόλα αυτά, τα κοιτάσματα χαλκού δεν ήταν προνόμιο μόνο της νησιωτικής χώρας. Κοιτάσματα χαλκού υπήρχαν και συνεχίζουν να υπάρχουν και στην ηπειρωτική Ελλάδα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το μεγάλο κοιτάσμα χαλκού πορφυρικού τύπου (δηλαδή χρυσού και χαλκού) στις Σκουριές Χαλκιδικής του οποίου η εκμετάλλευση άλλαξε τα δεδομένα στην οικονομία και κοινωνία της περιοχής.

Επίσης, στη περιοχή του Λιμογάρδιου Λαμίας και συγκεκριμένα στην περιοχή Нарθάκι, υπάρχουν υπόγειες μεταλλευτικές στοές αλλά και χαλκομιγείς εκβολάδες που αποδεικνύουν τη εξόρυξη, εκμετάλλευση και χρήση του μεταλλεύματος που ξεκίνησε κατά την περίοδο της αρχαιότητας και έφτασε μέχρι και τα νεότερα χρόνια. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μορφή του κοιτάσματος στην περιοχή ήταν φλέβες μέσα σε οφειτικά πετρώματα. Διαπιστώθηκε δε ότι η περιεκτικότητα σε χαλκό ήταν πολύ σημαντική καθώς ξεπερνούσε το 3%.

Μετά την εξόρυξη του μεταλλεύματος χαλκού ακολουθούσε ο εμπλουτισμός του και κατόπιν η επεξεργασία του στη μεταλλουργία. Σκοπός της περαιτέρω επεξεργασίας του, δηλαδή της εισαγωγής του στη μεταλλουργία, ήταν να <<καθαριστεί>> και επεξεργαστεί ούτως ώστε να παραχθεί καθαρό μέταλλο χαλκού. Το τελικό προϊόν χρησιμοποιείτο για την κατασκευή εργαλείων, όπλων, χρηστικών αγγείων, κοσμημάτων, αγαλμάτων και γλυπτών και πολλών άλλων χρηστικών αντικειμένων που σταδιακά αντικατέστησαν άλλα υλικά.

Με την πάροδο των χρόνων, και φτάνοντας στο 1856, χωρικοί της περιοχής Όθρυς (Λιμογάρδι Φθιώτιδας) ανακάλυψαν τυχαία μια οπή στην οποία εισήλθαν και βρέθηκαν σε υπόγειο χώρο με πολλές και διαφορετικές κατευθύνσεις. Σε πρώτη φάση και λόγω φόβου δεν προχώρησαν πολύ μέσα στις στοές αλλά εντός αυτών εντόπισαν σκουριές από χαλκό και άλλα μέταλλα. Το συμπέρασμα φυσικά ήταν ότι ανακάλυψαν ένα αρχαίο μεταλλείο χαλκού το οποίο είχε χαθεί μέσα στη γη στο πέρασμα του χρόνου.

Στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα μετά από αυτή την ανακάλυψη, πολλοί επιχειρηματίες (και εργαζόμενοι που προσελκύστηκαν από τη προοπτική της εύρεσης εργασίας) προχώρησαν σε μεταλλευτικές δραστηριότητες στην περιοχή. Η πρώτη κίνηση ήταν η εξασφάλιση άδειας από την κυβέρνηση για την κατοχύρωση του δικαιώματος εκμετάλλευσης και πράγματι, το 1872 στην ευρύτερη περιοχή παραχωρήθηκε το δικαίωμα εκμετάλλευσης χαλκού και χρωμίου σε έκταση 8,66 στρεμμάτων στην περιφέρεια του χωριού Αρχάνι, Φθιώτιδας.

Στη συνέχεια, το ίδιο έτος (1872) παραχωρήθηκε δικαίωμα εκμετάλλευσης χαλκού σε 13,7 στρέμματα της περιφέρειας του χωριού Στύρφακα του δήμου Παραχελωιτών και σε έκταση 6 στρεμμάτων στην περιφέρεια του χωριού Μπαξαή, ενώ επίσης μεταβιβάστηκε το δικαίωμα εξόρυξης και εκμετάλλευσης στην εταιρεία «Αχιλλεύς». Το 1876 παραχωρήθηκε δικαίωμα

εκμετάλλευσης χαλκού σε 10 στρέμματα της περιφέρειας του χωριού Τσοπανλάτα (Λυγαριά) πάλι στην περιοχή της Φθιώτιδας.

Το ενδιαφέρον των επενδυτών για τα μεταλλεία χαλκού αλλά και ταυτόχρονα άλλων μετάλλων στην περιοχή παρέμεινε ενεργό και κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Έτσι, το 1901, παραχωρήθηκε από την τότε κυβέρνηση το δικαίωμα εκμετάλλευσης χαλκού και άλλων μεταλλευμάτων. Συγκεκριμένα, ψευδαργύρου, αργυρούχου μόλυβδου και μαγγανίτου σε έκταση 11 στρεμμάτων στην ευρύτερη περιοχή του χωριού Γαρδίκι (Πελασγία) του δήμου Κρεμαστής Λάρισας. Μερικά χρόνια αργότερα, το 1906, παραχωρήθηκε το δικαίωμα εκμετάλλευσης χαλκού και άλλων μεταλλευμάτων σε έκταση 20,5 στρεμμάτων στην περιφέρεια του χωριού Σπαρτιά.

Επιστρέφοντας στη δεύτερη δεκαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα, πλέον στην περιοχή του Λιμογαρδίου υπάρχουν μόνο οι «εξοφλημένες» στοές, ως αδιάψευστοι μάρτυρες της προηγηθείσας εκμετάλλευσης των προηγούμενων χρόνων και φυσικά της ζωντανής ιστορίας της εξορυκτικής δραστηριότητας και μεταλλευτικής ιστορίας του τόπου.



**ΕΙΚΟΝΑ 2: Υπόγεια στοά του πρώην ορυχείου χαλκού στο Λιμογάρδι Λαμίας με γραμμές Decauville.**

## **4.1 Κύπρος**

Μιλώντας για την εκμετάλλευση του χαλκού στην πάροδο των χρόνων δεν θα μπορούσε να μην γίνει μια ειδική αναφορά στην εκμετάλλευση του μετάλλου αυτού στην Κύπρο.

**Η μεταλλευτική ιστορία της Κύπρου έχει συνδέσει το όνομα της (Cyprus) με το χαλκό (Cuprous).** Η παραγωγή του χαλκού στην Κύπρο άρχισε πριν το 3000 πρὸ Χριστού και μάλιστα καθιερωμένη. Οι αρχαίοι Κύπριοι εκτός του ότι ήταν δεινοί μεταλλευτές ήταν και επιδέξιοι μεταλλουργοί. Είχαν εντοπίσει σχεδόν όλα τα κοιτάσματα χαλκού που υπέστησαν εκμετάλλευση τα νεότερα χρόνια και μπόρεσαν να εξορύξουν το πλουσιότερο από το μέταλλο τους με υπόγειες μεθόδους εκμετάλλευσης. Ακολούθως, με μεταλλουργικές μεθόδους, που η βάση τους χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα, κατάφεραν να παράγουν μεταλλικό χαλκό υψηλής καθαρότητας (τάλαντα χαλκού).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι τα απόβλητα της μεταλλουργικής κατεργασίας, γνωστά ως σκουριές, έχουν ελάχιστα κατάλοιπα χαλκού. Οι σκουριές απαντώνται συνήθως κοντά στα διάφορα μεταλλεία χαλκού και προστατεύονται από τη νομοθεσία ως αρχαία μνημεία.

Τα νεότερα χρόνια η εκμετάλλευση του χαλκού άρχισε από τη περιοχή της Σκουριώτισσας, γύρω στο 1921 και συνεχίστηκε έντονα μέχρι το 1974. Για την εξόρυξη του μεταλλεύματος χρησιμοποιούνταν τόσο υπόγειες μέθοδοι εκμετάλλευσης όσο και επιφανειακές. Οι κυριότερες υπόγειες μέθοδοι που εφαρμόστηκαν ήταν των οριζόντιων διαδοχικών πατωμάτων, των ορόφων με κατακρήμνιση της οροφής, της πλήρωσης των κενών με λιθογόμωση και της υδραυλικής γόμωσης με χρήση τσιμεντοπολφού που περιείχε απορρίμματα των εργοστασίων εμπλουτισμού. Ενώ από τις επιφανειακές κυρίως εφαρμοζόταν η μέθοδος της κλειστής εκσκαφής με ορθές βαθμίδες, λόγω του τοπογραφικού ανάγλυφου των περιοχών.

## **4.2 Ο Χαλκός σε παγκόσμιο επίπεδο**

Γενικά σε παγκόσμιο επίπεδο, τα δύο μεγαλύτερα και παλαιότερα ορυχεία στον κόσμο είναι τα ορυχεία χαλκού-χρυσού στο ορυχείο Bingham Canyon, το ορυχείο χαλκού-χρυσού της Rio Tinto στη Γιούτα των Ηνωμένων πολιτειών (νοτιοδυτικά του Salt Lake City) και το ορυχείο της Chuquibambilla στη Χιλή. Επίσης το μεγαλύτερο υπόγειο μεταλλείο στον κόσμο, το El Teniente στην Χιλή που αποτελείται από υπόγειες σήραγγες μήκους 3.000 χιλιομέτρων, είναι κι αυτό



μεταλλείο χαλκού. Είναι λογικό, με τα μεγαλύτερα ορυχεία να βρίσκονται εκεί η παραγωγή χαλκού από την Χιλή σε παγκόσμιο επίπεδο να είναι ηχηρή, το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα παρακάτω ΠΙΝΑΚΑ 1 και ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.

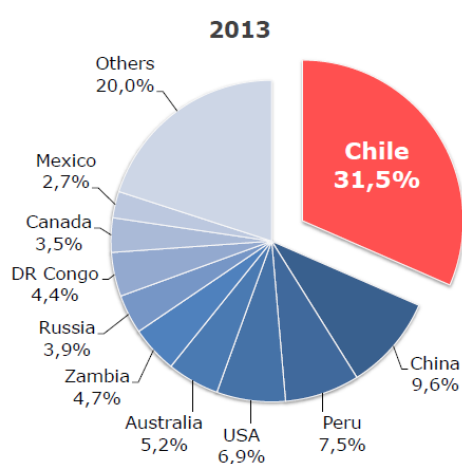
### ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Παραγωγή χαλκού ανά χώρα σε μετρικούς τόνους

#### World copper mine production

In thousand tons and share by country

Country	2012	2013
<b>Chile</b>	<b>5,434</b>	<b>5,776</b>
China	1,642	1,752
Peru	1,299	1,376
USA	1,196	1,268
Australia	914	961
Zambia	782	865
Russia	725	720
DR Congo	608	812
Canada	579	632
Mexico	500	487
Others	3,401	3,665
<b>World total</b>	<b>17,080</b>	<b>18,314</b>

Source: WBMS, Cochilco



### ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: Ποσοστιαία % κατανομή παραγωγής χαλκού ανά χώρα για το 2013

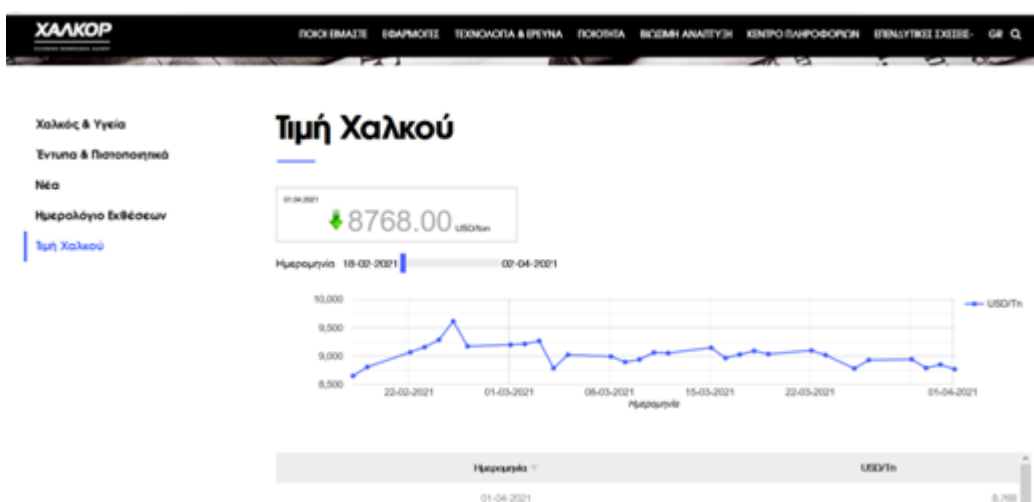
(Πηγή: British Geological Survey copper)

Στη σημερινή εποχή, η εξόρυξη χαλκού σε ορυχεία, παραμένει πολύ σημαντική προκειμένου να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη ζήτηση, η οποία από τα μέσα της δεκαετίας του '60 έχει αυξηθεί πάνω από 250% σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην Αφρικανική Ήπειρο, η Ζάμπια και το Κονγκό παράγουν πάνω από το 10% της παγκόσμιας παραγωγής χαλκού, ενώ στην ΕΕ τα κύρια ορυχεία παραγωγής χαλκού είναι στην Πολωνία, την Πορτογαλία, την Ισπανία και τη Σουηδία. Χαλκό από «αδία» κοιτάσματα παράγει όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω και η Κύπρος στην περιοχή Σκουριώτισσα, χρησιμοποιώντας μάλιστα την μέθοδο της βακτηριακής εκχύλισης σε σωρούς (bacterial heap-leaching).

Αντίθετα με τις παραπάνω χώρες, σήμερα στην Ελλάδα δεν πραγματοποιείται εξόρυξη κατεξοχήν μεταλλευμάτων χαλκού στη Χώρα (πχ. χαλκοπυρίτη, χαλκοσίνη κλπ), με συνέπεια να

μην υπάρχει πρωτογενής παραγωγή (primary production) αυτού από «ίδιες» πρώτες ύλες. Εντούτοις, η χώρα διαθέτει χαλκούχα (και χρυσοφόρα) κοιτάσματα μεικτών θειούχων πορφυριτικού τύπου (σαν αυτά της Χιλής) με περιεκτικότητες σε χαλκό που σήμερα θεωρούνται οικονομικά εκμεταλλεύσιμες. Υπάρχει μάλιστα η πρόβλεψη για την παραγωγή συμπυκνώματος χαλκού-χρυσού (2.500.000 τόνοι) και καθαρού χαλκού (30.000 τόνοι χαλκού/έτος για τα πρώτα 7 έτη επιφανειακής εκμετάλλευσης και 22.000 τόνοι χαλκού/έτος για τα επόμενα 21 έτη υπόγειας εκμετάλλευσης). Αυτό σύμφωνα με τις μελέτες αξιοποίησης του πορφυριτικού κοιτάσματος χαλκού-χρυσού των Σκουριών Χαλκιδικής κι εφόσον φυσικά λειτουργήσει εργοστάσιο εμπλουτισμού και μεταλλουργίας χαλκού. Όμως, παράγουμε δευτερογενή χαλκό (από ανακύκλωση) στην Ελλάδα, αλλά η πολιτεία δεν γνωρίζει ακριβή στοιχεία, καθώς όπως σε κάθε τομέα έτσι και στη μεταλλουργία του χαλκού δεν τηρούνται από όλους οι ενδεδειγμένες διαδικασίες.

Στην Ελλάδα, η εταιρεία με την κυριότερη παρουσία στην εκμετάλλευση χαλκού σε τοπικό και διεθνές επίπεδο είναι η **ΕΛΒΑΛΧΑΛΚΟΡ** ελληνική βιομηχανία Χαλκού και Αλουμινίου Ανώνυμος Εταιρεία. Η εταιρεία είναι ένας κορυφαίος βιομηχανικός παραγωγός διεθνώς στον κλάδο του αλουμινίου και του χαλκού, η οποία συστάθηκε τον Δεκέμβριο του 2017 μέσω της συγχώνευσης της ΕΛΒΑΛ (Eival) μίας από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες έλασης αλουμινίου και της ΧΑΛΚΟΡ (Halcor) του μεγαλύτερου παραγωγού σωλήνων χαλκού στην Ευρώπη. Η εταιρεία είναι εισηγμένη στο χρηματιστήριο και διαπρέπει σε διεθνές επίπεδο.

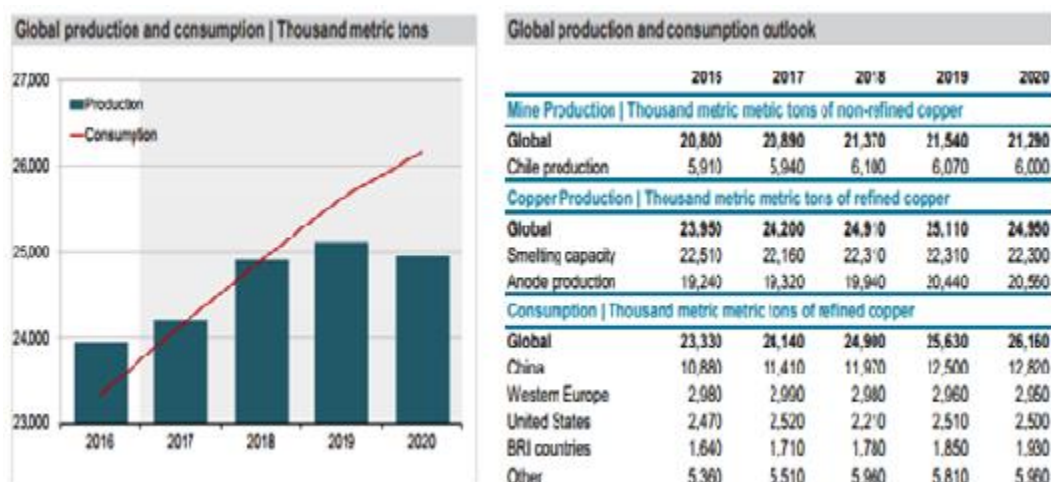


**ΕΙΚΟΝΑ 3: Τιμή χαλκού**

Η νέα εταιρική οντότητα **ΕΛΒΑΛΧΑΛΚΟΡ** αξιοποιεί τις συνέργειες μεταξύ Elval και της Halcor σε σημαντικούς τομείς όπως καινοτομία και τεχνολογία, έρευνα και ανάπτυξη, προμήθειες, αγορά, υποδομές και περιβάλλον και παράγει λύσεις προστιθέμενης αξίας και υψηλής ποιότητας στους πελάτες της σε όλο τον κόσμο. Η επιτυχημένη επιχειρηματική δραστηριότητα της **ΕΛΒΑΛΧΑΛΚΟΡ** βασίζεται στην έντονα εξωστρεφή εμπορική παρουσία της σε παγκόσμιο επίπεδο, τη διαρκή πρωτοπορία της και την συνεχή επένδυση σε έρευνα και τεχνολογία με γνώμονα την πελατοκεντρική φιλοσοφία. Η εταιρεία διαθέτει πάνω από 80 χρόνια εμπειρία και τεχνογνωσία, ισχυρή παραγωγική δράση με 12 εργοστασιακές μονάδες, εμπορική παρουσία σε πάνω από 100 χώρες καθώς και εξειδικευμένο και έμπειρο ανθρώπινο δυναμικό.

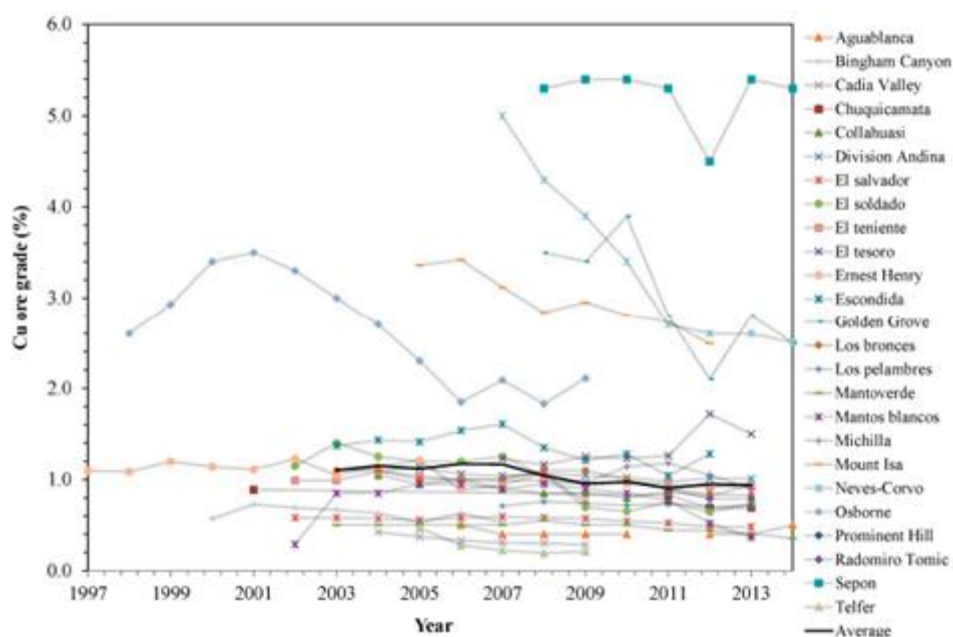
Όπως συνέβη με τα περισσότερα κοιτάσματα, μεταξύ του 2000 και του 2014, η κατανάλωση χαλκού αυξήθηκε μαζικά, ιδίως από αναδυόμενες αγορές όπως για παράδειγμα η Κίνα αλλά και άλλες χώρες. Η κατανάλωση μειώθηκε όμως όπως είναι φυσιολογικό μετά τον τερματισμό του πρώτου κύκλου των κοιτασμάτων. Ωστόσο, από ότι φαίνεται τα επόμενα χρόνια ανεβαίνει ξανά. Αυτό διαπιστώνεται και από τα παρακάτω **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3** και **ΠΙΝΑΚΑ 2** που προέρχονται από έκθεση της Focus Economics Consensus Forecast για τα βασικά μέταλλα και δείχνει τις προβλέψεις παραγωγής έως το 2020.

### **ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Παγκόσμια παραγωγή χαλκού ανά έτος**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: Παγκόσμια παραγωγή χαλκού ανά έτος (Πηγή: Focus Economics Consensus Forecast reports)**

Είναι γεγονός, πώς τις τελευταίες δεκαετίες η ζήτηση του χαλκού έχει αυξηθεί. Από το 1991 μέχρι το 2015 η παγκόσμια συνολική εξαγωγή διπλασιάστηκε από 9,3 εκατομμύρια σε 18,7 εκατομμύρια τόνους. Η Available Data υπολογίζει ότι τα παγκόσμια αποθέματα χαλκού είναι 720 εκατομμύρια τόνοι και οι προσδιορισμένοι πόροι περίπου 2,1 δισεκατομμύρια τόνοι, ενώ άλλες μελέτες υπολογίζουν 2,8 δισεκατομμύρια τόνοι. Προς το παρόν, ο παγκόσμιος μέσος όρος μεταλλεύματος χαλκού, για τα ορυχεία χαλκού, ανέρχεται περίπου στο 0,62% της περιεκτικότητας σε χαλκό. Αυτό το ποσοστό, αναμένεται να μειωθεί, καθώς εξορύσσονται τα ορυχεία με μεγαλύτερες περιεκτικότητες. Ξεκινώντας, από αυτές τις πληροφορίες, η ανησυχία για την μελλοντική διαθεσιμότητα του χαλκού αυξάνεται και αρκετές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην εκτίμηση της παγκόσμιας παραγωγής χαλκού χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Hubert, το οποίο εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 8 και 40 ετών.



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4:** Εκτιμήσεις παραγωγής χαλκού βάσει του μοντέλου Hubert (Πηγή: Article Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? (Guiomar Calvo 1, Gavin Mudd 2, Alicia Valero 1 and Antonio Valero 1))

## **5. Ο ΧΑΛΚΟΣ ΩΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑ**

Το μετάλλευμα του χαλκού βρίσκεται σε όλο το φλοιό της γης. Εμφανίζεται ως ιζηματογενές και ως πυριγενές πέτρωμα. Η εξωτερική επιφάνεια πάχους 10 χιλιομέτρων του φλοιού, περιέχει 33 γραμμάρια χαλκού για κάθε τόνο πετρώματος και σε ορισμένα σημεία, λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητάς πριν από εκατομμύρια χρόνια, υπάρχει και αυτοφυής χαλκός. Αυτές είναι και οι περιοχές που αξιοποιούνται σήμερα για εξόρυξη, επειδή έχουν αρκετή περιεκτικότητα σε χαλκό.

Στη συνέχεια, στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται αναλυτικά τα κυριότερα ορυκτά τα οποία συναντάμε κατά την εκμετάλλευσή του συνοδευόμενες από την περιεκτικότητα σε χαλκό για κάθε περίπτωση ορυκτού.

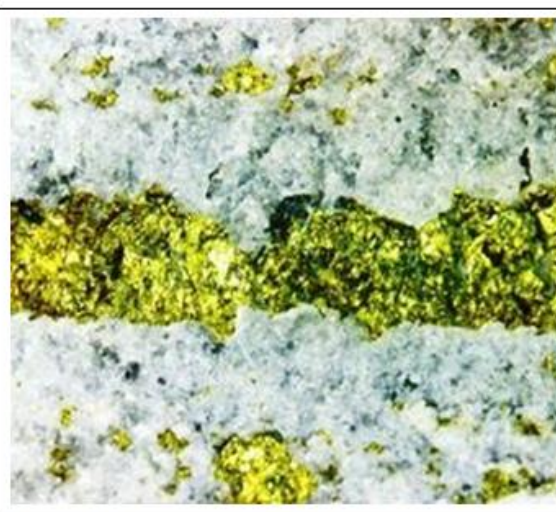
### **ΜΟΡΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝ**



**Εικόνα 4:** Αυτοφυής χαλκός (Cu)

Περιεκτικότητα: Cu 100wt%

Περιγραφή Δείγματος: -



**Εικόνα 5:** Χαλκοπυρίτης (CuFeS<sub>2</sub>)

Περιεκτικότητα: Cu 33,5wt%

Περιγραφή Δείγματος: φλεβίδιο χαλκοπυρίτη σε πορφύρη, Σκουριές Χαλκιδικής, πάχος φλεβίου 0,5cm.





**Εικόνα 6:** Βορνίτης ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ )

Περιεκτικότητα: Cu 63,3wt%

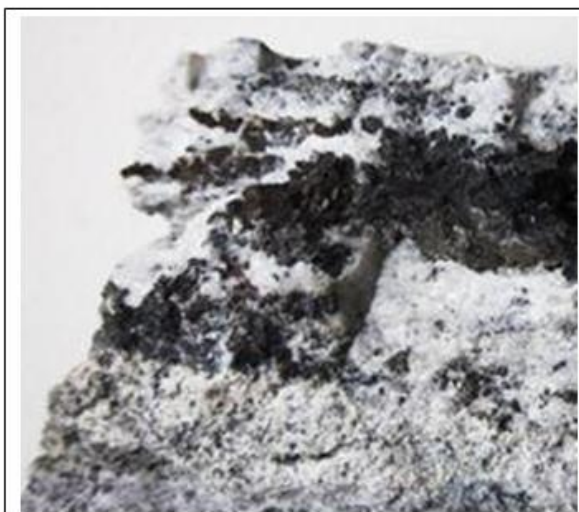
Περιγραφή Δείγματος: Συμπαγές μέταλλωμα Cu-Au με βορνίτη κοίτασμα Chelopech Βουλγαρίας, μέγεθος δείγματος 8cm.



**Εικόνα 7:** Εναργίτης ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ )

Περιεκτικότητα: Cu 48,4wt%

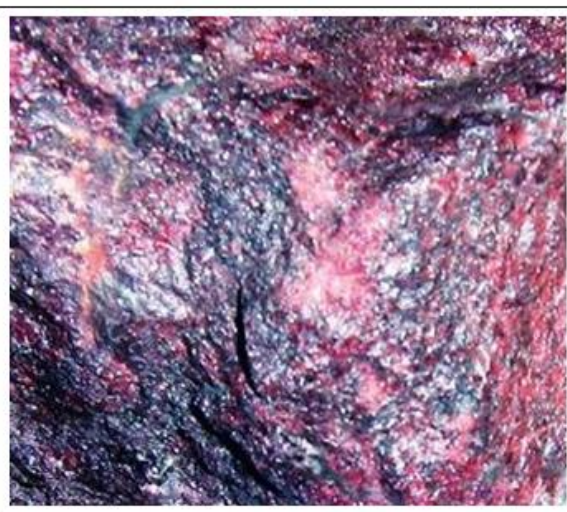
Περιγραφή Δείγματος: Κοίτασμα Chelopech Βουλγαρίας, μέγεθος δείγματος 4cm.



**Εικόνα 8:** Χαλκοσίνης ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )

Περιεκτικότητα: Cu 79,8wt%

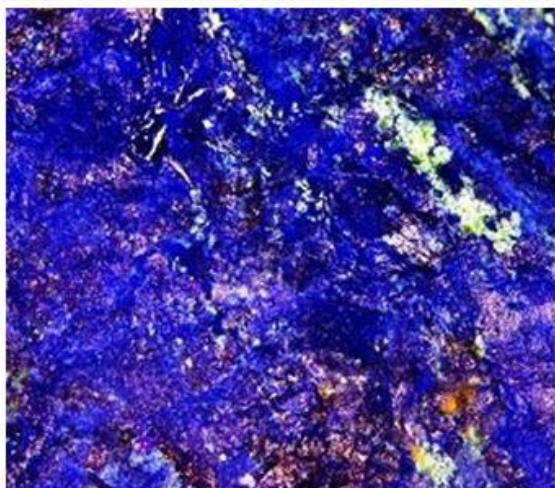
Περιγραφή Δείγματος: Σε χαλαζιακό φλεβίδιο σε πορφύρη, Assarel Βουλγαρίας, πάχος φλεβιδίου 1cm



**Εικόνα 9:** Κυπρίτης ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) Cu

Περιεκτικότητα: Cu 88,8wt%

Περιγραφή Δείγματος: -



**Εικόνα 10:** Αζουρίτης

$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  Περιεκτικότητα: Cu

55,3wt% Περιγραφή Δείγματος:

Λαύριον



**Εικόνα 11:** Μαλαχίτης

$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$  Περιεκτικότητα: Cu

57,48wt% Περιγραφή Δείγματος:

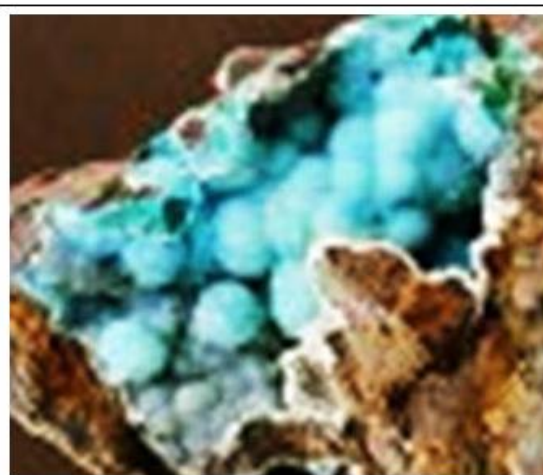
Λαύριον



**Εικόνα 12:** Κοβελλίνης  $\text{CuS}$

Περιεκτικότητα: Cu 66.46wt%

Περιγραφή Δείγματος: -



**Εικόνα 13:** Χρυσόκολλα  $(\text{Cu,Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$

Περιεκτικότητα: Cu 34wt%

Περιγραφή Δείγματος: -



### 5.1 Μονάδα μέτρησης χαλκού

Οι μετρήσεις των διαφόρων μετάλλων γίνονται συνήθως χρησιμοποιώντας το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI), όπως μετρικοί τόνοι (t) ή και γραμμάρια (g). Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται και άλλες μονάδες. Για τον χαλκό χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης η λίβρα (1 short ton=2000 lbs, 1lb= 0,4536kg-453,6g).

### 5.2 Όρια εκμεταλλευσιμότητας χαλκού

Τα όρια εκμετάλλευσης του χαλκού ως προς την περιεκτικότητα έχουν μεταβληθεί με την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Όρια εκμεταλλευσιμότητας χαλκού**

<u>ΕΤΟΣ</u>	<u>ΟΡΙΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟΤΗΤΑΣ</u>
1900	5% Cu
1970	1,1% Cu
<b>Σήμερα</b>	<b>0,5%Cu</b>

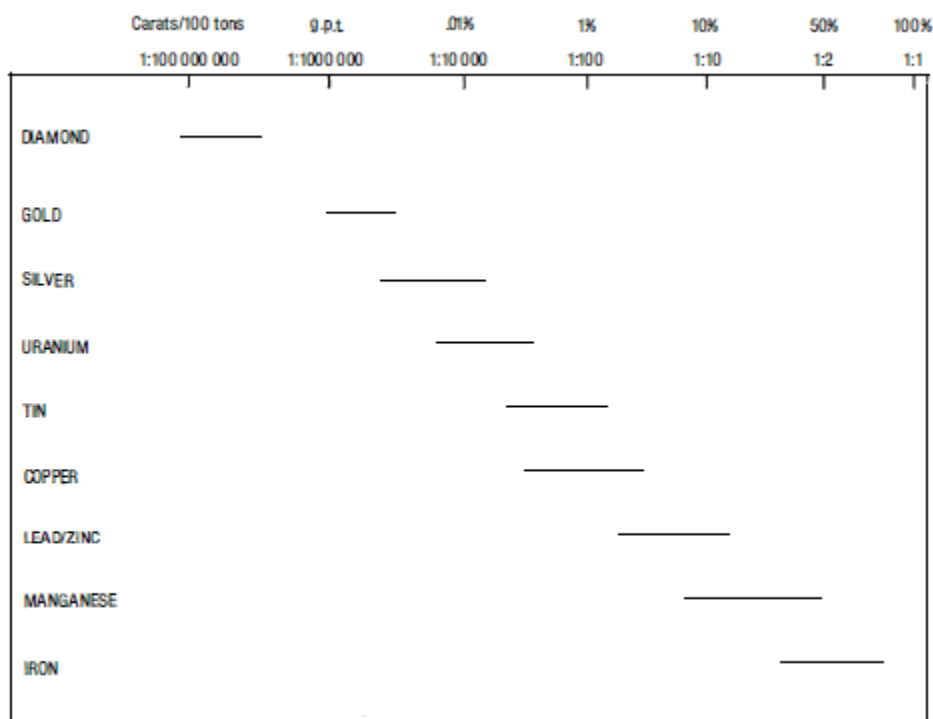
Εξάιρεση αποτελούν τα μεγάλα κοιτάσματα στα οποία το όριο εκμεταλλευσιμότητας κυμαίνεται από 0,3% έως 0,4% Cu.

Για να υπάρχει μια εικόνα μεγέθους αυτών των ποσοστών, το ποσοστό 0,30% Cu αντιστοιχεί σε 840 τόνους χαλκού σ' ένα κοιτάσμα 150,000 τόνων για το οποίο υπάρχει ενδιαφέρον. Το ποσοστό 0,56% ή γενικά πάνω από 0,35% αντιστοιχεί σε περίπου σε 750 τόνους χαλκού σ' ένα κοιτάσμα όπως αναφέρθηκε παραπάνω 150,000 τόνων.

**Προφανώς, αν το πολύτιμο στοιχείο υπάρχει σ' ένα ορυκτό, είναι το περιεχόμενο του ορυκτού το οποίο μας ενδιαφέρει.** Στη περίπτωση του χαλκού για παράδειγμα, σ' ένα κοιτάσμα χαλκοπυρίτη ο χαλκός αποτελεί μόνο το 1/3, παραταύτα, η ποσότητα του χαλκοπυρίτη καθορίζει



την ποσότητα του χαλκού και επομένως είναι στατιστικά σημαντικός. Ομοίως, και για να γίνει κατανοητό ακόμα καλύτερα, τα κύρια μεταλλεύματα σιδήρου περιέχουν περίπου 70% σίδηρο, έτσι ώστε ακόμη και το 100% του ορυκτού θα δώσει μόνο περίπου 70% Fe.

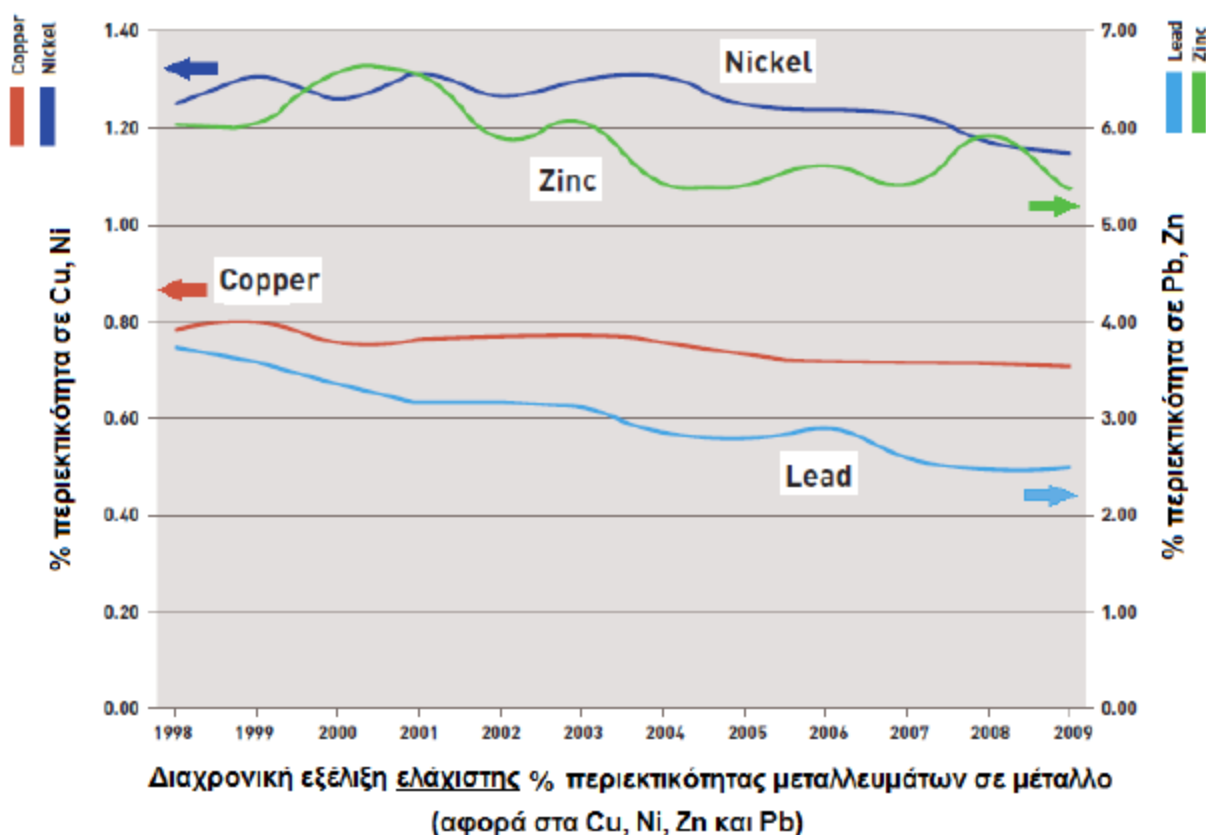


**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: Εύρος περιεχόμενου χρήσιμου μεταλλεύματος (Πηγή: The economic definition fore by Kenneth F. Lane, 1988)**

Το εύρος του χρήσιμου στοιχείου περιέχει χαρακτηριστικά των μεταλλευμάτων ενός αριθμού από διαφορετικά μεταλλεύματα ή ορυκτά. Επίσης, απεικονίζει το εύρος των χρήσιμων στοιχείων σε συνδυασμό με τα εκτιμώμενα αποθέματα μεταλλεύματος.

Με τόσο μεγάλη γκάμα διαφορών στα χαρακτηριστικά τους, στην συμπεριφορά τους και στην επεξεργασία τους για την εκτίμηση των αποθεμάτων των διάφορων μεταλλευμάτων, η διαφορά στην περιεκτικότητα χρήσιμου όπως μας παρουσιάζεται, στο **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5** δεν είναι κάτι το οποίο δεν είναι αναμενόμενο.

Επομένως, είναι φανερό πώς η ποσότητα του πολύτιμου υλικού σ' ένα κοίτασμα είναι αλληλεξάρτηση πολλών παραγόντων. Το ίδιο συμβαίνει και με τον χαλκό λοιπόν όπως και με τα υπόλοιπα μέταλλα. Συνεπώς, είναι φυσικό και επόμενο τα όρια εκμεταλλευσιμότητας να μην μένουν σταθερά. Αυτό, αποδεικνύεται και από το **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6** που ακολουθεί στη συνέχεια.



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6:** Διαχρονική εξέλιξη ελάχιστης % περιεκτικότητας μεταλλευμάτων σε μέταλλο (Πηγή: Σημειώσεις με θέμα: «Μηχανική προπαρασκευή και Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων II», Τσακαλάκης Κωνσταντίνος, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ)

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα ο χαλκός το 1998 είχε ελάχιστη περιεκτικότητα περίπου στο 0,8% και στα επόμενα δέκα χρόνια με εξαίρεση μικρές διακυμάνσεις από το 2000 έως το 2003 είχε μια σταθερή ελάχιστη περιεκτικότητα περίπου στο 0,5% χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μεταλλεύματα, ο μόλυβδος είχε μια παρόμοια πορεία με τον χαλκό επίσης πτωτική στην ελάχιστη περιεκτικότητα, σε αντίθεση με τα άλλα 2

μεταλλεύματα τον ψευδάργυρο και το νικέλιο στα οποία επίσης η ελάχιστη περιεκτικότητα μειώνεται σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια, αλλά στο ενδιάμεσο παρουσιάζουν πολλές διακυμάνσεις αντίθετες μεταξύ τους. Δηλαδή στο νικέλιο αυξάνεται η ελάχιστη περιεκτικότητα του πριν μειωθεί, ενώ στον ψευδάργυρο μειώνεται η ελάχιστη περιεκτικότητα και μετά από μικρές αυξήσεις μειώνεται ξανά.

### **5.3 Εξόρυξη χαλκού**

Το μέταλλευμα εξορύσσεται από το έδαφος είτε σε επιφανειακό μεταλλείο ή σε υπόγεια ορυχεία. Στο εσωτερικό βυθίζεται ένας κάθετος άξονας στη γη, για να φτάσει μέχρι το μέταλλευμα του χαλκού και μετά κατασκευάζονται οριζόντιες σήραγγες που οδηγούν στο μέταλλευμα. Το μεγαλύτερο ποσοστό των μεταλλευμάτων, εξορύσσονται με την χρήση της ανοικτής εκσκαφής (open pit mining). Τα μεταλλεύματα κοντά στην επιφάνεια, εξορύσσονται με την αποκάλυψη των επιφανειακών υπερκείμενων στρωμάτων.

### **5.4 Παραγωγή χαλκού**

Όταν τα μεταλλεύματα χαλκού περιέχουν μεταλλικό χαλκό πάνω από 5-6%, υπόκεινται σε κατευθείαν μεταλλουργική κατεργασία δια της οποίας ανακτάται ο μεταλλικός χαλκός. Όταν όμως είναι πτωχά μεταλλεύματα είναι απαραίτητο να εμπλουτιστούν.

Όσον αφορά στη μεταλλουργική κατεργασία του υπάρχουν δύο κύριες τεχνολογίες. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Υδρο-μεταλλουργική
- ✓ Πυρο-μεταλλουργική.

Η πυρο-μεταλλουργική μέθοδος περιλαμβάνει τη θερμική επεξεργασία συνήθως θειούχων συμπυκνωμάτων για την παραλαβή μη καθαρού μετάλλου (matte Cu) και σκωρίας. Λόγω αυτού, το μέταλλευμα μπορεί να υποστεί επεξεργασία σε σχεδόν οποιονδήποτε όγκο. Επιπλέον, η θερμική κατεργασία (συνήθως φρύξη) καθιστά δυνατή την «απομόνωση» σχεδόν όλων των χρήσιμων συστατικών από το μέταλλευμα ή το συμπύκνωμα. Στη συνέχεια, η matte υποβάλλεται σε περαιτέρω καθαρισμό με εμφύσηση O<sub>2</sub> για την παραγωγή αργού χαλκού και σκωρίας. Ο αργός χαλκός χυτεύεται σε ανόδους. Η πυρο-μεταλλουργική τεχνολογία χρησιμοποιείται για την

εξαγωγή χαλκού από συμπυκνώματα, ο οποίος έχει χαμηλό βαθμό εμπλουτισμού μετάλλων. Η υδρο-μεταλλουργική μέθοδος χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την επεξεργασία οξειδωμένων και φυσικών πετρωμάτων, τα οποία έχουν επίσης χαμηλή συγκέντρωση χαλκού.

### **5.5 Εμπλουτισμός χαλκού**

Στον όρο εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων περιλαμβάνονται όλες εκείνες οι κατεργασίες που εφαρμόζονται στο εξορυσσόμενο μέταλλευμα με στόχο την αύξηση της περιεκτικότητάς του στο χρήσιμο ή τα χρήσιμα συστατικά που περιέχει. Η αύξηση της περιεκτικότητας επιτυγχάνεται με την απομάκρυνση μέρους του άχρηστου («στείρου» όπως ονομάζεται) υλικού, το οποίο πάντα συνυπάρχει στο μέταλλευμα που εξορύσσεται.

Με τον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων παραλαμβάνονται από το αρχικό υλικό συνήθως δύο ή περισσότερα προϊόντα μικρότερης μάζας. Ένα από τα προϊόντα έχει αυξημένη περιεκτικότητα στο χρήσιμο ή τα χρήσιμα συστατικά (συμπύκνωμα) και επίσης προκύπτει ένα υλικό το οποίο καλείται απόρριμμα με μειωμένη περιεκτικότητα στο χρήσιμο συστατικό σε σχέση με την αρχική τροφοδοσία. Η ανάγκη εφαρμογής των κατεργασιών του εμπλουτισμού επιβάλλεται για λόγους:

- ✓ καλύτερης εμπορευσιμότητας των προϊόντων
- ✓ μείωσης του κόστους μεταφοράς στη μεταλλουργία,
- ✓ μείωσης του κόστους της μεταλλουργικής κατεργασίας,
- ✓ μείωσης των απωλειών σε χρήσιμο συστατικό στη σκουριά (απόρριμμα της μεταλλουργικής κατεργασίας)
- ✓ από τις προδιαγραφές που θέτει η μεταλλουργία η οποία θα κατεργαστεί το πλούσιο υλικό και θα παραχθεί το τελικό προϊόν (μέταλλο).

#### **5.5.1 Υδρομεταλλουργική κατεργασία χαλκού**

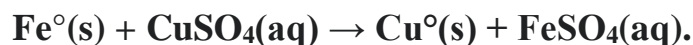
Εκμετάλλευση φτωχού σε χαλκό μεταλλεύματος, κυρίως οξειδίων, γίνεται με την μέθοδο της Εκχύλισης (Leaching), η οποία αποτελεί προ-στάδιο της υδρομεταλλουργίας. Αυτή η μέθοδος εμπλουτισμού, βασίζεται στη διαλυτοποίηση και εξαγωγή του χαλκού από το μέταλλευμα

συνήθως με χρήση οξέων (π.χ. αραιού  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Εναλλακτικά, ονομάζεται και βιοχημική εκχύλιση ή απόπλυση. Αυτό το είδος εμπλουτισμού ανήκει στην υδρο-μεταλλουργία.

Η υδρο-μεταλλουργία είναι ο κλάδος της εξαγωγικής μεταλλουργίας που ασχολείται με την παραγωγή (εξαγωγή) μετάλλων, κραμάτων ή καθαρών χημικών ενώσεων μεταλλικών στοιχείων από ορυκτά ή άλλες πρώτες ύλες, με χρήση υδατικών διαλυμάτων σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Το μέταλλο ή κράμα ή χημική ένωση συνήθως ανακτάται με ηλεκτρόλυση ή με κατακρήμνιση εντός του διαλύματος. Υδρο-μεταλλουργικές διεργασίες χρησιμοποιούνται μόνον για την παραγωγή μη σιδηρούχων μετάλλων όπως ο χαλκός αλλά και μέταλλα όπως το νικέλιο, το κοβάλτιο, ο μόλυβδος, ο χρυσός και ο άργυρος. Σε μερικές περιπτώσεις, υδρο-μεταλλουργικές διεργασίες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με πυρο-μεταλλουργικές, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του αλουμινίου ή του ψευδαργύρου.

Συγκεκριμένα για τον χαλκό, η πρώτη εφαρμογή της υδρο-μεταλλουργίας σε βιομηχανική κλίμακα πραγματοποιήθηκε στα μέσα του 18<sup>ου</sup> αιώνα στην Ισπανία για την εκμετάλλευση μεταλλευμάτων χαλκού κοντά στον ποταμό Ρίο Τίντο («Κόκκινος Ποταμός»). Ήδη από την εποχή της Αναγέννησης, οι μεταλλωρύχοι του Ρίο Τίντο είχαν παρατηρήσει, ότι όταν άφηναν τα θειούχα χαλκο-μεταλλεύματα που εξόρυσσαν στην περιοχή για καιρό εκτιθέμενα στον αέρα, τότε από τα νερά της βροχής δημιουργούνταν κοντά στους σωρούς των χαλκο-μεταλλευμάτων, «βιτριόλι». Δηλαδή, είχε δημιουργηθεί ένα διάλυμα θειϊκού οξέος ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), δισθενούς θειϊκού σιδήρου ( $\text{FeSO}_4$ ) και θειϊκού χαλκού ( $\text{CuSO}_4$ ). Οι Ισπανοί μεταλλωρύχοι άρχισαν να παράγουν συστηματικά μεταλλικό χαλκό λοιπόν, από το «βιτριόλι», με την προσθήκη μεταλλικού σιδήρου.

Η χημική αντίδραση που περιγράφει το παραπάνω είναι η ακόλουθη:



Σήμερα, η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάκτηση χαλκού με την συγκεκριμένη μέθοδο είναι η εξής:

1. Πρώτα ψεκάζεται το χαλκούχο μέταλλευμα με θειϊκό οξύ. Το θειϊκό οξύ προσροφάται και διέρχεται μέσα από τον σωρό και διαλύει τον χαλκό.
2. Στη συνέχεια το μεταλλοφόρο διάλυμα συλλέγεται σε δεξαμενή.

3. Το διάλυμα μεταφέρεται σε μία εγκατάσταση για να εξαχθεί ο οργανικός διαλύτης όπου μετά από αντίδραση σχηματίζονται σύμπλοκα διαλυμένα σε μία οργανική φάση.

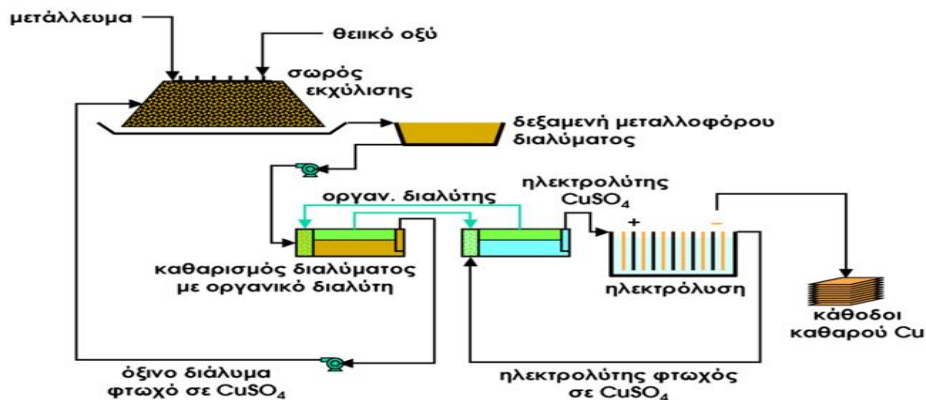
4. Η κορεσμένη με χαλκό οργανική φάση συνεχίζει στην εγκατάσταση απελευθέρωσης, εκεί έρχεται σε επαφή με τον οργανικό όξινο διαλύτη που επανεξάγει το χαλκό στην υδατική φάση που έχει ως αποτέλεσμα να σχηματιστεί ένα πυκνό και καθαρό διάλυμα. Ο οργανικός διαλύτης αναγεννάται και επιστρέφει στο 3ο στάδιο.

5. Ο ηλεκτρολύτης αντλείται σε κελιά ηλεκτρανάκτησης, στις καθόδους εκεί όπου αποτίθεται ο χαλκός με καθαρότητα 99,9%. Το οξύ που παράγεται επιστρέφει στο στείρο ηλεκτρολύτη στο 4 στάδιο.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι:

- ✓ χρειάζεται λιγότερη ενέργεια από ό,τι στην παραδοσιακή εξόρυξη και «εμπλουτιστική» διαδικασία
- ✓ δεν εκπέμπονται αέρια απόβλητα (π.χ.  $\text{SO}_2$ )
- ✓ χαμηλή επένδυση κεφαλαίου,
- ✓ ικανότητα να λειτουργήσει οικονομικότερα σε μικρότερη κλίμακα (για μικρότερη δυναμικότητα).

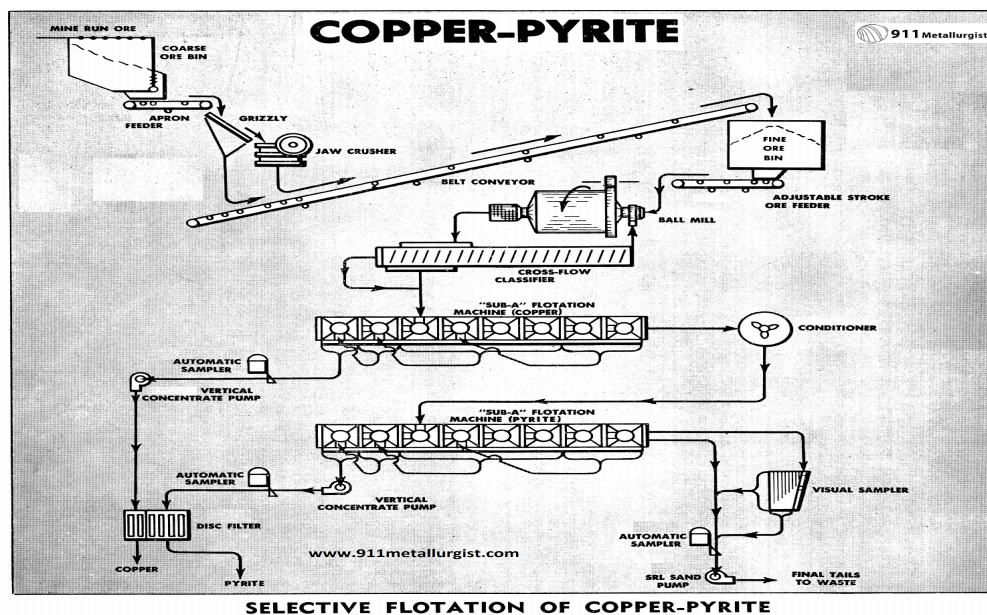
Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορυκτό με λιγότερο από 0,1% χαλκό και για αυτό τον λόγο η εξόρυξη με απόπλυση κερδίζει έδαφος. Εκτιμάται ότι το 2011 η μέθοδος αυτή αντιπροσώπευσε το 17% της συνολικής παραγωγής για την καθαρότητα του χαλκού. Μια αναπαράσταση την όλης διαδικασίας του εμπλουτισμού με χρήση οξέων ακολουθεί στην εικόνα:



**ΕΙΚΟΝΑ 14:** Απευθείας εξαγωγή χαλκού από το μετάλλευμα με υδρομεταλλουργική μέθοδο (εκχύλιση σε σωρούς)

### 5.5.2 Ανάκτηση χαλκού με την μέθοδο της εκλεκτικής επίπλευσης

Ο εμπλουτισμός θειούχων μεταλλευμάτων χαλκού γίνεται συνήθως με τη μέθοδο της Εκλεκτικής Επίπλευσης (Flotation).



**ΕΙΚΟΝΑ 15:** Εκλεκτική επίπλευση χαλκοπυρίτη

Η επίπλευση είναι η πιο σύγχρονη και αποδοτική μέθοδος εμπλουτισμού μετά τον αυτόματο οπτικό διαχωρισμό. Ανακαλύφθηκε στις αρχές του 20ού αιώνα. Ο διαχωρισμός κατά την

επίπλευση στηρίζεται στην διαφορά των επιφανειακών ιδιοτήτων, δηλαδή υδρόφιλο-υδρόφοβο ανάμεσα στο μέταλλευμα και το στείρο. Βέβαια, ορισμένα άλλα ορυκτά, γίνονται υδρόφοβα με κατάλληλη προοδοποίηση.

Η προοδοποίηση, είναι μέρος της διαδικασίας του εμπλουτισμού και η μέθοδος που ακολουθείται είναι η προσθήκη κατάλληλων αντιδραστηρίων που αλλάζουν τις επιφανειακές ιδιότητες των ορυκτών, για να προχωρήσει με αυτόν τον τρόπο πιο εύκολα στην επίπλευση.

Η ίδια η διαδικασία επίπλευσης είναι βασισμένη σε πολλές βασικές διεργασίες, οι οποίες διαφέρουν σε επίπεδο τόσο πολυπλοκότητας όσο και κόστους. Το απλούστερο και συνάμα φθηνότερο σύστημα προβλέπει τη μετάβαση σε έναν ανοικτό κύκλο επεξεργασίας μεταλλεύματος, την ελάττωση μεγέθους (θραύση) των μεταλλεύματων σε ένα στάδιο, καθώς και την επακόλουθη διαδικασία λειοτρίβησης.

Συγκεκριμένα τώρα, στα σουλφίδια του χαλκού όπου προτιμάται να εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος εμπλουτισμού, σχηματίζουν λεπτές μεμβράνες (covellite) σε πυρίτη. Λόγω της πολυπλοκότητας της χημικής σύνθεσης, η δυνατότητα πλεύσης αυτού του μεταλλεύματος ελαττώνεται κάπως. Μια αποτελεσματική διαδικασία εμπλουτισμού απαιτεί προσεκτική λειοτρίβηση του μεταλλεύματος προκειμένου να διευκολυνθεί η αποδέσμευση (liberation) των ορυκτών του χαλκού στο στείρο των σουλφιδίων του χαλκού. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε πολλές περιπτώσεις, η λεπτομερής λειοτρίβηση δεν είναι αναγκαία ή μπορεί ακόμη να δημιουργεί και προβλήματα στον εμπλουτισμό.

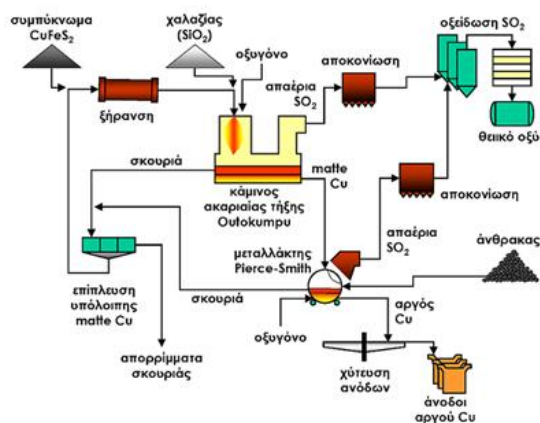
Μια βασική διαφορά, της μεθόδου εκλεκτικής επίπλευσης σε σχέση με τον υδρομεταλλουργική επεξεργασία (εκχύλιση) με την χρήση οξέων, είναι ότι η συνέχεια της επεξεργασίας στην πρώτη περίπτωση είναι η πυρομεταλλουργική επεξεργασία του συμπυκνώματος, ενώ στην υδρομεταλλουργική επεξεργασία όπως αναλύθηκε και παραπάνω ακολουθεί ηλεκτρόλυση.

Η τήξη του μεταλλεύματος γίνεται με πυρο-μεταλλουργικές διαδικασίες. Δηλαδή, ξεκινάει με την φρύξη του μεταλλεύματος. Η φρύξη του μεταλλεύματος έχει σκοπό να μετατρέψει τις κύριες στερεές φάσεις της τροφοδοσίας (μεταλλεύματος ή συμπυκνώματος), σε άλλες φάσεις που είναι πιο εύκολα κατεργάσιμες. Ανάλογα με το προϊόν της διεργασίας αυτής, γίνεται λόγος για **οξειδωτική φρύξη** (παραγωγή οξειδίων), **αναγωγική φρύξη** (μερική ή ολική αναγωγή μεταλλικών ενώσεων), **θειωτική φρύξη** (παραγωγή θειικών ενώσεων), **χλωριωτική φρύξη**



(παραγωγή χλωριούχων ενώσεων). Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για τη φρύξη μεταλλευμάτων και συμπυκνωμάτων είναι συνεχούς λειτουργίας, όπως η θερμαινόμενη αλυσιδωτή κάμιнос (κάμιнос Dwight–Lloyd), η κατακόρυφη περιστροφική κάμιнос πολλών δαπέδων (κάμιнос Nichols–Herreshoff) και η κάμιнос ρευστοστερεάς κλίνης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αναγωγή γίνεται σε στερεά κατάσταση, όπως συμβαίνει για παράδειγμα κατά την παραγωγή σπογγώδους σιδήρου σε ειδικές φρεατώδεις καμίνοους. Όμως πιο συχνά, η αναγωγή των μεταλλικών ενώσεων γίνεται στην υγρή κατάσταση.

Για παράδειγμα, με την αναγωγή σιδηρο-μεταλλευμάτων στην υψικάμινο προκύπτει ρευστός χυτοσίδηρος. Μαζί με το αργό μέταλλο παράγεται και μία άλλη φάση, η σκουριά, η οποία είναι μείγμα τηγμένων οξειδίων, που ως ελαφρύτερα δεν αναμειγνύονται με το τηγμένο μέταλλο και επιπλέουν πάνω από αυτό. Έτσι, η απόχυση και παραλαβή του μετάλλου γίνεται χωριστά από τη σκουριά. Σε μερικές περιπτώσεις, πριν την παραγωγή του αργού μετάλλου παράγεται μια ενδιάμεση φάση, η οποία είναι το αποτέλεσμα της μερικής αναγωγής της τροφοδοσίας. Για παράδειγμα, με την αρχική αναγωγή θειούχων μεταλλευμάτων του χαλκού, παράγεται μια φάση που καλείται matte και η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μείγμα θειούχου χαλκού ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) και θειούχου σιδήρου ( $\text{FeS}$ ). Ως αντιδραστήρες αναγωγής χρησιμοποιούνται συνήθως φρεατώδεις κάμινοι, κάμινοι ανοικτής εστίας ή έμφλογες κάμινοι, καθώς και ηλεκτρικές κάμινοι.



**ΕΙΚΟΝΑ 16:** Διάγραμμα πυρομεταλλουργικής επεξεργασίας για την παραγωγή αργού χαλκού

Το τήγμα που προκύπτει από την πρώτη αναγωγή καθαρίζεται πριν ακόμα στερεοποιηθεί σε μεγάλους μεταλλουργικούς κάδους που αποκαλούνται μεταλλάκτες. Με εμφύσηση οξυγόνου σε μεταλλάκτες Pierce–Smith, η matte μορφή του χαλκού μετατρέπεται σε αργό χαλκό.

Περαιτέρω καθαρισμός του τήγματος γίνεται με προσθήκες αντιδραστηρίων, ώστε να δημιουργηθούν νέες ενώσεις που επιπλέουν πάνω στο τήγμα και ξαφρίζονται.

## **6. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΧΑΛΚΟΥ**

Η βελτίωση του βαθμού ανάκτησης του χαλκού είναι δυνατή όπως και σε άλλα μεταλλεύματα. Αυτό πραγματοποιείται με την μέθοδο του προ-εμπλουτισμού. Η διαδικασία η οποία εφαρμόζεται ονομάζεται θραύση και αποδέσμευση και στηρίζεται στην απομάκρυνση του <<στεύρου>> στα αρχικά στάδια και απόληψη ενός ακόμη προϊόντος μικτών τεμαχίων, τα οποία συνήθως επανεπεξεργάζονται μετά από τη περαιτέρω ελάττωση μεγέθους, για τη βελτίωση της περιεκτικότητάς τους σε χρήσιμο συστατικό.

### **6.1 Θραύση-Αποδέσμευση**

Ο αντικειμενικός στόχος της θραύσης (κατάτμηση ή ελάττωση μεγέθους) είναι η αποδέσμευση (liberation) ή ο μηχανικός αποχωρισμός (με μηχανήματα θραύσης-λειοτρίβησης) των χρήσιμων συστατικών ενός μεταλλεύματος από τα πάντα συνοδευόμενα στείρα υλικά στο μεγαλύτερο όμως δυνατό μέγεθος τεμαχίων.

Όσον αναφορά, την αποδέσμευση, βαθμός αποδέσμευσης του χρήσιμου συστατικού ή του στεύρου καλείται το ποσοστό (κατά βάρος) των ελεύθερων («καθαρών») τεμαχίων, που προκύπτουν μετά από ελάττωση μεγέθους προς το συνολικό περιεχόμενο της αντίστοιχης φάσης σε ένα μέταλλευμα.

Ο βαθμός αποδέσμευσης μπορεί να είναι μεγάλος, ιδιαιτέρως σε μεταλλεύματα που έχουν προκύψει από ιζηματογένεση λόγω αποκόλλησης μεταξύ τους στις επιφάνειες επαφής. Στην πραγματικότητα όμως, σχεδόν πάντοτε υπάρχει ισχυρή πρόσφυση του ενός στο άλλο. Οπότε, κατά τη διεργασία θραύσης, οι δυο φάσεις δεν αποκολλιούνται αλλά «σχίζονται» στα σημεία

αδυναμίας ή ασυνεχειών του υλικού, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μικτά κομμάτια (χρήσιμου συστατικού και <<στείρου>>) και ο βαθμός αποδέσμευσης είναι μικρός.

Υπάρχει όμως σημαντική διαφοροποίηση όσον αναφορά τον βαθμό αποδέσμευσης. Υπάρχουν μέθοδοι εμπλουτισμού (π.χ. μαγνητικός διαχωρισμός ή βαρυτομετρικές μέθοδοι εμπλουτισμού) όπου δεν είναι απαραίτητος ο μεγάλος βαθμός αποδέσμευσης. Στις περιπτώσεις αυτές ακόμη και μικρές φυσικο-χημικές διαφορές του χρήσιμου συστατικού από το <<στείρο>> (για παράδειγμα μαγνητική συμπεριφορά του ενός ή διαφορά πυκνότητας μεταξύ των φάσεων και άλλα) είναι ικανές να οδηγήσουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή στην απομόνωση (σε μορφή μικτών ή ενδιάμεσων τεμαχίων) του περιεχόμενου χρήσιμου συστατικού από το <<στείρο>>. Αντιθέτως, όταν η κατανομή του χρήσιμου συστατικού μέσα στο <<στείρο>> επιβάλει τη λεπτομερή κατάτμηση και πρόκειται να εφαρμοστεί για παράδειγμα επίπλευση ως μέθοδος εμπλουτισμού ή υδρο-μεταλλουργική κατεργασία του μεταλλεύματος, ο μεγάλος βαθμός αποδέσμευσης, που απαιτεί πολλά στάδια κατάτμησης (θραύσεις και λειοτρίβηση) είναι ουσιαστικός παράγοντας επιτυχίας του διαχωρισμού. Και αυτό επειδή οι «φάσεις» του χρήσιμου συστατικού ή του <<στείρου>> και στις δυο περιπτώσεις πρέπει να «εκτίθενται» στα αντιδραστήρια που θα χρησιμοποιηθούν για να μπορούν αυτά να δράσουν αποδοτικά πάνω στα τεμάχια του χρήσιμου συστατικού ή του <<στείρου>>.

Όπως είναι κατανοητό, στη περίπτωση του χαλκού οι μέθοδοι εμπλουτισμού που χρησιμοποιούνται είναι αυτές στις οποίες ο βαθμός αποδέσμευσης παίζει σημαντικό ρόλο για την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.

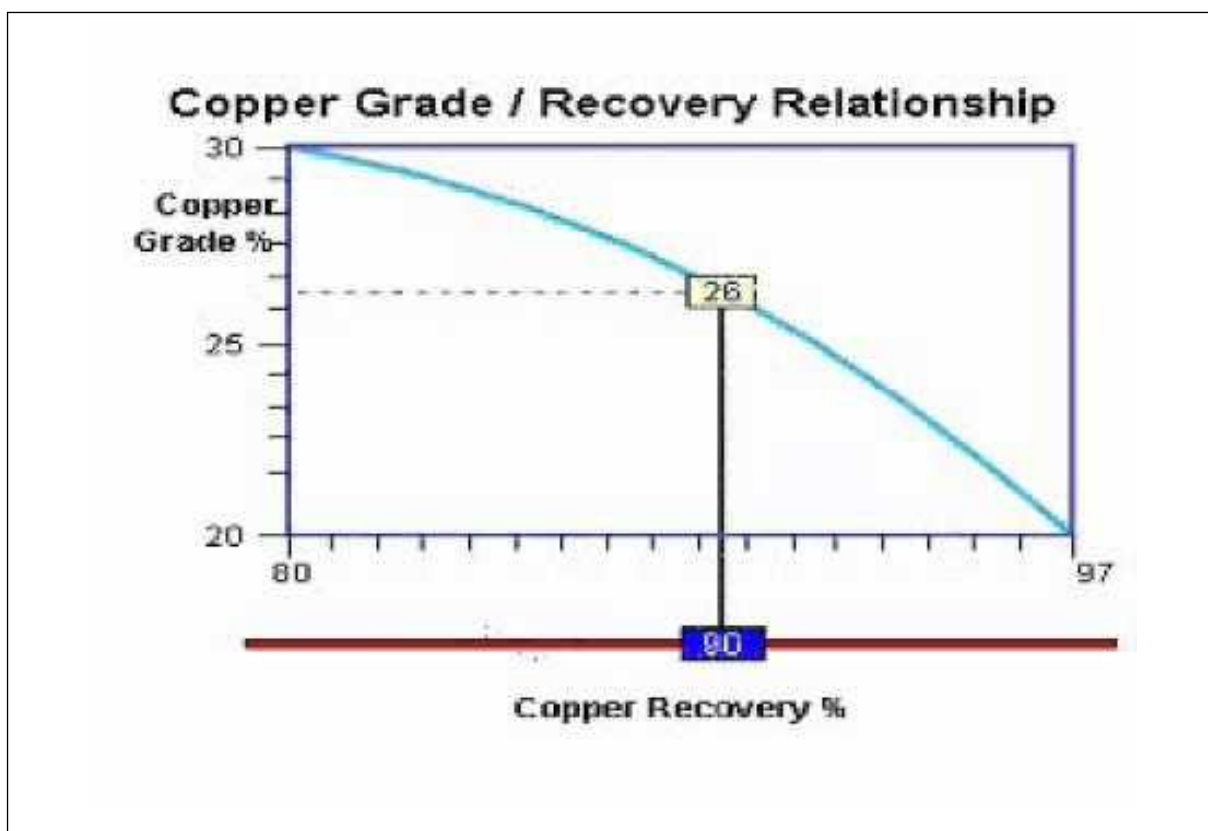
## **6.2 Οριακή % περιεκτικότητα και χαλκός**

Ο καθαρός χαλκός Cu% στον χαλκοπυρίτη και συγκεκριμένα στο συμπύκνωμα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 22% και 32%. Ενώ ο καθαρός χαλκοπυρίτης περιέχει 34,6% χαλκό.

Όπως είναι λοιπόν φανερό, η περιεκτικότητα στο συμπύκνωμα και η ανάκτηση είναι μεγέθη αλληλεξαρτώμενα. Σε μια σωστή μονάδα διαχωρισμού υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ συμπυκνώματος και ανάκτησης. Εάν η περιεκτικότητα στο συμπύκνωμα του ενός προϊόντος αυξάνεται, η ανάκτηση συνήθως μειώνεται.

Όμως, περιεκτικότητα στο συμπύκνωμα και ανάκτηση μπορούν και τα δύο να αυξηθούν βελτιώνοντας τον βαθμό αποδέσμευσης. Βελτιώνοντας τον βαθμό αποδέσμευσης, μειώνουμε την ποσότητα κόκκων σε πολύτιμα ορυκτά, τα οποία είναι εγκλωβισμένα σε συσσωματώματα. Βαθμός αποδέσμευσης και ανάκτηση συντελούν μ' αυτόν τον τρόπο στην μεγιστοποίηση του κέρδους.

Ο χαλκός λοιπόν είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτής της αλληλεξάρτησης όπως φαίνεται και το **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7** που ακολουθεί.



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7:** % ανάκτηση Cu σε σχέση με την οριακή περιεκτικότητα στο συμπύκνωμα (Πηγή: Σημειώσεις με θέμα: «Μηχανική προπαρασκευή και Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων II», Τσακαλάκης Κωνσταντίνος, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ)

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:**

- ✓ Όσο η αποδεκτή % περιεκτικότητα σε Cu στο συμπύκνωμα (απαίτηση) αυξάνεται τόσο η % ανάκτηση σε Cu μειώνεται.
- ✓ Όσο η % περιεκτικότητα σε Cu μειώνεται τα ποσοστά % ανάκτησης του χαλκού αυξάνονται.

**7. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ**

Η εξόρυξη χαλκού είναι μια περίπλοκη διαδικασία όπως φαίνεται και από τις παραπάνω πληροφορίες και αναλύσεις όσων αφορά στα βασικά βήματα τα οποία ακολουθούνται. Οπότε σ' αυτό το σημείο παρατίθενται επιγραμματικά τα βασικά βήματα επεξεργασίας του χαλκού από την αρχή μέχρι και τέλος.

**Η Εξόρυξη του χαλκού ξεκινά με την αναζήτηση**, όπου οι γεωλόγοι χρησιμοποιούν εξελιγμένες τεχνικές όπως δειγματοληψία για να προσδιορίσουν εάν μια περιοχή της γης έχει αρκετό χαλκό για να κάνει την εξόρυξη οικονομικά βιώσιμη ή με άλλα λόγια <<αν αξίζει τον κόπο>> για την εταιρεία που πραγματοποιεί την εξόρυξη να προχωρήσει στην επένδυση. Μόλις επιβεβαιωθεί η παραπάνω συνθήκη, ο χαλκός εξορύσσεται από μαζικά επιφανειακά μεταλλεία με την μορφή μεταλλεύματος. Αφού ληφθεί το μετάλλευμα από το ορυχείο, τότε πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία για την εξαγωγή χαλκού. Το μετάλλευμα συνθλίβεται και αλέθεται για να απελευθερώσει τα επιθυμητά ορυκτά από τα απόβλητα ορυκτά, επίσης γνωστά ως <<ορυκτά γαγκού>>. Αυτό που μένει είναι το ψήσιμο σε φούρνους για την παραγωγή ματ χαλκού, το οποίο είναι ουσιαστικά λιωμένο ορυκτό. Στη συνέχεια, πρέπει να τελειοποιηθεί μέσω διάφορων άλλων διαδικασιών, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρόλυσης, για να διαχωριστεί ο χαλκός από τα άλλα ορυκτά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την απόδοση 99,9% καθαρού χαλκού. Στο **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8** παρουσιάζεται συνοπτικά όλη η διαδικασία επεξεργασίας του χαλκού.

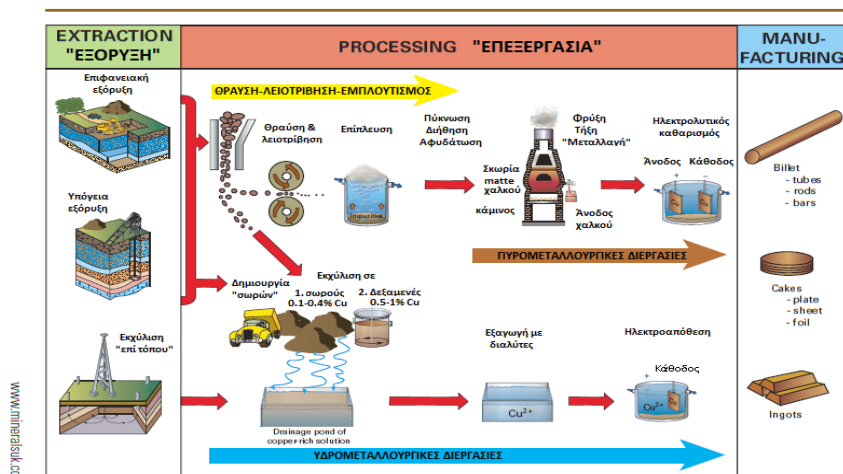


Figure 3 Copper processing from extraction to manufacture.

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας Cu (Πηγή: [www.mineralsuk.com](http://www.mineralsuk.com))

### 8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΧΑΛΚΟΥ

Τα αποθέματα, ανάλογα με το βαθμό βεβαιότητας διακρίνονται σε βέβαια, πιθανά και δυνατά. Ο υπολογισμός της περιεκτικότητας και της εκτίμησης των αποθεμάτων ενός κοιτάσματος όπως και του χαλκού αποτελεί ένα ιδιαίτερα κρίσιμο στάδιο στη διαδικασία του σχεδιασμού μιας εκμετάλλευσης.

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του κοιτάσματος, τη σχεδιαζόμενη μέθοδο εκμετάλλευσης, τον απαιτούμενο βαθμό ακρίβειας καθώς και με το πλήθος και τη μορφή των δεδομένων που έχουν προκύψει από την προηγηθείσα έρευνα. Οι τοπικές μέθοδοι εκτίμησης που βασίζονται στη γεωστατιστική (Kriging) είναι σήμερα οι επικρατούσες αφού υπερέχουν σε ακρίβεια των άλλων (γεωμετρικές, αριθμητικές) και παρέχουν τη δυνατότητα εκτίμησης σφάλματος.

Η γνώση των αποθεμάτων και της μέσης περιεκτικότητας του κοιτάσματος χαλκού αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για την αξιολόγηση και την αξιοποίηση του. Η λεπτομερής γνώση του κοιτάσματος αποτελεί το απαραίτητο υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα στηριχθεί η απόφαση για τις επενδύσεις καθώς και ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης. Από την κατανομή της περιεκτικότητας και των αποθεμάτων στο χώρο, θα αποφασιστεί η μέθοδος εκμετάλλευσης, ο

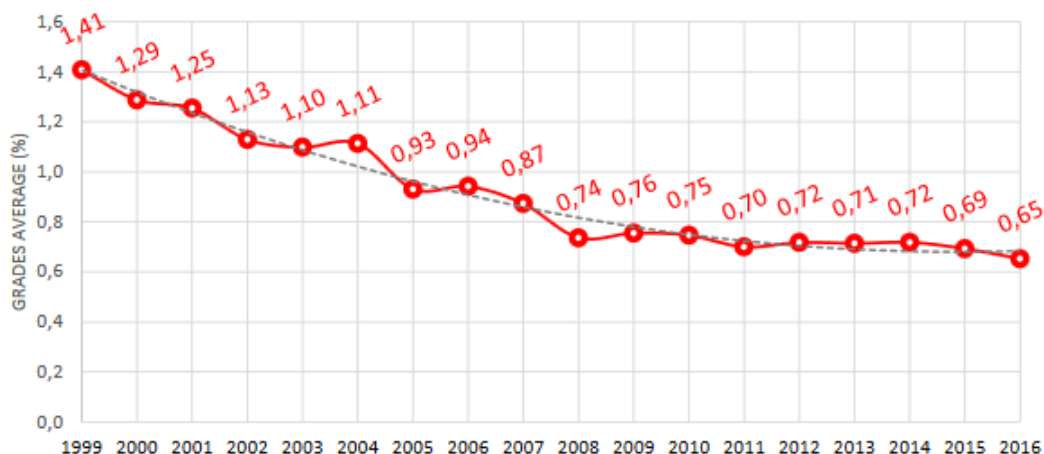
τρόπος προσπέλασης, ο προγραμματισμός της παραγωγής, το μέγεθος της επιχείρησης και άλλα. Οι μέθοδοι υπολογισμού των αποθεμάτων μπορούν να διακριθούν στις ακόλουθες δύο βασικές κατηγορίες, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά στα θεμελιώδη στοιχεία τους:

1. Συμβατικές μέθοδοι
2. Μαθηματικο-στατιστικές μέθοδοι

### **8.1 Ορισμός οριακής περιεκτικότητας μεταλλεύματος**

Σ' αυτό το σημείο δεν γίνεται να μην γίνει σαφές ποιά είναι η έννοια της οριακής περιεκτικότητας, καθώς είναι παράγοντας ιδιαίτερα σημαντικός στον υπολογισμό των αποθεμάτων. **Η οριακή περιεκτικότητα είναι η ελάχιστη απαιτούμενη % περιεκτικότητα σε ορυκτό ή μέταλλο για την εξόρυξη (ή την επεξεργασία) μεταλλεύματος.** Σύμφωνα με τη θεωρία της οριακής περιεκτικότητας (Lane 1988), κάθε κοιτάσμα παρουσιάζει ένα όριο στην περιεκτικότητά του σε χρήσιμα συστατικά κάτω από το οποίο θεωρείται οικονομικά μη εκμεταλλεύσιμο. Το εν λόγω όριο καλείται **οριακή περιεκτικότητα** (cut-off grade). Τα τμήματα του κοιτάσματος των οποίων η περιεκτικότητα υπερβαίνει την οριακή θεωρούνται οικονομικά εκμεταλλεύσιμα. Αν και υπάρχουν πολλοί τρόποι έκφρασης της οριακής περιεκτικότητας, αυτή συνήθως εκφράζεται ως:

- g / t (γραμμάρια ανά τόνο)
- \$ / τόνο (δολάρια ανά τόνο)
- % (τοις εκατό μέταλλο)



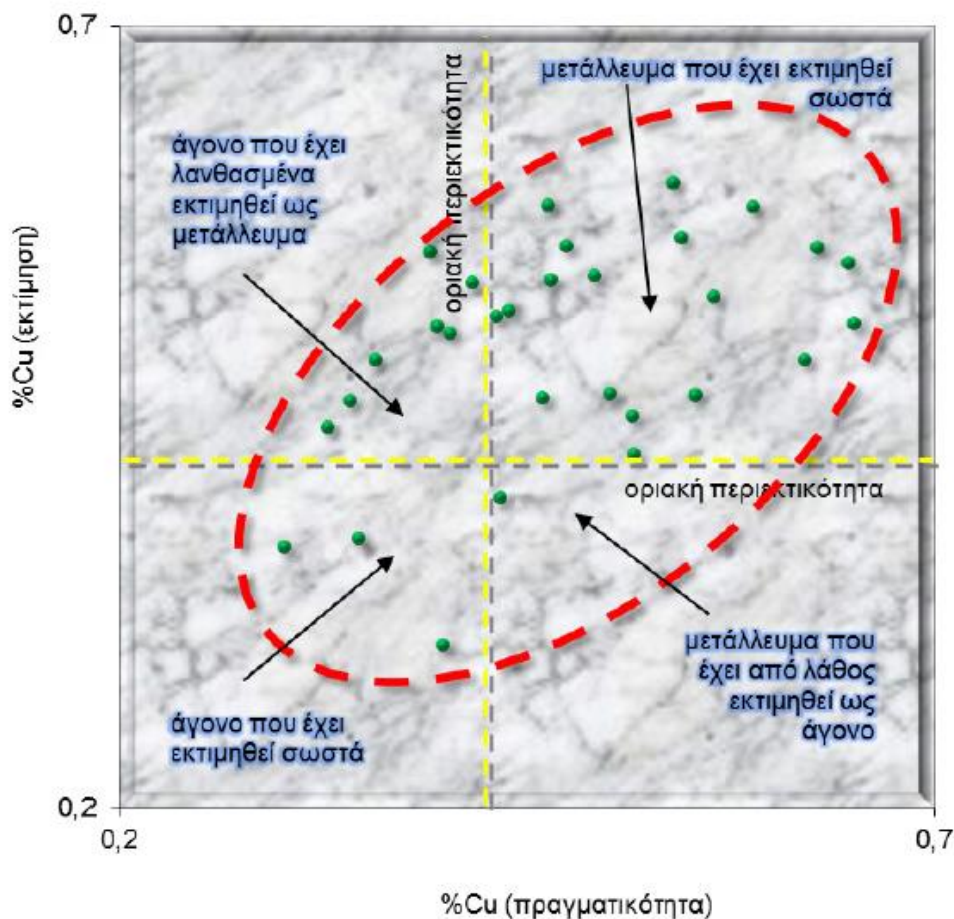
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: Διαχρονική εξέλιξη της οριακής περιεκτικότητας (ore grade) μεταλλεύματων σε Cu % στη Χιλή (Πηγή: Chilean copper mining costs Jorge Cantallop Director of Research and Policy Planning Chilean Copper Commission, December, 2017)**

Η περιεκτικότητα αποτελεί το βασικό στοιχείο για την αξιολόγηση κοιτασμάτων που περιλαμβάνουν ένα μόνο χρήσιμο συστατικό, όπως, για παράδειγμα, ο χρυσός ή ο χαλκός στην προκειμένη περίπτωση. Προφανώς, το υλικό το οποίο παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα υπόκειται επεξεργασία προκειμένου να ανακτηθεί ο χρυσός, ενώ το υπόλοιπο απορρίπτεται ως απόβλητο. Ως εκ τούτου, το συνολικό απόθεμα ενός κοιτάσματος καθορίζεται με βάση την οριακή του περιεκτικότητα. Στη συνέχεια και σύμφωνα με την οριακή περιεκτικότητα του κοιτάσματος, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός της εξόρυξης. Ο προγραμματισμός της εξόρυξης σχετίζεται με τη θέση και την κατανομή του κοιτάσματος στον χώρο, δηλαδή με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής, τον τύπο του κοιτάσματος, τα φυσικά του χαρακτηριστικά και τη χωρική κατανομή των αποθεμάτων. Επιπροσθέτως, ο σχεδιασμός της εξόρυξης εξαρτάται από τις λειτουργικές δαπάνες που σχετίζονται με αυτήν, καθώς και από την απαιτούμενη επεξεργασία για τη μετατροπή των χρήσιμων συστατικών του κοιτάσματος σε εμπορεύσιμη μορφή. Ο απώτερος στόχος της ανωτέρω διαδικασίας είναι ο υπολογισμός της

καθαρής παρούσας αξίας του κοιτάσματος. Ο υπολογισμός των αποθεμάτων και της περιεκτικότητας του κοιτάσματος σε χρήσιμα συστατικά πραγματοποιείται από γεωεπιστήμονες. Παρά το γεγονός ότι ο υπολογισμός της οριακής περιεκτικότητας συμβάλλει στην ταξινόμηση



του υλικού και στον διαχωρισμό των αποβλήτων από τα χρήσιμα συστατικά, τα σφάλματα στον υπολογισμό της μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένη ταξινόμηση.



**ΕΙΚΟΝΑ 17:** Οριακή % Cu περιεκτικότητα-εκτιμήσεις αποθεμάτων (Πηγή: Εισαγωγή στην μεταλλευτική έρευνα, Κωνσταντίνος Μόδης-Σοφία Σταματάκη, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ)

### **8.1.1 Υπολογισμός της οριακής περιεκτικότητας με χρήση του «καθαρού» μεταλλουργικού κέρδους NSR ( Net Smelter Return)**

Η μέθοδος **NSR** προσδιορίζει το μέτρο της αξίας του μεταλλεύματος και ορίζεται ως το κέρδος από την πώληση των μεταλλικών προϊόντων, μετά την αφαίρεση του κόστους μεταφοράς και επεξεργασίας για την παραγωγή τους. Ο προσδιορισμός του **NSR** ενός μεταλλευτικού κοιτάσματος εξυπηρετεί δύο βασικούς σκοπούς:

- Παρέχει έναν κοινό παρονομαστή για σύγκριση της περιεκτικότητας σε χρήσιμα συστατικά των πολυμεταλλικών κοιτασμάτων
- Διευκρινίζει τους οικονομικούς παράγοντες που προσδιορίζουν την αξία του μεταλλεύματος

Επιπρόσθετα, τα μοντέλα NSR λαμβάνουν υπόψη και τα τρία τυπικά στάδια των μεταλλευτικών εργασιών: το στάδιο εξόρυξης, το στάδιο εμπλουτιστικής επεξεργασίας (βελτίωση % περιεκτικότητας) και το στάδιο μεταλλουργικής επεξεργασίας και καθαρισμού των μετάλλων. Για ένα πολυμεταλλικό κοιτάσμα, συνιστάται να εξετάζονται δύο τιμές οριακής περιεκτικότητας **NSR**.

Στην περίπτωση κοιτάσματος που περιέχει  $n$  μέταλλα με οικονομική αξία, το **NSR** ενός μετρικού τόνου του μεταλλεύματος υπολογίζεται ως:

$$NSR(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 r_1 p_1 (V_1 - R_1) + x_2 r_2 p_2 (V_2 - R_2) + \dots + x_n r_n p_n (V_n - R_n) - \frac{C_s}{K} - \frac{C_t}{K}$$

#### **ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Ερμηνεία μεταβλητών μεθόδου NSR**

<b>Μεταβλητή</b>	<b>Επεξήγηση</b>
$x$	Περιεκτικότητα % κάθε μέταλλου στο κοιτάσμα
$r$	Ανάκτηση % επεξεργασίας εμπλουτισμού
$R$	Κόστος μεταλλουργικής επεξεργασίας και καθαρισμού κάθε μέταλλου
$p$	Μεταλλουργική ανάκτηση % κάθε μέταλλου
$V$	Τιμή πώλησης κάθε μέταλλου
$K$	Μετρικοί τόνοι μεταλλεύματος για 1 τόνο συμπυκνώματος
$C_s$	Μεταλλουργικό κόστος ανά τόνο συμπυκνώματος
$C_t$	Κόστος μεταφοράς κόστος ανά τόνο συμπυκνώματος

Στην περίπτωση μικρών ή σύνθετων πολυμεταλλικών (μικτών) κοιτασμάτων, μπορεί να θεωρηθεί ότι τελικώς πωλείται "μικτό" συμπύκνωμα που οδηγεί σε χαμηλότερο καθαρό μεταλλουργικό κέρδος (**NSR**), σε αντίθεση με την περίπτωση παραπέρα επεξεργασίας του προηγούμενου μικτού συμπυκνώματος για το διαχωρισμό των ορυκτών μεταξύ τους. Τα πολυμεταλλικά κοιτάσματα (π.χ. Mc Arthur River, Australia και Red Dog, Alaska) έχουν κέρδος από την πώληση ακόμη και μικτών συμπυκνωμάτων μολύβδου-ψευδαργύρου.

### **8.1.2 Υπολογισμός οριακής περιεκτικότητας με την μέθοδο Lane**

Η μέθοδος **Lane** παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Ken Lane το 1988, όταν εντόπισε τρία ξεχωριστά στάδια εφαρμογής του όρου της οριακής περιεκτικότητας: την εξόρυξη, τον εμπλουτισμό και τη μεταλλουργική επεξεργασία. Συνέδεσε αυτά τα στάδια αξιοποίησης με την έννοια της Καθαρής Παρούσας Αξίας για να προτείνει μια μέθοδο προσδιορισμού της οριακής περιεκτικότητας που μεγιστοποιεί την παρούσα αξία. Η μέθοδος **Lane** προσφέρει έναν πιο ακριβή και σύνθετο τρόπο υπολογισμού της οριακής περιεκτικότητας. Αυτή η μέθοδος απαιτεί επίσης περισσότερες πληροφορίες και μεταβλητές, επομένως μπορεί να μην είναι η πρώτη επιλογή για έναν προκαταρκτικό υπολογισμό. Αν και υπάρχουν πολλές ενδιάμεσες τιμές % περιεκτικότητας που καθορίζονται μέσω της μεθόδου **Lane**, υπάρχει μόνο μια τιμή οριακής περιεκτικότητας που προσδιορίζεται τελικά. Αυτή η οριακή περιεκτικότητα είναι γνωστή ως βέλτιστη οριακή περιεκτικότητα και χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της παρούσας αξίας. Η βέλτιστη οριακή περιεκτικότητα παρέχει το πλεονέκτημα της εξέτασης των επιτοκίων προεξόφλησης και της δυναμικότητας της διεργασίας, ωστόσο, αυτά τα δεδομένα ενδέχεται να αλλάξουν στην πορεία. Στα αρχικά στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού, ο ρυθμός παραγωγής και η δυναμικότητα της εγκατάστασης επεξεργασίας δεν έχουν ακόμη καθοριστεί επακριβώς, επομένως η μέθοδος Lane είναι πιο ακριβής και αποτελεσματική κατά τη φάση της παραγωγικής λειτουργίας του μεταλλευτικού-μεταλλουργικού έργου.

## **8.2 Συμβατικές μέθοδοι**

Οι συμβατικές μέθοδοι επιχειρούν να υπολογίσουν την ποιότητα του κοιτάσματος και των αποθεμάτων με τον καθορισμό της ζώνης επιρροής κάθε δείγματος. Ο καθορισμός αυτός γίνεται με βάση γεωμετρικά κριτήρια τα οποία συνιστούν μια παραδοχή αναφορικά με την κατανομή της μεταλλοφορίας. Οι τρεις κύριες μέθοδοι που εμπίπτουν στη συγκεκριμένη κατηγορία είναι:

**-Η μέθοδος των τομών – Η μέθοδος των πολυγώνων – Η μέθοδος των τριγώνων -**

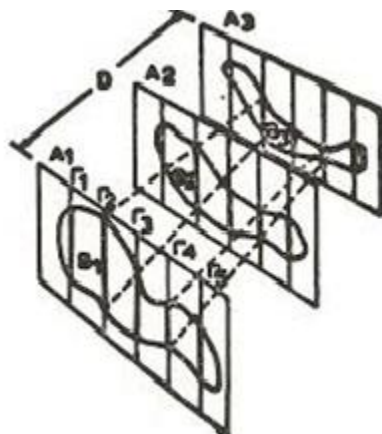
Στα πλεονεκτήματα των συμβατικών μεθόδων μπορούν να αναφερθούν, ότι είναι εύκολες στη χρήση τους, δεν χρειάζονται ειδικές γνώσεις και γίνονται εύκολα κατανοητές.

### **8.2.1 Μέθοδος των τομών**

Εφαρμόζεται, κυρίως, όταν ο κάρναβος των γεωτρήσεων είναι κατά το δυνατό κανονικός και οι γεωτρήσεις παράλληλες μεταξύ τους (συνήθως κατακόρυφες). Στη θέση κάθε παράλληλης σειράς γεωτρήσεων κατασκευάζεται μία τομή. Από την τομή αυτή προκύπτει αφενός η επιφάνεια της τομής του κοιτάσματος στη θέση αυτή και αφετέρου, η μέση περιεκτικότητα του μεταλλεύματος, που αντιστοιχεί στην τομή. Η περιεκτικότητα αυτή υπολογίζεται σαν σταθμικός μέσος όρος της περιεκτικότητας της κάθε γεώτρησης και της επιφάνειας επιρροής της γεώτρησης. Η επιφάνεια επιρροής είναι εκείνη που ορίζεται από τα μέσα των αποστάσεων της γεώτρησης προς τις δύο γειτονικές της γεωτρήσεις στην τομή αυτή. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο υπολογισμός της μέσης περιεκτικότητας των τμημάτων που περιλαμβάνονται μεταξύ των τομών. Ως περιεκτικότητα για κάθε τμήμα μεταξύ δύο διαδοχικών τομών λαμβάνεται, ο σταθμικός μέσος όρος που προκύπτει από τις μέσες περιεκτικότητες των τομών και τα εμβαδά των αντίστοιχων επιφανειών κατά τις οποίες τέμνεται το κοίτασμα. Συγκεκριμένα ισχύει:

$$V=L/3(E1+E2+\sqrt{E1E2})$$

Οπτικά αυτή η μέθοδος παρουσιάζεται στην παρακάτω **ΕΙΚΟΝΑ 18**:



**ΕΙΚΟΝΑ 18: Μέθοδος τομών**

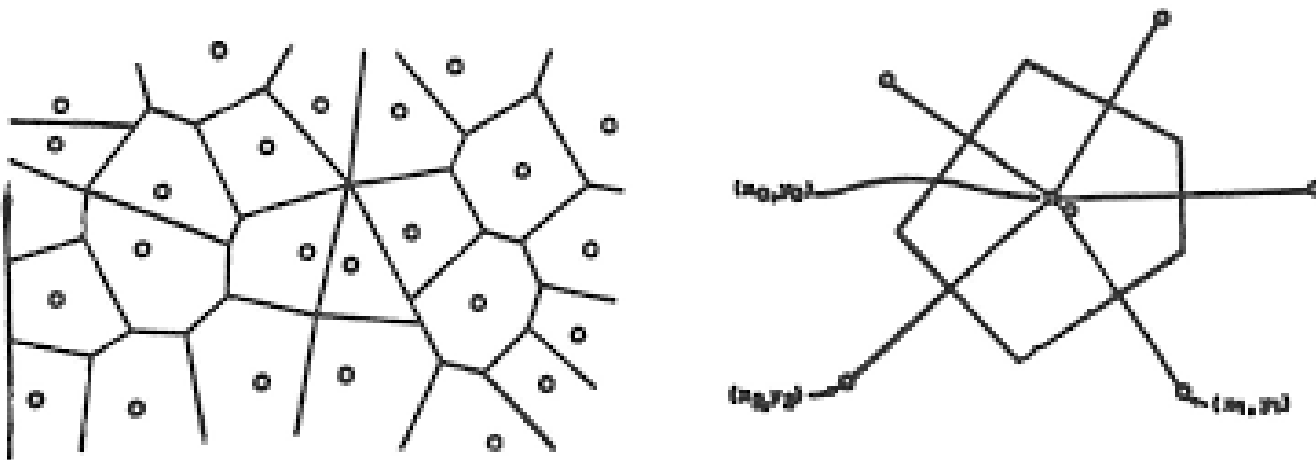
### **8.2.2 Μέθοδος των πολυγώνων**

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, σε χάρτη όπου έχουν τοποθετηθεί οι γεωτρήσεις και οριοθετηθεί τα όρια του κοιτάσματος, ενώνεται κάθε γεώτρηση με ευθείες, με τις πλησιέστερες γεωτρήσεις. Μετά από αυτό φέρονται οι κάθετοι στο μέσο των προηγούμενων ευθειών και σχηματίζεται έτσι ένα πολύγωνο γύρω από κάθε γεώτρηση. Η πολυγωνική αυτή επιφάνεια είναι η επιφάνεια επιρροής της γεώτρησης. Ο αντίστοιχος όγκος επιρροής της γεώτρησης στο χώρο είναι ένα πολυγωνικό πρίσμα με βάση την παραπάνω επιφάνεια και ύψος και το πάχος του κοιτάσματος στη θέση της γεώτρησης. Έτσι ο συνολικός όγκος του κοιτάσματος θα είναι ίσος με το άθροισμα των πρισμάτων που αναφέρθηκαν και η μέση περιεκτικότητα του κοιτάσματος θα ισούται με τον αριθμητικό μέσο των περιεκτικότητων των γεωτρήσεων χρησιμοποιούμενου του όγκου επιρροής κάθε γεώτρησης σαν συντελεστή στάθμισης.

Με τη μέθοδο αυτή γίνονται οι εξής παραδοχές:

- ✓ Η ποιότητα του κοιτάσματος είναι η ίδια σε ολόκληρο τον όγκο του αντίστοιχου πρισματος.
- ✓ Το πάχος του κοιτάσματος είναι το ίδιο σε ολόκληρο το πρίσμα με εκείνο που διέτρησε η γεώτρηση.

Οπτικά αυτή η μέθοδος παρουσιάζεται στην **ΕΙΚΟΝΑ 19**:



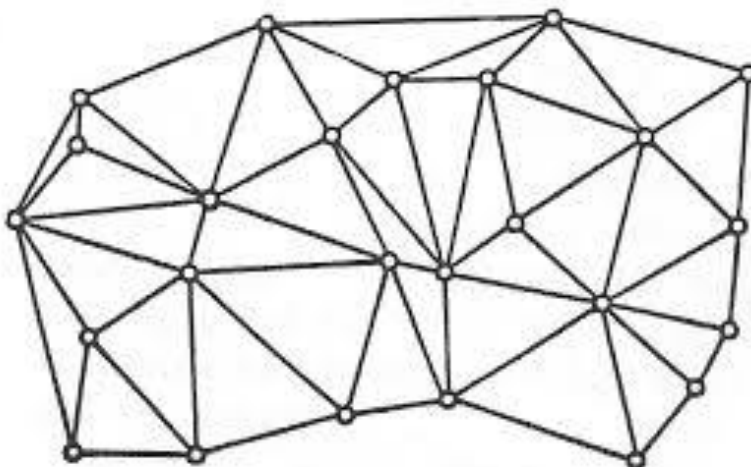
**ΕΙΚΟΝΑ 19: Μέθοδος Πολυγώνων**

### **8.2.3 Μέθοδος των τριγώνων**

Στη μέθοδο των τριγώνων ενώνονται οι γειτονικές γεωτρήσεις ανά τρεις και σχηματίζονται έτσι τρίγωνα με κορυφές τις γεωτρήσεις. Με αυτό τον τρόπο το κοίτασμα χωρίζεται σε ορθά τριγωνικά πρισματοειδή. Ο όγκος των πρισμάτων υπολογίζεται σαν το γινόμενο της βάσης που είναι κάθε τρίγωνο επί το ύψος που λαμβάνεται σαν ο μέσος όρος του μήκους των τριών γεωτρήσεων. Η μέση ποιότητα υπολογίζεται σαν σταθμικός μέσος των τριών γεωτρήσεων που ορίζουν οι κορυφές του τριγώνου.

Και εδώ όπως και στην περίπτωση της μεθόδου των πολυγώνων γίνονται οι παρακάτω αυθαίρετες υποθέσεις μέσα σε κάθε πολυγωνικό πρίσμα: Η ποιότητα του κοιτάσματος μεταβάλλεται γραμμικά και ότι η μεταβολή του πάχους του κοιτάσματος είναι γραμμική επίσης.

Οπτικά αυτή η μέθοδος παρουσιάζεται στην **ΕΙΚΟΝΑ 20**:



**ΕΙΚΟΝΑ 20: Μέθοδος των τριγώνων**

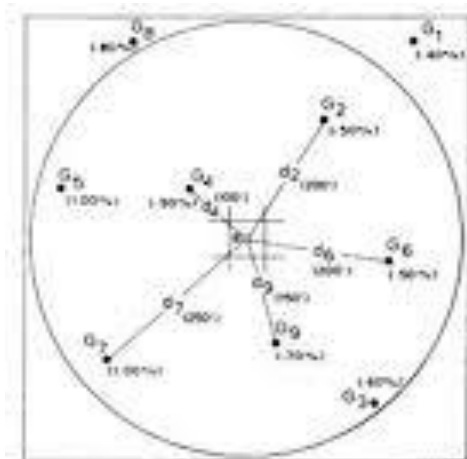
Παραλλαγή της μεθόδου των τριγώνων, αποτελεί η περίπτωση όπου η περιεκτικότητα του κάθε πρίσματος υπολογίζεται σαν σταθμικός μέσος όρος από τις περιεκτικότητες των γεωτρήσεων και τα εμβαδά των επιφανειών των πολυγώνων ή τριγώνων που ορίζονται για κάθε γεώτρηση από τις αντίστοιχες πλευρές του τριγώνου και τις ευθείες που είναι κάθετες στο μέσο της κάθε πλευράς του τριγώνου. Η παραλλαγή αυτή της μεθόδου δίνει αποτελέσματα ταυτόσημα με τη μέθοδο των πολυγώνων.

#### **8.2.4 Μέθοδος των αντίστροφων αποστάσεων**

Η κάτοψη του κοιτάσματος υποδιαιρείται σε ένα σύνολο κατακόρυφων πρισμάτων, ισομεγέθη, συνήθως τετράγωνα ή ορθογώνια παραλληλόγραμμα που μπορεί να είναι ανεξάρτητα από τις θέσεις των γεωτρήσεων. Η περιεκτικότητα κάθε πρίσματος υπολογίζεται ως σταθμικός μέσος όρος με βάση τις περιεκτικότητες των γεωτρήσεων που βρίσκονται σε ορισμένη ακτίνα από το κέντρο του πρίσματος και δεν «καλύπτονται» από άλλες πλησιέστερες γεωτρήσεις. Ο σταθμικός συντελεστής με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η περιεκτικότητα της κάθε γεώτρησης είναι το τετράγωνο του αντιστρόφου της απόστασης της γεώτρησης από το κέντρο του πρίσματος. Έτσι, η επίδραση της περιεκτικότητας της κάθε γεώτρησης μικραίνει όσο αυξάνεται η απόστασή της

από το κέντρο του πρίσματος (διπλασιασμός της απόστασης συνεπάγεται υπο-τετραπλασιασμό της επίδρασης).

Παραλλαγή της μεθόδου αποτελεί η περίπτωση όπου το αντίστροφο της απόστασης υψώνεται στον κύβο ώστε να μειωθεί περαιτέρω η επίδραση των απομακρυσμένων δειγμάτων. Οπτικά αυτή η μέθοδος παρουσιάζεται στην **ΕΙΚΟΝΑ 21** και οι μαθηματικοί τύποι που ισχύουν για την συγκεκριμένη μέθοδο:



$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= \frac{G_1 \times \frac{1}{(d_1)^2} + G_2 \times \frac{1}{(d_2)^2} + G_3 \times \frac{1}{(d_3)^2} + G_4 \times \frac{1}{(d_4)^2} + G_5 \times \frac{1}{(d_5)^2}}{\frac{1}{(d_1)^2} + \frac{1}{(d_2)^2} + \frac{1}{(d_3)^2} + \frac{1}{(d_4)^2} + \frac{1}{(d_5)^2}} \\
 \bar{x} &= \frac{0.5 \times \frac{1}{(200)^2} + 0.5 \times \frac{1}{(200)^2} + 0.3 \times \frac{1}{(150)^2} + 1.0 \times \frac{1}{(250)^2} + 0.9 \times \frac{1}{(300)^2}}{\frac{1}{(200)^2} + \frac{1}{(200)^2} + \frac{1}{(150)^2} + \frac{1}{(250)^2} + \frac{1}{(300)^2}} = 0.37\%
 \end{aligned}$$

**ΕΙΚΟΝΑ 21: Μέθοδος των αντίστροφων αποστάσεων**

### **8.3 Μαθηματικο-στατιστικές μέθοδοι**

Η συγκεκριμένη κατηγορία μεθόδων χρησιμοποιεί μαθηματικά και στατιστικά εργαλεία προκειμένου να εκτιμήσει την κατανομή της ποιότητας ενός κοιτάσματος στο χώρο και τελικά τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα. Με τη χρήση αυτών των μεθόδων επιχειρείται η προσαρμογή μιας μαθηματικής συνάρτησης (για παράδειγμα κανονική κατανομή) στην χωρική κατανομή της μεταλλοφορίας. Πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι η δυνατότητα προσδιορισμού του σφάλματος εκτίμησης και κατ' επέκταση της ακρίβειας του αποτελέσματος (διάστημα εμπιστοσύνης). Οι κυριότερες μέθοδοι είναι η κλασική στατιστική και η γεωστατιστική.



### **8.3.1 Μέθοδος κλασικής Στατιστικής**

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δίνει ποσοτική έκφραση και στο σφάλμα που συνοδεύει την εκτίμηση με τη μορφή του διαστήματος εμπιστοσύνης. Έτσι καθορίζει τα όρια γύρω απ' την εκτίμηση που αναμένεται να βρίσκεται η αληθινή τιμή με ορισμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης). Η βασική διαφορά της κλασικής στατιστικής από τις συμβατικές μεθόδους είναι, ότι προσπαθεί να προσδιορίσει το νόμο με τον οποίο κατανέμεται η μεταλλοφορία αντί να αποδώσει σε αυτή κατά εντελώς αυθαίρετο τρόπο ένα νόμο όπως συμβαίνει, κατά περίπτωση, με τις γεωμετρικές μεθόδους. Η γενική διαδικασία που ακολουθείται στην εφαρμογή της μεθόδου, είναι επιλογή ενός θεωρητικού μοντέλου (κανονική κατανομή, λογαριθμο-κανονική), είτε με βάση την πείρα από άλλα παρόμοια κοιτάσματα είτε από τα υπάρχοντα δεδομένα το οποίο προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα. Στη συνέχεια από το θεωρητικό μοντέλο υπολογίζεται η καλύτερη εκτιμήτρια της μεταβλητής παραμέτρου του πληθυσμού που εξετάζεται και προσδιορίζονται τα σφάλματα που συνοδεύουν την εκτίμηση αυτή.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- ✓ Απαλλάσσει κατά μεγάλο μέρος τους υπολογισμούς από προσωπικά κριτήρια του μελετητή.
- ✓ Δίνει τις καλύτερες εκτιμήσεις και τα σφάλματα που τις συνοδεύουν.
- ✓ Δίνει την ευκαιρία προγραμματισμού των μεταλλευτικών ερευνών.
- ✓ Επιτρέπει βελτιστοποίηση του προγράμματος δειγματοληψίας.
- ✓ Δίνει δυνατότητα κατασκευής χαρτών ισο-περιεκτικότητας (trend surface analysis) με τη μέθοδο της παλινδρόμησης (regression analysis).

Σαν μειονέκτημα της μεθόδου μπορεί να αναφερθεί το γεγονός ότι βασίζεται στην παραδοχή ότι τα δείγματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η παραδοχή αυτή μπορεί να ισχύει στα αρχικά στάδια των ερευνών όπου οι αποστάσεις μεταξύ των ερευνητικών έργων είναι σημαντικές. Όσο όμως οι αποστάσεις μικραίνουν τόσο τα δείγματα συσχετίζονται μεταξύ τους και η εφαρμογή της κλασικής στατιστικής οδηγεί σε αρκετά υψηλότερα σφάλματα.

### **8.3.2 Γεωστατιστική**

Ο όρος «γεωστατιστική» εκφράζει τη στατιστική μελέτη φυσικών φαινομένων. «Η γεωστατιστική είναι η εφαρμογή του φορμαλισμού των τυχαίων συναρτήσεων στην αναγνώριση και εκτίμηση των φυσικών φαινομένων» (Matheron, 1963). Ένα φυσικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται «χωρικό», όταν οι μεταβλητές ενδιαφέροντός του εξαρτώνται από τον χώρο ή και τον χρόνο. Η γεωστατιστική βρήκε σημαντικό πεδίο ανάπτυξης στη μεταλλευτική, αφού η περιεκτικότητα ενός κοιτάσματος θεωρείται ένα χωρικό φυσικό φαινόμενο.

Από μαθηματικής πλευράς, μια χωρική μεταβλητή είναι μια συνάρτηση  $f(x)$ , η οποία λαμβάνει μία τιμή για κάθε σημείο  $a$  με συντεταγμένες  $x, y, z$ , σε έναν χώρο τριών διαστάσεων. Οι τιμές αυτές συχνά είναι τόσο ακανόνιστες, ώστε η συνάρτηση να μην μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά. Στην περίπτωση του κοιτάσματος όμως, φαίνεται να υπάρχουν «ζώνες», στις οποίες οι τιμές συσχετίζονται. Δηλαδή, η τιμή της συνάρτησης  $f(x)$  εξαρτάται από τη θέση του σημείου  $a$ .

Η γεω-στατιστική ή kriging είναι ουσιαστικά μια βέλτιστη χωρική μέθοδος εκτίμησης, βασισμένη σε ένα μοντέλο της εξαρτημένης χωρικά διαφοράς. Το μοντέλο της χωρικής ανάλυσης καλείται βαριόγραμμα (variogram) ή εναλλακτικά χρησιμοποιείται ο όρος ημι-βιόγραμμα (semi-variogram). Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μεθόδων γεω-χωρικής ανάλυσης, όπως η γεωστατιστική, που εξετάζουμε είναι η δυνατότητα να ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα στις παραγόμενες εκτιμήσεις.

### **8.4 Παράδειγμα εφαρμογής μεθόδων υπολογισμού αποθεμάτων χαλκού**

Το χαλκούχο κοιτάσμα «Φοίνικας» βρίσκεται στη νήσο Κύπρο και υφίσταται εκμετάλλευση από τη Hellenic Copper Mines Ltd, από το 1996. Γεωλογικά ανήκει στο γνωστό κοιτασματοφόρο οφιολιθικό σύμπλεγμα του όρους Τρόδος. Το εξορυκτικό πρόγραμμα του Φοίνικα προβλέπει την εξόρυξη 2–3 εκατομμυρίων τόνων μεταλλεύματος και 2 εκατομμυρίων τόνων <<στείων>>.

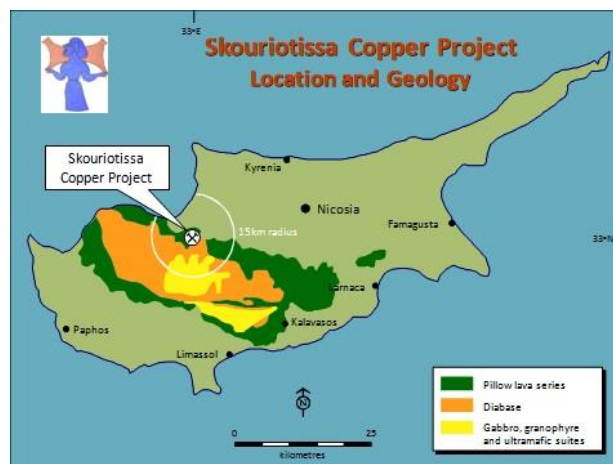
Το μετάλλευμα που εξορύσσεται τροφοδοτεί το παρακείμενο υδρο-μεταλλουργικό εργοστάσιο της εταιρείας. Το τελικό προϊόν που παράγεται είναι καθαρός χαλκός 99.999%. Το μεταλλείο και το υδρο-μεταλλουργικό εργοστάσιο λειτουργούν στην περιοχή Σκουριώτισσας 50 χιλιόμετρα δυτικά της Λευκωσίας, στους πρόποδες της οροσειράς του Τροόδους. Η έδρα της εταιρείας

βρίσκεται στη Λευκωσία. Η επικρατούσα άποψη ήταν ότι η δημιουργία των θειούχων κοιτασμάτων της Κύπρου σχετίζεται με τις τεκτονικές τάφρους. Το κοιτάσμα βρίσκεται σε αλλοιωμένες βασαλτικές λάβες του ανώτερου ορίζοντα. Κυριαρχεί η προπυλιτωμένη μορφή λαβών, οι οποίες τέμνονται από εκχύσεις έντονα εξαλλοιωμένων λαβών υψηλής πυριτιώσεως. Στα όρια των πυριτιωμένων αυτών λαβών παρουσιάζεται έντονα ο αιματίτης, ενώ δεν απουσιάζουν και κατάλοιπα μη εξαλλοιωμένων βασαλτικών λαβών, οι οποίες περιβάλλονται πάντα από άλλες εξαλλοιωμένες.

Το κοιτάσμα είναι υδροθερμικό και τα μεταλλοφόρα ρευστά, ανερχόμενα, ακολούθησαν τις ασυνέχειες του πετρώματος, που κυρίως ήταν οι περιβάλλουσες των λαβών. Ορυκτολογικά, κυριαρχούν τα οξειδωμένα ορυκτά της ζώνης εμπλουτισμού, κυρίως μη οξειδωμένα χαλκούχα ορυκτά και σιδηροπυρίτης. Η περιεκτικότητα σε θείο είναι χαμηλή (0,5–5,0%) και υπάρχουν ευδιάκριτες ζώνες μαλαχίτη. Τα γεωλογικά αποθέματα του κοιτάσματος υπολογίζονται σε 20.000.000 τόνους, με μέση περιεκτικότητα 0,4% σε χαλκό. Στα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος αξίζει να σημειωθεί και η ύπαρξη σημαντικής ποσότητας χρυσοφόρου μεταλλεύματος.



**ΕΙΚΟΝΑ 22:** Κοιτάσματα χαλκού Σκουριώτισσα



**ΕΙΚΟΝΑ 23:** Κοιτάσματα χαλκού - Κύπρος

Το κοιτάσμα του Φοίνικα έχει διαστάσεις κώνου  $750 \times 450$  μ. και μέγιστη ανάπτυξη σε βάθος γύρω στα 220μ. Για την εξόρυξη του μεταλλεύματος εφαρμόζεται η μέθοδος των ορθών ανοικτών βαθμίδων (κλειστή εκσκαφή). Η προσπέλαση γίνεται μέσω σκυρό-στρωτων οδών, που ενώνουν τις θέσεις εξόρυξης με τις πλατείες απόθεσης και το εργοστάσιο εμπλουτισμού. Η εξόρυξη γίνεται επιλεκτικά και με εφαρμογή ελεγχόμενων μεθόδων πυροδότησης. Ο στόχος των πυροδοτήσεων είναι η χαλάρωση του πετρώματος και όχι η εξόρυξη και ο θρυμματισμός του. Η εκτίμηση των αποθεμάτων από την εταιρεία έγινε με τη μέθοδο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης (IDS). Στην προσπάθεια βελτιστοποίησης της εκτίμησης των αποθεμάτων και παράλληλα με την προχώρηση της εξόρυξης, η εταιρεία προβαίνει συνεχώς σε επαναπροσδιορισμό των αποθεμάτων για καλύτερη και ακριβέστερη μελέτη και αξιοποίηση του κοιτάσματος. Για την πραγματοποίηση του στόχου αυτού στη μέθοδο IDS χρησιμοποιούνται και αξιοποιούνται συνεχώς νέοι περιορισμοί, νέες γεωτρήσεις και στοιχεία που προέρχονται από το πλούσιο αρχείο που δημιουργείται από την εξόρυξη του μεταλλεύματος.

Στο τελευταίο μοντέλο με μπλοκ που δημιούργησε η εταιρεία εφάρμοσε περιορισμούς στην ακτίνα επιρροής εκτίμησης κάθε μπλοκ. Οι αποστάσεις αυτές είναι 30 μ., 45 μ. και 60 μ., προσδιορίζοντας έτσι τα βέβαια, τα πιθανά και τα δυνατά αποθέματα αντίστοιχα. Επίσης, εφαρμόστηκε ο περιορισμός της ύπαρξης τουλάχιστον δύο γεωτρήσεων σε κάθε κύκλο υπολογισμών. Η εξόρυξη ξεκίνησε το 1996 και μέχρι τη στιγμή που έγινε η μελέτη των Modisetal (2008) είχε εξορυχθεί σημαντικό μέρος του εκμεταλλεύσιμου κοιτάσματος.

Η εταιρεία, τηρώντας πλήρες αρχείο των διατρημάτων ανατίναξης, περίπου κάθε οκτώ μέτρα, συνέκρινε και έλεγχε συνεχώς την ακρίβεια των εκτιμήσεων. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων έδειξαν σημαντικές διαφορές από την πραγματικότητα, τόσο θετικές όσο και αρνητικές, σε μεγάλα τμήματα του κοιτάσματος. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αποφασίστηκε ο επαναυπολογισμός των αποθεμάτων με γεωστατιστική η οποία θεωρείται αδιαμφισβήτητα ακριβέστερη. Επίσης, θεωρήθηκε απαραίτητη η σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων με σκοπό την κατανόηση των αποκλίσεων και προσδιορισμό των πιθανών αιτιών που δημιούργησαν τα σφάλματα εκτίμησης.

Για τον υπολογισμό των αποθεμάτων με γεωστατιστική χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 325 γεωτρήσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν 24.528 δείγματα μέσου μήκους 1,5 μ. Οι γεωτρήσεις είναι κατακόρυφες με βάθος που κυμαίνεται από 30 έως 600 μ. Είναι τοποθετημένες σε τετραγωνικό

ως επί το πλείστον κάρναβο με πλευρά 20 μ. Τα δείγματα έχουν αναλυθεί ως προς την περιεκτικότητα σε Cu, S και τη διαλυτότητα σε θειϊκό οξύ. Ο υπολογισμός των βαριογραμμμάτων έγινε στις εξής κατευθύνσεις: Βορρά–Νότο, Ανατολή–Δύση, κατά μήκος της γεώτρησης, Βορειοανατολικά–Νοτιοδυτικά και Βορειοδυτικά–Νοτιοανατολικά.

Η εξέταση των πειραματικών βαριογραμμμάτων δείχνει τη μη τυχαία κατανομή των περιεκτικότητων στον χώρο, εφόσον το φαινόμενο κόκκου είναι πρακτικά μηδενικό. Επιπλέον, είναι σαφής η ισοτροπία και η ομοιογένεια του κοιτάσματος. Στα δεδομένα προσαρμόστηκε ένα σφαιρικό μοντέλο βαριογράμματος με οροφή  $C_0 = 0.15 \text{ Cu} (\%)$  και ακτίνα επιρροής  $\alpha = 45 \text{ μ}$ . Η εκτίμηση του κοιτάσματος έγινε στο πλαίσιο του μοντέλου με μπλοκ, στις ίδιες συντεταγμένες και μέγεθος με το μοντέλο IDS, το οποίο υπολογίστηκε παλαιότερα. Κάθε μπλοκ είχε διαστάσεις  $10 \times 10 \times 3 \text{ μ}$ . 0 0,1 0,2 0,3 0 50 100 150 200  $\gamma(h) \text{ Cu} (\%)^2 \text{ h} (m) \text{ N-S-E-WDTHModel}$ .

Το συνολικό παραλληλεπίπεδο που προέκυψε είχε διαστάσεις  $900 \times 600 \times 350 \text{ m}$  και ήταν οριζόντιο.

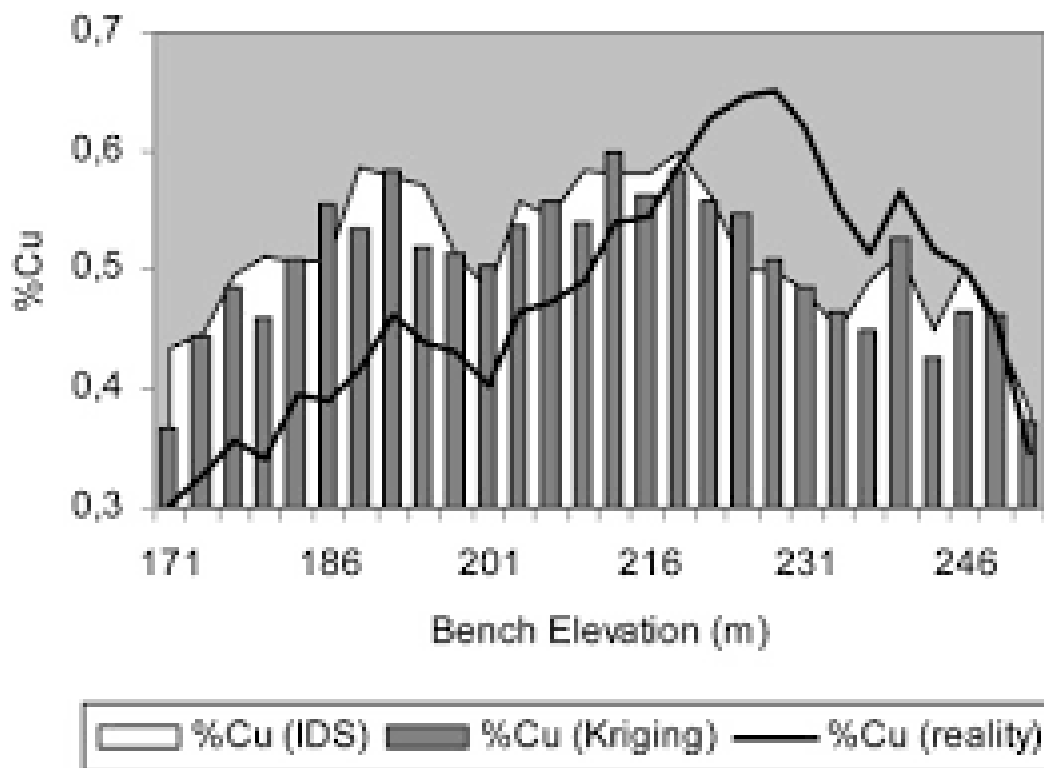
Οι συντεταγμένες του κέντρου του παραλληλεπιπέδου αυτού ήταν  $-39.350 \text{ E}$ ,  $10.200 \text{ N}$  και το υψόμετρό του  $175 \text{ μ}$ . Σε κάθε μπλοκ καταχωρήθηκαν οι τρεις συντεταγμένες του κέντρου του, ο αριθμός των σύνθετων δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμησή του, καθώς και η εκτιμώμενη περιεκτικότητα σε Cu.

Για την εκτίμηση της μέσης περιεκτικότητας κάθε μπλοκ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του <<Ordinary Kriging>>. Για τον προσδιορισμό των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση κάθε μπλοκ ακολουθήθηκε η στρατηγική της ελλειψοειδούς ογδοημοριακής αναζήτησης, με μέγιστη απόσταση  $50 \text{ μ}$  στο οριζόντιο επίπεδο και  $15 \text{ μ}$  στο κατακόρυφο. Ο μέγιστος αριθμός δειγμάτων για τον υπολογισμό ήταν 48 και ο ελάχιστος 6. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων έγινε βάσει των αποτελεσμάτων της εκμετάλλευσης στα υψόμετρα 248 έως 171, τη χρονική περίοδο 1998-2003. Κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής και με στόχο τον χαρακτηρισμό κάθε μπλοκ που επρόκειτο να αποληφθειόρυσσονταν τέσσερα διατρήματα μήκους  $3,6 \text{ μ}$  σε τετραγωνική διάταξη πλευράς  $4 \text{ μ}$ ., από τα οποία λαμβανόταν ένα σύνθετο δείγμα.

Συνολικά, ήταν διαθέσιμα 24.917 δείγματα από σύνολο περίπου 90.000 διατρημάτων. Στην περιοχή των δειγμάτων αυτών δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο με μπλοκ, στο οποίο

εκτιμήθηκαν οι μέσες τιμές με χρήση της μεθόδου IDS. Η κατανομή της περιεκτικότητας στο μοντέλο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι απεικονίζει την πραγματικότητα λόγω της πυκνής δειγματοληψίας, ενώ για τον ίδιο λόγο η μέθοδος εκτίμησης δεν παίζει σημαντικό ρόλο.

Για μια πρώτη σύγκριση των δύο μεθόδων, υπολογίστηκε η μέση τιμή καθενός από τα τρία μοντέλα (Kriging, IDS και «πραγματικότητας») σε κάθε βαθμίδα εκμετάλλευσης. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10:** Διάγραμμα σύγκρισης kriging-IDS-«πραγματικότητα» (Πηγή: Εισαγωγή στην μεταλλευτική έρευνα, Κωνσταντίνος Μόδης-Σοφία Σταματάκη, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ)

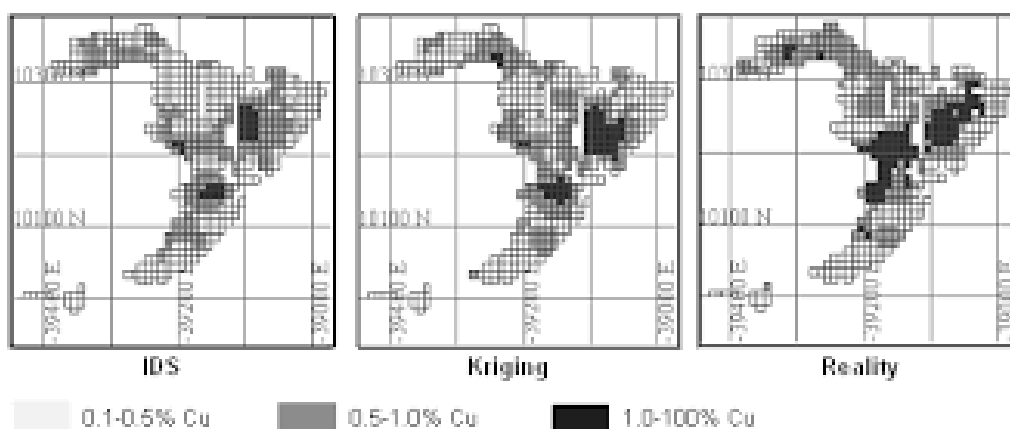
Είναι εμφανές ότι:

- ✓ Και οι δύο μέθοδοι δημιουργούν εξομάλυνση της κατανομής περιεκτικότητας.
- ✓ Και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν αποκλίσεις από την πραγματικότητα.

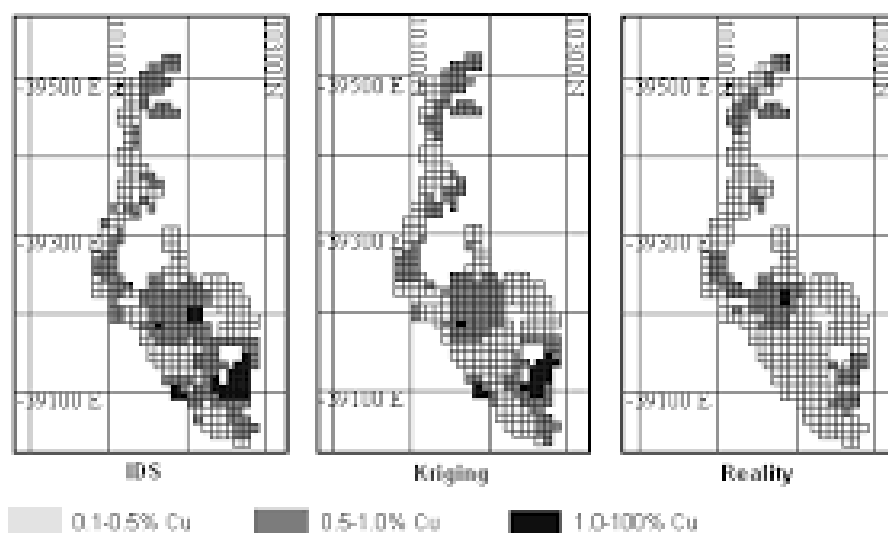
- ✓ Η γεωστατιστική παρουσιάζει μικρότερο σφάλμα, κυρίως στην περιοχή του φτωχού κοιτάσματος.

Για τον ακριβέστερο έλεγχο της απόκλισης κάθε μεθόδου από την πραγματικότητα, είναι αναγκαίο να συγκριθούν οι τομές των μοντέλων σε κάθε βαθμίδα με στόχο την εξέταση της χωρικής κατανομής των περιεκτικοτήτων.

Μια παρόμοια σύγκριση δείχνει σχετική υπεροχή της γεω-στατιστικής έναντι της μεθόδου IDS.



**ΕΙΚΟΝΑ 24:** Τομές kriging-IDS-«πραγματικότητα»



**ΕΙΚΟΝΑ 25:** Τομές kriging-IDS-«πραγματικότητα»

Παρά την αδιαμφισβήτητη υπεροχή της, η μη επίτευξη σημαντικής βελτίωσης στην ακρίβεια με την εφαρμογή της γεω-στατιστικής στην περίπτωση του «Φοίνικα» οφείλεται:

- ✓ στην κανονικότητα της δειγματοληψίας, η οποία οδηγεί σε συμμετρικές διατάξεις των δεδομένων ως προς το σημείο εκτίμησης με αποτέλεσμα σε ισαπέχοντα σημεία να αποδίδονται ίσοι συντελεστές βαρύτητας, ανεξάρτητα από τη μέθοδο υπολογισμού που χρησιμοποιείται και
- ✓ στη μεγάλη πυκνότητα της δειγματοληψίας, η οποία οδηγεί και τις δύο μεθόδους σε σύγκλιση με την πραγματικότητα.

Συμπερασματικά, η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου IDS και της γεω-στατιστικής με τα αποτελέσματα της εκμετάλλευσης δείχνει βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης. Η βελτίωση αυτή είναι εμφανής είτε με απευθείας συγκριτική παρατήρηση τομών είτε μέσω της τάσης για σύγκλιση της ευθείας των εκτιμώμενων με τις πραγματικές τιμές.

## **9. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΧΑΛΚΟΥ**

Υπάρχουν κοιτάσματα χαλκού που ήταν και είναι διαχρονικά διαδεδομένα και ευκόλως ανιχνεύσιμα προς εξόρυξη, επεξεργασία και διοχέτευση στην αγορά. Από την άλλη πλευρά υπάρχουν κοιτάσματα που απαιτούν ενδελεχή οικονομική και παραγωγική ανάλυση συγκριτικά και σε επίπεδο <<Μεγέθους του Κοιτάσματος-Κόστος εξόρυξης και Απορρόφησης από την αγορά>>. Λεπτομερή οικονομικά πλάνα και οικονομοτεχνικές αναλύσεις αναπτύσσονται καθώς σε αρκετές περιπτώσεις το κόστος εξόρυξης με την υπάρχουσα τεχνογνωσία και τεχνολογία είναι είτε μεγαλύτερο από τη τιμή πώλησης είτε το κέρδος είναι αρκετά μικρό για να προχωρήσουν οι διαδικασίες εγκατάστασης ενός σύγχρονου ορυχείου χαλκού μαζί με όλον τον παρελκόμενο εξοπλισμό. Πέραν αυτού πρέπει να είναι εξακριβωμένο ότι η παραγωγή θα είναι συνεχής και σε ικανοποιητικά επίπεδα στο μέλλον. Ένα χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα είναι τα πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού.



## 9.1 Απόδοση μεταλλείου χαλκού

Η ποσότητα παραγωγής ενός μεταλλείου χαλκού, όπως και κάθε άλλου μεταλλεύματος είναι ένα ποσοτικά μετρήσιμο μέγεθος. Τα οικονομικά και στατιστικά στοιχεία δείχνουν κατά πόσο τα κοιτάσματα του μεταλλείου ικανοποιούν τα οικονομικά μοντέλα του μεγέθους των κοιτασμάτων συγκριτικά με τον κόστος παραγωγής και τον δείκτη ευκολίας της εξόρυξης, ούτως ώστε η εταιρεία που εκμεταλλεύεται το ορυχείο να είναι μακροπρόθεσμα εντός οικονομικού σχεδιασμού, ψηλά στον δείκτη ανταγωνιστικότητας και εντός των ορίων βιώσιμης ανάπτυξης.

Μια σημαντική λοιπόν σχέση όσον αναφορά τα παραπάνω είναι αυτή που μας δείχνει τη ποσότητα  $Q_{+c}$  του χρήσιμου προϊόντος που περιέχεται στο υλικό και έχει μέση % περιεκτικότητα μεγαλύτερη από την % οριακή ως συνάρτηση της οριακής % περιεκτικότητας:

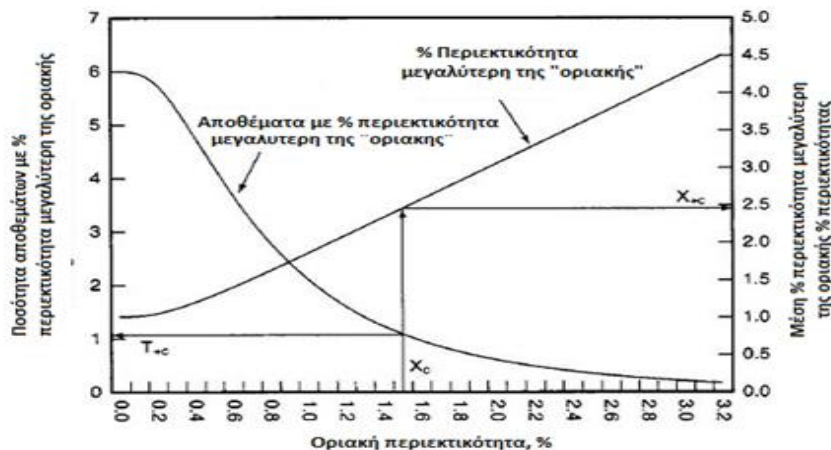
$$Q_{+c} = T_{+c} X_{+c}$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση ορυχείο χαλκού τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- ✓ η περιεκτικότητα  $x$ ,
- ✓ η οριακή περιεκτικότητα  $x_c$  και η μέση περιεκτικότητα πάνω την οριακή  $x_{+c}$  εκφράζονται σε % Cu
- ✓ η ποσότητα μεταλλεύματος  $T_{+c}$  εκφράζεται σε μετρικούς τόνους
- ✓ και η περιεχόμενη ποσότητα χρήσιμου  $Q_{+c}$  (στο  $T_{+c}$ ) εκφράζεται σε μετρικούς τόνους ή λίβρες χαλκού ( $1t=2205lb$ )

Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση ενός ορυχείου χρυσού, οι περιεκτικότητες εκφράζονται σε γραμμάρια ανά μετρικό τόνο (g/t) και η ποσότητα μετάλλου σε μετρικούς τόνους ή ουγγιές χρυσού (1 ουγγιά troy= 31.1035g).

Η παραπάνω σχέση αποδίδεται και διαγραμματικά παρακάτω:



Σχέση ποσότητας αποθεμάτων - % περιεκτικότητας σε χρήσιμο

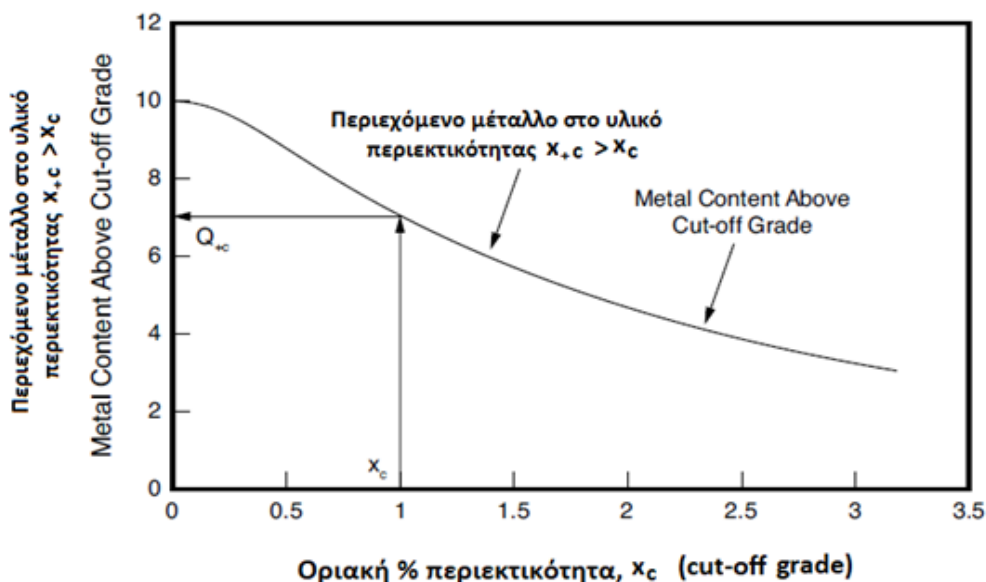
**:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11:** Σχέση ποσότητας αποθεμάτων-% περιεκτικότητα σε χρήσιμο (Πηγή: <https://www.wikipedia.org>)

Εφόσον, το  $T_{+c}$  αντιπροσωπεύει τη ποσότητα μεταλλεύματος  $T_{+c}$  και το  $x_{+c}$  συμβολίζει τη μέση περιεκτικότητα πάνω από την οριακή  $x_{+c}$ , τα έσοδα από τις πωλήσεις ισούνται με:

$$T_{+c}x_{+c}rV$$

Όπου  $r$  είναι το ποσοστό του πολύτιμου προϊόντος που ανακτάται κατά τη διάρκεια επεξεργασίας και  $V$  είναι η αξία του προϊόντος στην αγορά. Ο βαθμός καθορίζει επίσης χωρητικότητα του υλικού που εξορύσσεται και που δεν θα υποστεί κάποια επεξεργασία. Το ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11 παραπάνω, δείχνει τη σχέση μεταξύ, της ποσότητας αποθεμάτων και % περιεκτικότητας σε χρήσιμο. Οι καμπύλες σε αυτό το γράφημα είναι γνωστές ως καμπύλες % περιεκτικότητας σε χρήσιμο-καμπύλες ποσότητας αποθεμάτων. Οι καμπύλες % περιεκτικότητα-ποσότητας αποθεμάτων χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για να δείξουν τον αντίκτυπο που έχουν, διαφορετικές στρατηγικές σχετικά με τα οικονομικά μιας εξορυκτικής επιχείρησης.

Μια άλλη σχέση που είναι επίσης χρήσιμη φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα και σχετίζεται με τη βελτιστοποίηση των βαθμών αποδέσμευσης. Αυτό το σχήμα δείχνει την ποσότητα  $Q_{+c}$  του χρήσιμου προϊόντος που περιέχεται στο υλικό και έχει μέση % περιεκτικότητα μεγαλύτερη από την % οριακή.



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12:** Περιεχόμενο μέταλλο στο υλικό περιεκτικότητας  $x_c > x_c$  – Οριακή % περιεκτικότητα  $x_c$  (Πηγή: An introduction to cut off grade estimation by Jean-Michel Rendu, 2<sup>nd</sup> Edition, Society of Mining, Metallurgy and Exploration 2013)

### 9.2 Άμεσο κέρδος και απώλεια μεταλλείου χαλκού

Τα άμεσα κέρδη ή οι ζημίες  $Udir(x)$ , που σχετίζονται με έναν μετρικό τόνο υλικού, υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη μόνο το κόστος και τα έσοδα που μπορούν να αποδοθούν άμεσα στην εξόρυξη αυτού του υλικού, την επεξεργασία του και την πώληση του τελικού προϊόντος. Ο υπολογισμός των οριακών περιεκτικοτήτων % με τη βοήθεια της μεθόδου του "νεκρού" σημείου (**Breakeven point**), υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη μόνο το κόστος και τα έσοδα που προκύπτουν άμεσα από την εξόρυξη και την επεξεργασία (ή την απευθείας απόρριψη) ενός μετρικού τόνου υλικού περιεκτικότητας %  $x$  σε μέταλλο. Οι επιπτώσεις, εάν υπάρχουν, στους συνολικούς τόνους που εξορύσσονται, στο πρόγραμμα παραγωγής και το κόστος ανά μετρικό τόνο δεν λαμβάνονται υπόψη. Επίσης, η σχέση % περιεκτικότητας-αποθεμάτων μεταλλεύματος δεν λαμβάνεται υπόψη.

### 9.2.1 Μαθηματική σχέση κέρδους-απώλειας μεταλλεύματος χαλκού

Το άμεσο κέρδος ή ζημία  $U_{dir}(x)$  που αναμένεται από την επεξεργασία ενός μετρικού τόνου υλικού του περιεκτικότητας %  $x$  είναι και  $U_{ore}(x)$  εκφράζεται ως εξής:

$$U_{ore}(x) = xr(V-R) - (M_0 + P_0 + O_0)$$

Όπου:

$x_c$  = μέση % περιεκτικότητα

$r$  = ανάκτηση ή ποσοστό % του περιεχόμενου χρήσιμου υλικού που ανακτάται από το εξορυσσόμενο μέταλλευμα

$V$  = αξία μια μονάδας χρήσιμου υλικού

$R$  = κόστος μεταλλουργικής επεξεργασίας-καθαρισμός του μετάλλου, μεταφορά, κόστος πωλήσεων και άλλα κόστη που υπεισέρχονται ανά μονάδα χρήσιμου προϊόντος

$M_0$  = κόστος εξόρυξης ανά μετρικό τόνο υλικού προς επεξεργασία (εξορυγμένο)

$P_0$  = κόστος επεξεργασίας ανά μετρικό τόνο προς επεξεργασία (εξορυγμένο)

$O_0$  = γενικό κόστος ανά μετρικό τόνο προς επεξεργασία (εξορυγμένο)

Εάν το χρήσιμο προϊόν είναι ένα συμπύκνωμα, το  $V$  είναι η τιμή μιας μονάδας του περιεχόμενου μετάλλου στο συμπύκνωμα. Για παράδειγμα, το  $V$  μπορεί να είναι η τιμή του χαλκού σε δολάρια ανά λίβρα χαλκού (\$/lbCu) ή η τιμή του χρυσού σε δολάρια ανά ουγγιά χρυσού (troy/ozAu, 1troyoz = 28.35 g).  $r$  είναι το ποσοστό % του μετάλλου σε συμπύκνωμα που θα πληρωθεί, σύμφωνα με το συμβόλαιο με τη μεταλλουργία. Το  $R$  περιλαμβάνει τα έξοδα μεταφοράς και μεταλλουργικής επεξεργασίας-καθαρισμού του μετάλλου, καθώς και άλλες μειώσεις και ποινές που πρέπει να αφαιρεθούν από το  $V$  για να αποζημιωθεί η μεταλλουργία για τις ενδεχόμενες απώλειες κατά την επεξεργασία. Όταν το συμπύκνωμα πωλείται σε μια μεταλλουργική μονάδα, οι εφαρμοζόμενες τιμές  $V$ ,  $r$  και  $R$  μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο διαπραγμάτευσης μεταξύ πωλητή (μεταλλευτική επιχείρηση ή μονάδα εμπλουτισμού) και αγοραστή (μεταλλουργία) και να προσδιοριστούν στο συμβόλαιο πώλησης στη μεταλλουργία. Εάν το υλικό πρόκειται να μην αξιοποιηθεί δηλαδή να μη πωληθεί, η τιμή  $U_{dir}(x)$  είναι και  $U_{waste}(x)$  και εκφράζεται ως εξής:

$$U_{waste}(x) = -(M_w + P_w + O_w)$$

Τα  $M_w$  και  $O_w$  είναι κόστος εξόρυξης και γενικά έξοδα αντίστοιχα ανά μετρικό τόνο στείρο, δηλαδή άχρηστου υλικού.  $P_w$  είναι το κόστος επεξεργασίας ενός μετρικού τόνου στείρου υλικού, που μπορεί να απαιτηθεί για να αποφευχθεί η πιθανή μόλυνση του νερού και η παραγωγή όξινης απορροής για παράδειγμα από την οξειδωση θειούχων ενώσεων του περιεχόμενου μετάλλου με στόχο να ικανοποιηθούν και άλλες ισχύουσες κανονιστικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Η οριακή % περιεκτικότητα μεταξύ μεταλλεύματος και στείρων είναι  $x_{+c}$  και δίνεται από:  $U_{ore}(x_{+c}) = U_{waste}(x_{+c})$ . Με επίλυση αυτής της εξίσωσης προκύπτει:

$$x_{+c} = \{(M_0 + P_0 + O_0) - M_w + P_w + O_w\} / \{r(V - R)\}$$

Η οριακή % περιεκτικότητα μεταξύ μεταλλεύματος και στείρων είναι ίσος με τη διαφορά μεταξύ του κόστους εξόρυξης και επεξεργασίας μεταλλεύματος και στείρων  $(M_0 + P_0 + O_0) - M_w + P_w + O_w$ , διαιρούμενη με την αξία (τιμή πώλησης-κόστος μεταλλουργικής επεξεργασίας-καθαρισμού) μιας μονάδας μετάλλου που περιέχεται σ' ένα μετρικό τόνο υλικού που έχει υποστεί επεξεργασία  $r(V - R)$ .

### 9.3 Παράδειγμα υπολογισμού οριακής περιεκτικότητας μεταλλεύματος χαλκού

Το παρακάτω παράδειγμα δείχνει πώς μπορεί να υπολογιστεί η οριακή περιεκτικότητα με και χωρίς απομάκρυνση στείρων, σε επιφανειακό ορυχείο χαλκού. Οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά του ορυχείου που θα χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς είναι όπως περιγράφηκε και πιο πάνω τα παρακάτω:

$r$ = ανάκτηση ή ποσοστό % πολύτιμου χρήσιμου υλικού που ανακτάται από το εξορυσσόμενο μέταλλευμα

$V$ = αξία μια μονάδας χρήσιμου υλικού

$R$ = μεταλλουργική επεξεργασία-καθαρισμός του μετάλλου, μεταφορά, κόστος πωλήσεων και άλλα κόστη που υπεισέρχονται ανά μονάδα χρήσιμου προϊόντος

$M_0$ = κόστος εξόρυξης ανά μετρικό τόνο μεταλλεύματος προς επεξεργασία

$P_0$ = κόστος επεξεργασίας ανά μετρικό τόνο μεταλλεύματος προς επεξεργασία

$O_0$ = γενικό κόστος ανά μετρικό τόνο μεταλλεύματος προς επεξεργασία

$M_w$ = κόστος εξόρυξης στείρου

$P_w$ = κόστος επεξεργασίας στείρου

$O_w$ = γενικά έξοδα που αφορούν το στείρο

Το κόστος ευκαιρίας για την «κατάταξη» ενός μετρικού τόνου ( $1t=2.2051b$ ) υλικού ως χρήσιμου ή στείρου.

Αρχικά, χρειάζεται να υπολογιστεί το άμεσο κέρδος από την επεξεργασία του χρήσιμου υλικού  $U_{ore}$  καθώς και η ζημία που θα υπάρξει από το υλικό που δεν είναι προς εκμετάλλευση και θα θεωρηθεί άχρηστο υλικό ή στείρο. Αυτά τα δύο μεγέθη προκύπτουν από τις δύο παρακάτω εξισώσεις:

$$U_{ore}(x) = x_{+c}r(V-R) - (M_0 + P_0 + O_0)$$

$$U_{waste}(x) = -(M_0 + P_0 + O_0)$$

Αρχικά, υπολογίζουμε το  $U_{waste}(x)$  και στη συνέχεια και εφόσον όπως αναφέρθηκε παραπάνω η οριακή % περιεκτικότητα μεταξύ μεταλλεύματος και στείρων είναι  $x_{+c}$  ώστε  $U_{ore}(x_{+c}) = U_{waste}(x_{+c})$ , στη συνέχεια λύνοντας την πρώτη εξίσωση ως προς  $x_{+c}$  προκύπτει η πρώτη οριακή περιεκτικότητα, η οποία αφορά στο υλικό του χαλκού το οποίο βρίσκεται στα εσωτερικά όρια των κοιλωμάτων ενός ορυχείου επιφανειακού τύπου.

Στη συνέχεια, πρέπει να υπολογίσουμε και την οριακή περιεκτικότητα του χαλκού που βρίσκεται εκτός των ορίων του επιφανειακού μεταλλείου και αυτό το μέγεθος προκύπτει πολύ εύκολα με τον λόγο:

$$(M_0 + P_0 + O_0) / r(V-R)$$

Και μ' αυτόν τον τρόπο έχουμε και τον δεύτερο βαθμό αποδέσμευσης χαλκού που μας ενδιαφέρει. Οι % οριακές περιεκτικότητες που υπολογίστηκαν με την βοήθεια των δύο παραπάνω εξισώσεων θα μπορούσαν να προκύψουν απευθείας αντικαθιστώντας τις κατάλληλες τιμές σε άλλες παρόμοιες εξισώσεις. Οι δύο % οριακές περιεκτικότητες δεν θα έχουν την ίδια τιμή θα υπάρξει σίγουρα διαφορά. Η διαφορά στην % οριακή περιεκτικότητα του χαλκού

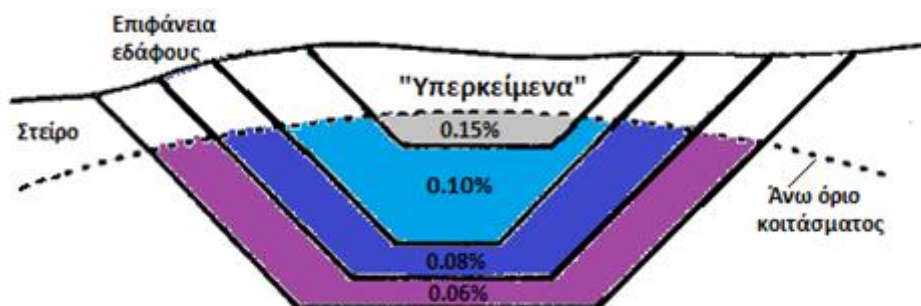
αντιπροσωπεύει το ποσό των επιπλέον ποσοτήτων χαλκού που χρειάζεται για να καλύψει το κόστος του μεταλλευτικού υλικού που δεν ήταν προγραμματισμένο να εξορυχθεί. Τα άλλα είδη εξισώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν δίνουν γραφικές απεικονίσεις των συναρτήσεων χρησιμότητας που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των % οριακών περιεκτικότητας ορυχείων. Στους προηγούμενους υπολογισμούς που οδηγούν στην τελική εξίσωση, η % οριακή περιεκτικότητα του «εξωτερικού» ορυχείου, είναι αυτός που εφαρμόζεται για έναν μετρικό τόνο υλικού % περιεκτικότητας  $x$  που είναι να μην εκτεθειμένο στην επιφάνεια αλλά δεν είχε συμπεριληφθεί στο σχέδιο εξόρυξης. Αυτό το υλικό μπορεί να εξορύσσεται χωρίς απομάκρυνση στείρων. Αντίθετα, στη συνέχεια, με την επόμενη εξίσωση εξετάζεται η περίπτωση όπου, απαιτείται μερική απομάκρυνση αποβλήτων για την εξόρυξη του χαλκού.

Έστω, αν οριστεί  $s$  η ποσότητα των στείρων. Η εξίσωση μ' αυτή την επιπλέον παράμετρο θα πάρει την ακόλουθη μορφή:

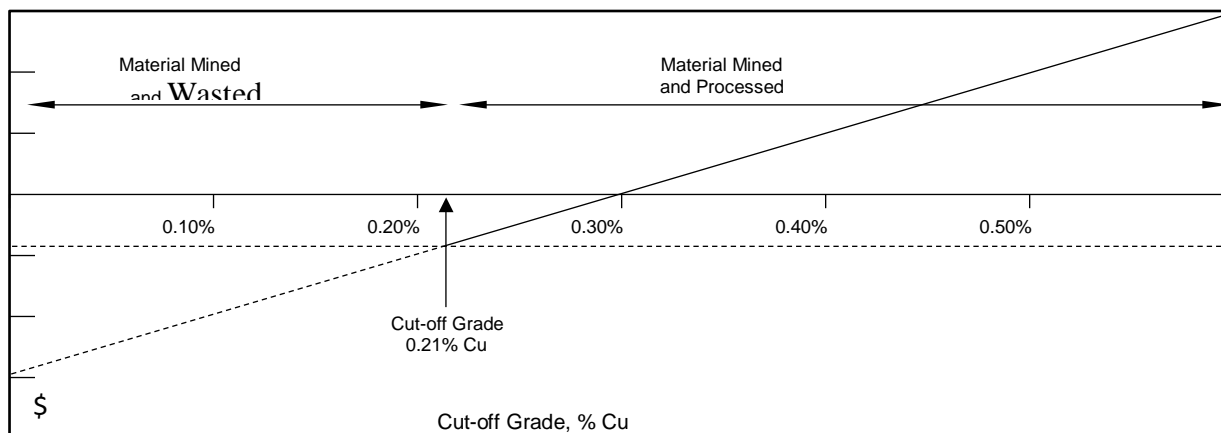
$$U_{ore}(x) = xr(V-R) - (M_0 + P_0 + O_0) - s(M_w + P_w + O_w)$$

Και αναλόγως, είναι επόμενο να έχουμε διαφορετικές τιμές στις οριακές % περιεκτικότητες με την προσθήκη αυτής της επιπλέον παραμέτρου.

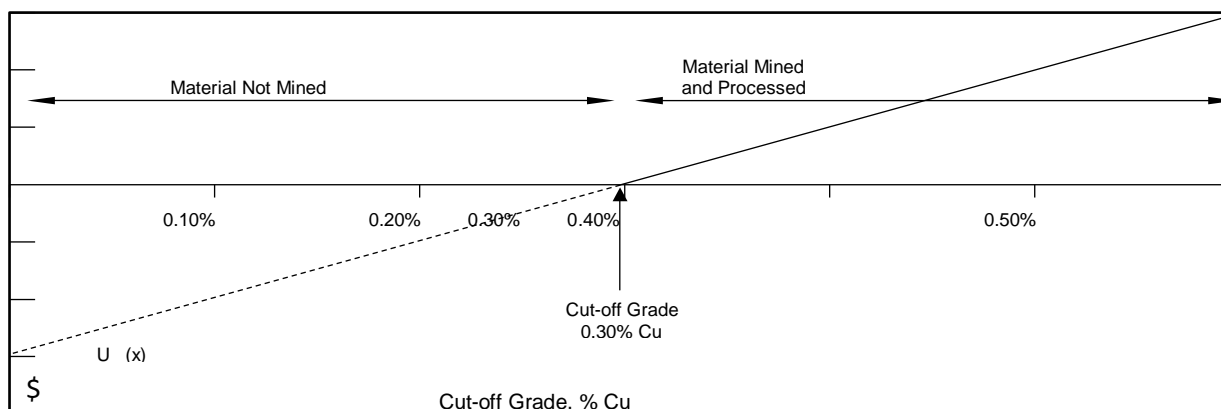
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι γραφικές απεικονίσεις των οριακών περιεκτικότητας για τις διάφορες περιπτώσεις προαναφέρθηκαν ώστε να προκύψει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα πώς κυμαίνονται τα μεγέθη σε κάθε περίπτωση όπως και η **ΕΙΚΟΝΑ 26** ώστε να γίνει κατανοητό πόσο διαφέρει η οριακή % περιεκτικότητα ανάλογα με την περίπτωση.



**ΕΙΚΟΝΑ 26:** Μεταβολή της % οριακής περιεκτικότητας λόγω μεταβολής (μείωση) του λόγου αποκάλυψης (στείρα:μετάλλευμα)

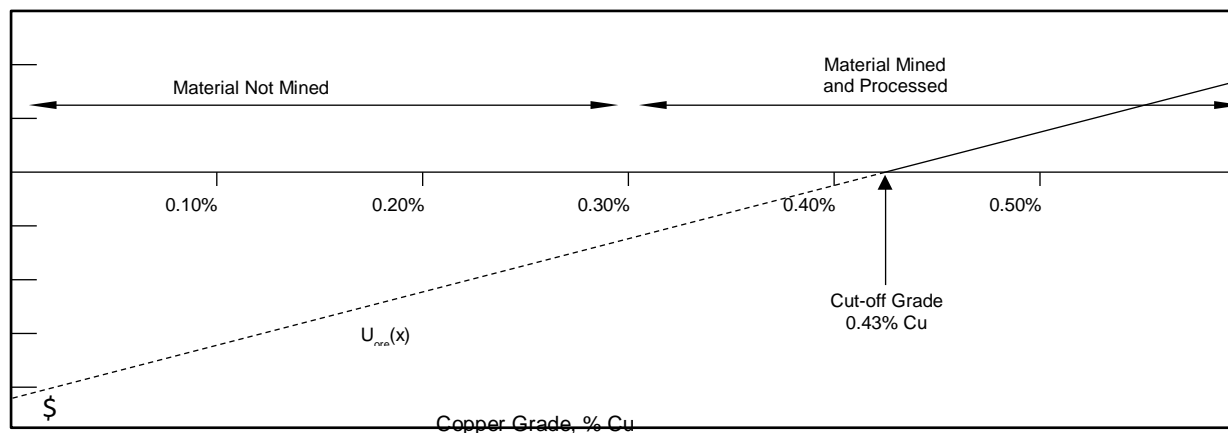


**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13:** Γραφική εκτίμηση % οριακής περιεκτικότητας επιφανειακού ορυχείου χαλκού (εσωτερικά) (Πηγή: An introduction to cut off grade estimation by Jean-Michel Rendu, Society of Mining, Metallurgy and Exploration 2008)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14:** Γραφική εκτίμηση % οριακής περιεκτικότητας επιφανειακού ορυχείου χαλκού (εκτός ορίων) (Πηγή: An introduction to cut off grade estimation by Jean-Michel Rendu, Society of Mining, Metallurgy and Exploration 2008)





**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15:** Γραφική εκτίμηση οριακής % περιεκτικότητας επιφανειακού ορυχείου χαλκού σε λόγο αποκάλυψης 1,5:1 (στείρα:μετάλλευμα) (Πηγή: An introduction to cut off grade estimation by Jean-Michel Rendu, Society of Mining, Metallurgy and Exploration 2008)

#### 9.4 Οριακές % περιεκτικότητες επιφανειακών μεταλλείων (ορυχεία) χαλκού

Το ακόλουθο παράδειγμα δείχνει τη διαδικασία υπολογισμού των οριακών περιεκτικοτήτων, με και χωρίς κόστος αποκάλυψης (απομάκρυνση στείρων), σε επιφανειακό ορυχείο χαλκού. Οι τιμές των παραμέτρων που περιγράφουν τη λειτουργία του ορυχείου και λαμβάνονται υπόψη είναι:

$r = 86\%$  (περιλαμβάνει τις ανακτήσεις εμπλουτιστικής και μεταλλουργικής επεξεργασίας)

$V =$  τιμή 3.20\$ ανά λίβρα πληρωτέου (\$/lb Cu LME)

$R = 0,60\text{\$}$  ανά λίβρα πληρωτέου χαλκού (συμπεριλαμβάνεται ο ναύλος-κόστος μεταφοράς, η μεταλλουργική επεξεργασία και ο καθαρισμός μετάλλου)

$M_0 = 3,00\text{\$}$  κόστος εξόρυξης ανά μετρικό τόνο εξορυσσόμενου μεταλλεύματος (\$/t μεταλλεύματος)

$P_0 = 10,00\text{\$}$  κόστος επεξεργασίας ανά μετρικό τόνο μεταλλεύματος που υποβάλλεται σε επεξεργασία

$O_0 = 1,70\text{\$}$  κόστος γενικών εξόδων ανά μετρικό τόνο μεταλλεύματος που υποβάλλεται σε επεξεργασία.

$M_w = 3,30\$$  κόστος εξόρυξης ανά μετρικό τόνο στείρων που εξορύσσονται

$P_w = 0,50\$$  κόστος επεξεργασίας ανά μετρικό τόνο στείρων που εξορύσσονται (περιλαμβάνονται περιβαλλοντικός έλεγχος και η ενδεχόμενη μελλοντική αποκατάσταση)

$O_w = 0,40\$$  κόστος γενικών εξόδων ανά μετρικό τόνο στείρων που εξορύσσονται.

Το κόστος ευκαιρίας για την κατάταξη ενός μετρικού τόνου ( $1t=2.205lb$ ) υλικού ως μεταλλεύματος ή ως στείρων δίνεται από:

$$U_{ore}(x) = xR(V-R) - (M_o + P_o + O_o) = x0,86(3,20-0,60)2.205 - (3,00+10,00+1,70) = 4.929x - \$14,70$$

$$U_{waste}(x) = -(M_o + P_o + O_o) = -(3,30+0,50+0,40) = -\$4,20$$

Για το υλικό (μετάλλευμα και στέιρο) που εξορύσσεται εντός των ορίων του επιφανειακού μεταλλείου, η οριακή % περιεκτικότητα του εργοστασίου εμπλουτισμού είναι:

$$x_c = (14,70-4,20)/4.929 = \mathbf{0,21\% \text{ Cu}}$$

Ενώ, για το υλικό που εξορύσσεται εκτός των αρχικών ορίων του κοιτάσματος του επιφανειακού μεταλλείου, η οριακή % περιεκτικότητα δίνεται από:

$$x_c = 14,70/4.929 = \mathbf{0,30\% \text{ Cu}}$$

Η διαφορά  $\mathbf{0,09\% \text{ Cu}}$  στην οριακή % περιεκτικότητα που υπολογίζεται, αντιπροσωπεύει την αναγκαία επιπλέον ποσότητα χαλκού (Cu) που περιέχεται στο συμπληρωματικά εξορυγμένο υλικό και θα αποζημιώσει για το κόστος εξόρυξης του μεταλλεύματος που δεν είχε προγραμματιστεί εξ αρχής να εξορυχθεί.

Στους προηγούμενους υπολογισμούς που αφορούσαν στην οριακή % περιεκτικότητα του υλικού εκτός των ορίων του ορυχείου είναι αυτή που αφορά σ' ένα μετρικό τόνο μεταλλεύματος περιεκτικότητας  $x$ , το οποίο εμφανίζεται στην επιφάνεια του ορυχείου, αλλά δεν είχε συμπεριληφθεί στο σχέδιο εξόρυξης, δηλαδή δεν χρειάζεται αποκάλυψη. Δηλαδή αυτό το υλικό μπορεί να εξορυχθεί χωρίς αποκάλυψη (απομάκρυνση στείρων).

Η διαδικασία όμως προσδιορισμού της οριακής % περιεκτικότητας, η οποία ακολουθεί, <<εξετάζει>> την περίπτωση κατά την οποία απαιτείται και απομάκρυνση στείρων για την εξόρυξη αυτού του υλικού. Ο λόγος εξορυσσόμενα στείρα προς μέταλλευμα είναι:

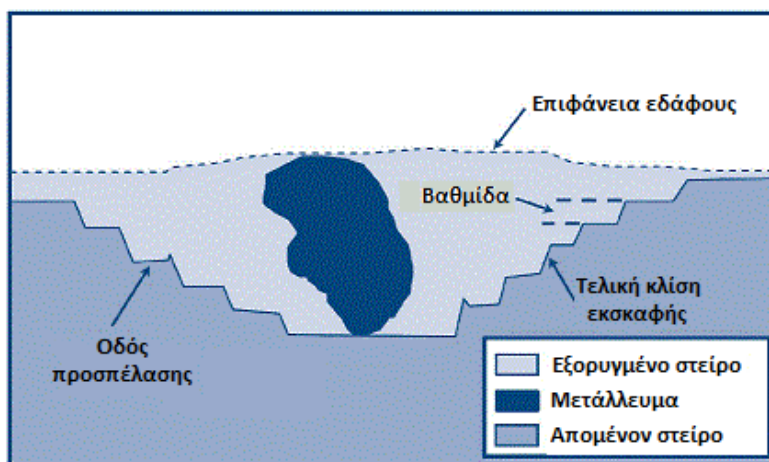
$$s = 1,5t \text{ στείρα ανά μετρικό τόνο μεταλλεύατος (1,5:1)}$$

Οπότε,

$$U_{\text{ore}}(x) = xr(V-R)-(M_o + P_o + O_o)-s(M_w + P_w + O_w) = x0,86(3,20-0,60)2.205-(3,00 + 10,00 + 1,70)-1,5(3,30 + 0,50 + 0,40) = 4,929x-\$21,00$$

Η αντίστοιχη οριακή περιεκτικότητα στην περίπτωση αυτή (με συν-εξόρυξη στείρων) διαμορφώνεται σε:

$$x_c = 21,00/4.929 = 0,43\% \text{ Cu}$$



**ΕΙΚΟΝΑ 27: Εξορυγμένο στείρο-μέταλλευμα-απομένον στείρο**

### **9.5 Οριακή % περιεκτικότητα χαλκού σε ορυχείο μικρής δυναμικότητας**

Για να απεικονιστεί η σχέση μεταξύ περιορισμών δυναμικότητας μεταλλείου-κόστους ευκαιρίας μεταλλείου χαλκού και οριακής % περιεκτικότητας, μέσω συγκεκριμένων μελετών έχουν προκύψει συγκεκριμένες εκτιμήσεις και παραδοχές, οι οποίες έχουν εφαρμογή σε όλων των

ειδών τα μεταλλεία και είναι καταγεγραμμένες στους παρακάτω πίνακες στην αγγλική καθώς είναι η γλώσσα της αγοράς.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Λειτουργικές και οικονομικές παραδοχές ορυχείου χαλκού**

<b>GENERAL OPERATING CONDITIONS</b>		
Mine capacity	72,000,000	Metric tons mined per year
Mill capacity(flotation)	50,000,000	Metric tons processed per year
Refining capacity	480,000,000	Pounds of copper refined per year
Average grade	0,52% CU	Average grade of ore processed
<b>FIXED COSTS(UNALLOCATED)</b>	\$100,000,000	\$/yr
<b>VARIABLE COSTS</b>		
M <sub>w</sub>	\$4.00	\$/waste metricton mined
P <sub>w</sub>	\$0.80	\$/waste metricton mined
O <sub>w</sub>	\$0.65	\$/waste metricton mined
M <sub>0</sub>	\$4.50	\$/ore metricton mined
P <sub>0</sub>	\$9.00	\$/ore metricton mined
O <sub>0</sub>	\$2.20	\$/ore metricton mined
<b>AVERAGE GRADE,RECOVERY AND REVENUE PER POUND OF COPPER</b>		
x	0,55% CU	Average grade of ore mined
r	84%	Copper recovery(flotation and smelter)
V	\$2,95	Copper price per pound of recovered copper
R	\$0,75	Freight and smelting cost per pound of recovered copper
<b>DISCOUNT RATE AND MINE LIFE</b>		
i	12%	Discount rate
n	10	Mine life(years)

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Ετήσια ταμειακή ροή και παρούσα αξία επένδυσης μεταλλείου χαλκού.**

<b>YEARLY CASH FLOW</b>		
metric tons mined	72	Million metric tons per year
metric tons ore	50	Million metric tons per year
Metric tons waste	22	Million metric tons per year
Cost per metric ton ore	\$15.70	\$/t mined and processed
Cost per metric ton waste	\$5.45	\$/t mined and wasted
Cost per year ore	\$785.00	Million \$/yr
Cost per year waste	\$119.90	Million \$/yr
Total operating cost	\$904.90	Million \$/yr
Fixed cost per year	\$100.00	Million \$/yr
Total cost per year	\$1,004.90	Million \$/yr
Ore grade	0.55%	Cu
Copper contained	606.38	Million Ib Cu/yr
Copper recovered	509.36	Million Ib Cu/yr
Revenue per pound sold	\$2.20	\$/Ib
Revenue from sales	\$1,120.58	Million \$/yr
Net cash flow	\$115.68	Million \$/yr(C)
<b>NET PRESENT VALUE</b>	12%	%/yr(i)
Discount rate mine life	10	Years(n)
NPV factor g(I,n)	6.328	$g(I,n)=\{1-(1+i)^{-n}\}(1+i)/i$
Net present value	\$732.06	$NPV_i=Cg(i,n)$

**Οι παραπάνω παραδοχές μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμες στον οικονομικό σχεδιασμό εκμετάλλευσης οποιουδήποτε ορυχείου.**

## 10. ΠΟΛΥΜΜΕΤΑΛΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΑΛΚΟΣ

Τα πολυμεταλικά κοιτάσματα ορίζονται ως συγκεντρώσεις που περιέχουν περισσότερα από ένα μέταλλα οικονομικής αξίας. Οι εξισώσεις που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της κατάλληλης πορείας ή διαδικασίας (εμπλουτισμός ή απόρριψη ως στείρο) πρέπει να εξετάσουν τη οικονομική συμβολή κάθε μετάλλου. Η απόφαση αν ένας μετρικός τόνος υλικού, πρέπει να απορριφθεί ή να αποσταλεί στη μονάδα επεξεργασίας δεν μπορεί πλέον να γίνεται μόνο με βάση την % περιεκτικότητα σε μέταλλο όπως περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η αξιολόγηση μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών (επεξεργασία ή απόρριψη ως στείρο) πρέπει πλέον να γίνεται εισάγοντας τον όρο "**τιμές δολαρίου**" για κάθε πιθανή διαδικασία και η οριακή περιεκτικότητα μεταξύ μεταλλεύματος και "στείρου" πρέπει να εκφράζεται σε όρους δολαρίου.

### 10.1 Γενικές παραδοχές με βάση τον χαλκό

Ας θεωρήσουμε έναν μετρικό τόνο υλικού που περιέχει δυο πολύτιμα μέταλλα, χαλκός και χρυσός. Έστω το  $\chi_1$  και το  $\chi_2$  να είναι οι τιμές χαλκού και χρυσού, αντίστοιχα. Η επεξεργασία αποτελείται από κυκλώματα θραύσης, λειοτριβήσης και επίπλευσης. Ο χαλκός παράγεται σε συμπύκνωμα, το οποίο πωλείται σε μεταλλουργική μονάδα. Η ανάκτηση μέσω επίπλευσης είναι  $r_1$  για χαλκό και  $r_2$  για χρυσό. Το κόστος εξόρυξης, επεξεργασίας, εμπλουτισμού και γενικών εξοδών ενός μετρικού τόνου είναι  $M_0$ ,  $P_0$ , και  $O_0$ , αντίστοιχα. Το αντίστοιχο κόστος ανά μετρικό τόνο στείρων είναι  $M_w$ ,  $P_w$ , και  $O_w$ . Σύμφωνα με τη συμβόλαιο πώλησης στη μεταλλουργία, η τιμή που λαμβάνεται υπόψη για την πώληση του συμπυκνώματος είναι  $p_1 = 96,5\%$  της αξίας του περιεχόμενου χαλκού που περιέχεται στο συμπύκνωμα μετά την αφαίρεση ποσού  $d_1$  και επίσης για την αξία του περιεχόμενου χρυσού ποσοστό  $p_2 = 99\%$  του χρυσού που περιέχεται στο συμπύκνωμα, για να ληφθούν υπόψη οι απώλειες κατά τη μεταλλουργική επεξεργασία. Οι μειώσεις αυτές, που αφορούν στο κόστος μεταλλουργικής επεξεργασίας, είναι  $C_s$  ανά μετρικό τόνο συμπυκνώματος. Ο λόγος συγκέντρωσης  $K$  είναι ο αριθμός των μετρικών τόνων υλικού που πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία για την παραγωγή ενός μετρικού τόνου συμπυκνώματος. Το κόστος μεταφοράς ενός μετρικού τόνου συμπυκνώματος στη μεταλλουργία είναι  $C_t$ . Οι τιμές των μετάλλων  $V_1$  και  $V_2$  για χαλκό και χρυσό, αντίστοιχα είναι εκείνες που καθορίζονται από το χρηματιστήριο μετάλλων του Λονδίνου (London Metal Exchange). Εξ ου

και η τιμή ενός μετρικού τόνου υλικού που αποστέλλεται στην εγκατάσταση επίπλευσης δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις.

Οι συναρτήσεις που αναφέρθηκαν λοιπόν και σε προηγούμενη ενότητα συγκεκριμένα **9.3** στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πάρουν την εξής μορφή:

$$U_{ore}(x_1, x_2) = (x_1 r_1 - d_1) p_1 V_1 + (x_2 r_2) p_2 V_2 - C_s / K - C_t / K - (M_0 + P_0 + O_0)$$

$$U_{waste} = -(M_w + P_w + O_w)$$

Το πολυμεταλλικό μας υλικό θα πρέπει να σταλεί στο εργοστάσιο εμπλουτισμού για περαιτέρω επεξεργασία μόνο αν ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$U_{ore}(x_1, x_2) > U_{waste}$$

Αυτοί οι τύποι δείχνουν ότι πολλοί παράγοντες λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της οριακής περιεκτικότητας μεταξύ μεταλλεύματος και απορριμμάτων. Το κόστος επεξεργασίας και οι ανακτήσεις ενδέχεται να εξαρτώνται όχι μόνο στην περιεκτικότητα σε χρήσιμα μέταλλα, αλλά και σε άλλα γεωλογικά χαρακτηριστικά όπως την ορυκτολογία, την σκληρότητα, την περιεκτικότητα σε αργιλικά και βαθμό οξειδωσης, που αλλάζουν ανάλογα με την περιοχή του κοιτάσματος που εξορύσσεται.

Τα μεταλλουργικά συμβόλαια όσον αφορά στα αποδεκτά συμπυκνώματα εμπλουτισμού, μπορούν να προβλέπουν βαριές ρήτρες όταν τα συμπυκνώματα βρεθούν να περιέχουν υπερβολικές ποσότητες σε επιβλαβή στοιχεία και μη μεταλλικό προϊόν, το οποίο δεν υπήρχε στον αρχικό σχεδιασμό και υπολογισμό.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εκτίμηση της τιμής της οριακής περιεκτικότητας που ισχύει για έναν μετρικό τόνο εξορυσσόμενου υλικού. Επειδή η τιμή ενός μετρικού υλικού είναι συνάρτηση περισσότερων του ενός παραγόντων, δεν έχει πλέον νόημα να μιλάμε για % οριακή περιεκτικότητα. Ιστορικά, αυτό το πολυδιάστατο πρόβλημα μεταβλήθηκε σε μονοδιάστατο πρόβλημα σε τον ορισμό της «ισοδύναμης» περιεκτικότητας σε μέταλλο.

Με την πρόοδο των υπολογιστών και την ευκολία χρήσης τους με την οποία μπορούν να πραγματοποιηθούν σύνθετοι μαθηματικοί υπολογισμοί, τώρα μιλάμε για τιμές οριακής περιεκτικότητας, οι οποίες εκφράζονται σε όρους δολαρίου και απαιτούν υπολογισμό της καθαρής απόδοσης του μεταλλουργικού εργοστασίου smelter.

Ο υπολογισμός της "ισοδύναμης" περιεκτικότητας ενός πολυμεταλλικού μεταλλευτικού κοιτάσματος είναι χρήσιμος για την απλοποίηση της οικονομικής αξιολόγησης μιας συγκέντρωσης χρήσιμων μετάλλων σε όρους ισοδύναμης περιεκτικότητας ενός μόνο ορυκτού. Ο υπολογισμός της "ισοδύναμης" περιεκτικότητας εξαρτάται από δύο παράγοντες :

- Την τιμή κάθε μετάλλου
- Την ανάκτηση % κάθε μετάλλου κατά τη διεργασία εμπλουτισμού

Η "ισοδύναμη" περιεκτικότητα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας έναν ισοδύναμο συντελεστή/παράγοντα, που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της περιεκτικότητας % του δευτερεύοντος μετάλλου σε τιμές % περιεκτικότητας του πρωτεύοντος μετάλλου . Ο ισοδύναμος συντελεστής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση, όπου ο δείκτης 1 δηλώνει το κύριο ή πρωτεύον ορυκτό.

$$F_{eq\ 1-2} = \frac{(p_2 - s_2)y_2}{(p_1 - s_1)y_1}$$

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Ερμηνεία μεταβλητών εξίσωσης προσδιορισμού «ισοδύναμης» περιεκτικότητας**

Variable	Definition
$p$	Market sale value of each metal
$s$	Sales and marketing cost of each metal
$y$	Metallurgical recovery of each metal

Στη συνέχεια, η "ισοδύναμη" μέση περιεκτικότητα % υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το συντελεστή μετατροπής και τη μέση % περιεκτικότητα κάθε μετάλλου στο κοιτάσμα.



$$g_{eq} = g_1 + F_{eq\ 1-2} g_2 + \dots + F_{eq\ 1-n} g_n$$

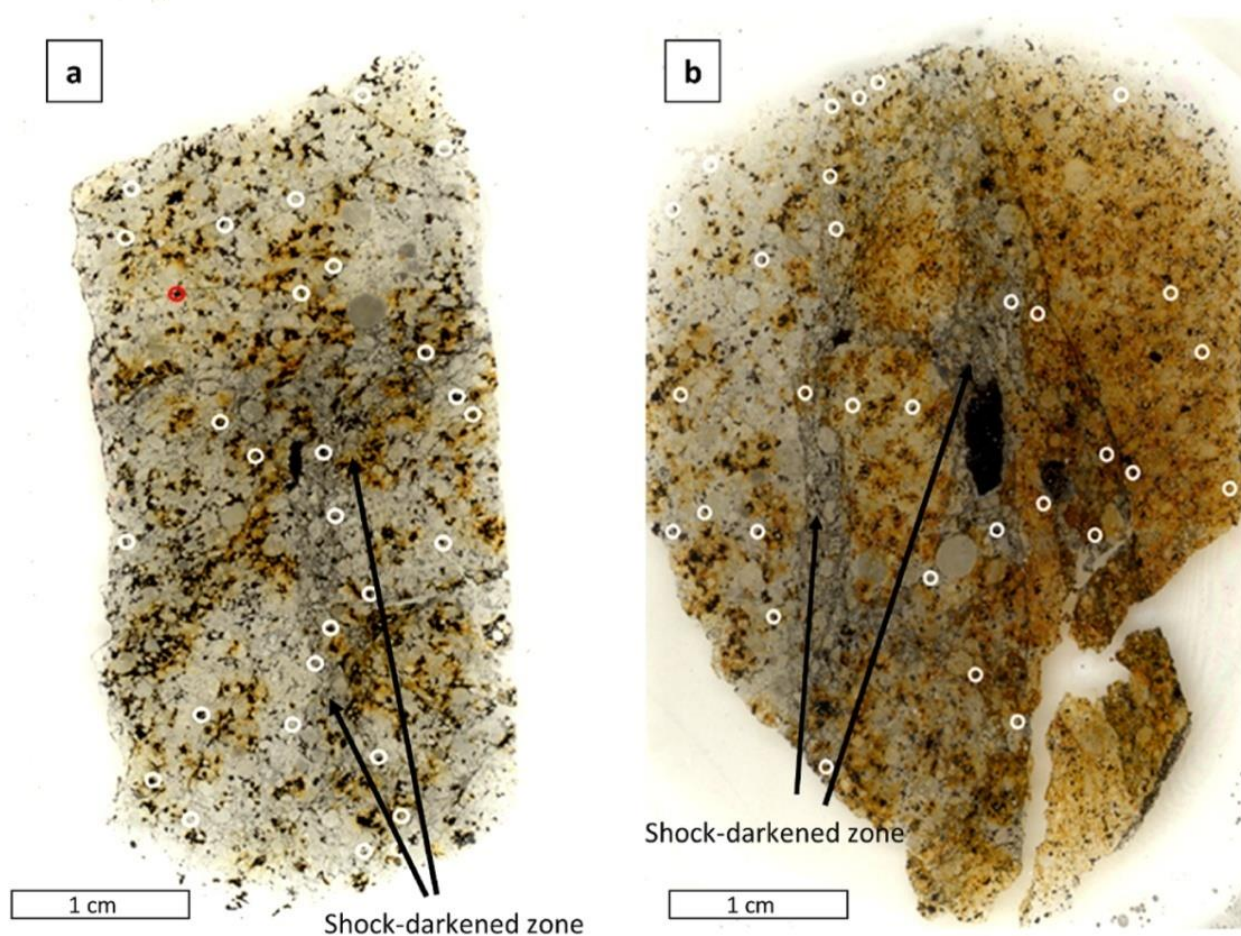
## **11.Ο ΧΑΛΚΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ**

Καθώς οι απαιτήσεις για σημαντικούς μεταλλικούς πόρους συνεχίζουν να αυξάνονται, υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για τη μελέτη διαφόρων διαστημικών περιβαλλόντων, που μπορεί να παρέχουν εναλλακτικές δεξαμενές. Επί του παρόντος, πιστεύεται ότι ορισμένες ομάδες αστεροειδών θα μπορούσαν να περιέχουν σημαντικές αφθονίες μετάλλων όπως ο χαλκός, ο σίδηρος, το νικέλιο ή το κοβάλτιο. Ωστόσο, οι παραδοσιακές εξορυκτικές πρακτικές στη γη συνήθως απαιτούν εκτεταμένη χημική επεξεργασία, γεγονός που εγείρει ανησυχία σχετικά με τη σκοπιμότητα εξόρυξης πόρων στο διάστημα. Πώς μπορούμε να αναγνωρίσουμε αξιόπιστα ατομικούς αστεροειδείς πλούσιους σε μεταλλικούς πόρους και πώς μπορούν να εξαχθούν αποτελεσματικά μέταλλα με τρόπους που ελαχιστοποιούν το κόστος και την καταστροφή στο τοπικό περιβάλλον;

### **11.1 Ο χαλκός στο διάστημα**

Μια πρόσφατη μελέτη της Katarzyna Luszczek στο Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας του Βρότσλαβ και της Agata Krzesinka στο Πανεπιστήμιο του Όσλο προσπάθησε να εντοπίσει καλύτερα τους πιθανούς διαστημικούς πόρους κατανοώντας πώς τα μέταλλα, όπως ο χαλκός, μπορούν να συγκεντρωθούν σε αστεροειδής. Για να γίνει αυτό, αναλύθηκαν αρκετοί μετεωρίτες που ονομάζονται χονδρίτες, που πιστεύεται ότι προέρχονται από κοινό τύπο S, πετρώδης αστεροειδής. Στη συνέχεια, η αφθονία του χαλκού συσχετίστηκε με χαρακτηριστικά σε κάθε μετεωρίτη που θα μπορούσαν να υποδείξουν επιπτώσεις κρούσης ή και τήξης. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι η εναπομένουσα θερμότητα που παράγεται από συμβάντα σύγκρουσης-κρούσης πιθανώς οδηγεί στο σχηματισμό καθαρών αποθέσεων χαλκού, καθώς και άλλων αντιδράσεων σε χονδρίτες. Η μελέτη αναφέρθηκε στην περιοχή στην οποία αυτό συμβαίνει ως «ζώνη σκοτεινότητας σοκ» **EIKONA 28** και μπορεί να ταυτοποιηθεί χρησιμοποιώντας απομακρυσμένες φασματοσκοπικές τεχνικές. Ως εκ τούτου, η μελέτη πρότεινε ότι οι ζώνες σοκ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εντοπίσουν που εναποτέθηκε καθαρός χαλκός, κάτι που είναι ευκολότερο στην εξόρυξη χαλκού σε σχέση με άλλα μεταλλεύματα.

Έτσι, αν και δεν είναι εφικτό από περιβαλλοντική ή οικονομική άποψη η εξόρυξη ενός ολόκληρου αστεροειδούς για μέταλλα όπως ο χαλκός, συγκεκριμένες περιοχές που παρουσιάζουν σκοτεινές κρούσεις μπορεί να είναι προσοδοφόρες και να χρησιμεύσουν ως πιο προσιτές δεξαμενές για μεταλλικούς πόρους στο μέλλον.



**ΕΙΚΟΝΑ 28: Ζώνες χαλκού σε μετεωρίτη**

## **11.2 Ο χαλκός στους ωκεανούς**

Τα τελευταία χρόνια ανακαλύφθηκαν στο βυθό των ωκεανών μια σειρά πολύτιμα μέταλλα όπως κοβάλτιο, μαγγάνιο, χαλκός και νικέλιο. Από το 2013 λειτουργεί το πρώτο ορυχείο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η καναδική εταιρεία Nautilus έχει ήδη την άδεια για την εξόρυξη στερεών ορυκτών από το θαλάσσιο βυθό της παράκτιας περιοχής της Παπούα-Νέα Γουϊνέας στον Ειρηνικό Ωκεανό. Οι Καναδοί προχωρούν ήδη από το 2013 στην εκμετάλλευση των

κοιτασμάτων μαγγανίου, χαλκού, χρυσού, αργύρου και νικελίου που βρίσκονται στο θαλάσσιο βυθό με τη μορφή «κονδύλων» (nodule), γνωστών σαν πολυμεταλλικών «κονδύλων».

Στο θαλάσσιο οικοσύστημα έχουν βρεθεί 3 τύποι ορυκτών ωκεανού βαθέων υδάτων εμπορικού ενδιαφέροντος και είναι τα παρακάτω:

- **Πολυμεταλλικοί «κόνδυλοι»:** ήταν το πρώτο από τα θαλασσινά ορυκτά που ανακαλύφθηκαν. Σε μια περιοχή του βυθού του βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού που είναι γνωστή ως η περιοχή Clarion Clipperton Zone (CCZ), η Διεθνής Αρχή Θάλασσας (ISA) εκτιμά ότι υπάρχουν πάνω από 20 δισεκατομμύρια τόνοι αυτών των «κονδύλων». Γενικά, αυτοί οι «κόνδυλοι» βρίσκονται πάνω σε ιζήματα ωκεανού σε βάθη μεγαλύτερα από 3000 μέτρα.
- **Sea floor Massive Sulfides (SMS):** σχηματίζονται από υποθαλάσσια ηφαιστειακά και γενικά βρίσκονται σε ρηχότερα νερά από ό, τι οι «κόνδυλοι». Οι εναποθέσεις χαλκού, ψευδαργύρου, χρυσού και αργύρου είναι αυτές που έχουν εμπορικό ενδιαφέρον σε αυτές τις περιοχές. Πολλά, εάν όχι τα περισσότερα από αυτά τα πιθανά πεδία βρίσκονται στον δακτύλιο της πυρκαγιάς του Ειρηνικού και βρίσκονται μέσα στην αποκλειστική οικονομική ζώνη των παράκτιων κρατών (EEZ).
- **Οι πολυμεταλλικές κρούστες:** βρίσκονται επίσης σε σχετικά ρηχά νερά στις ΑΟΖ των παράκτιων κρατών. Αυτές οι κρούστες σχηματίζουν ένα σκληρό στρώμα στο βυθό έως 25 εκατοστά πάχους. Τα ορυκτά εμπορικού ενδιαφέροντος είναι το κοβάλτιο, το τιτάνιο, η πλατίνα και ορισμένα μέταλλα σπανίων γαιών (REM).

Όσον αφορά, τους «κόνδυλους» που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, σύμφωνα με επιστημονικές έρευνες ενδέχεται να περιέχουν και 'σπάνιες γαίες' που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας. Δηλαδή στην κατασκευή ηλεκτρονικών υπολογιστών, συσκευές λείζερ, κινητών τηλεφώνων, ιατρικών εξαρτημάτων κλπ.

Η Γερμανία διαθέτει από το 2006 άδεια για την έρευνα και την εκμετάλλευση «κονδύλων» μαγγανίου στο θαλάσσιο βυθό μεταξύ Μεξικού και Χαβάης. Η εξόρυξη είναι ιδιαίτερα

δαπανηρή, διότι οι πολυμεταλλικοί «κόνδυλοι» βρίσκονται στη θαλάσσια άβυσσο, δηλαδή σε βάθος 4.000 μέχρι 6.000 μέτρων. Πέρα όμως από το οικονομικό θέμα, που με την παρούσα τεχνολογία η εκμετάλλευση των ορυκτών πόρων στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι αρκετά ασύμφορη, υπάρχουν και αλλά σοβαρά θέματα. Επιστήμονες και οικολογικές οργανώσεις κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου για την εκμετάλλευση υλών που βρίσκονται στο θαλάσσιο βυθό ή και στην άβυσσο των ωκεανών, διότι εκτιμούν ότι δεν γνωρίζουμε επακριβώς ποιες είναι οι λειτουργίες τους στο συγκεκριμένο θαλάσσιο οικοσύστημα, αλλά ούτε και πόσο σημαντική είναι στην ‘αλυσίδα’ της βιόσφαιρας. Το σίγουρο είναι ότι βρισκόμαστε ακόμα σε πρωταρχικό στάδιο, αλλά σίγουρα στο μέλλον το θαλάσσιο περιβάλλον έχει να μας προσφέρει πολλά με τις κατάλληλες συνθήκες τόσο σε χαλκό όσο και σε άλλα μεταλλεύματα.



**ΕΙΚΟΝΑ 29: Το ερευνητικό ρομπότ ROV 6000 που ανιχνεύει το θαλάσσιο βυθό μέχρι 6000 μέτρα**

## **12. ΧΑΛΚΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Ο χαλκός υπάρχει με φυσικό τρόπο στο περιβάλλον σε μια μεγάλη ποικιλία μορφών. Επίσης, μεγάλες ποσότητες χαλκού απελευθερώνονται στο περιβάλλον καθημερινά μέσω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η φυσική παρουσία του χαλκού στο περιβάλλον βοήθησε στη δημιουργία εξελικτικών μηχανισμών για τη χρησιμοποίηση του χαλκού από τον άνθρωπο, τα φυτά, τα ζώα και επομένως ο χαλκός είναι αναγκαίο στοιχείο για μια φυσιολογική και υγιή ανάπτυξη οργανισμών.

Σύμφωνα με τον Prohanska και Failla (1993) <<..είναι δυσκολότερο να σκεφτούμε ένα σύστημα το οποίο δεν εξαρτάται από τον χαλκό από το να συντάξουμε κατάλογο όλων αυτών που εξαρτώνται>>.

Παρόλα αυτά πρέπει να αναφέρουμε, πως παρόλο που ο χαλκός υπάρχει με φυσικό τρόπο στα εδάφη πολλές φορές δεν είναι βιο-δαθέσιμος για λήψη από τα φυτά. Η μειωμένη λήψη χαλκού κάτω από τα βιολογικώς αναγκαία όρια μπορεί να προκαλέσει έλλειψη χαλκού, καθώς και πλήθος βιοχημικών και φυσιολογικών ανωμαλιών. Όμως, προβλήματα προκαλούνται όχι μόνο από την έλλειψη αλλά και την περίσσεια χαλκού, όταν το περιβάλλον δέχεται υψηλές συγκεντρώσεις. Όλα αυτά είναι φυσικά και επόμενα, καθώς ο χαλκός όταν εισέρχεται στο περιβάλλον εκτίθεται σε πολλές και διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Το γεγονός αυτό συχνά οδηγεί σε αλλαγές στη χημική σύσταση του χαλκού και επομένως και στη βιοδιαθεσιμότητά του. Το ποσό του χαλκού που εισέρχεται στο περιβάλλον και οι χημικές αλλαγές που συμβαίνουν είναι πολύ σημαντικές για τον καθορισμό της τύχης του και της βιολογικής επίδρασης.

Ο Requegnat το 1990 αναφέρει <<... Γίνεται όλο και πιο δύσκολο το να πείσουμε ορισμένους περιβαλλοντολόγους ότι μια απλή παρουσία ενός τοξικού συστατικού σε θαλάσσια ιζήματα δεν σημαίνει αναγκαία ότι θα επηρεάσει με επιζήμιο τρόπο την πανίδα και την χλωρίδα του οικοσυστήματος>>.

Αυτό που πρέπει να τονιστεί, είναι ότι ο χαλκός συνήθως αμέσως μόλις εισέλθει στο περιβάλλον σχηματίζει σταθερές και ακίνδυνες ενώσεις με οργανικά και ανόργανα συστατικά του περιβάλλοντος και παρόλο που οι αλληλεπιδράσεις, του χαλκού με τον περιβάλλον είναι πολύπλοκες, οι έρευνες δείχνουν ότι σχεδόν όλες οι ποσότητες χαλκού που εισέρχονται στο περιβάλλον σταθεροποιούνται αμέσως.



### 12.1 Χαλκός και ανακύκλωση

Όπως αναφέρθηκε ο χαλκός, είναι ένα μέταλλο το οποίο μπορεί να ανακυκλωθεί απεριόριστες φορές και αυτό είναι μια ιδιότητα με τεράστια οφέλη για το περιβάλλον. Η επανένταξη του «σκράπ» στην παραγωγή συμβάλει στις αρχές της κυκλικής οικονομίας και έχει τεράστια κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με την πρωτογενή παραγωγή της ίδιας ποσότητας χαλκού, υπολογίζεται τουλάχιστον σε 4.398.816MWh, σε χρονικό διάστημα 12 ετών (από το 2008-2019) ισοδυναμώντας με ενέργεια που καταναλώνει ετησίως μια πόλη 775.970 κατοίκων (υπολογισμένο από το μέσο όρο της Ε.Ε).

Τα οφέλη της ανακύκλωσης του χαλκού παρουσιάζονται στο **ΠΙΝΑΚΑ 8** που ακολουθεί:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Οφέλη ανακύκλωσης**

Ενέργεια για παραγωγή 1 tn Cu (MWh)	Εξοικονόμηση ενέργειας λόγω ανακύκλωσης(%)	Μ.Ο. παραπάνω ετήσιας χρήσης σκραπ 2008-2019 σε σχέση με 2007 (tn)	Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας (MWh)	Ισοδύναμη ετήσιας ενέργειας πόλης (αρ. κατοίκων)
<b>27,8</b>	<b>85</b>	<b>15.513</b>	<b>4.398.816</b>	<b>755.970</b>
Εκλύσεις CO <sub>2</sub> ανά παραγόμενο τόνο Cu (tn)	Αποφυγή εκπομπών CO <sub>2</sub> λόγω ανακύκλωσης (%)	Μ.Ο. παραπάνω ετήσιας χρήσης σκραπ 2008-2019 σε σχέση με 2007 (tn)	Συνολική αποφυγή εκπομπών CO <sub>2</sub>	Ισοδύναμες ετήσιες εκπομπές CO <sub>2</sub> πόλης (αρ. κατοίκων)
<b>5,5</b>	<b>64</b>	<b>15.513</b>	<b>655.262</b>	<b>61.245</b>

### 13. ΧΑΛΚΟΣ ΚΑΙ ΥΓΕΙΑ

Δεν θα γινόταν σ' αυτό το σημείο να μην γίνει αναφορά στο σημαντικό ρόλο που μπορεί να παίζει ο χαλκός στην προστασία της υγείας του ανθρώπου, ειδικά στην εποχή που αυτός ο τομέας την ανθρωπότητας είναι ιδιαίτερα ευάλωτος. Στην αρχαιότητα ο χαλκός αντιπροσώπευε για τους Αιγύπτιους την αιώνια ζωή, την υγεία και την ευημερία και το χρησιμοποιούσαν για τη θεραπεία λοιμώξεων και την αποστείρωση του νερού. **Ο Ιπποκράτης αντιμετώπιζε με χαλκό (ή χαλκό και μέλι) ανοιχτές πληγές και δερματικά προβλήματα, ενώ Ρωμαίοι, Αζτέκοι, Πέρσες, Ινδοί και Μογγόλοι τον είχαν πρώτο και καλύτερο για έλκη και μολύνσεις.**

Ο χαλκός δεν κάνει μόνο για καλώδια και ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές, αλλά επίσης καταστρέφει (με ασφάλεια και απόλυτη επιτυχία) περισσότερο από το 99,9% όλων των βακτηρίων, ακόμα και τα πιο ανθεκτικά όπως ο χρυσίζων σταφυλόκοκκος. Και όλα αυτά μέσα σε 10 λεπτά έως 2 ώρες, αρκεί οι ευαίσθητοι, βλαβεροί μικροοργανισμοί να έρθουν σε επαφή με την επιφάνειά του. Άρα υπερέχει και ξεχωρίζει, επειδή κανένα υλικό δεν μπορεί να πλησιάσει την αντιμικροβιακή αποτελεσματικότητά του. **Ίσως γι' αυτό στις επιδημίες χολέρας στο Παρίσι (1832-1852) οι εργαζόμενοι στον χαλκό είχαν ανοσία στην ασθένεια. Πολλά επίσης έχουν λεχθεί και για την έντονη αντικαρκινική του δράση, παρατηρημένη ήδη από το 1912 σε Γερμανία, Γαλλία και Αγγλία.**

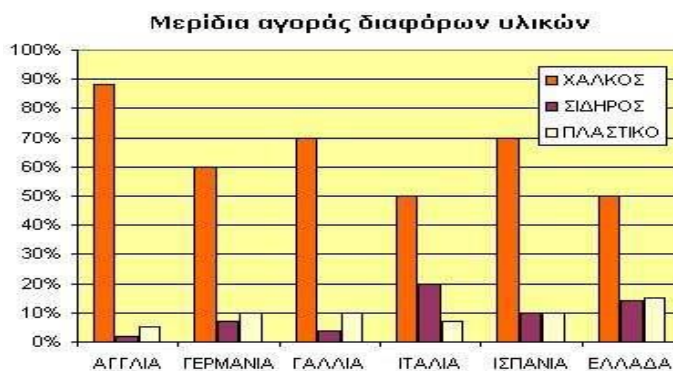
<<Το κόκκινο μέταλλο>> έχει καταπλήξει τους επιστήμονες με τις ιδιότητές του, αφού σαρώνει στην κυριολεξία όποιον μολυσματικό παράγοντα βρεθεί στον δρόμο του. Ο τρόπος που το κάνει είναι εκπληκτικός. Πρώτα τρυπάει την εξωτερική μεμβράνη των βακτηρίων κάνοντάς την σαν... <<σουρωτήρι>> και στη συνέχεια τα εμποδίζει να τραφούν, να αναπνεύσουν, να δημιουργήσουν ενέργεια, να πολλαπλασιαστούν ή έστω να επισκευάσουν τη χαλασμένη μεμβράνη τους. Αυτό σημαίνει ότι ο χαλκός καταστρέφει συνεχώς τα μικρόβια και μάλιστα χωρίς να φθείρεται ο ίδιος, ενώ ταυτόχρονα είναι απόλυτα ασφαλής στην (εξωτερική) χρήση του.

Σήμερα στα νοσοκομεία διαφόρων χωρών (και της Ελλάδας) χρησιμοποιείται ο λεγόμενος <<αντιμικροβιακός χαλκός>> που αποτελείται από διάφορα ανθεκτικά κράματα του μετάλλου. Όπως υποστηρίζει μάλιστα ο καθηγητής μικροβιολογίας Bill Keevil, πρόεδρος Περιβαλλοντικής Υγείας στο αγγλικό πανεπιστήμιο του Southampton, η τοποθέτηση επιφανειών από χαλκό επάνω σε αντικείμενα που αγγίζουμε καθημερινά μέσα σε δημόσια κτίρια και οχήματα μαζικής μεταφοράς (π.χ. χειρολαβές, πόμοια και διακόπτες) θα μπορούσε να μειώσει την ταχεία παγκόσμια διάδοση των πολύ-ανθεκτικών μικροβίων. Όπως είναι λοιπόν ξεκάθαρο, ειδικά λόγω των συνθηκών που διανύουμε στις μέρες ο χαλκός μπορεί να προσφέρει λύσεις ακόμα και σ' αυτό τον τομέα.

## 14. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Είναι φανερό από όλα τα παραπάνω πώς η ζωή του ανθρώπου από την αρχαιότητα είναι συνδεδεμένη με τον χαλκό και είναι βέβαιο πώς αυτή η κοινή πορεία θα συνεχιστεί. Από όλα τα μέταλλα που έχουν χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο, ο χαλκός είχε την θετικότερη επίδραση στην εξέλιξη, ίσως όχι του απόλυτου πλούτου, αλλά της πρόοδου, του πολιτισμού και των επιστημών. Ο χαλκός με τα δεδομένα που έχουμε προς το παρόν, παρόλο που είναι γνωστός από την προϊστορική εποχή και χρησιμοποιείται ευρέως εδώ και 5.000 χρόνια περίπου ίσως να είναι ο χρυσός του μέλλοντος κυρίως στην εποχής μας. Από την ανακάλυψή του έως και σήμερα έχει παίξει ζωτικό ρόλο συνεισφέροντας στη βελτίωση της ποιότητας και βιωσιμότητας των ανθρώπινων κοινωνιών και αυτό θα συνεχίσει να κάνει.

Το μέλλον της γης πλέον επιτάσσει την χρήση φιλικών προς το περιβάλλον υλικών και στη διαχείριση των υπολειμμάτων τους, μέσω της ανακύκλωσης στο τέλος της ζωής τους. Ο χαλκός όπως αναφέρθηκε καλύπτει και με το παραπάνω αυτά τα κριτήρια καθώς είναι ένα οικολογικά αποδεκτό μέταλλο 100% ανακυκλώσιμο και υποστηρίζει όλες τις ήπιες μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή, συμβάλλοντας θετικά στη διατήρηση του περιβάλλοντος του πλανήτη. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως το 41% του χαλκού που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη προέρχεται από ανακύκλωση. Επομένως, η παρουσία του χαλκού στην πορεία της ανθρωπότητας είναι δεδομένη το οποίο επιβεβαιώνει και το παρακάτω **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16**. Το σίγουρο είναι ότι με την πάροδο του χρόνου και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, νέες μορφές εμπλουτισμού αλλά και επεξεργασίας του χαλκού θα ανακαλυφθούν και θα εξελιχθούν ώστε να μπορούμε να επωφεληθούμε από την χρήση του.



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16: Μερίδια αγοράς διαφόρων υλικών (Πηγή: <https://www.wikipedia.org>)**



## **15. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Mining Economics and Strategy by Ian C. Runge, SME 1998.
2. An introduction to cut off grade estimation by Jean-Michel Rendu, Society of Mining, Metallurgy and Exploration 2008.
3. An introduction to cut off grade estimation by Jean-Michel Rendu, 2<sup>nd</sup> Edition, Society of Mining, Metallurgy and Exploration 2013
4. Economic Geology Research cut off grade, University of the Witwaterstrand Johannesburg, some aspects of ore reserve estimation by F. Mendelsohn 1980.
5. The economic definition of ore by Kenneth F. Lane, 1988
6. Βασικές αρχές και εφαρμογές ορυκτολογίας με διαγράμματα και έγχρωμες φωτογραφίες, Σεραφείμ Γ. Σαββίδης, Κοζάνη 2014.
7. Σημειώσεις με θέμα: « Σχεδιασμός υπαίθριων εκμεταλλεύσεων-Εκτίμηση αποθεμάτων και βελτιστοποίηση Ορίων Εκμετάλλευσης », Μενεγάκη Μαρία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ.
8. Σημειώσεις με θέμα: « Μηχανική προπαρασκευή και Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων Ι », Τσακαλάκης Κωνσταντίνος, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ.
9. Σημειώσεις με θέμα: « Μηχανική προπαρασκευή και Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων ΙΙ », Τσακαλάκης Κωνσταντίνος, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ.
10. Ελληνικό Ινστιτούτο Ανάπτυξης Χαλκού, Ιστοσελίδα: <https://copperalliance.gr/>
11. Κύπρος το νησί του Χαλκού. Η παραγωγή και η εμπορία του μετάλλου από την εποχή του Χαλκού μέχρι και την Ρωμαϊκή περίοδο, Βασιλική Κασσιανίδου, 2006
12. Εισαγωγή στην μεταλλευτική έρευνα, Κωνσταντίνος Μόδης-Σοφία Σταματάκη, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ.
13. Lunar Geology: Minerals on the Moon, Ιστοσελίδα: <https://www.permanent.com/lunar-geology-minerals.html>

14. Planetary and Space Science, Elsevier BV.
15. Ιστοσελίδα: <https://www.orykta.gr/>
16. Η μεταλλουργία του χαλκού, Τσέλιος Θωμάς, 2010
17. Copper in ordinary chondrites: Proxies for resource potential of asteroids and constraints for minimum-invasive and economically efficient exploitation, Katarzyna Luszczek- Agata M. Krzesinska, September 2020
18. Ιστοσελίδα: <http://el.marinetechologynews.com/>
19. Ιστοσελίδα: <https://www.halcor.com/el/sustainability/supply-chain>
20. Ιστοσελίδα: <https://www.halcor.com/el/press-center/metal-price>
21. Ιστοσελίδα: <https://www.bgs.ac.uk/mineralsUK/statistics/mineralProfiles.html>
22. Chilean copper mining costs, Jorge Cantallopts Director of Research and Policy Planning Chilean Copper Commision, December 2017
23. Analysis of material efficiency aspects of personal computers product group, Tecchio P., Ardente F., Marwede M., Clemm C., Dimitrova G., Mathieux F., January 2018.
24. Article Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? (Guiomar Calvo 1, Gavin Mudd 2, Alicia Valero 1 and Antonio Valero 1). Resources 2016, 5, 36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>

