



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΧΡΙΣΤΙΝΑ Β. ΜΑΥΡΕΑ
ΑΕΜ 5444

ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024





ΧΡΙΣΤΙΝΑ Β. ΜΑΥΡΕΑ

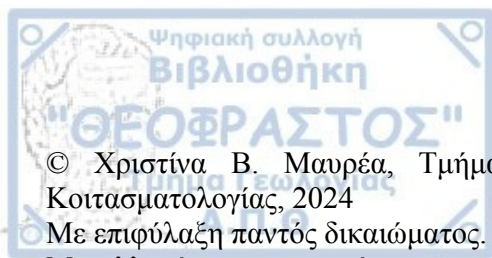
ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Χριστίνα Β. Μαυρέα ΑΕΜ: 5444
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Χριστίνα Β. Μανρέα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Μεταλλογένεση κοιτασμάτων πορφυριτικού τύπου - *Διπλωματική Εργασία*

© Christina V. Mavrea, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2024

All rights reserved.

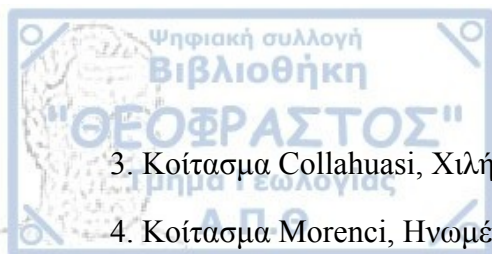
Metallogenesis of porphyry type ore deposits- *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ	5
1. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	5
2. ΖΩΝΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ.....	7
3. ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ	8
Ζώνη ποτασσικής Εξαλλοίωσης.....	9
Ζώνη Προπυλιτικής Εξαλλοίωσης	9
Ζώνη Σερικιτικής Εξαλλοίωσης	9
Ζώνη Αργλικής Εξαλλοίωσης	10
4. Κατανομή Μετάλλων στις Ζώνες.....	10
ΤΥΠΟΙ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΑ	12
1. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Χαλκού (Cu)	13
2. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Χρυσού (Au).....	13
3. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Μολυβδαινίου (Mo).....	13
4. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Χαλκού-Χρυσού (Cu-Au).....	13
5. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Χαλκού-Μολυβδαινίου (Cu-Mo).....	13
ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΟΣ.....	14
ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	15
ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ.....	15
1. Κοίτασμα Escondida, Χιλή.....	15
2. Κοίτασμα Grasberg, Ινδονησία	16



3. Κοίτασμα Collahuasi, Χιλή	16
4. Κοίτασμα Morenci, Ηνωμένες Πολιτείες	17
ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ	18
Το Κοίτασμα των Σκουριών	18
Το κοίτασμα της Μαρώνειας	19
ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	21
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	22



Η διπλωματική αυτή εργασία εξετάζει τη μεταλλογένεση πορφυριτικών κοιτασμάτων, τα οποία αποτελούν σημαντικές πηγές χαλκού, χρυσού και μολυβδαινίου παγκοσμίως. Τα πορφυριτικά κοιτάσματα σχηματίζονται μέσω υδροθερμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές με έντονη μαγματική δραστηριότητα, συνήθως σε συνθήκες σύγκλισης τεκτονικών πλακών. Η εργασία αναλύει τη δομή των κοιτασμάτων, η οποία επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και τη σύσταση των υδροθερμικών ρευστών, και εξετάζει τις κύριες ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης: ποτασσική, προπυλιτική, σερικιτική και αργιλική. Επίσης, αναλύεται η κατανομή των μετάλλων σε αυτές τις ζώνες και η σημασία τους για την εξορυκτική δραστηριότητα. Επιπλέον, η εργασία παρουσιάζει τα κυριότερα παγκόσμια πορφυριτικά κοιτάσματα, καθώς και τα σημαντικότερα ελληνικά κοιτάσματα και εμφανίσεις, όπως των Σκουριών και της Μαρώνειας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην περιβαλλοντική διάσταση της εξόρυξης, καθώς και στην κοινωνική αποδοχή των εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Η κατανόηση του μηχανισμού σχηματισμού αυτών των κοιτασμάτων και η βιώσιμη διαχείριση των πόρων τους είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομία και το περιβάλλον.



ABSTRACT

This thesis examines the metallogenesis of porphyry ore deposits, which are significant sources of copper, gold, and molybdenum worldwide. Porphyry deposits form through hydrothermal processes occurring in areas with intense magmatic activity, typically in tectonic plate convergence zones. The thesis analyzes the zonation of these deposits, influenced by temperature and the composition of hydrothermal fluids, and explores the main hydrothermal alteration zones: potassic, propylitic, sericitic, and argillic. The distribution of metals within these zones and their importance for mining activities are also discussed. Additionally, the thesis presents major global porphyry deposits as well as significant Greek deposits, such as Skouries and Maronia. Special emphasis is placed on the environmental impact of mining, along with the social impact of the mining activities. Understanding the formation mechanisms of these deposits and the sustainable management of their resources is crucial for both the economy and the environment.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε από τον κ. Βασίλειο Μέλφο, Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την υπόδειξη του θέματος, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής.

Τα μέταλλα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας καθώς περιέχονται σε μια πληθώρα αντικειμένων. Η παρούσα πτυχιακή εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει και να εξετάσει την μεταλλογένεση πορφυριτικού τύπου που αποτελεί μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξη σε όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία καθώς και στον κ. Β. Μέλφο, που ήταν ο επιβλέπων αυτής της διπλωματικής εργασίας.



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα αποτελούν μία από τις πιο σημαντικές πηγές εξόρυξης μεταλλευμάτων, κυρίως χαλκού και χρυσού, σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτά τα γεωλογικά συστήματα σχηματίζονται μέσω υδροθερμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές με έντονη μαγματική δραστηριότητα. Η οικονομική σημασία τους είναι τεράστια, καθώς προσφέρουν σταθερές ποσότητες πολύτιμων μετάλλων, εξασφαλίζοντας την τροφοδοσία της βιομηχανίας σε πρώτες ύλες που απαιτούνται για την κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών, κατασκευών, και άλλων προϊόντων καθημερινής χρήσης (Guilbert & Park 2007).

Η κατανόηση του μηχανισμού σχηματισμού των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι σημαντική τόσο για τη γεωλογία όσο και για τη βιομηχανία εξόρυξης καθώς μπορεί να βοηθήσει την εύρεση νέων κοιτασμάτων με σημαντικά οικονομικά οφέλη. Τα κοιτάσματα αυτά σχηματίζονται σε μεγάλα βάθη, όπου οι υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις προκαλούν την κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών, τα οποία αποθέτουν μέταλλα μέσα σε πυριγενή και ηφαιστειακά πετρώματα. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε μεγάλες συγκεντρώσεις μετάλλων, καθιστώντας τα πορφυριτικά κοιτάσματα σημαντικούς στόχους για εξόρυξη.

Η σημασία των πορφυριτικών κοιτασμάτων επεκτείνεται και στην παγκόσμια οικονομία. Τα κοιτάσματα αυτά για παράδειγμα, εξασφαλίζουν την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων χαλκού αλλά και χρυσού, δυο μέταλλων πολύ σημαντικά στην καθημερινότητά μας με πολλές χρήσεις. Παράλληλα, τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι συνήθως μεγάλα σε μέγεθος και εκτείνονται σε σημαντικά βάθη, κάτι που τα καθιστά ιδανικά για μακροχρόνια εκμετάλλευση με σημαντικό οικονομικό όφελος (Klein Philpotts 2013).

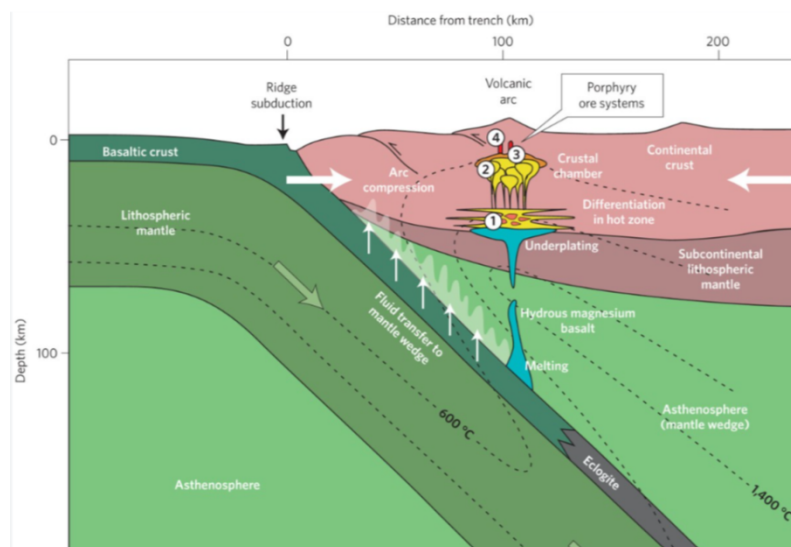
Η εκμετάλλευση των πορφυριτικών κοιτασμάτων, αλλά και όλων των τύπων μεταλλοφοριών, περιλαμβάνει περιβαλλοντικές προκλήσεις. Οι δραστηριότητες εξόρυξης συχνά επιφέρουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως η αποψίλωση δασών και η ρύπανση των υδάτων. Για αυτό το λόγο η τήρηση των περιβαλλοντικών νόμων είναι υψίστης σημασίας (Moon et al. 2006, Wills & Finch 2015).

ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗΣ

1. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα σχηματίζονται σε περιοχές όπου υπάρχει έντονη μαγματική δραστηριότητα, συνήθως σε συνθήκες σύγκλισης τεκτονικών πλακών. Το μάγμα, που προέρχεται από το μανδύα της Γης, ανεβαίνει προς την επιφάνεια, και κατά την ψύξη του, απελευθερώνει υδροθερμικά ρευστά. Αυτά τα ρευστά είναι πλούσια σε μεταλλικά στοιχεία, όπως χαλκός, χρυσός και μολυβδαίνιο, τα οποία διαλύονται σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Η απελευθέρωση των ρευστών γίνεται κατά την κρυστάλλωση του μάγματος, μια διαδικασία που είναι κρίσιμη για τον εμπλουτισμό των πετρωμάτων σε μέταλλα (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005, Guilbert & Park 2007).

Καθώς το μάγμα ανεβαίνει προς τα ανώτερα τμήματα της λιθόσφαιρας, μπορεί να διεισδύσει σε προϋπάρχοντα πετρώματα, σχηματίζοντας μαγματικούς θόλους ή άλλες δομές (Σχήμα 1). Η εισβολή του μάγματος σε ψυχρότερα πετρώματα οδηγεί σε μερική κρυστάλλωση, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση υδροθερμικών ρευστών. Αυτή η διαδικασία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον σχηματισμό των πορφυριτικών κοιτασμάτων, καθώς τα υδροθερμικά ρευστά αρχίζουν να διαλύουν και να μεταφέρουν τα μέταλλα που βρίσκονται στο μάγμα, οδηγώντας σε συγκέντρωση αυτών σε συγκεκριμένες περιοχές (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005).



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση του γεωτεκτονικού περιβάλλοντος σχηματισμού των κοιτασμάτων πορφυριτικού τύπου (ΠΗΓΗ: Wilkinson 2013)

Μετά τον αρχικό σχηματισμό των πορφυριτικών κοιτασμάτων, δευτερογενή υδροθερμικά ρευστά μπορούν να διεισδύσουν στην περιοχή, προκαλώντας περαιτέρω μεταλλογενετικές διεργασίες. Αυτά τα ρευστά μπορεί να προέρχονται είτε από παρακείμενα μαγματικά συστήματα είτε από την ανακύκλωση ήδη υπάρχοντων ρευστών μέσα στο σύστημα. Τα δευτερογενή ρευστά μπορεί να εμπλουτίσουν συγκεκριμένα μέρη του κοιτάσματος σε μέταλλα ή να προκαλέσουν την εκ νέου διανομή των μετάλλων, σχηματίζοντας νέες φλέβες και ζώνες εμπλουτισμένες σε χαλκό, χρυσό, ή άλλα μεταλλικά στοιχεία. Οι μεταγενέστερες υδροθερμικές διεργασίες μπορούν να προκαλέσουν την αναδιάταξη των μεταλλικών ζωνών μέσα στο πορφυριτικό σύστημα. Με την πάροδο του χρόνου, οι μεταλλικές φλέβες μπορούν να εμπλουτιστούν ή να απεμπλουτιστούν, καθώς νέα υδροθερμικά ρευστά διέρχονται από τις υπάρχουσες ρωγμές και πόρους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συγκέντρωση μεταλλικών στοιχείων σε νέες ζώνες ή και στην απομάκρυνση ορισμένων στοιχείων, επηρεάζοντας έτσι την τελική κατανομή και τον βαθμό καθαρότητας του κοιτάσματος (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005, Guilbert & Park 2007).

Οι μεταγενέστερες διεργασίες συχνά οδηγούν σε σημαντικές αλλαγές στην ορυκτολογική σύνθεση του κοιτάσματος. Τα νέα υδροθερμικά ρευστά μπορεί να αντιδράσουν με τα ήδη σχηματισμένα ορυκτά, μετατρέποντάς τα σε νέες ορυκτολογικές φάσεις. Αυτές οι μετατροπές μπορούν να επηρεάσουν την ευκολία εξόρυξης και επεξεργασίας των μεταλλευμάτων, αλλά και την ποιότητα των τελικών προϊόντων. Οι δευτερογενείς υδροθερμικές διεργασίες συχνά οδηγούν σε εμπλουτισμό των επιφανειακών ζωνών του κοιτάσματος. Καθώς τα υδροθερμικά ρευστά μετακινούνται προς τα ανώτερα επίπεδα του φλοιού, τα μέταλλα μπορεί να καταβυθίζονται σε ρηχές ζώνες, δημιουργώντας εμπλουτισμένες επιφάνειες που είναι πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμες. Αυτός ο εμπλουτισμός μπορεί να περιλαμβάνει αυξημένες συγκεντρώσεις χαλκού, χρυσού, ή άλλων πολύτιμων μετάλλων, κάνοντας τις επιφανειακές αυτές ζώνες ιδιαίτερα ελκυστικές για εξόρυξη (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005).

Η τεκτονική δραστηριότητα μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στις μεταγενέστερες υδροθερμικές διεργασίες. Ρήγματα και άλλες τεκτονικές δομές μπορεί να ανοίξουν νέες διαδρομές για την κυκλοφορία των υδροθερμικών ρευστών, προκαλώντας περαιτέρω εμπλουτισμό ή απεμπλουτισμό του κοιτάσματος. Η συνεχής κίνηση του φλοιού μπορεί επίσης να προκαλέσει την ανακατανομή των μετάλλων και την δημιουργία νέων, δευτερογενών κοιτασμάτων κοντά στα αρχικά πορφυριτικά κοιτάσματα. Τα υδροθερμικά ρευστά που απελευθερώνονται από το ψυχόμενο μάγμα κινούνται μέσω του φλοιού της Γης μέσω διαρροών

και ρωγμών, ακολουθώντας κυρίως τις ζώνες αδυναμίας των πετρωμάτων. Αυτή η κυκλοφορία είναι κρίσιμη για τη συγκέντρωση των μεταλλικών στοιχείων σε συγκεκριμένες περιοχές. Καθώς τα ρευστά κινούνται προς ψυχρότερα περιβάλλοντα, προκαλούνται χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην απόθεση των μετάλλων στις επιφάνειες των ρωγμών και στους πόρους των πετρωμάτων, σχηματίζοντας τελικά τα μεταλλικά κοιτάσματα (Silito 2010, Seedorff et al. 2005).

2. ΖΩΝΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ

Ένα από τα χαρακτηριστικά των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι η έντονη ζώνωση που παρουσιάζουν. Αυτή η ζώνωση οφείλεται στη σταδιακή εναπόθεση των μεταλλικών στοιχείων καθώς τα υδροθερμικά ρευστά μετακινούνται από την πηγή του μάγματος προς τα ανώτερα επίπεδα του φλοιού. Τα πιο θερμά ρευστά τείνουν να αποθέτουν μεταλλικά στοιχεία όπως χαλκό και μολυβδαίνιο κοντά στο κέντρο του συστήματος, ενώ τα ψυχρότερα ρευστά αποθέτουν χρυσό και άλλα ευγενή μέταλλα πιο απομακρυσμένα από την κεντρική ζώνη (Murad et al. 2021).

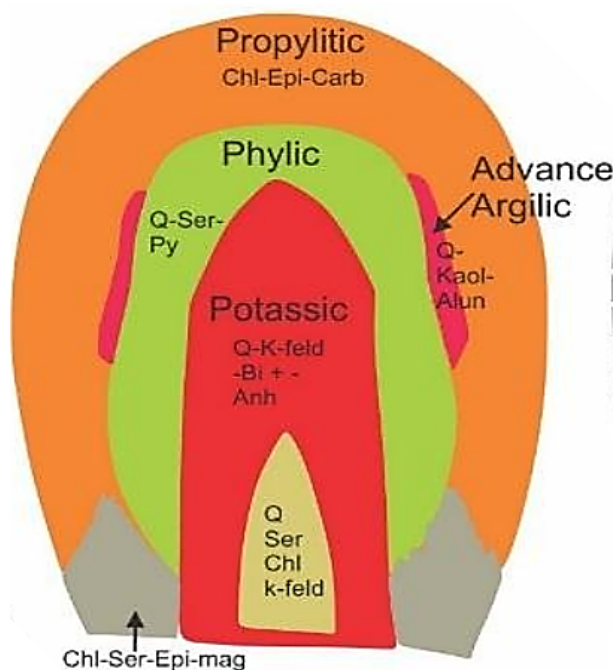
Καθώς τα υδροθερμικά ρευστά κινούνται και ψύχονται, τα μέταλλα που μεταφέρουν αρχίζουν να αποτίθενται μέσα σε ρωγμές και πόρους των πετρωμάτων, σχηματίζοντας φλέβες και αρτηρίες μεταλλικών ορυκτών. Οι φλέβες αυτές συχνά περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων όπως ο χαλκός και ο χρυσός, καθιστώντας τα οικονομικά εκμεταλλεύσιμα. Ο σχηματισμός αυτών των φλεβών είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό των πορφυριτικών κοιτασμάτων και μπορεί να συμβάλει στην εκτίμηση της ποιότητας και της ποσότητας του μετάλλου που περιέχει το κοιτάσμα (Murad et al. 2021, Silito 2010).

Τα υδροθερμικά ρευστά που σχηματίζουν τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι συχνά όξινα, λόγω της παρουσίας διοξειδίου του θείου και άλλων πτητικών συστατικών που διαλύονται στο μάγμα. Αυτό το όξινο περιβάλλον επιτρέπει τη διατήρηση των μεταλλικών ιόντων σε διάλυση καθώς τα ρευστά κινούνται μέσω του φλοιού. Η σταδιακή εξουδετέρωση των ρευστών αυτών σε ψυχρότερες ζώνες προκαλεί την καταβύθιση των μετάλλων, δημιουργώντας ζώνες πλούσιες σε χαλκό, χρυσό και άλλα μέταλλα (Silito 2010, Seedorff et al. 2005).

3. ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΞΑΛΟΙΩΣΕΙΣ

Μετά την αρχική απόθεση των μετάλλων, τα πορφυριτικά κοιτάσματα μπορούν να υποστούν περαιτέρω αλλαγές λόγω μεταγενέστερων υδροθερμικών διεργασιών. Αυτές οι διεργασίες μπορούν να αναδιατάξουν τα μέταλλα, να εμπλουτίσουν ή να απομακρύνουν μεταλλικά στοιχεία από το σύστημα. Τέτοιες αλλαγές μπορεί να είναι αποτέλεσμα μεταγενέστερων φάσεων μαγματικής δραστηριότητας ή και της δράσης ρευστών που προέρχονται από βαθύτερες περιοχές της Γης. Οι ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης στα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι κρίσιμες για την κατανόηση της γεωλογικής τους δομής και την οικονομική τους αξία. Αυτές οι ζώνες δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση των υδροθερμικών ρευστών με τα πετρώματα και χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα ορυκτολογικά και χημικά χαρακτηριστικά.

Οι κύριες ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης στα πορφυριτικά συστήματα είναι οι εξής: η ζώνη ποτασσικής εξαλλοίωσης, η ζώνη προπυλιτικής εξαλλοίωσης, η ζώνη σερικιτικής εξαλλοίωσης και η ζώνη αργιλικής εξαλλοίωσης (Σχήμα 2). Κάθε μια από αυτές τις ζώνες χαρακτηρίζεται από διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες, ορυκτολογικές συνθέσεις και τύπους μετάλλων που περιέχουν, προσφέροντας μοναδικές ενδείξεις για την παρουσία και το βάθος των πορφυριτικών κοιτασμάτων (Silito 2010, Seedorff et al. 2005).



Σχήμα 2: Γενικευμένη κατανομή των ζωνών εξαλλοίωσης σε ένα πορφυριτικό σύστημα. (ΠΗΓΗ: Murad et al. 2021).

Η ζώνη ποτασσικής εξαλλοίωσης είναι η βαθύτερη και πιο θερμή ζώνη στο πορφυριτικό σύστημα. Χαρακτηρίζεται από την παρουσία ορυκτών όπως ορθόκλαστο, αλβίτης, βιοτίτης και μαγνητίτης. Αυτή η ζώνη σχηματίζεται σε θερμοκρασίες συνήθως μεταξύ 400-600°C, όπου τα υδροθερμικά ρευστά είναι πλούσια σε κάλιο. Τα μέταλλα που συναντώνται σε αυτή τη ζώνη περιλαμβάνουν τον χαλκό και το μολυβδαίνιο, τα οποία συχνά σχηματίζουν μεγάλες και οικονομικά εκμεταλλεύσιμες φλέβες. Η ποτασσική ζώνη είναι σημαντική καθώς αποτελεί την κύρια πηγή των βασικών μετάλλων στο πορφυριτικό κοίτασμα, και η αναγνώριση της στην ύπαιθρο μπορεί να υποδεικνύει την παρουσία ενός πλούσιου σε χαλκό συστήματος σε βαθύτερα επίπεδα (Silito 2010, Seedorff et al. 2005).

Ζώνη Προπυλιτικής Εξαλλοίωσης

Η ζώνη προπυλιτικής εξαλλοίωσης βρίσκεται συνήθως πάνω από την ποτασσική ζώνη και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, περίπου 250-400°C. Αυτή η ζώνη χαρακτηρίζεται από την παρουσία ορυκτών όπως ο χλωρίτης, το επίδοτο, ο αλβίτης και ο σερίκίτης. Τα υδροθερμικά ρευστά που δημιουργούν την προπυλιτική ζώνη είναι πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα και ασβεστίτη, τα οποία προκαλούν την αλλοίωση των μαγματικών πετρωμάτων. Η ζώνη αυτή είναι φτωχότερη σε μέταλλα σε σχέση με την ποτασσική ζώνη, αλλά μπορεί να περιέχει ίχνη χαλκού, χρυσού και άλλων δευτερογενών μετάλλων. Η παρουσία της προπυλιτικής ζώνης στην ύπαιθρο μπορεί να αναγνωριστεί από την πράσινη απόχρωση των πετρωμάτων λόγω του χλωρίτη, καθώς και από την εμφάνιση μαζικών αλλοιώσεων στα πετρώματα (Silito 2010, Seedorff et al. 2005).

Ζώνη Σερικιτικής Εξαλλοίωσης

Η ζώνη σερικιτικής εξαλλοίωσης βρίσκεται σε μεσαία βάθη και χαρακτηρίζεται από την παρουσία σερίκίτη, χαλαζία και θειούχων ορυκτών. Αυτή η ζώνη σχηματίζεται σε θερμοκρασίες περίπου 300-450°C και είναι συχνά πλούσια σε μεταλλικά στοιχεία όπως χαλκός, μολυβδαίνιο και χρυσός. Η σερικιτική ζώνη είναι σημαντική για την εξερεύνηση πορφυριτικών κοιτασμάτων, καθώς μπορεί να υποδεικνύει την ύπαρξη πλούσιων φλεβών σε χαλκό και άλλα πολύτιμα μέταλλα. Στην ύπαιθρο, η ζώνη αυτή αναγνωρίζεται από την εκτεταμένη παρουσία σερίκίτη, ο

οποίος δίνει στα πετρώματα μια λευκή ή ανοιχτόχρωμη εμφάνιση, και από τη συχνή παρουσία θειούχων φλεβών που μπορεί να εκτίθενται στην επιφάνεια (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005).

Ζώνη Αργιλικής Εξαλλοίωσης

Η ζώνη αργιλικής εξαλλοίωσης είναι η πιο επιφανειακή και σχηματίζεται σε θερμοκρασίες κάτω από 300°C. Αυτή η ζώνη χαρακτηρίζεται από την παρουσία αργιλικών ορυκτών όπως καολίνης, σμεκτίτης και ιλίτης. Η αργιλική εξαλλοίωση συμβαίνει κυρίως σε περιοχές όπου τα υδροθερμικά ρευστά έχουν υποστεί μεγάλη αραίωση και έχουν χαμηλή θερμοκρασία, προκαλώντας εκτεταμένη αλλοίωση των πετρωμάτων. Η ζώνη αυτή συχνά συνοδεύεται από χαμηλές συγκεντρώσεις μεταλλικών στοιχείων, ωστόσο μπορεί να υποδεικνύει την ύπαρξη πλουσιότερων ζωνών σε μεγαλύτερο βάθος. Στην ύπαιθρο, η ζώνη αργιλικής εξαλλοίωσης αναγνωρίζεται από τα μαλακά, λευκά ή γκρίζα αργιλικά πετρώματα και την παρουσία έντονων αλλοιώσεων στην επιφάνεια (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005).

4. Κατανομή Μετάλλων στις Ζώνες

Η κατανομή των μετάλλων στις ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης ακολουθεί ένα συγκεκριμένο πρότυπο, με τον χαλκό και το μολυβδαίνιο να είναι συγκεντρωμένα κυρίως στη ζώνη ποτασσικής εξαλλοίωσης. Στη σερικιτική ζώνη, βρίσκονται επίσης υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού και χρυσού, ενώ στις πιο επιφανειακές ζώνες, όπως η αργιλική, τα μέταλλα συνήθως παρουσιάζουν διάχυτη κατανομή ή χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Η κατανόηση αυτής της κατανομής είναι κρίσιμη για την εξερεύνηση πορφυριτικών κοιτασμάτων, καθώς καθορίζει ποιες περιοχές είναι πιο πιθανό να περιέχουν εκμεταλλεύσιμα μεταλλεύματα (Murad et al. 2021).

Η αναγνώριση των ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης στην ύπαιθρο είναι μια σημαντική δεξιότητα για γεωλόγους και μεταλλωρύχους. Οι ζώνες αυτές αναγνωρίζονται βάσει των ορυκτολογικών τους χαρακτηριστικών, των χρωματικών αλλαγών στα πετρώματα, και της παρουσίας συγκεκριμένων τύπων φλεβών και μεταλλικών στοιχείων στην επιφάνεια. Για παράδειγμα, η ποτασσική ζώνη αναγνωρίζεται από την παρουσία βιοτίτη και μαγνητίτη, ενώ η σερικιτική ζώνη χαρακτηρίζεται από τον σερικίτη και τις φλέβες με σουλφίδια και κυρίως σιδηροπυρίτη.

Η χρήση γεωχημικών αναλύσεων και γεωφυσικών μεθόδων μπορεί επίσης να βοηθήσει στην ακριβή ταυτοποίηση αυτών των ζωνών και στη χαρτογράφηση τους σε υπόγεια επίπεδα. Οι ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης είναι κρίσιμες για την επιτυχή εξερεύνηση και εκμετάλλευση πορφυριτικών κοιτασμάτων. Οι γεωλόγοι χρησιμοποιούν την κατανομή των ζωνών αυτών για να εντοπίσουν περιοχές με υψηλή πιθανότητα για οικονομικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα. Η αναγνώριση των ζωνών μπορεί να κατευθύνει τις εξορυκτικές δραστηριότητες προς τις πιο πλούσιες σε μέταλλα περιοχές και να βοηθήσει στην εκτίμηση του βάθους και του μεγέθους του κοιτάσματος. Η κατανόηση της αλληλουχίας και της εξέλιξης των ζωνών είναι επίσης σημαντική για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη σχεδίαση βιώσιμων μεθόδων (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005).

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα συνήθως σχηματίζονται σε βάθη αρκετών χιλιομέτρων κάτω από την επιφάνεια της Γης. Με την πάροδο του χρόνου, οι τεκτονικές διεργασίες και η διάβρωση μπορεί να φέρουν αυτά τα κοιτάσματα πιο κοντά στην επιφάνεια, όπου γίνονται προσβάσιμα για εξόρυξη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να διαρκέσει εκατομμύρια χρόνια και επηρεάζεται από μια ποικιλία γεωλογικών παραγόντων (Murad et al. 2021).

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα συνδέονται συχνά με άλλους τύπους κοιτασμάτων, όπως τα επιθερμικά και τα skarn. Η γεωλογική σχέση μεταξύ αυτών των τύπων κοιτασμάτων μπορεί να προσφέρει επιπλέον πληροφορίες για τη γεωλογική ιστορία μιας περιοχής και για τις δυνατότητες εξόρυξης. Οι σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφόρων γεωλογικών διεργασιών μπορούν να οδηγήσουν σε πλούσια κοιτάσματα που περιέχουν ποικίλα μεταλλικά στοιχεία (Silitoe 2010).

Η κατανόηση των γεωλογικών προτύπων που χαρακτηρίζουν τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι ζωτικής σημασίας για την εξερεύνηση νέων πόρων. Οι γεωλόγοι χρησιμοποιούν συγκεκριμένα γεωλογικά και γεωχημικά κριτήρια για να αναγνωρίσουν περιοχές με πιθανή παρουσία πορφυριτικών κοιτασμάτων, εφαρμόζοντας τεχνικές όπως η γεωφυσική και γεωχημική ανάλυση για να εντοπίσουν υπόγεια κοιτάσματα (Sinclair 2007).

ΤΥΠΟΙ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΑ

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι γνωστά για την πλούσια περιεκτικότητά τους σε διάφορα μέταλλα, με τα κυριότερα να είναι ο χαλκός, ο χρυσός και το μολυβδαίνιο. Ο χαλκός αποτελεί το βασικότερο μέταλλο που περιέχεται στα πορφυριτικά συστήματα, καθώς αυτά τα κοιτάσματα είναι η κύρια πηγή χαλκού παγκοσμίως. Συνήθως, ο χαλκός συναντάται με τη μορφή θειούχων ορυκτών, όπως ο χαλκοπυρίτης και ο βορνίτης. Ο χρυσός, ο οποίος συχνά συνοδεύει τον χαλκό σε πολλά πορφυριτικά κοιτάσματα, βρίσκεται σε μικρότερες συγκεντρώσεις, αλλά η οικονομική του αξία είναι πολύ σημαντική. Το μολυβδαίνιο, ένα άλλο βασικό μέταλλο που συναντάται στα πορφυριτικά κοιτάσματα, εξορύσσεται κυρίως ως μολυβδαινίτης και έχει κρίσιμη χρήση στη βιομηχανία λόγω των ιδιοτήτων του (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005, Hedenquist & Richards 1998).

Ο χαλκός αποτελεί το κύριο μέταλλευμα στα πορφυριτικά κοιτάσματα και συνήθως εμφανίζεται σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 0,3% έως 1% κατά βάρος. Αν και η συγκέντρωση αυτή φαίνεται χαμηλή, η τεράστια έκταση των πορφυριτικών κοιτασμάτων καθιστά την εξόρυξη του χαλκού οικονομικά βιώσιμη. Ο χρυσός, που συχνά συνυπάρχει με τον χαλκό, παρουσιάζει συγκεντρώσεις της τάξης των 0,2 έως 2 γραμμαρίων ανά τόνο. Η παρουσία του χρυσού στα πορφυριτικά συστήματα ενισχύει την οικονομική αξία του κοιτάσματος, καθώς προσφέρει ένα σημαντικό δευτερογενές προϊόν. Η εξόρυξη του χρυσού από τα πορφυριτικά κοιτάσματα γίνεται συνήθως παράλληλα με την εξόρυξη του χαλκού, γεγονός που αυξάνει την οικονομική απόδοση της εκμετάλλευσης. Το μολυβδαίνιο αποτελεί επίσης σημαντικό μεταλλικό στοιχείο σε πολλά πορφυριτικά κοιτάσματα, ιδιαίτερα στα κοιτάσματα που σχηματίζονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι συγκεντρώσεις μολυβδαίνιου κυμαίνονται συνήθως από 0,01% έως 0,2% κατά βάρος. Εκτός από το μολυβδαίνιο, άλλα μέταλλα που μπορεί να περιέχονται στα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι ο άργυρος, τον βισμούθιο και ο κασσίτερος. Αυτά τα μέταλλα αν και σε μικρότερες συγκεντρώσεις, μπορούν να αποτελέσουν σημαντικές πηγές πρόσθετων εσόδων για την εξορυκτική δραστηριότητα (Silitoe 2010, Seedorff et al. 2005).

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα μπορούν να διαχωριστούν με βάση το κύριο μέταλλο που περιέχουν, και αυτός ο διαχωρισμός συχνά γίνεται για να τονιστεί η οικονομική σημασία του κάθε μετάλλου. Οι κυριότερες κατηγορίες περιλαμβάνουν:

1. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Χαλκού (Cu)

Αυτά τα κοιτάσματα είναι η πιο κοινή μορφή πορφυριτικών συστημάτων και αποτελούν την κύρια πηγή χαλκού παγκοσμίως. Περιέχουν κυρίως χαλκοπυρίτη και άλλα θειούχα ορυκτά του χαλκού. Εκτός από χαλκό, συχνά περιέχουν σημαντικές ποσότητες χρυσού και μολυβδαινίου, αλλά ο χαλκός παραμένει το κυρίαρχο μέταλλο που εξορύσσεται.

2. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Χρυσού (Au)

Σε αυτά τα κοιτάσματα, ο χρυσός είναι το κύριο μέταλλο και εξορύσσεται ως βασικό προϊόν. Τα πορφυριτικά χρυσού μπορεί να περιέχουν επίσης μικρότερες ποσότητες χαλκού, αλλά η οικονομική σημασία του χρυσού είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη.

3. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Μολυβδαινίου (Mo)

Σε αυτά τα κοιτάσματα, το μολυβδαίνιο είναι το κύριο προϊόν. Ο μολυβδαίνιτης είναι το βασικό ορυκτό και τα κοιτάσματα αυτά συχνά σχηματίζονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα πορφυριτικά χαλκού. Μπορούν να περιέχουν μικρές ποσότητες χαλκού και αργύρου, αλλά το μολυβδαίνιο είναι το μέταλλο που καθορίζει την εξορυκτική τους αξία.

4. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Χαλκού-Χρυσού (Cu-Au)

Αυτά τα κοιτάσματα περιέχουν σημαντικές ποσότητες τόσο χαλκού όσο και χρυσού. Συνήθως, και τα δύο μέταλλα έχουν οικονομική σημασία και εξορύσσονται ταυτόχρονα. Τα κοιτάσματα αυτά είναι από τα πιο αποδοτικά, καθώς τα έσοδα προέρχονται από δύο βασικά πολύτιμα μέταλλα.

5. Πορφυριτικά Κοιτάσματα Χαλκού-Μολυβδαινίου (Cu-Mo)

Ο χαλκός και το μολυβδαίνιο αποτελούν τα κύρια προϊόντα. Αυτά τα κοιτάσματα είναι σημαντικά για τη βιομηχανία, καθώς παρέχουν δύο βασικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται ευρέως. Ο συνδυασμός χαλκού και μολυβδαινίου καθιστά αυτά τα κοιτάσματα στρατηγικά για την παραγωγή υλικών υψηλής αντοχής.

Ο διαχωρισμός των πορφυριτικών κοιτασμάτων με βάση το κυρίαρχο μέταλλο είναι σημαντικός, όχι μόνο για την κατανόηση της γεωλογίας τους, αλλά και για την οικονομική τους αξιολόγηση και την επιλογή κατάλληλων μεθόδων εξόρυξης και επεξεργασίας (Moon et al. 2006).

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΟΣ

Η εξόρυξη πορφυριτικών κοιτασμάτων αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει τη χρήση τεχνικών ανοικτής εκσκαφής και την επεξεργασία των μεταλλευμάτων για την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων όπως ο χαλκός, ο χρυσός και το μολυβδαίνιο. Η συντριπτική πλειονότητα των πορφυριτικών κοιτασμάτων εξορύσσονται με τη μέθοδο της ανοικτής εκσκαφής (open-pit mining), λόγω του μεγάλου μεγέθους τους και της σχετικά χαμηλής περιεκτικότητάς τους σε μέταλλα. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την αφαίρεση των επιφανειακών στρωμάτων και την εξόρυξη του μεταλλεύματος από μεγάλα και βαθιά κοιλάματα, τα οποία μπορούν να φτάσουν σε βάθος αρκετών εκατοντάδων μέτρων και σε πλάτος αρκετών χιλιομέτρων (Wills & Finch 2015, Moon et al.2006).

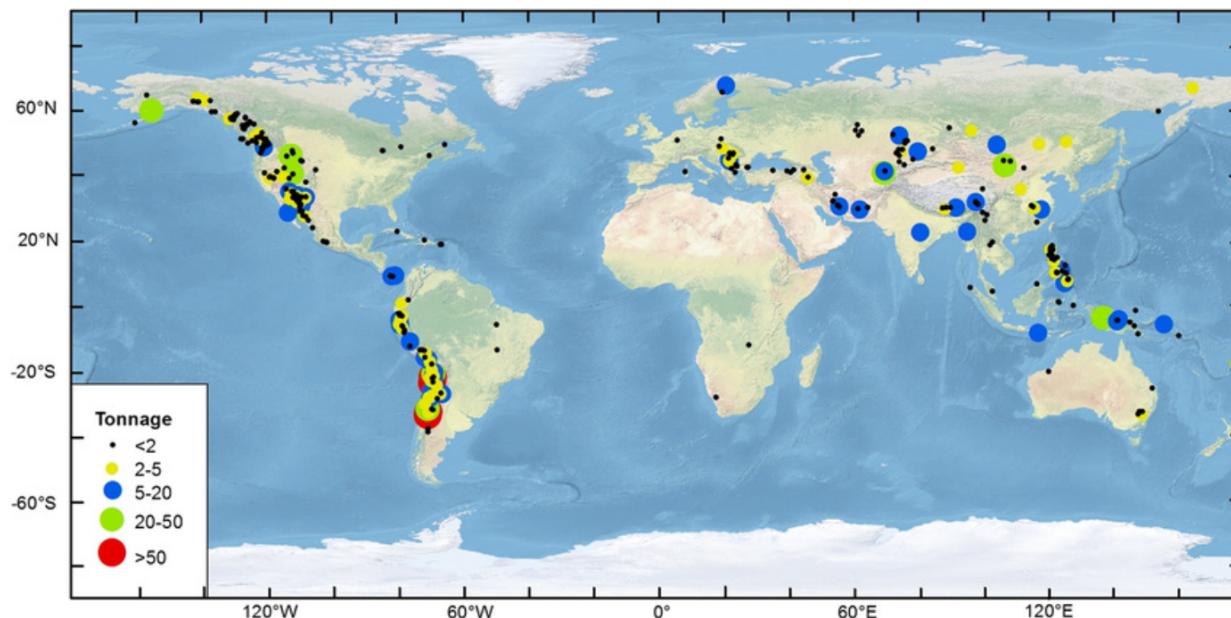
Μετά την εξόρυξη, το υλικό μεταφέρεται στις εγκαταστάσεις θραύσης, όπου το μέγεθός του μειώνεται δραστικά για να διευκολυνθεί η περαιτέρω επεξεργασία. Ο εμπλουτισμός του χαλκού γίνεται μέσω επίπλευσης και μπορεί να αποδώσει συμπυκνώματα με περιεκτικότητα χαλκού που υπερβαίνει το 20%. Μετά την επίπλευση, τα συμπυκνώματα υπόκεινται σε διαδικασίες ξήρανσης και τήξης, κατά τις οποίες το μεταλλικό οξείδιο του χαλκού ανακτάται ως καθαρό μέταλλο. Για τον εμπλουτισμό του χρυσού και του μολυβδαίνιου, συχνά χρησιμοποιούνται εξειδικευμένες διαδικασίες, όπως η κυάνωση και η εκχύλιση, οι οποίες επιτρέπουν την απομόνωση αυτών των μετάλλων από το υπόλοιπο υλικό (Wills & Finch 2015, Moon et al. 2006).

Η διαχείριση των αποβλήτων από αυτές τις διαδικασίες αποτελεί σημαντική πρόκληση, καθώς τα πορφυριτικά κοιτάσματα παράγουν τεράστιες ποσότητες απορριμμάτων και τελμάτων. Οι εγκαταστάσεις διαχείρισης τελμάτων που κατασκευάζονται για να συγκρατούν τα απόβλητα, αποτρέποντας τη ρύπανση των υδάτινων πόρων πρέπει να ελέγχονται διαρκώς και αν τηρούνται όλα τα προβλεπόμενα περιβαλλοντικά μέτρα. Εξελίξεις στη βιώσιμη εξόρυξη και επεξεργασία, όπως η ανακύκλωση του νερού και η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον αντιδραστήρων, συνεχώς βελτιώνουν τις τεχνικές αυτές, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της εξόρυξης πορφυριτικών κοιτασμάτων (Wills & Finch 2015, Moon et al.2006).

ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Η πλειοψηφία των κοιτασμάτων πορφυριτικού τύπου εντοπίζεται σε περιοχές με συγκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών (Σχήμα 3) (Sun et al. 2015)



Σχήμα 3: Παγκόσμια κατανομή των κοιτασμάτων πορφυριτικού τύπου (ΠΗΓΗ: Sun et al. 2015)

1. Κοίτασμα Escondida, Χιλή

Το κοίτασμα Escondida, που βρίσκεται στην έρημο Ατακάμα της Χιλής, είναι το μεγαλύτερο πορφυριτικό κοίτασμα χαλκού στον κόσμο. Ανακαλύφθηκε το 1981 και η παραγωγή του ξεκίνησε το 1990. Το Escondida είναι υπεύθυνο για περίπου το 5% της παγκόσμιας παραγωγής χαλκού, παράγοντας περισσότερους από 1 εκατομμύριο τόνους χαλκού ετησίως. Το κοίτασμα περιέχει τεράστιες ποσότητες χαλκού, κυρίως με τη μορφή πρωτογενών θειούχων ορυκτών, όπως χαλκοπυρίτης και βορνίτης, καθώς και δευτερογενών θειούχων ορυκτών, όπως κοβελλίνης και χαλκοσίνης. Το κοίτασμα Escondida είναι ένα τυπικό παράδειγμα πορφυριτικού κοιτάσματος χαλκού-χρυσού, με το χαλκό να είναι το κυρίαρχο μέταλλο. Χρησιμοποιείται επίσης για την παραγωγή χρυσού και αργύρου ως παραπροϊόντα. Η τεράστια έκταση του κοιτάσματος, που εκτείνεται σε εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα, επιτρέπει την εφαρμογή της τεχνικής της ανοικτής εκσκαφής, με ένα από τα μεγαλύτερα ανοικτά ορυχεία στον κόσμο να βρίσκεται εκεί (Σχήμα 3) (Hervé et al. 2012).

Η εξόρυξη στο Escondida είναι μια πρόκληση λόγω των εξαιρετικά ξηρών κλιματικών συνθηκών της περιοχής και του γεγονότος ότι το ορυχείο βρίσκεται σε υψηλό υψόμετρο, πάνω από 3.000 μέτρα. Παρά τις προκλήσεις, το Escondida παραμένει ένα από τα πιο αποδοτικά και σημαντικά κοιτάσματα παγκοσμίως, χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις και την αυστηρή διαχείριση των φυσικών πόρων. Οι προοπτικές για το μέλλον του κοιτάσματος είναι θετικές, με το ορυχείο να αναμένεται να παραμείνει παραγωγικό για δεκαετίες (Hervé et al. 2012).

2. Κοίτασμα Grasberg, Ινδονησία

Το κοιτάσμα Grasberg, που βρίσκεται στην επαρχία Παπούα της Ινδονησίας, είναι το δεύτερο μεγαλύτερο πορφυριτικό κοιτάσμα χαλκού και χρυσού στον κόσμο. Το ορυχείο, που ανακαλύφθηκε το 1988, είναι επίσης το μεγαλύτερο χρυσωρυχείο στον κόσμο, με τεράστια αποθέματα χρυσού. Εκτός από τον χαλκό και τον χρυσό, το κοιτάσμα περιέχει και άλλα πολύτιμα μέταλλα, όπως το ασήμι, τα οποία συμβάλλουν στην οικονομική βιωσιμότητα του ορυχείου. Η ανάπτυξη και η εκμετάλλευση του Grasberg είναι εξαιρετικά δύσκολη, καθώς το κοιτάσμα βρίσκεται σε μια απομακρυσμένη και δυσπρόσιτη περιοχή των Δυτικών Παπούων, σε υψόμετρο περίπου 4.000 μέτρων, μέσα σε ένα βραχώδες και ορεινό τοπίο (Mernagh et al.2020).

Το Grasberg είναι ένα πολυδιάστατο ορυχείο, συνδυάζοντας τεχνικές ανοικτής εκσκαφής και υπόγειας εξόρυξης, κάτι που του επιτρέπει να εκμεταλλεύεται διαφορετικά τμήματα του κοιτάσματος. Η ανοικτή εκσκαφή, που κάποτε ήταν η κύρια μέθοδος εξόρυξης, έχει πλέον μειωθεί λόγω της βαθμιαίας εξάντλησης του επιφανειακού τμήματος του κοιτάσματος, και η παραγωγή μεταφέρεται σταδιακά σε υπόγειες εργασίες. Παρά τις προκλήσεις, το Grasberg παραμένει κρίσιμος προμηθευτής χαλκού και χρυσού παγκοσμίως, με αποθέματα που εκτιμάται ότι θα διατηρήσουν την παραγωγή για δεκαετίες, καθιστώντας το ένα από τα σημαντικότερα ορυχεία στον κόσμο (Mernagh et al.2020).

3. Κοίτασμα Collahuasi, Χιλή

Το κοιτάσμα Collahuasi, που βρίσκεται στα βουνά των Άνδεων στη βόρεια Χιλή, είναι το τρίτο μεγαλύτερο πορφυριτικό κοιτάσμα χαλκού στον κόσμο. Σήμερα το κοιτάσμα αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες πηγές χαλκού σε παγκόσμιο επίπεδο, με την ετήσια παραγωγή του να ξεπερνά τους 600.000 τόνους χαλκού. Το κοιτάσμα Collahuasi χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεγάλων ποσοτήτων χαλκού σε μορφή θειούχων ορυκτών, όπως ο χαλκοπυρίτης και ο

βορνίτης, καθώς και από την ύπαρξη σημαντικών ποσοτήτων μολυβδαίνιου, που εξορύσσεται ως υποπροϊόν (Institution of Mining and Metallurgy 1994).

Η εξόρυξη στο Collahuasi διεξάγεται κυρίως μέσω της μεθόδου της ανοικτής εκσκαφής, με το ορυχείο να βρίσκεται σε υψόμετρο άνω των 4.000 μέτρων, κάτι που απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και ιδιαίτερα ανθεκτικές υποδομές για την αντιμετώπιση των ακραίων καιρικών συνθηκών και του αραιού αέρα. Το κοιτάσμα Collahuasi είναι διάσημο για την ποιότητα του μεταλλεύματος του, το οποίο περιέχει σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό σε σύγκριση με άλλα πορφυριτικά κοιτάσματα. Η εξόρυξη στο Collahuasi περιλαμβάνει την εκμετάλλευση τόσο των επιφανειακών όσο και των βαθύτερων τμημάτων του κοιτάσματος, με την παραγωγή να ενισχύεται από τις συνεχείς επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες και υποδομές. Το Collahuasi είναι επίσης γνωστό για τις αυστηρές περιβαλλοντικές του πρακτικές, με την εταιρεία να επενδύει σημαντικά σε προγράμματα διαχείρισης νερού, επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων και αποκατάστασης του περιβάλλοντος, εξασφαλίζοντας την βιώσιμη ανάπτυξη της εξορυκτικής δραστηριότητας στην περιοχή (Institution of Mining and Metallurgy 1994).

4. Κοίτασμα Morenci, Ηνωμένες Πολιτείες

Το κοιτάσμα Morenci, που βρίσκεται στην πολιτεία της Αριζόνα στις Ηνωμένες Πολιτείες, είναι το τέταρτο μεγαλύτερο πορφυριτικό κοιτάσμα χαλκού στον κόσμο και το μεγαλύτερο στις ΗΠΑ. Η ιστορία της εξόρυξης στο Morenci ξεκινά από τον 19^ο αιώνα, με την παραγωγή χαλκού να συνεχίζεται μέχρι σήμερα, καθιστώντας το ένα από τα μακροβιότερα και πιο παραγωγικά κοιτάσματα παγκοσμίως. Το Morenci είναι κυρίως γνωστό για την παραγωγή χαλκού, αν και παράγονται επίσης μικρότερες ποσότητες χρυσού και αργύρου (Berger et al. 2008).

Η εξόρυξη στο Morenci γίνεται κυρίως μέσω της μεθόδου της ανοικτής εκσκαφής, με το κοιτάσμα να εκτείνεται σε μια τεράστια έκταση, καλύπτοντας αρκετές χιλιάδες στρέμματα. Το ορυχείο είναι διάσημο για τις εντυπωσιακές του διαστάσεις, με το ανοιχτό του λάκκο να είναι ορατό ακόμη και από το διάστημα. Στο Morenci χρησιμοποιείται επίσης την τεχνική της εκχύλισης σε σωρούς (heap leaching) για την ανάκτηση χαλκού από χαμηλής περιεκτικότητας μεταλλεύματα, μια μέθοδος που είναι οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον.

Το Morenci έχει διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη της παραγωγής χαλκού στις ΗΠΑ και παραμένει σημαντικός παράγοντας στην παγκόσμια αγορά χαλκού. Η επιτυχία του ορυχείου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις συνεχείς επενδύσεις σε τεχνολογία, καθώς και στις πρωτοποριακές πρακτικές διαχείρισης φυσικών πόρων. Η βιώσιμη διαχείριση του νερού και των

αποβλήτων, η αποκατάσταση των εκμεταλλευόμενων εκτάσεων και η ενεργή συμμετοχή της τοπικής κοινότητας καθιστούν το Morenci ένα πρότυπο για τη σύγχρονη εξορυκτική βιομηχανία, διασφαλίζοντας τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική υπευθυνότητα της περιοχής (Berger et al. 2008).

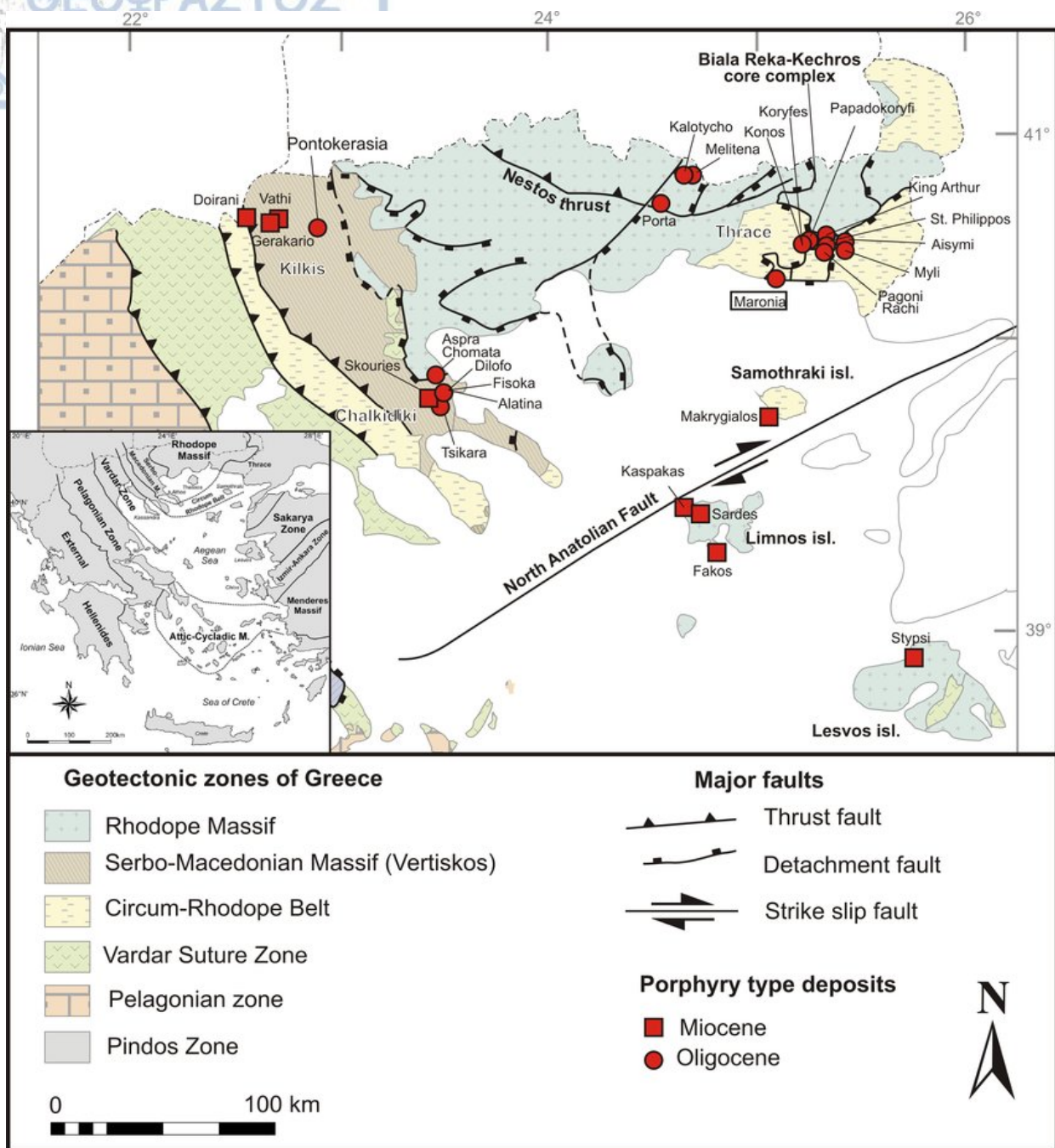
ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ

Η Ελλάδα, αν και είναι μικρή σε έκταση, φιλοξενεί μια πλούσια γεωλογική ποικιλία που περιλαμβάνει και πορφυριτικά κοιτάσματα-εμφανίσεις. Αυτά τα κοιτάσματα, τα οποία συνήθως σχετίζονται με ηφαιστειακές και υποηφαιστειακές δραστηριότητες, έχουν εξεταστεί εκτενώς για την οικονομική τους σημασία. Τα ελληνικά πορφυριτικά κοιτάσματα, παρά το γεγονός ότι δεν είναι τόσο μεγάλα σε σύγκριση με εκείνα άλλων χωρών όπως η Χιλή και οι ΗΠΑ, εξακολουθούν να έχουν στρατηγική σημασία για την εκμετάλλευση χαλκού και άλλων πολύτιμων μετάλλων (Melfos et al. 2002, 2017, 2020, Stergiou et al. 2021, Voudouris et al. 2013).

Τα σημαντικότερα πορφυριτικά κοιτάσματα στην Ελλάδα βρίσκονται κυρίως στη Βόρεια Ελλάδα, στις περιοχές της Μακεδονίας και της Θράκης (Σχήμα 4). Οι γεωλογικές έρευνες έχουν εντοπίσει αρκετά κοιτάσματα χαλκού, μολυβδαίνιου, χρυσού και άλλων μετάλλων που συνδέονται με πορφυριτικά συστήματα. Τα πιο γνωστά πορφυριτικά κοιτάσματα στην Ελλάδα είναι εκείνα των Σκουριών στη Χαλκιδική και της Μαρώνειας στην. Αυτά τα κοιτάσματα είναι αποτέλεσμα της εκτεταμένης μαγματικής δραστηριότητας που έλαβε χώρα στην περιοχή κατά το Ολιγόκαινο και Μειόκαινο (Melfos et al. 2002, Voudouris et al. 2013, Stergiou et al. 2021).

Το Κοίτασμα των Σκουριών

Το κοίτασμα των Σκουριών είναι ίσως το πιο γνωστό πορφυριτικό κοίτασμα στην Ελλάδα. Βρίσκεται στη Βόρεια Χαλκιδική και αποτελεί σημαντική πηγή χαλκού και χρυσού. Το κοίτασμα ανακαλύφθηκε τη δεκαετία του 1970 και από τότε έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένων γεωλογικών και μεταλλευτικών ερευνών. Το κοίτασμα των Σκουριών περιέχει χαλκό-χρυσό και παρουσιάζει μεταλλοφορίες που περιλαμβάνουν κυρίως χαλκοπυρίτη και χρυσό, με δευτερεύουσες ποσότητες μολυβδαίνιου. Το μεταλλείο στο κοίτασμα των Σκουριών βρίσκεται ακόμη σε καθεστώς ανάπτυξης από την Eldorado Gold και η εκμετάλλευση αναμένεται να ξεκινήσει στα τέλη του 2025 (McFall 2018, Siron et al. 2018).



Σχήμα 4: Κατανομή κοιτασμάτων πορφυριτικού τύπου στην Μακεδονία και τη Θράκη (ΠΗΓΗ: Melfos et al. 2020).

Το κοιτάσμα της Μαρώνας

Στην περιοχή της Μαρώνας, έχει εντοπιστεί μια σημαντική πορφυριτική εμφάνιση μεγάλης έκτασης (Melfos et al. 2002, 2021, Falkenberg et al. 2024). Η περιοχή στη Θράκη, είναι γνωστή για τα πορφυριτικά κοιτάσματα, τα οποία περιέχουν σημαντικά αποθέματα χαλκού, χρυσού και μολυβδαινίου. Η εμφάνιση στη Μαρώνα έχει μελετηθεί και έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα

πιο σημαντικά πορφυριτικά συστήματα στην Ελλάδα, ιδιαίτερα λόγω της παρουσίας μολυβδαινίου και ρηνίου. Πρόκειται για ένα τυπικό παράδειγμα πορφυριτικού συστήματος με χαλκό και μολυβδαίνιο, που σχετίζεται με υποηφαιστειακές δραστηριότητες κατά το Καινοζωικό.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από την παρουσία πορφυριτικών και πλουτωνικών πετρωμάτων, τα οποία έχουν υποστεί εκτεταμένη υδροθερμική εξαλλοίωση. Η εμφάνιση έχει οικονομική σημασία λόγω των μεγάλων αποθεμάτων χαλκού, μολυβδαινίου και ρηνίου που περιέχει. Το ρήνιο είναι ιδιαίτερα πολύτιμο στη βιομηχανία, καθώς χρησιμοποιείται σε κράματα για την ενίσχυση της αντοχής τους στη θερμότητα και τη διάβρωση (Voudouris et al. 2013).

Η περιεκτικότητα σε χαλκό στο κοίτασμα της Μαρώνειας κυμαίνεται από 0,3% έως 0,6%. Αυτή η συγκέντρωση θεωρείται τυπική για πορφυριτικά συστήματα, τα οποία συχνά περιέχουν χαλκό σε ποσοστά γύρω στο 0,5%. Ο χαλκός στο κοίτασμα βρίσκεται κυρίως υπό τη μορφή χαλκοπυρίτη (CuFeS_2).

Η περιεκτικότητα σε μολυβδαίνιο είναι ιδιαίτερα σημαντική, με συγκεντρώσεις που κυμαίνονται συνήθως από 0,02% έως 0,05%, αν και σε ορισμένες περιοχές μπορεί να υπερβεί και το 0,1%. Το μολυβδαίνιο εμφανίζεται κυρίως υπό τη μορφή του ορυκτού μολυβδαινίτη (MoS_2). Επίσης, η υψηλή περιεκτικότητα σε ρήνιο, έως 5% στον μολυβδαινίτη, καθιστά το κοίτασμα ιδιαίτερα πολύτιμο, δεδομένης της βιομηχανικής αξίας του σε κράματα και άλλες εφαρμογές (Voudouris et al. 2013).

ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα αποτελούν οικονομικούς στόχους μεγάλης σημασίας λόγω των μετάλλων που περιέχουν. Παρόλο που οι περιεκτικότητές τους κυμαίνονται σε χαμηλά ποσοστά, τα τεράστια αποθέματά τους, σε συνδυασμό με την επιφανειακή εξόρυξή τους που αποτελεί τη συνηθέστερη τακτική, τα καθιστά από τους σημαντικότερους τύπους μεταλλοφορίας.

Η εκμετάλλευση των πορφυριτικών κοιτασμάτων παγκοσμίως αλλά και στην Ελλάδα αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις. Η πιο σημαντική από αυτές είναι η κοινωνική αποδοχή, που συνδέεται κυρίως με τις περιβαλλοντικές ανησυχίες. Οι τοπικές κοινότητες συχνά αντιτίθενται σε τέτοιου είδους έργα, φοβούμενες την καταστροφή του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η γεωγραφική κατανομή των κοιτασμάτων σε απομακρυσμένες και συχνά ορεινές περιοχές καθιστά την εξόρυξη τεχνικά απαιτητική και δαπανηρή.

Παρά τις προκλήσεις, τα πορφυριτικά κοιτάσματα παρουσιάζουν σημαντικές προοπτικές για την εκμετάλλευση μεταλλευμάτων, ιδιαίτερα σε μια περίοδο όπου η ζήτηση για χαλκό και χρυσό παραμένει υψηλή. Οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι βελτιώσεις στις περιβαλλοντικές πρακτικές μπορούν να συμβάλλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη αυτών των πόρων, ενισχύοντας την οικονομία εξασφαλίζοντας παράλληλα την προστασία του περιβάλλοντος.

- Berger, B. R., Ayuso, R. A., Wynn, J. C., & Seal, R. R., II. (2008). Preliminary model of porphyry copper deposits (No. 2008-1321). U.S. Geological Survey
- Falkenberg, J. J., Keith, M., Melfos, V., Hohl, M., Haase, K. M., Voudouris, P., Höss, A., Wenske, J., Klemm, R., Beier, C., Kutzschbach, M., & Strauss, H. (2024). Insights into fluid evolution and Re enrichment by mineral micro-analysis and fluid inclusion constraints: Evidence from the Maronia Cu-Mo±Re±Au porphyry system in NE Greece. *Mineralium Deposita*, 1-25.
- Guilbert, J. M., & Park, C. F., Jr. (2007). *The geology of ore deposits*. Waveland Press.
- Hedenquist, J. W., & Richards, J. P. (1998). The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 33, 1-16.
- Hervé, M., Sillitoe, R. H., Wong, C., Fernández, P., Crignola, F., Ipinza, M., & Urzúa, F. (2012). Geologic overview of the Escondida porphyry copper district, northern Chile. *Economic Geology*, 107(5), 815-838.
- Institution of Mining and Metallurgy, De Beer, L. J., & Dick, L. A. (1994). Development of the Collahuasi copper deposits—a world-class copper project in the Andes of northern Chile. In *Proceedings of the Institution of Mining and Metallurgy* (pp. 181-195). Springer Netherlands.
- Klein, C., & Philpotts, A. R. (2013). *Earth materials: Introduction to mineralogy and petrology*. Cambridge University Press.
- McFall, K. A., Naden, J., Roberts, S., Baker, T., Spratt, J., & McDonald, I. (2018). Platinum-group minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit. *Ore Geology Reviews*, 99, 344-364.
- Melfos, V., Vavelidis, M., Christofides, G., & Seidel, E. (2002). Origin and evolution of the Tertiary Maronia porphyry copper-molybdenum deposit, Thrace, Greece. *Mineralium Deposita*, 37(7), 648-668.
- Melfos, V., & Voudouris, P. (2017). Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration. *Ore Geology Reviews*, 89, 1030-1057.

- Melfos, V., Voudouris, P., Melfou, M., Sánchez, M. G., Papadopoulou, L., Filippidis, A., Spry, P. G., Schaarschmidt, A., Klemm, R., Haase, K. M., Tarantola, A., & Mavrogenatos, C. (2020). Mineralogical constraints on the potassic and sodic-calcic hydrothermal alteration and vein-type mineralization of the Maronia porphyry Cu-Mo±Re±Au deposit in NE Greece. *Minerals*, 10(2), 182.
- Mernagh, T. P., Leys, C., & Henley, R. W. (2020). Fluid inclusion systematics in porphyry copper deposits: The super-giant Grasberg deposit, Indonesia, as a case study. *Ore Geology Reviews*, 123, 103570.
- Moon, C. J., Whateley, M. K. G., & Evans, A. M. (2006). *Introduction to mineral exploration* (2nd ed.). Blackwell Publishing.
- Murad, F., Ghaffar, A., Ullah, I., Mastoi, A. S., & Zaman, M. T. (2021). The alteration and mineralization characteristics of Miocene porphyry Cu-Au deposits of Chagai Magmatic Belt, District Chagai, Balochistan, Pakistan. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 12(1), 1-8.
- Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J., & Barton, M. D. (2005). Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 251-298.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3-41.
- Sinclair, W. D. (2007). Porphyry deposits. In W. D. Goodfellow (Ed.), *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods* (pp. 223-243). Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division.
- Siron, C. R., Rhys, D., Thompson, J. F., Baker, T., Veligrakis, T., Camacho, A., & Dalampiras, L. (2018). Structural controls on porphyry Au-Cu and Au-rich polymetallic carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining district, northern Greece. *Economic Geology*, 113(2), 309-345.
- Stergiou, C. L., Melfos, V., Voudouris, P., Spry, P. G., Papadopoulou, L., Chatzipetros, A., & Filippidis, A. (2021). The geology, geochemistry, and origin of the porphyry Cu-Au-(Mo) system at Vathi, Serbo-Macedonian Massif, Greece. *Applied Sciences*, 11(2), 479.

- Sun, W., Huang, R. F., Li, H., Hu, Y. B., Zhang, C. C., Sun, S. J., & Ling, M. X. (2015). Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geology Reviews*, 65, 97–131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.004>
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P. G., Bindi, L., Moritz, R., Ortelli, M., & Kartal, T. (2013). Extremely Re-rich molybdenite from porphyry Cu-Mo-Au prospects in northeastern Greece: Mode of occurrence, causes of enrichment, and implications for gold exploration. *Minerals*, 3(2), 165-191.
- Voudouris, P., Mavrogonatos, C., Spry, P. G., Baker, T., Melfos, V., Klemd, R., Haase, K. M., & Melfou, M. (2019). Porphyry and epithermal deposits in Greece: An overview, new discoveries, and mineralogical constraints on their genesis. *Ore Geology Reviews*, 107, 654-691.
- Wilkinson, J. J. (2013). Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs. *Nature Geoscience*, 6(11), 917-925.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2015). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.