



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ – ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΤΑΜΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟΥ ΧΑΛΚΟΥ(Cu)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2020





ΑΝΤΑΜΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟΥ ΧΑΛΚΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

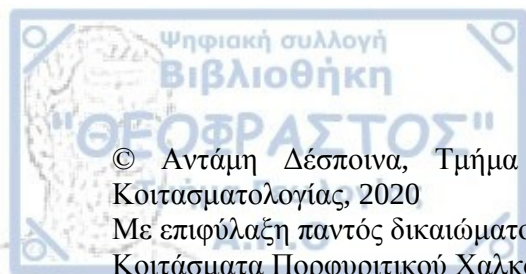
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

©Αντάμη Δέσποινα, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Αντάμη Δέσποινα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Κοιτάσματα Πορφυριτικού Χαλκού – Διπλωματική Εργασία

© Antami Despoina, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2020
All rights reserved.
Porphyry Copper 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.





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	9
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	10
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ (Cu)	11
2.ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΞΟΡΥΞΗΣ	12
3.ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ - ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ.....	16
4.ΖΩΝΕΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗΣ - ΤΥΠΟΙ ΦΛΕΒΩΝ.	23
5.ΙΔΙΑΙΤΕΡΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ,	25
6.ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ.....	28
6.1 ΛΗΜΝΟΣ	28
6.1.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟ ΤΟΥ ΦΑΚΟΥ	29
6.1.2 ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗ ΦΑΚΟΥ	30
6.1.3 ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΕΣ	31
6.2 ΣΚΟΥΡΙΕΣ	32
6.2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ	32
6.2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	33
6.2.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΔΙΕΙΣΔΥΣΕΩΝ.....	34
6.2.4 ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ	37
6.3 ELATSITE.....	39
6.3.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	39
6.3.2 ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ	40
6.4 ΜΑΜΥΤ	41
6.4.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	41
6.4.2 ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ.....	43
6.5 ΟΚ ΤΕΔΙ.....	44
6.5.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	44
6.5.2 ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ.....	45
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού

Αντάμη Δέσποινα

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η ανάλυση και η χρησιμότητα των κοιτασμάτων πορφυριτικού χαλκού (Cu). Τα κοιτάσματα αυτά είναι ευρέως διαδεδομένα και η ζήτησή τους όλο και αυξανόμενη. Αρχικά η δημιουργία αυτού του είδους κοιτασμάτων οφείλεται σε περιβάλλοντα σύγκλισης και συνιστούν μια από τις σημαντικότερες πηγές σε Cu, Mo, Au, Ag. Έπειτα από την δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων δημιουργούνται τέσσερις ζώνες εξαλλοίωσης οι οποίες από το κέντρο προς την περιφέρεια κατανέμονται ως εξής: Καλιούχος, Φυλλιτική, Αργιλική και Προπυλιτική. Εν συνεχεία ιδιαίτερο οικονομικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ακόλουθα ορυκτά του Cu όπως, ο αυτοφυής χαλκός, ο χαλκοπυρίτης, ο βορνίτης, ο εναργίτης, ο χαλκοσίνης, ο κυπρίτης, ο αζουρίτης, ο μαλαχίτης, ο κοβελλίνης και η χρυσόκολλα. Επιπλέον ενδιαφέρον παρουσιάζουν πολύτιμα μέταλλα τα οποία έχουν βρεθεί σε αυτά τα κοιτάσματα όπως ο χρυσός και η ομάδα των μετάλλων της πλατίνας PGM. Συνεπώς το ερευνητικό ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην ανακάλυψη νέων πηγών για βασικά και ευγενή μέταλλα. Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά σε κάποιες εμφανίσεις κοιτασμάτων αυτού του τύπου όπως στα κοιτάσματα της Λήμνου και των Σκουριών στην Ελλάδα, καθώς και των κοιτασμάτων Elatsite (Βουλγαρία), Mamut (Μαλαισία) και Ok Tedi (Παπούα - Νέα Γουινέα). Όσον αφορά την περιοχή των Σκουριών οι υψηλές περιεκτικότητες σε Pt, Pd, Bi έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.



ABSTRACT

Porphyry copper deposits

Antami Despoina

The aim of this diploma thesis is the study and usefulness of porphyry copper (Cu) deposits. These deposits are widespread and their demand is increasing. Originally, the formation of this type of deposit is due to plate convergence environments. It is one of the major sources of Cu, Mo, Au, and Ag. On the basis of the evolution of hydrothermal fluids, four alteration zones are observed, which are distributed from the center to the periphery as follows: K-potassic, phyllic, argillic and propylitic. The porphyry type deposits have a particular economic interest for Cu minerals such as chalcopyrite, bornite, enargite, chalcocite, cuprite, azurite, malachite, covellite, and chrysocolla. Of particular interest are the precious metals found in these deposits including gold and the platinum group metals (PGM). Therefore, the research interest has focused on discovering new sources of these metals. Some important examples of porphyry systems are discussed in this diploma thesis. These deposits are found in Lemnos and Skouries of Greece, Elatsite of Bulgaria, Mamut and Oktedi. Concerning the region of Skouries the intersection between Pt, Pd, Bi has particular interest.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα τα κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού. Πιο ειδικά θα αναλυθεί η σημασία των κοιτασμάτων αυτού του τύπου, οι τρόποι εξόρυξης αυτών, γεωλογικά χαρακτηριστικά όπως και οι γεωτεκτονικές θέσεις που οφείλεται η δημιουργία τους. Επιπλέον θα εξεταστούν οι ζώνες εξαλλοίωσης των κοιτασμάτων καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά που κάνουν την κάθε ζώνη ξεχωριστή. Στην συνέχεια θα δούμε τους τύπους φλεβών και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που μπορούμε να συναντήσουμε σε αυτές τις μεταλλοφορίες. Τέλος θα δοθούν κάποια παραδείγματα ανά τον κόσμο όπου φιλοξενούνται αυτά τα κοιτάσματα, δύο εξ' αυτών βρίσκονται στον Ελλαδικό χώρο και τα υπόλοιπα τρία σε παγκόσμιο επίπεδο. Συνοψίζοντας θα τελειώσουμε αυτή την εργασία τονίζοντας την αξία που έχει η εκμετάλλευση αυτών των κοιτασμάτων για την παγκόσμια οικονομία.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας, κ. Βασίλη Μέλφο, ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση του θέματος, το αμείωτο ενδιαφέρον, τις χρήσιμες συμβουλές του, την καλή επικοινωνία μεταξύ μας, και την βοήθειά του για την εκπλήρωση της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Γεωλογικού τμήματος του Α.Π.Θ για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν, για την όρεξη και προσπάθειά τους να μας κάνουν να αγαπήσουμε την Γεωλογία και την επιστήμη.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

ΧΑΛΚΟΥ(Cu)

Σημαντική για την κοινωνία μας είναι η διαθεσιμότητα και η χρήση μετάλλων και ορυκτών πρώτων υλών από την βιομηχανία. Έτσι λοιπόν είκοσι στοιχεία όπως Ge Be, και σπάνιες γαίες (REE) ταυτοποιήθηκαν ως σημαντικοί ορυκτοί πόροι και μέταλλα. Πολύτιμα κοιτάσματα είναι αυτά του πορφυριτικού χαλκού, των οποίων η έρευνα και η μελέτη είναι σημαντική για την χώρα μας, λόγω των εμφανίσεων στην Ελλάδα και κυρίως στη Βόρεια. Θα ακολουθήσει μια αναφορά στα κοιτάσματα χαλκού και σε επόμενο κεφάλαιο η ανάλυση αυτών.

Σε γεωτεκτονικό περιβάλλον σύγκλισης κατά τον Sillitoe (2010), μπορούν να δημιουργηθούν τα κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού τα οποία είναι πηγές και άλλων στοιχείων εκτός του Cu όπως Mo, Au και Ag. Η διάρκεια της ανάπτυξής τους ποικίλλει από 100.000 χρόνια έως και εκατομμύρια χρόνια, ενώ συμπλέγματα αυτών έχουν την ικανότητα να παραμένουν ενεργά πάνω από 10 εκατομμύρια χρόνια. Σε υποηφαιστειακές μαγματικές διεισδύσεις όξινης έως ενδιάμεσης σύστασης πετρώματα, αντικατοπτρίζονται τέτοιου είδους μεταλλοφορίες, συχνά υπό την μορφή ζωνών. Στενή σχέση με τα υπό μελέτη κοιτάσματα έχουν και τα θερμομεταμόρφωσης από επαφή (Skarn) ή ανθρακικής αντικατάστασης, η ενδιάμεσης έως υψηλής θεώσης επιθερμικές μεταλλοφορίες και τέλος ξενιστών διασποράς Au από ιζηματογενή πετρώματα.

Όπως αναφέρθηκε τα κοιτάσματα Cu σχετίζονται με την δράση υδροθερμικών διαλυμάτων καθώς επίσης και με διεισδύσεις μάγματος οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε βάθος 5-15 km, σε μαγματικούς θαλάμους. Τα υδροθερμικά διαλύματα αφομοιώνουν κάποια στοιχεία του μάγματος όπως διάφορα οξείδια, θείο και μέταλλα. Κατά την ψύξη του μάγματος, με την πτώση της θερμοκρασίας στους 250 βαθμούς Κελσίου ξεκινά μια διαδικασία, η οποία ευθύνεται για την δημιουργία των ζωνών εξαλλοίωσης καθώς επίσης και την μεταλλοφορία με την μορφή φλεβών και φλεβωδών τύπου Stockwork (Sillitoe, 2010).

Κατά την δημιουργία των πορφυριτικών κοιτασμάτων και με την δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων δημιουργούνται τέσσερις ζώνες εξαλλοίωσης, των οποίων η χωρητικότητα είναι ικανή να καλύπτει πολλά κυβικά χιλιόμετρα, όπου σε επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούμε εκτενώς.

2.ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΞΟΡΥΞΗΣ

Κατά τον Sillitoe (2010) τα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu προσδιορίζονται από μεγάλες εκτάσεις υδροθερμικά εξαλλοιωμένων πετρωμάτων που το μέγεθος ποικίλλει από 10 έως 100 Km³. Επιπλέον συνδέονται και με άλλους τύπους μεταλλοφορίας όπως διασποράς σε ιζηματογενή πετρώματα, θερμομεταμόρφωσης από επαφή (Skarn) και αντικατάστασης. Είναι πολύ πιθανόν η γένεση ενός κοιτάσματος χαλκού να σχετίζεται με μεταλλοφορία επιθερμικού τύπου ενδιάμεσης ή υψηλής θείωσης.

Τα κοιτάσματα πορφυριτικού Cu σχετίζονται με διεισδύσεις μάγματος και συγκεκριμένα συνδέονται με ασβεσταλκαλικό μαγματισμό σε ηφαιστειακά τόξα. Το συγκεκριμένο μοτίβο μαγματισμού παραπέμπει σε ζώνες υποβύθισης ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων. Ως εκ τούτου τα κοιτάσματα αυτά οφείλουν την δημιουργία τους σε ενεργές περιοχές υποβύθισης ωκεάνιου φλοιού κάτω από ηπειρωτικό. Ωστόσο έχει παρατηρηθεί μικρό ποσοστό δημιουργίας τέτοιου τύπου κοιτάσματος, σε απομακρυσμένες περιοχές από την υποβύθιση (post-collisional).

Οι αναλογίες κατά μέσο όρο ενός κοιτάσματος Cu είναι 0,5-1,5 % Cu, <0,01-0,04% Mo και η περιεκτικότητα σε Au παρουσιάζει διακυμάνσεις από 0,0-1,5 g/t. Εξαίρεση εκδηλώνουν τα πορφυριτικά κοιτάσματα χρυσού με ποσοστό από 0,9-1,5 g/t και ο χαλκός να εμφανίζεται με μικρή περιεκτικότητα <0,1 %. Τέλος τα κοιτάσματα θερμό μεταμόρφωσης από επαφή (Skarn) καταλαμβάνουν υψηλά ποσοστά σε χαλκό και χρυσό.

Τα κοιτάσματα Cu παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά. Αρχικά αναδύονται κατά μήκος ορογενετικών συστημάτων με αποτέλεσμα την δημιουργία ζωνών, μήκος χιλιάδων χιλιομέτρων. Παράδειγμα αποτελεί η περιοχή των Άνδεων. Κατά τον Sillitoe (2008) μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταλλογένεση μακριά από αυτές τις ζώνες αν και είναι σπάνιο. Η δημιουργία των κοιτασμάτων χαλκού έχει κοινά χαρακτηριστικά, με γνώμονα την ηλικία, με καθορισμένες μεταλλογενετικές εποχές οι οποίες σχετίζονται με μεγάλης έκτασης μαγματικά φαινόμενα. Είναι σημαντικό να τονίσουμε την τμηματική διαίρεση των ζωνών στα κοιτάσματα χαλκού, τα οποία σχετίζονται με την διασπορά του μαγματισμού. Η διασπορά συνδέεται με την μεταβολή κλίσης της υποβυθιζόμενης πλάκας κατά την διαδοχή των

μεταλλογενετικών εποχών και συμβαδίζει με τις μετατοπίσεις των ηφαιστειακών τόξων (Sillitoe and Perello, 2005).

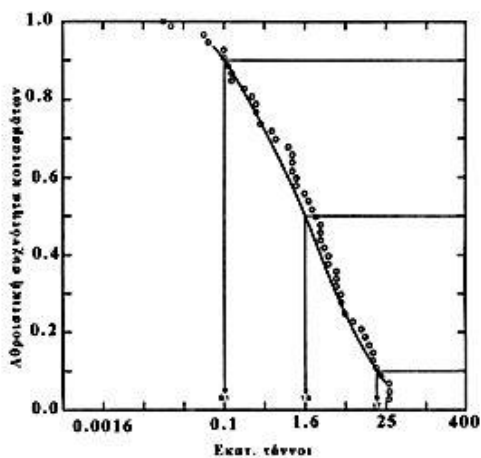
Σήμερα χρειαζόμαστε ασύλληπτα τεράστιες ποσότητες χαλκού. Θα δοθεί ένα παράδειγμα εξόρυξης χαλκού με αναφορά στο μεγαλύτερο ορυχείο χαλκού το οποίο βρίσκεται στο Κένικοτ της Γιούτα. Κάθε χρόνο εξορύσσονται μισό εκατομμύριο τόνοι πετρώματος την ημέρα έτσι λοιπόν δικαιολογείται και το τεράστιο βάθος και πλάτος του ορυχείου. Η πρώτη δυσκολία είναι ο εντοπισμός των πιο πλούσιων κοιτασμάτων, Το επόμενο βήμα έχοντας βρει τις κατάλληλες θέσεις είναι η εξόρυξη του. Ο μόνος τρόπος είναι με την βοήθεια μεγάλων ποσοτήτων ισχυρών εκρηκτικών. Η διαδικασία ξεκινάει με την εργασία των πυροτεχνουργών οι οποίοι ανοίγουν τρύπες 15 μ. σε ένα πλέγμα. Οι τρύπες γεμίζουν με 400 κιλά ισχυρών εκρηκτικών όπου αρκούν για να σπάσουν 180.000 τόνους πέτρωμα. Έπειτα ανατινάσσουν τις γομώσεις και δημιουργούν μια τεράστια έκρηξη. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία ο χώρος εκκενώνεται. Χιλιάδες τόνοι πετρώματος σπάνε από την έκρηξη, όπου την ημέρα είναι δυνατόν ο χώρος να υποστεί έως και 3 εκρήξεις.

Εν συνεχεία το Κένικοτ διαθέτει μερικούς από τους πιο μεγάλους εκσκαφείς στον κόσμο, το οποίο είναι ικανό να σηκώνει εκατοντάδες τόνους πέτρωμα με μια κίνηση. Ένα φορτηγό παράλληλα μεταφέρει το υλικό. Το κάθε φορτηγό μεταφέρει 300 τόνους. Αφού τελειώσει η περισυλλογή το πέτρωμα μεταφέρεται στο εργοστάσιο πάνω σε ταινιόδρομους όπου θα υποστεί ειδική επεξεργασία. Το πέτρωμα φτάνει στο εργοστάσιο σε κομμάτια αφού ήδη έχει υποστεί την πρώτη φάση της επεξεργασίας του όπου έγινε κομμάτια από τις περιστρεφόμενες λεπίδες του σπαστήρα. Έτσι λοιπόν ξεκινάει ο διαχωρισμός του χαλκού όπου είναι και το ζητούμενο. Τεράστιοι μύλοι κάνουν το πέτρωμα σκόνη που αναμειγνύεται με νερό και ξανθικό άλας. Αυτή η ένωση βοηθά στον διαχωρισμό του χαλκού από το υλικό που έχουμε υπό επεξεργασία. Το 28% είναι χαλκός ενώ το 70% είναι σίδηρος, θείο και πυρίτιο. Οι προσμείξεις πρέπει να απομακρυνθούν.

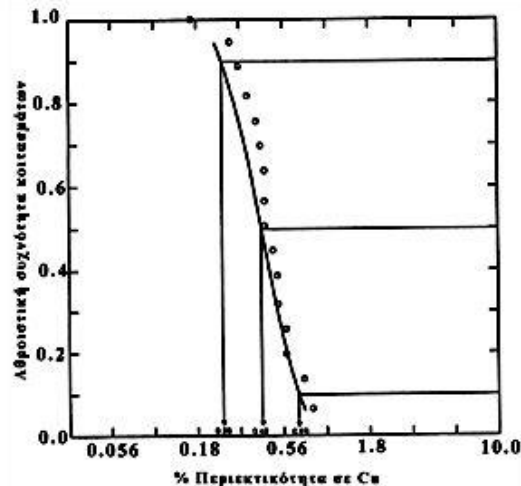
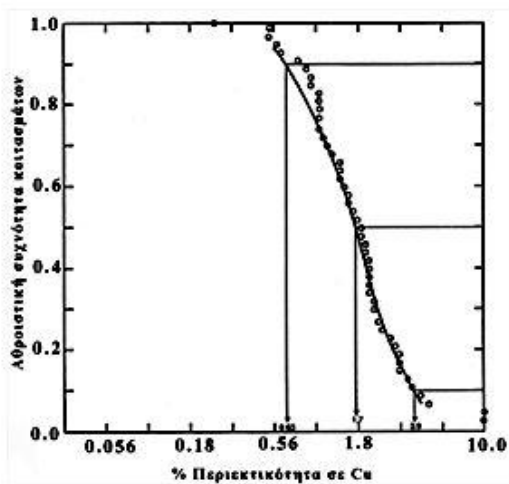
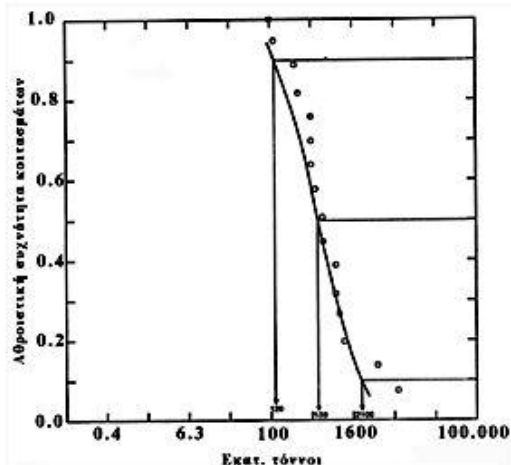
Η λύση είναι η ρευστοποίηση για διαχωρισμό. Το συμπύκνωμα θερμαίνεται και το οξυγόνο απομακρύνεται με άνθρακα. Το αποτέλεσμα είναι 99,9% ρευστός χαλκός. Τέλος το μέταλλο υφίσταται άλλη μια διαδικασία, χύνεται σε επίπεδα πλαίσια και μεταφέρεται σε κοντινό εργοστάσιο όπου και καθαρίζεται περαιτέρω με ηλεκτρόλυση. Κατά την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης τα πλαίσια βυθίζονται σε δεξαμενή οξέος μαζί με φύλλα χάλυβα. Ως αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιείται ο χάλυβας και με αυτό τον τρόπο προσελκύει τα μόρια του χαλκού. Μέσα σε 10 μέρες τα μόρια περνούν μέσα από το οξύ στα φύλλα χάλυβα. Τα φύλλα είναι επισήμως 99,99% καθαρός χαλκός και η μορφή του χαλκού

παρουσιάζεται σε επίπεδες πλάκες. Η τελική φάση είναι όταν αυτές οι πλάκες θα γίνουν καλώδια με θερμή εξέλαση.

ΣΥΜΠΑΓΗ ΘΕΙΟΥΧΑ ΤΥΠΟΥ ΚΥΠΡΟΥ



ΠΟΡΦΥΡΙΚΑ Cu - Mo



Σχ. 2.1. Κατανομή περιεκτικότητας για διαφορετικούς τύπους κοιτασμάτων χαλκού: τα συμπαγή θειούχα κοιτάσματα Κύπρου και τα κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού (Πηγή: orykta.gr)

3.ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ-ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ

ΖΩΝΕΣ

Τύποι κοιτασμάτων-ορυκτολογία

Ο χαλκός παρουσιάζεται σε πολλά ορυκτά και σε μεγάλες περιεκτικότητες. Μερικά από αυτά συγκροτούν τις ομάδες των θειοαλάτων, θειικών, θειούχων, υδροξειδίων, οξειδίων, πυριτικών, ανθρακικών ή μετέχουν με μορφή ενώσεων με άλλα στοιχεία (π.χ σεληνίδια χαλκού ή αρσενίδια), σημαντικό είναι να επισημανθεί και ο αυτοφυής χαλκός. Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται τα κύρια ορυκτά του χαλκού με οικονομικό ενδιαφέρον, η περιεκτικότητά τους σε χαλκό, η φωτογραφία τους και ο χημικός τους τύπος. Ο χαλκοπυρίτης (CuFeS_2) καταλαμβάνει σημαντική εμφάνιση στα μεταλλεύματα χαλκού, σε ποσοστό 70%. Σε πολλά σημεία του πλανήτη με πληθώρα κοιτασματολογικών τύπων συναντώνται μεταλλεύματα χαλκού. Ωστόσο ως μελλοντικές πηγές χαλκού μπορούν να χαρακτηριστούν οι συγκεντρώσεις σε μεγάλα βάθη στους ωκεανούς, στα αποκαλούμενα πεδία «κονδύλων» καθώς και σε ωκεάνιες περιοχές με υποηφιστειακή δραστηριότητα, όπως τα κοιτάσματα συμπαγών θειούχων.

Οι κύριοι τύποι μεταλλευμάτων χαλκού είναι οι ακόλουθοι:

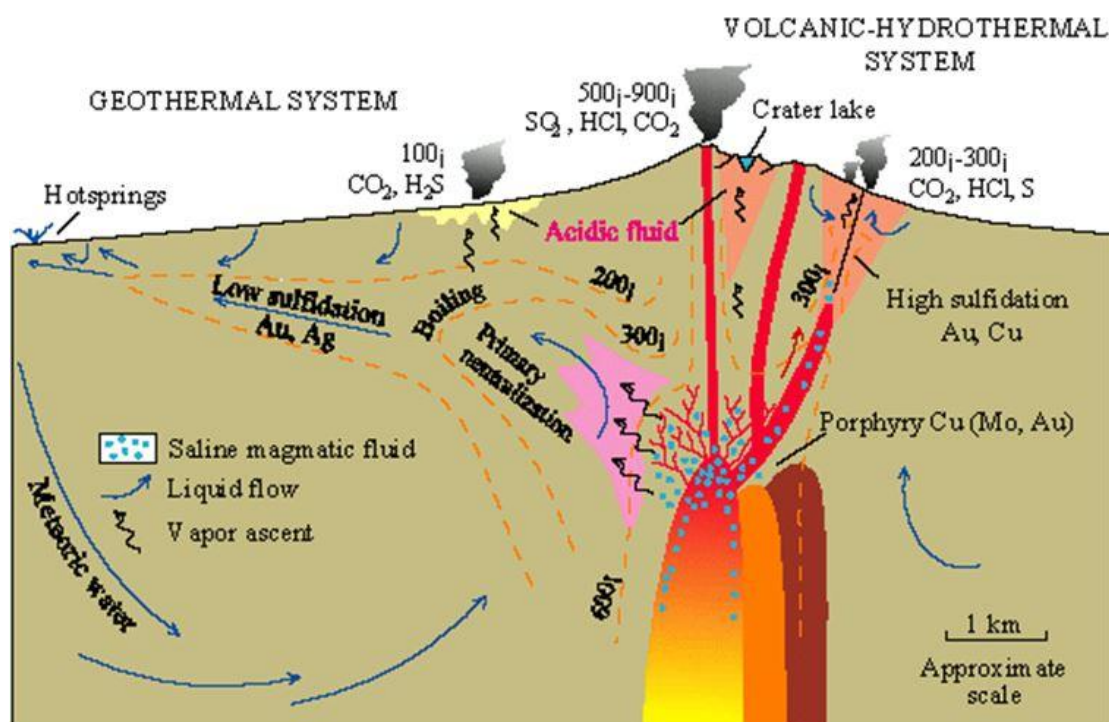
- Συμπαγή θειούχα μεταλλεύματα - στα οποία μπορεί να υπάρχουν αυξημένες συγκεντρώσεις χαλκού - συνδεδεμένα με ηφαιστειότητα: κυρίως μεταλλεύματα σε ακολουθίες λαβών οφιολιθικών συμπλεγμάτων, γνωστά ως «τύπου Κύπρου», αλλά και σε ηφαιστειακές ακολουθίες σε νησιωτικά τόξα, γνωστά ως «τύπου Kuroko».

- Σε skarn χαλκού συνδεδεμένα με διεισδύσεις γρανιτοειδών.
- Σε χερσογενή ιζήματα (τύπου Red bed).
- Μεταλλεύματα χαλκού πορφυριτικού τύπου (πιθανόν και με χρυσό).
- Επιθερμικά κοιτάσματα εναργίτη - χρυσού
- Ιζηματογενή χαλκούχα μεταλλεύματα φιλοξενούμενα σε αργίλους ή ψαμμίτες (τύπου Kupferschiefer ή Zambian copper belt).

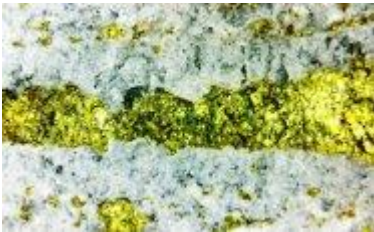
- Σε συμπλέγματα αλκαλικών πυριγενών πετρωμάτων (π.χ. σύμπλεγμα καρμπονατιτών Palabora της Νοτίου Αφρικής).

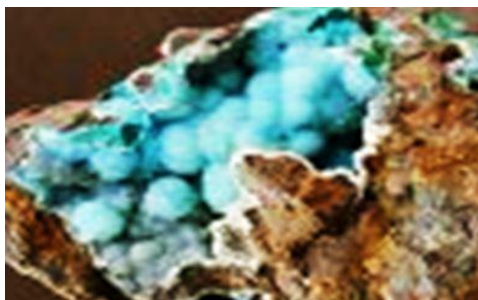
Τα μεταλλεύματα χαλκού πορφυριτικού τύπου και τα επιθερμικά κοιτάσματα εναργίτη - χρυσού έχουν μεγάλη σημασία για τον χώρο της Καρπαθο-Βαλκανικής, όπου ήταν πηγές μετάλλου ήδη από την εποχή του χαλκού. Η εκμετάλλευση συνεχίζεται σε ορισμένες περιπτώσεις με παράλληλη ανάκτηση χρυσού (π.χ Elatsite της Βουλγαρίας, Bor και

Majdanpek της Σερβίας, Chelovech, Assarel) ή βρίσκεται σε προχωρημένο επίπεδο έρευνας (Σάπες Ροδόπης) ή υπό ανάπτυξη (Σκουριές Χαλκιδικής). Από κοιτάσματα συμπαγούς θειούχου μεταλλεύματος υπήρξε σημαντική παραγωγή χαλκού στην Κύπρο όπου εμφανίζονται στο οφειολιθικό σύμπλεγμα του Τριαδικού σε ακολουθίες έκχυτων λαβών με μαξιλαροειδή μορφή.

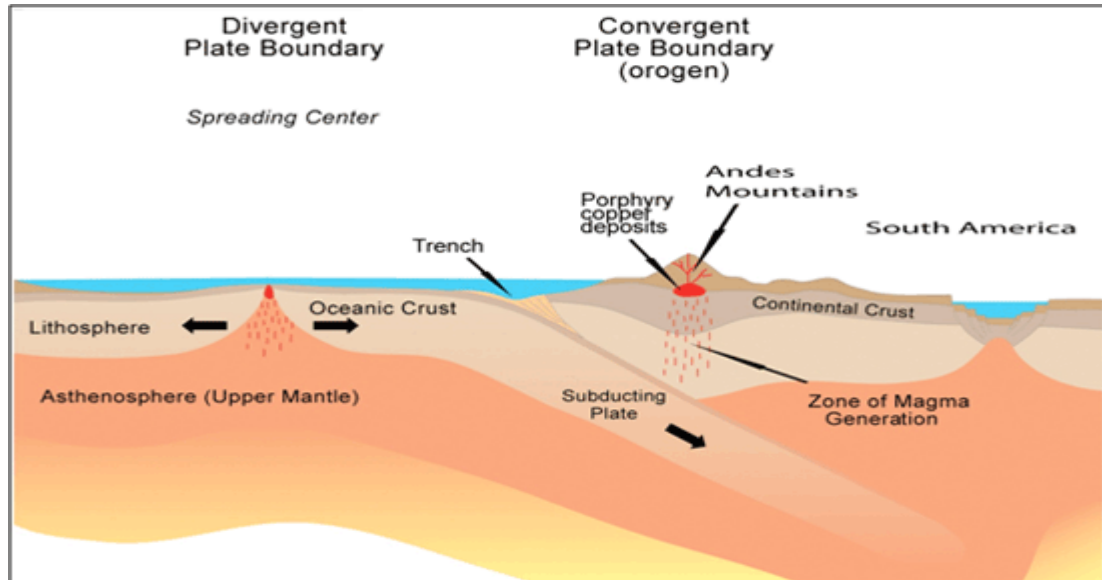


Σχ.3.1 Χωρική σχέση ανάμεσα σε πορφυριτικού τύπου και επιθερμικού, η πορεία των μεταλλοφόρων ρευστών και η προέλευσή τους (Hedenquist et al. 2000). Σε μεταλλοφόρα ρευστά οφείλουν την γένεσή τους οι μεταλλοφορίες επιθερμικών κοιτασμάτων που συνδέονται με το μάγμα και μεταναστεύουν στην επιφάνεια μέσα από βαθιά ρήγματα. Πλευρικά από νερό μετεωρικής προέλευσης κυριαρχείται το υδροθερμικό σύστημα και εμφανίζει ομοιότητες με γεωθερμικά πεδία.

Όνομα, χημικός τύπος, περιγραφή δείγματος περιεκτικότητα,	Εικόνες ορυκτών του χαλκού με οικονομικό ενδιαφέρον
Αυτοφυής χαλκός (Cu) Cu 100%	
Χαλκοπυρίτης (CuFeS₂) (φλέβα χαλκοπυρίτη σε πορφύρη, πάχος φλέβας 0, 5cm, Σκουριές Χαλκιδικής) Cu 33, 5%	
Βορνίτης (Cu₅FeS₄) (μετάλλευμα Cu-Au με βορνίτη, μέγεθος δείγματος 8cm, Chelopech Βουλγαρίας) Cu 63, 3%	
Εναργίτης (Cu₃AsS₄) (μέγεθος δείγματος 4cm, Chelopech Βουλγαρίας) Cu 48, 4%	
Χαλκοσίνης (Cu₂S) (σε χαλαζιακή φλέβα σε πορφύρη, πάχος φλέβας 1cm, Assarel Βουλγαρίας) Cu 79, 8%	

Κυπρίτης (Cu_2O) Cu 88, 8%	
Αζουρίτης $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ (Λαύριο) Cu 55, 3%	
Μαλαχίτης $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Λαύριο) Cu 57, 48%	
Κοβελλίνης CuS Cu 66, 46%	
Χρυσόκολλα $\text{Cu, Al}_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$ Cu 34%	

Σχ.3.2. Ορυκτά του χαλκού με οικονομικό ενδιαφέρον (<https://www.orykta.gr/oryktes-prototypes-tis-ellados>)

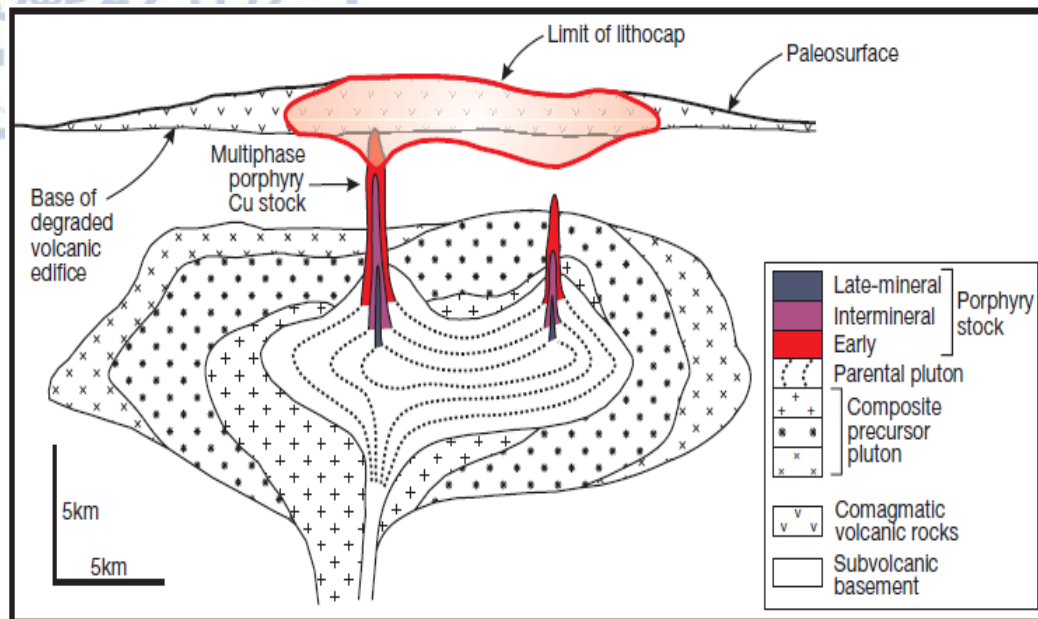


Σχ. 3.3 Απεικόνιση κατά μήκος των οροσειρών των Άνδεων, η δημιουργία των πορφυριτικών κοιτασμάτων χαλκού και η σύνδεσή τους με ζώνες υποβύθισης (<http://www.indicoresources.com/s/CopperPorphyryDeposits.asp>).

Τα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα δημιουργίας των πορφυριτικών κοιτασμάτων ποικίλουν, συμπίεστικά, εκτατικά με στοιχεία οριζόντιας μετατόπισης και μέτρια εκτατικά. Ο bimodal βασαλτικός- ρυολιθικός μαγματισμός σχετίζεται με ισχυρά εκτατικές τεκτονικές συνθήκες με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η δημιουργία πορφυριτικών κοιτασμάτων. Τα μεγέθη των τάσεων που δημιουργούνται σε περιβάλλοντα σύγκλισης εξαρτώνται από την μορφή της υποβύθισης (περιστροφή πλάκας – αυλοκοειδής μορφή) καθώς και τον βαθμό σύγκλισης και απόκλισης της πλάκας. Η συμπίεστική τεκτονική συνδέεται με την δημιουργία κοιτασμάτων χαλκού η οποία συνεπάγεται με αύξηση πάχους του ηπειρωτικού φλοιού και έπειτα λαμβάνει χώρα η εκτατική τεκτονική με ραγδαία εκταφή, αναθόλωση και μαγματισμό (Sillitoe, 1998). Με αυτές τις συνθήκες απελευθερώνονται υψηλές ποσότητες υδροθερμικών ρευστών και μάγματος λόγω της δημιουργίας μαγματικών θαλάμων. Σημαντικό ρόλο κατέχουν και τα ρήγματα που καθορίζουν την γεωμετρία των συστημάτων. Οι ενδοτοξικές ρηξιγενής ζώνες παίζουν σημαντικό ρόλο στην γένεση των κοιτασμάτων. Τέλος οι διασταυρώσεις ρηξιγενών δομών με δομές παράλληλες κατά την ανάπτυξη του ηφαιστειακού τόξου αποτελούν σημαντικό παράγοντα (Sillitoe and Perelló, 2009).

Και οι τρεις τύποι πετρωμάτων (πυριγενή, ιζηματογενή, μεταμορφωμένα) είναι ικανά να φιλοξενούν τα κοιτάσματα χαλκού. Σημαντικό ρόλο στην δημιουργία τους έχει ο υπερκείμενος σχηματισμός που πρέπει να είναι σχετικά διαπερατός. Για παράδειγμα όταν εντοπίζεται κοντά στην μαγματική διείσδυση μεγάλου πάχους ανθρακικές σειρές σε επαφή με άλλα πετρώματα μικρής περατότητας. Το αποτέλεσμα με την δράση αυτών των σχηματισμών θα είναι υψηλού βαθμού ορυκτογένεσης (Sillitoe, 1997). Μερικές φορές δημιουργούνται «τυφλά» υψηλής περιεκτικότητας κοιτάσματα λόγω της δυσκολίας διείσδυσης από τα μικρά περατότητας στρώματα. Πλούσια σε Fe πετρώματα αποτελούνται από ξενιστές τέτοιων κοιτασμάτων (Phillips et al. 1974, Wilkinson et al. 1982). Αυτό οφείλεται στην δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων και στην αυξημένη ικανότητα δέσμευσης του χαλκού. Ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων πετρωμάτων αποτελούν γάββροι, βασάλτες και διαβάσες. Άλλου τύπου μεταλλοφορίες όπως (Skarn) ή αντικατάστασης απαιτούν σχηματισμούς με πιο ιδιαίτερα μορφολογικά και χημικά χαρακτηριστικά. Επικλαστικοί ή πυροκλαστικοί σχηματισμοί αποτελούν ιζηματογενείς ξενιστές για υψηλής θείωσης μεταλλοφορία.

Οι πορφυριτικές μεταλλοφορίες χαρακτηρίζονται από πολλαπλές διεισδυτικές φάσεις των μαγματικών διεισδύσεων. Οι διεισδύσεις πραγματοποιούνται υπό την μορφή συμπαγών ακανόνιστων σωμάτων ή με την μορφή φλεβών και η γεωμετρία τους χαρακτηρίζεται ελλειψοειδής. Διακρίνονται λοιπόν με βάση τον βαθμό κρυστάλλωσης κατά αύξουσα σειρά σε μετά κρυσταλλικούς πορφύρες, τελικούς κρυσταλλικούς πορφύρες, μεσοκρυσταλλικούς και σε πρώιμους. Οι πορφυριτικές διεισδύσεις ως προς την γεωχημεία τους είναι τύπου I. Όσον αφορά την χημεία τους αποτελούνται από ασβεσταλκαλική με ενδιάμεση έως υψηλή περιεκτικότητα σε κάλιο. Πετρογραφικά η σύστασή τους κυμαίνεται μεταξύ γρανοδιορίτη, χαλαζιακού μονζονίτη, αλκαλικού διορίτη, ασβεσταλκαλικού διορίτη, χαλαζιακού διορίτη, μονζονίτη έως και συηνίτη. Με τα λευκοκρατικά μέλη της σειράς συνδέονται οι μεταλλοφορίες Cu πλούσιες σε Mo, ενώ με τα μαφικά οι πλούσιες σε Au. Το φρεατομαγματικό διατρεμές είναι χαρακτηριστικό των κοιτασμάτων χαλκού. Αυτά λοιπόν οφείλουν την δημιουργία τους σε εκρηκτική ηφαιστειακή δράση και αποτελούν κατακόρυφους ηφαιστειακούς σωλήνες. Επιφανειακά μπορεί να εκδηλώνονται ως ηφαίστεια τύπου Maar. Η δημιουργία τους γίνεται στα τελικά στάδια του συστήματος χαλκού. Χρονικά συμπίπτουν με την δημιουργία επιθερμικών μεταλλοφοριών υψηλής θείωσης σε μικρότερα βάθη.



Σχ.3.4 Πολλαπλές διεισδυτικές φάσεις μαγματικών διεισδύσεων των πορφυριτικών συστημάτων (Sillitoe, 2010).

Τμήμα της επιθερμικής μεταλλοφορίας Au μπορεί να απομονωθεί τοπικά στην επαφή με γειτονικούς σχηματισμούς. Ιδιαίτερη υφή παρουσιάζουν τα φρεατομαγματικά λατυποπαγή που δημιουργούνται σε διατρεμή. Αποτελούνται από τοφικά συστατικά ανδεσιτικής έως δακτιτικής σύστασης και από κλάστες πετρωμάτων του υποβάθρου. Τα μαγματικά και τα φρεατομαγματικά λατυποπαγή έχουν διαφορές ως προς το συγκολλητικό υλικό.

Τα βαθύτερα τμήματα των πορφυριτικών συστημάτων αποτελούνται από μεταλλοφορίες πορφυριτικού $\text{Cu} \pm \text{Au} \pm \text{Mo}$. Ο Cu προσκολλάει σε ενώσεις του θείου των οποίων οι μορφές συνδέονται με την μορφή του πετρώματος ξενιστή, των διατρεμών, των πορφυριτικών διεισδύσεων και των διακλάσεων μέσα στις οποίες κρυσταλλώνεται η μεταλλοφορία. Οι μεταλλοφορίες χαλκού και χρυσού δημιουργούνται με την παρουσία ανθρακικών πετρωμάτων και την ύπαρξη υπερκείμενων μη περατών σχηματισμών καθώς επίσης και μεταλλοφορίες τύπου Skarn Zn-Pb και περιφερειακού Au. Σε άλλο σημείο στις ίδιες συνθήκες δημιουργούνται μεταλλοφορίες σουλφιδίων από αντικατάσταση στα ανθρακικά, όπου κυριαρχεί ο χαλκός και εντοπίζονται μεταλλοφορίες $\text{Pb, Ag, Zn} \pm \text{Au}$. Μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα μπορεί να εντοπιστεί Au. Μεταλλοφορίες ενδιάμεσης θείωσης χαρακτηρίζονται από την παρουσία $\text{Ag, Pb, Zn} \pm \text{Cu} \pm \text{Au}$ και ανθρακικών ορυκτών του Mn.

4.ΖΩΝΕΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗΣ-ΤΥΠΟΙ ΦΛΕΒΩΝ

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα έχουν ως χαρακτηριστικό την δημιουργία ζωνών εξαλλοίωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Η κάλυψη των ζωνών είναι ικανή να καταλαμβάνει μεγάλο όγκο, εξαλλοιώνοντας τους γειτονικούς σχηματισμούς και τις μαγματικές διεισδύσεις (Sillitoe, 2010). Οι ζώνες από τον πυρήνα προς την περιφέρεια είναι:

- νατριούχος-ασβεστούχα
- ποτασσική
- χλωριτική-σερικιτική
- σερικιτική
- προπυλιτική
- αργιλική

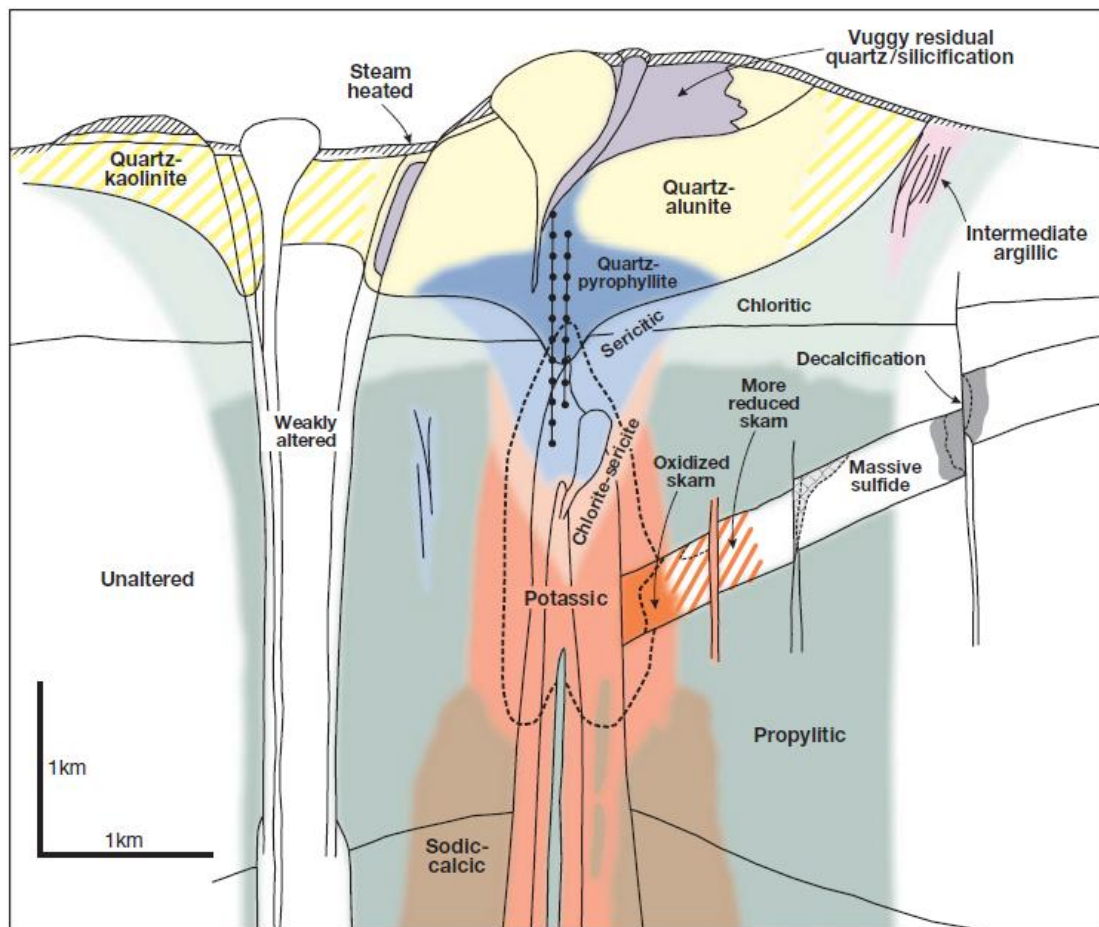
Τα συστήματα Cu που σχετίζονται με ασβεσταλκαλικό μαγματισμό έχουν μικρή ανάπτυξη στη σερικιτική και στην αργιλική ζώνη. Την μεγαλύτερη εξαλλοίωση καταλαμβάνει η νατριούχος-ασβεστούχα ζώνη, με τον μαγνητίτη ως χαρακτηριστικό ορυκτό εξαλλοίωσης. Έπειτα η ποτασσική με τον βιοτίτη και τον χαλαζία ως ορυκτό εξαλλοίωσης. Στην συγκεκριμένη ζώνη η μεταλλοφορία αποτελείται από ορυκτά του βορνίτη και του χαλκοπυρίτη. Περιφερειακά των συστημάτων αναπτύσσεται η προπυλιτική όπου αποτελείται από επίδοτο, χλωρίτη, αλβίτη και ανθρακικά ορυκτά. Η εξαλλοίωση μαφικών ορυκτών σε χλωρίτη, του πλαγιокλάστου σε ιλλίτη ή και σερικίτη του μαγνητίτη σε αιματίτη, με παράλληλη δημιουργία ορυκτών χαλκοπυρίτη και σιδηροπυρίτη, πυροδοτεί την χλωριτική-σερικιτική ζώνη. Στην ζώνη αυτή τα ορυκτά του χαλκού είναι ο κοβελίνης, ο χαλκοσίνης, ο τενναντίτης, ο βορνίτης, ο εναργίτης και ο χαλκοπυρίτης. Τέλος ο χαλαζίας και ο καολινίτης είναι τα κυρίαρχα ορυκτά της αργιλικής ζώνης.

Τύποι Φλεβών

Οι φλέβες σχηματίζονται σχεδόν σε όλα τα συστήματα πορφυριτικού χαλκού και είναι σημαντικές διότι εναποτίθενται σημαντικά ορυκτά. Η ορυκτολογική ανάλυση των φλεβών, η ροή, η τοποθεσία οι υφές και ο προσανατολισμός μας παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες όσον αφορά την εξέλιξη του χρόνου και του χώρου του ρευστού (π.χ Rehrig and Heidrick, 1972, Titley et al.1986, Geraghty et al.1988, Muntean and Einaudi, 2000, 2001, Proffett 2003a).

Χαρακτηριστικοί τύποι φλεβών περιγράφηκαν στο Butte από τον Meyer (1965) αλλά η πρώτη αναφορά για τα πορφυριτικά κοιτάσματα εδραιώνεται στο Ελ Σαλβαδόρ όπου οι

Gustafson και Hunt (1975) όρισαν A, B και D τύπους φλεβών. Έπειτα ο Gustafson and Quiroge (1995) συμπεριέλαβαν τον βιοτίτη και όρισαν τον τύπο C.



Σχ.4.1 Ζώνες εξαλλοίωσης σε πορφυριτικά συστήματα Cu (Sillitoe, 2010).

Οι Clark (1993) πρόσθεσαν τύπο φλεβών M βασιζόμενοι στα ευρήματα χαλκού. Ο Muntean and Einaudi (2000, 2001) πρόσθεσαν ακόμη ένα τύπο φλέβας αποτελούμενο από χαλαζία. Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι οι φλέβες παρέχουν μια σύνδεση μεταξύ των μαγματικών και υδροθερμικών διαδικασιών όπως περιγράφεται από τον Henderson μέσω των Carten (1986), οι φλέβες συνήθως περιέχουν ελαστικούς κρυστάλλους του χαλαζία ± βιοτίτη ± μολυβδαινίτη.

Η ταξινόμηση των φλεβών πραγματοποιείται με περιγραφικά κριτήρια συμπεριλαμβανομένου την μορφολογία, την υφή, την ορυκτολογία της πλήρωσης, τον προσανατολισμό και τον βαθμό αλλοίωσης του υλικού πλήρωσης. Οι νεότερες φλέβες σχηματίζονται σε χαμηλή θερμοκρασία. Οι θερμοκρασιακές εκτιμήσεις προσεγγιστικά για πολλές φλέβες βασίζονται στην ορυκτολογία, στα εγκλείσματα και στα ισότοπα του S.

5. ΙΔΙΑΙΤΕΡΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Πολλές σημαντικά κοιτάσματα Cu-Au, Cu-Mo, Mo-W, βρίσκονται γύρω από τον Ειρηνικό ωκεανό, στις Μεσογειακές περιφέρειες και στα Καρπάθια, όπως και στις περιοχές της Ευρώπης (Αλπική ορογένεση) το οποίο εντείνεται από την δυτική Ευρώπη μέσω του Ιράν και των Ιμαλαΐων, στην Κίνα και την Μαλαισία. Τα κοιτάσματα χαλκού σχηματίζονται όπως έχουμε αναφέρει κατά μήκος των περιοχών σύγκρουσης των πλακών και μπορούν να συνδεθούν με ηπειρωτικά και νησιωτικά τόξα.

Αλκαλικά ή πλούσια σε K και ασβέστιο κοιτάσματα πορφυριτικού συστήματος αντιπροσωπεύουν σημαντικούς πόρους χρυσού λόγω των μεγάλων συγκεντρώσεων. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχουν διαπιστωθεί αυξημένες περιεκτικότητες σε παλλάδιο (Pd) και πλατίνα (Pt). Αυτά τα πολύτιμα μέταλλα ανήκουν στα στοιχεία της ομάδας πλατίνας PGEs, τα οποία είναι πολύ σημαντικά και στρατηγικής σημασίας λόγω της αυξανόμενης χρήσης τους σε προηγμένες τεχνολογίες (ιατρική, ηλεκτρονική). Παρόλο που συνδέονται με βασικό-υπερβασικό μαγματισμό ορισμένες μεταλλοφορίες με εμφάνιση Pd-Pt συνδέθηκαν με αλκαλικού τύπου μαγματισμό (π.χ Βρετανική Κολομβία, Σκουριές Ελλάδα κ.ά.). Τέλος το ερευνητικό ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην ανακάλυψη νέων πηγών PGE.

Τα κοιτάσματα υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας από πολύτιμα μέταλλα τα οποία ταυτοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα JEOL, JSM 5600 ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, εξοπλισμένο με αυτοματοποιημένο σύστημα Oxford ISIS 300 σύστημα ανάλυσης ενεργειακής διασποράς στο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.

Όσον αφορά την περιοχή των Σκουριών Χαλκιδικής το πιο χαρακτηριστικό που έχει βρεθεί στο κοιτάσμα πορφυριτικού χαλκού, είναι η διασταύρωση μεταξύ Pt, Pd, Bi. Θεωρείται λοιπόν τα Pt και Pd μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποπροϊόντα. Πρέπει να τονίσουμε πως στον κύριο τύπο φλεβών βρίσκεται υψηλή ποσότητα Pd. Επιπλέον διαπιστώθηκε ευρεία ετερογένεια στη χωρική αλλαγή της περιεκτικότητας σε στοιχεία και πολύτιμα μέταλλα σε όλη την περιοχή των Σκουριών. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο χρώμιο και το νικέλιο διότι είναι στοιχεία που μας δείχνουν πληροφορίες για την προέλευση και εξέλιξη του μάγματος.

Ανατολικά των Σκουριών στα 5 χιλιόμετρα βρίσκεται η Φυσώκα όπου το πορφυριτικό σύστημα διαφοροποιήθηκε σε σχέση με αυτό των Σκουριών. Βρέθηκε λοιπόν μικρή διαφορά στην ηλικία των κοιτασμάτων με νεότερη αυτή των Σκουριών. Το κοιτάσμα χαρακτηρίζεται

σε πολλές θέσεις από έντονη αλλοίωση με οξείδια σιδήρου και ανώμαλο χαλκό. Τα ορυκτολογικά δεδομένα είναι περιορισμένα σε σχέση με το κοίτασμα στο ανατολικό περιθώριο. Η ανάλυση έδειξε ότι αποτελείται από χαμηλή περιεκτικότητα σε Pd και Cu και υψηλότερη σε Au, Te, As, Pb και Zn.

Παρόλο που αποκτούνται περισσότερα στοιχεία για την πλήρη αξιολόγηση των πολύτιμων μετάλλων στην Ευρώπη με την αξιολόγηση των πορφυριτικών κοιτασμάτων της Βαλκανικής χερσονήσου υποδηλώνουν ότι μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην παγκόσμια παραγωγή PGE. Το δυναμικό απόθεσης στις Σκουριές είναι 15t Pd και 3,5t Pt. Για το κοίτασμα στην Βουλγαρία οι αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται στους 13 t και 3,47 t ανάλογα.

Ο εμπλουτισμός σε Cr, Co και Ni στις Σκουριές, όπως και οι αναλογίες Pt και Pd στο κοίτασμα στην Βουλγαρία έρχονται σε αντίθεση με τα κοιτάσματα στην Ρωσία και στην Μογγολία όπου οι περιεκτικότητες είναι χαμηλές. Οι διαφορές των περιεκτικότητων στις προαναφερόμενες περιοχές σχετίζονται με μαγματισμό σε διαφορετικά γεωτεκτονικά περιβάλλοντα.

Το σύστημα Re-Os το οποίο χρησιμοποιείται και ως μέθοδος ραδιοχρονολόγησης στον μολυβδαινίτη, όσο και ως φορέας της πηγής μετάλλων με άμεσο προσδιορισμό του οσμίου στα μεταλλεύματα. Οι αρχικές αναλογίες $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ που είναι πιο ραδιογενείς από τον μανδύα δείχνουν συνεισφορά του φλοιού. Επιπλέον αυξημένο ποσοστό του ισοτόπου του οσμίου που καταγράφεται στα κοιτάσματα διαφόρων ηλικιών έχουν ερμηνευθεί ώστε να αντικατοπτρίζουν την ανακύκλωση από περιοχές με υψηλές αναλογίες $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$. Τέλος υψηλές τιμές Re και ^{187}Os καταγράφηκαν στο πορφυριτικό κοίτασμα Cu-Au-Mo(PGE) αντανακλώντας συνεισφορά από τον μανδύα μετά την σύγκρουση.

Στην βόρεια Ελλάδα τα πορφυριτικά κοιτάσματα συγκεντρώνονται τόσο στα ανατολικά (Μαρώνεια, Παγώνη Ράχη, Κώνος, Κασσιτέρες, Μύλοι, Μελιτένα) όσο και στα δυτικά της μάζας της Ροδόπης (Σκουριές, Φυσώκα, Τσικάρα, Βάθη, Γερακαριό). Στο ανατολικό τμήμα της Ροδόπης τα κοιτάσματα συνδέονται με αλκαλικού έως υψηλού-K μαγματισμού Ολιγοκαινικής ηλικίας (Ortelli et al., 2009, 2010, Moritz et al., 2010, Melfos and Voudouris, 2017, Voudouris et al., 2019). Τα πορφυριτικά κοιτάσματα στην βόρεια Ροδόπη δεν έχουν εξερευνηθεί πλήρως αλλά γενικότερα περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις Cu και εμφανίσεις Au, Mo, Re.

Στην Μαρώνεια το κοίτασμα Cu-Mo-Re-Au βρίσκεται στον λόφο Κτίσμα και σχετίζεται με τον πλουτωνίτη της Μαρώνειας που αποτελείται κυρίως από μονζονίτη ηλικίας 29,8 έως 28,4 Ma όπως έδειξε η ραδιοχρονολόγηση Rb-Sr σε όλο το πέτρωμα αλλά και στον βιοτίτη.

Ο μολυβδαινίτης περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις Re έως 2,88% κατά βάρος (Melfos et al. 2002, Melfos and Voudouris, 2017, Voudouris et al., 2019). Επιφανειακά δείγματα ωστόσο δείχνουν συγκεντρώσεις μέχρι 7600 ppm Mo, 5460 ppm Cu, 1 ppm Au. Γεώτρηση 10 μ έδωσε τα εξής αποτελέσματα: 12 ppm Au, 17 ppm Ag και 2% κατά βάρος Cu, το οποίο πιθανώς σχετίζεται με υψηλή επιθερμική σουλφιδίωση που υποδηλώνεται από την παρουσία φαμανίτη, τεναντίτη και πυροφυλλίτη καθώς και από τοπικά απροσδόκητα υψηλή συγκέντρωση Au (Melfos et al., 2002, 2020)

Στην περιοχή Παγώνη Ράχη, το κοίτασμα Cu-Mo-Re-Au σχετίζεται με τον γρανοδιορίτη και τον τοναλίτη και χαρακτηρίζεται ως επιθερμικό κοίτασμα (Voudouris et al., 2013). Η μεταλλογένεση πραγματοποιείται σε 4 παραγενετικά στάδια:

1. Στην Κ-ποτασσική με πλούσιες σε Au χαλαζιακές φλέβες, μαγνητίτη και χαλκοπυρίτη (τύπου A και M) στην ζώνη αλλοίωσης
2. Στην ποτασσική με εμφάνιση χαλκοπυρίτη μολυβδαινίτη και φλέβες χαλαζία
3. Στην σερικιτική ζώνη με μεταβατικό χαρακτήρα σε σύγκριση με την προηγούμενη ζώνη οι φλέβες τύπου D περιλαμβάνουν φυσικό Au και Ag-Bi-Te και Se
4. Στην αργιλική ζώνη οι φλέβες περιέχουν πολύτιμα μέταλλα (τύπου E) με βάση τον χαλαζία και τον ασβεστίτη, πλούσια σε Au, Ag και Te, με πιθανή γενετική σχέση με φλέβες τύπου D (Voudouris et al., 2013).

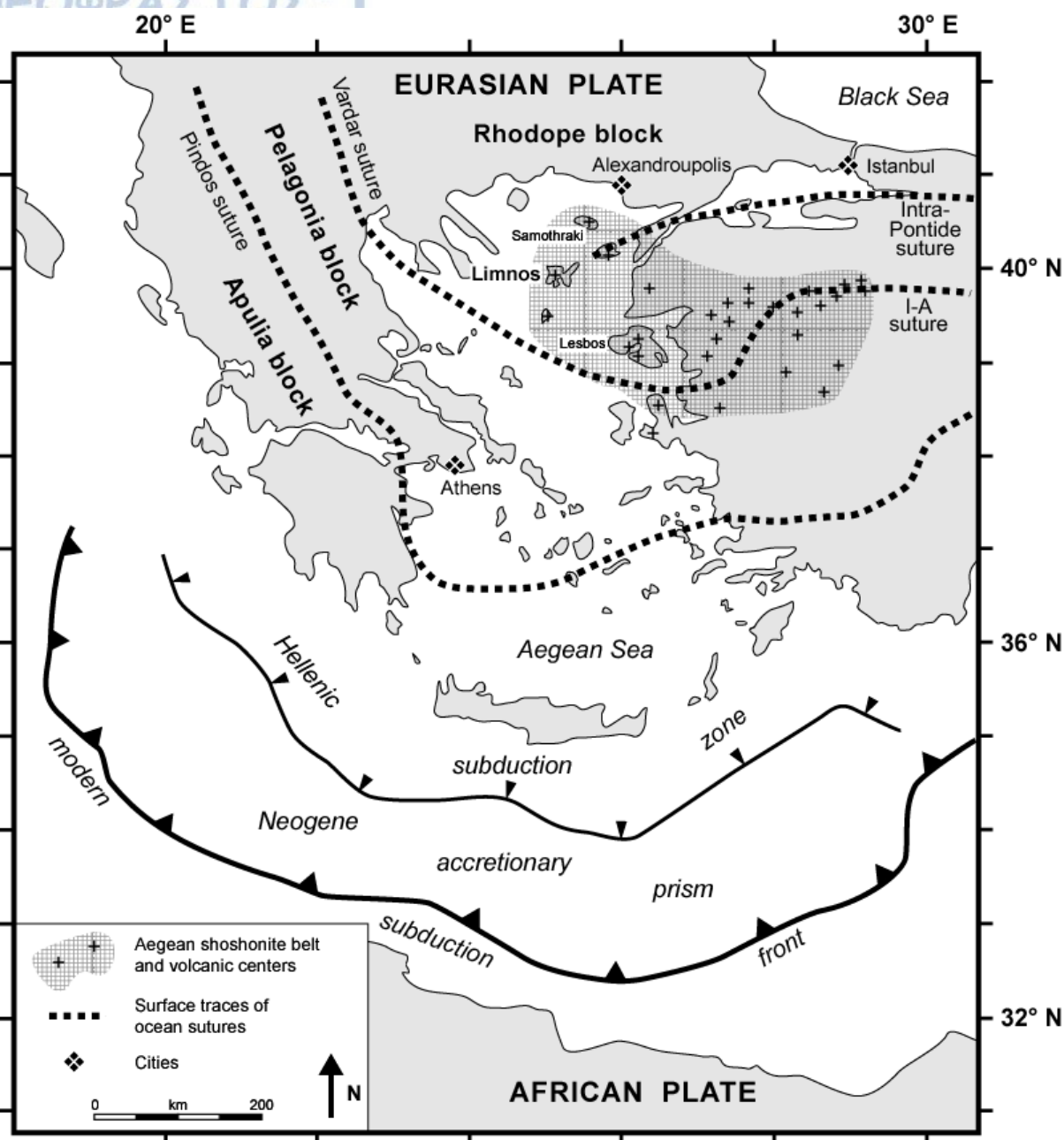
Χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα του συγκεκριμένου κοιτάσματος μας έδωσαν τα εξής αποτελέσματα: 5,1 ppm Au πάνω κατά 0,5% βάρος Cu, έως 40 ppm Te, 2000 ppm Mo και 20 ppm. Τέλος περιέχεται εξαιρετικά υψηλή περιεκτικότητα Re στον μολυβδαινίτη (Voudouris et al., 2009).

6.ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ

6.1 Λήμνος

Στην Ελλάδα και στη θάλασσα του βορείου Αιγαίου, η Ελληνική ορογένεση είναι ένα διακριθέν *terrane* της ζώνης αποσχηματισμού Άλπεων –Ιμαλαΐων και αντιπροσωπεύει έναν γεωτεκτονικό σύνδεσμο μεταξύ της νότιας βαλκανικής χερσονήσου και της Τουρκίας, που είναι το αποτέλεσμα της αλπικής σύγκρουσης μεταξύ των πλακών Ευρώπης και Αφρικής. Από το Μεσοζωικό, η σύγκρουση προκάλεσε θραύση και καλυμματοποίηση των τριών ηπειρωτικών τεμαχίων της Απούλιας, της Πελαγονικής, και της Ροδόπης, όπως επίσης και του παρεμβαλλόμενου ωκεάνιου φλοιού. Τα τελευταία μεταμορφικά γεγονότα υψηλής πίεσης κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης χρονολογούνται στα 51 και 42 Ma. Από τις αρχές του Τριτογενούς, η Αλπική υποβύθιση έχει μεταναστεύσει νότια όπου δομείται το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο. Η οπισθοχώρηση της υποβύθισης είχε σαν αποτέλεσμα την τρέχουσα μεγάλης κλίμακας τοπική έκταση (εφελκυσμός). Ο ηπειρωτικός φλοιός στην βορειοανατολική Ελλάδα έχει διασταλεί 100% από το κατώτερο Μειόκαινο. Η διπλή μετανάστευση της υποβύθισης και ο μεγάλης κλίμακας εφελκυσμός προκάλεσαν ορογενετικές αποκολλήσεις και λέπτυνση φλοιού όπως επίσης και την εμφάνιση συμπλεγμάτων μεταμορφικών πυρήνων. Ηφαιστειότητα παρατηρείται από τις αρχές Μειοκαίνου στο βορειοανατολικό Αιγαίο και δυτικά της Τουρκίας. Τα ηφαιστειακά πετρώματα προέρχονται από μεγάλους στρωματο-ηφαιστίτες στο βορειοανατολικό Αιγαίο, τα υπολείμματα των οποίων είναι παρόντα στα νησιά Λέσβος, Λήμνος, Σαμοθράκη και στη δυτική Τουρκία (Fornadel et al., 2012).

Αρκετές πιθανές ερμηνείες έχουν διατυπωθεί για τέτοιου είδους εκτεταμένης ηφαιστειακής δραστηριότητας και περιλαμβάνουν μια απότομη αύξηση γεωθερμίας που σχετίζεται με ανάδυση του μανδύα που προκλήθηκε από την αποκόλληση της υποβυθιζόμενης πλάκας. Εξαιτίας του εμπλουτισμού σε σπάνιες γαίες (REE), Mg και Cr-πλούσιων φαινοκρυστάλλων κλινοπυροξένων και της διαφυγής Sm-Nd ισοτόπου στα πετρώματα της νήσου Λήμνος, το μάγμα στην περιοχή ξεχείλισε ασθενοσφαιρικό μανδύα εξαιτίας της αποκόλλησης της πλάκας, η οποία προκάλεσε το λιώσιμο των μεταβασαλτών (Fornadel et al., 2012).



Σχ.6.1 Γεωτεκτονικός χάρτης Ελλάδας (Fornadel et al., 2012).

6.1.1 Γεωλογία στην χερσόνησο του Φακού

Η περιοχή που υφίστανται η χερσόνησος του Φακού αποτελείται από 2 μεγάλους λόφους στα δυτικά λόφος Τουρλίδα και ανατολικά λόφος Πετρόσπιτου, των οποίων τα υψόμετρα είναι περίπου 300 m. Το ιζηματογενές υπόβαθρο αποτελείται από μεσαίου μεγέθους κόκκων ψαμμίτη πλούσιο σε χαλαζία παρουσία σουλφιδίων που προήλθαν από την υδροθερμική εξαλλοίωση (Fornadel et al., 2012). Τα ιζηματογενή πετρώματα υπόκεινται των παλαιότερων ηφαιστειογενών και των διεισδυνόντων πετρωμάτων που βρέθηκαν στο νησί της

Λήμνου. Τα ηφαιστειακά αποτελούνται από ανδεσιτική ροή λάβας, τέφρας, και διεισδύσεις υποηφαιστειακών τραχειανδεσιτών της νότιας έκθεσης της ενότητας Κατάκολου. Στα βόρεια της χερσονήσου υπάρχει μια μικρή εμφάνιση πυροκλαστικού πετρώματος της ενότητας Ρωμανού. Βασιζόμενοι στο σχήμα ταξινόμησης κατά Le Bas et al. (1986), η εμφάνιση του πυροκλαστικού πετρώματος στην χερσόνησο του Φακού κυμαίνεται μεταξύ σοσινιτικών ανδεσιτών (λατίτες), τραχειανδεσιτών και τραχειτών. Στο κέντρο της χερσονήσου, οι εμφανίσεις και τα ιζηματογενή πετρώματα του υποβάθρου ανακατεύονται με υποηφαιστειακό μικροπορφυριτικό χαλαζιακό μονζονίτη (ο χαλαζιακός μονζονίτης του Φακού), προτάθηκε ότι ο χαλαζιακός μονζονίτης γενετικά σχετίζεται με την τοποθέτηση μιας άλλης υποηφαιστειακής διείσδυσης της ενότητας Κατάκολου (Fornadel et al., 2012). Μεγάλο μέρος της νοτιοδυτικής μεριάς της Λήμνου έχει υποστεί υδροθερμική εξαλλοίωση κατά μήκος των ζωνών των ρηγμάτων. Κατά τους Papulis & Tsolis Katagas (2008) ορίζονται 4 δυσδιάκριτες ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης βασιζόμενοι στην ορυκτολογία της αργίλου όπου υπάρχουν σμεκτίτης, ιλλίτης, αλλουσίτης, και καλονιτικές-δακιτικές ζώνες. Παρόλα αυτά οι ζώνες του σμεκτίτη και του ιλλίτη δεν είναι κοινές. Κατά Skarpelis et al. (1998), η εξάπλωση των ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης του Φακού ελέγχεται από τη ρηξιγενή τεκτονική. Στον Φακό αναπτύσσονται οι ακόλουθες ζώνες εξαλλοίωσης: α) ζώνη πυριτίωσης, β) ζώνη αλουνίτη γ) αργιλική ζώνη και δ) προπυλιτική (Fornadel et al., 2012). Η χερσόνησος του Φακού όπως και το υπόλοιπο νησί, διαπερνάται από ρήγματα BANΔ και ABA-ΔNΔ. Οπότε και τοποθετούνται υποηφαιστειακά σώματα και διευκολύνεται η ροή των υδροθερμικών – μαγματικών ρευστών που είναι υπεύθυνα για την μεταλλοφόρα. Ο χαλαζιακός μονζονίτης του Φακού και τα γειτονικά πετρώματα υποβλήθησαν σε έντονη υδροθερμική εξαλλοίωση (Voudouris and Alfieris, 2005; Voudouris, 2006; Papoulis and Tsoli-Katagas, 2008, Fornadel et al., 2012).

6.1.2 Υδροθερμική εξαλλοίωση Φακού

Η υδροθερμική εξαλλοίωση του Φακού σύμφωνα με τους Fornadel et al. (2010) ταξινομείται ως εξής:

Καλιούχος (Potassic): σημειώνεται στο ανατολικό μέρος του Φακού ιδιαίτερα σχετίζεται με τον χαλαζιακό μονζονίτη του Φακού. Είναι ο πιο παλιός τύπος εξαλλοίωσης στην περιοχή (σχεδόν ταυτόχρονα με την προπυλιτική εξαλλοίωση). Αποτελείται από χαλαζία, ορθόκλαστο, βιοτίτη, μαγνητίτη, πυρίτη και χαλκοπυρίτη.

Προπυλιτική (propylitic): αναπτύσσεται στα χαμηλότερα επίπεδα του επιθερμικού συστήματος, πλευρικά της αργιλικής ζώνης. Φαίνεται σε όλους τους τύπους πετρωμάτων με εξαίρεση τους τόφφους. Χαρακτηρίζεται από χλωρίτη, αλβίτη, επίδοτο, σερικήτη, σιδηροπυρίτη, ακτινόλιθο, απατίτη και τιτανίτη, άστριοι, αμφίβολοι και πυρόξενοι.

Σερικιτική ή φυλλοπυριτική (sericitic or phyllic): χαρακτηρίζεται από σερικήτη, χαλαζία, πυρίτη και τουρμαλίνη. Παρούσα είναι η σερικιτική εξαλλοίωση λάβας και τόφφων σε μεγάλη περιοχή μεταξύ λόφων Τουρλίδας και Πετρόσπιτου πίσω από την προχωρημένη αργιλική (advanced argilic) ζώνη. Επίσης η αργιλική εξαλλοίωση εμφανίζεται στο νότιο τμήμα της χερσονήσου του Φακού. Χαρακτηρίζεται από σμεκτίτη, σερικήτη, χλωρίτη, χαλαζία, πυρίτη και κατά θέσεις τουρμαλίνη.

Προχωρημένη αργιλική (advanced argilic): χαρακτηρίζεται από αλλουνίτη, χαλαζία, καολινίτη και πυρίτη. Η συγκεκριμένη ζώνη όπως και τοπογραφικά είναι υψηλότερα από την σερικιτική εξαλλοίωση, και διαπερνάται από υδροθερμικά λατυποπαγή στα οποία θράυσματα πετρωμάτων που έχουν εξαλλοιωθεί περιβάλλονται από οξειδία του σιδήρου.

Πυριτική: Καταλαμβάνει ένα μεγάλο τμήμα της περιοχής. Ζώνες πυριτίωσης υπό μορφή πυριτικών καλυμμάτων κυριαρχούν στο δυτικό και ανατολικό τμήμα (θέσεις Τουρλίδα και Πετρόσπιτος). Η πυριτίωση διακρίνεται σε πορώδη και σε συμπαγή μορφή. Εκτός του μικροκρυσταλλικού χαλαζία, σιδηροπυρίτη, και μαρκασίτη στη ζώνη πυριτίωσης σε μικρές αναλογίες συμμετέχουν αλουνίτης ζιρκόνιο, ανατάσης (Voudouris and Skarpelis, 1998).

6.1.3 Μεταλλοφορίες

Περιοχή Φακού: Σύμφωνα με Fornadel et al. (2010) στις πυριτικές ζώνες εντοπίζεται μεταλλοφόρα, στο νότιο τμήμα της περιοχής και συγκεκριμένα σε χαλαζιακές φλέβες που βρίσκονται μέσα στους ψαμμίτες (δυτική και κεντρική ζώνη) και στο χαλαζιακό μονζοδιορίτη, στα νοτιοανατολικά της περιοχής (ανατολική ζώνη). Στη δυτική ζώνη μεταλλοφόρας εντός χαλαζιακών φλεβών διεύθυνσης B55° Δ και B70° Α. Σε χαμηλότερα τοπογραφικά επίπεδα εντοπίστηκε πλήθος χαλαζιακών φλεβών και υδροθερμικών λατυποπαγών με πλούσια μεταλλοφόρα θειούχων, θειοαλάτων, τελλουριδίων και χρυσού. Η ανατολική ζώνη μεταλλοφόρας βρίσκεται περίπου 600 m νοτιοανατολικά της κεντρικής ζώνης και χαρακτηρίζεται από τις υψηλότερες συγκεντρώσεις χρυσού στις μεταλλοφορίες της περιοχής Φακού. Μήκος περίπου 1 Km και εύρος περίπου 10 m (Fornadel et al., 2012).

Περιοχή Σάρδεων: Σύστημα χαλαζιακών φλεβών, φλέβες αναπτύσσονται εντός υποηφαιστεϊτή και ψαμμιτών και συνδέονται με συστήματα ρηγμάτων B55°Δ B70°Α, όπως και στην περιοχή του Φακού. Το πλευρικό πέτρωμα των χαλαζιακών φλεβών χαρακτηρίζεται από σερικιτίωση. Περιοχή Ρουσσοπουλίου. Εντοπίστηκαν εντός ηφαιστειακών λατυποπαγών τρεις ζώνες μαύρης συμπαγούς πυριτίωσης. Η πυριτίωση είναι οπαλιούχος συνήθως και συνδέεται με σερικιτική εξαλλοίωση πλευρικού πετρώματος. Ζώνη αλουνίτη αναπτύσσεται πάνω από τη ζώνη πυριτίωσης. Χαρακτηριστική είναι η υδροθερμική λατυποποίηση τόσο των ζωνών πυριτίωσης όσο και της ζώνης αλουνίτη. Η μεταλλοφόρα περιλαμβάνει σιδηροπυρίτη, μαρकाσίτη, και φλεβίδια που διαπερνούν τις ζώνες πυριτίωσης (Voudouris and Skarpelis 1998, Fornadel et al., 2012). Σύμφωνα με Voudouris & Skarpelis (1998) οι ζώνες πυριτίωσης, αλουνίτη και τα υδροθερμικά λατυποπαγή στις θέσεις Τουρλίδα και Πετρόσπιτος παρουσιάζουν χαμηλές περιεκτικότητες χρυσού. Η υψηλότερη τιμή σε χρυσό μετρήθηκε σε φλεβικό υλικό από την ανατολική ζώνη μεταλλοφόρας 5,6 g/t. Οι υψηλότερες τιμές αργύρου μετρήθηκαν σε δείγματα με άφθονο τετραεδρίτη στα χαμηλότερα επίπεδα του επιθερμικού συστήματος (Fornadel et al., 2012).

6.2 Σκουριές

6.2.1 Γεωγραφική θέση

Το κοίτασμα πορφυριτικού Cu-Au, των Σκουριών, εμφανίζεται στην Μακεδονία και συγκεκριμένα στην περιοχή της Χαλκιδικής, ΝΑ της Θεσσαλονίκης. Στην περιοχή των Σκουριών έλαβε χώρα διείσδυση μάγματος σε γνευσίους και αμφιβολιτικούς σχιστολίθους της ενότητας του Βερτίσκου. Υπάρχουν ενδείξεις εκμετάλλευσης του κοιτάσματος κατά την αρχαιότητα. Συγκεκριμένα φαίνεται πως η εξόρυξη δραστηριοποιήθηκε κατά την διάρκεια του 5^{ου} έως 2^{ου} αιώνα π.Χ..



Σχ.6.2.1 Φωτογραφία από την περιοχή των Σκουριών (Β. Μέλφος).

6.2.2 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής

Το κοίτασμα των Σκουριών αναπτύσσεται εντός της Σερβομακεδονικής μάζας. Συγκεκριμένα αναπτύσσεται στην ανώτερη ενότητα του Βερτίσκου και στην κατώτερη των Κερδυλλίων κατά Kockel et al. (1975). Η διείδυση της μεταλλοφορίας στις Σκουριές συμπεριλαμβάνεται στην ενότητα του Βερτίσκου. Ανάμεσα στις δύο ενότητες υπάρχει ομαλή μετάβαση κατά Kockel et al. (1975). Εν αντιθέσει κατά Neubauer (1957) θεωρείται πως υπάρχουν ασυμφωνίες μεταξύ των ενοτήτων.

Ενότητα Βερτίσκου: Η ενότητα Βερτίσκου καταλαμβάνει τον μεγαλύτερο όγκο της Σερβομακεδονικής μάζας, υπέρκειται της ενότητας των Κερδυλλίων (Sakellariou, 1989) και αποτελείται από μεγάλη ποικιλία λιθολογικών φάσεων. Συγκεκριμένα συγκροτείται από μοσχοβιτικούς γνευσίους, διμαρμαρυγιακούς γνευσίους, οφθαλμώδεις γνευσίους, μοσχοβιτικούς γρανιτικούς γνευσίους και γρανιτικούς γνευσίους με κυανίτη και σταυρόλιθο. (Sakellariou, 1989). Τα μάρμαρα δεν εμφανίζονται στην συγκεκριμένη ενότητα. Τέλος παρουσιάζονται αμφιβολίτες και σχιστόλιθοι με μορφή ενστρώσεων ή φακών στους

γενεσίους (Kockel & Mollat, 1977, Sakellariou, 1989). Με ραδιοχρονολόγηση U – Pb σε ζirkόνια και ουρανοθορίτες, ταυτοποιήθηκε η ηλικία διείσδυσης. Το αποτέλεσμα που δόθηκε απαντάται στο Μειόκαινο (Frei, 1992). Το αποτέλεσμα συμπίπτει και με αυτά του πετρώματος.

Ενότητα Κερδυλλίων: Μεταξύ των εκβολών του Στρυμόνα και του Στρατωνίου, εμφανίζεται η ενότητα των Κερδυλλίων έχοντας μικρή έκταση. Κατά τον Μουντράκη (2010) τα πετρώματα της απαρτίζονται από τους βαθύτερους ορίζοντες της Σερβομακεδονικής μάζας. Πιο αναλυτικά αποτελείται από μεταμορφωμένα και συγκεκριμένα από μάρμαρα, βιοτιτικούς γενεσίους και αμφιβολίτες (Kockel et al., 1975). Κατά τον Σακελαρίου (1989) ο επικρατέστερος σχηματισμός είναι οι βιοτιτικοί γενεύσιοι με αναπτυγμένη μεταμορφική στρωμάτωση. Σύμφωνα με τον ίδιο ερευνητή οι αμφιβολίτες παρουσιάζονται με την μορφή φακών ή ενστρώσεων σε βιοτιτικούς γενεσίους. Επιπλέον τα μάρμαρα εμφανίζονται μέσα στους γενεσίους σε τρεις ορίζοντες (άνωτερος, κατώτερος, βαθύτερος) χωρίς να διαφοροποιούνται λιθολογικά (Kockel et al., 1975). Το ανώτερο μάρμαρο αποτελείται από το υπόβαθρο της ενότητας τους Βερτίσκου και είναι πλούσιο σε γραφίτη. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα αποτελούνται από απλιτοειδείς και πηγματοειδείς φλέβες (Sakellariou, 1989). Σύμφωνα με τον Νικολάου (1960), οι φλέβες αυτές σχετίζονται με την μαγματική δραστηριότητα που οφείλονται στην δημιουργία των κοιτασμάτων. Σε αντίθεση ο Mantzos (1989), υποστηρίζει ότι τα συγκεκριμένα πετρώματα κρυσταλλώθηκαν μετά την απόθεση του κοιτάσματος.

6.2.3 Ορυκτολογική ανάλυση διαδοχικών διεισδύσεων

Στις Σκουριές υπάρχουν τέσσερις διαδοχικές φάσεις. Από την νεότερη προς την παλαιότερη είναι οι ακόλουθες : πορφύρης τελικού σταδίου, ενδιάμεσος πορφύρης, κύριος πορφύρης, ροζ μονζονιτικός πορφύρης.

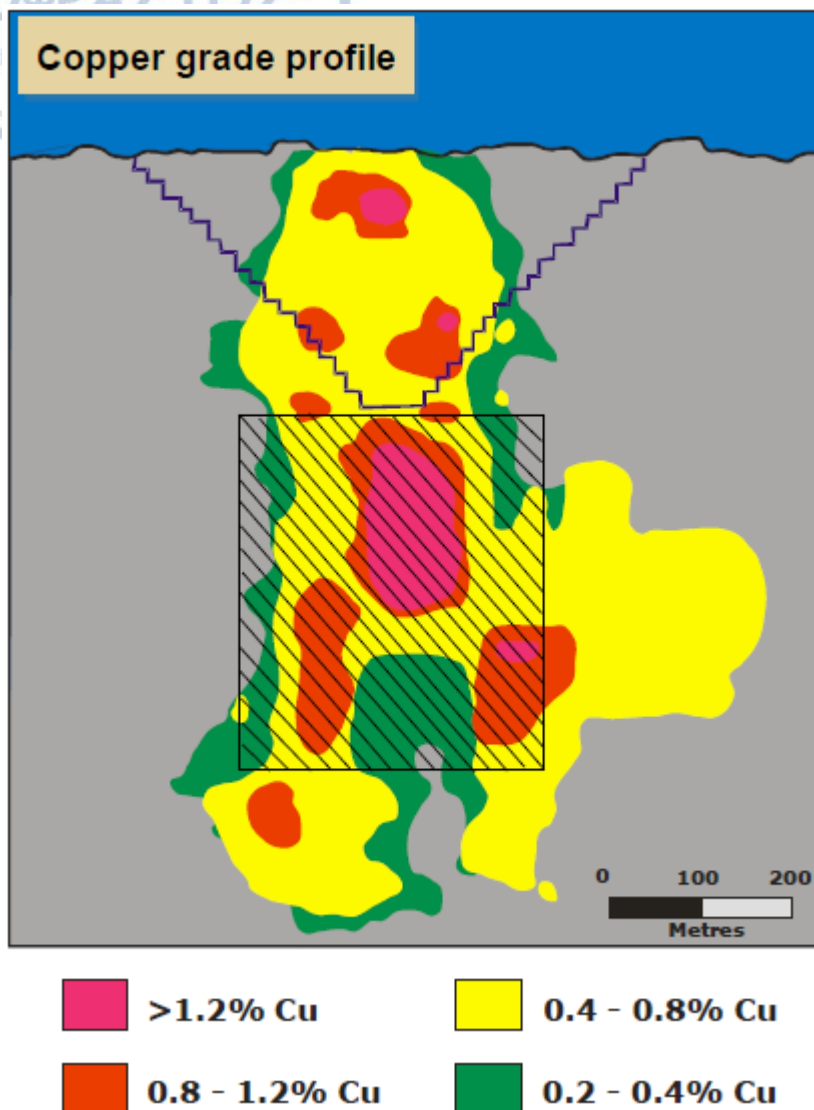
Πορφύρης τελικού σταδίου: Οι μονζονιτικές φλέβες που υπάρχουν στο πέτρωμα πιθανόν σχετίζονται με πρόσφατο κρυσταλλωμένο τήγμα, προερχόμενο από τον κύριο μαγματικό θάλαμο. Οι φλέβες χαρακτηρίζονται από μέσο – αδρόκοκκη πορφυρική υφή και αποτελούνται από 55% κατ 'όγκο από φαινοκρυστάλλους πλαγιокλάστων, αμφιβόλων, αλκαλικών αστρίων, βιοτίτη, απατίτη και τιτανίτη. Σε αρκετά σημεία υπάρχουν κηλίδες ανυδρίτη. Το Th κατέχει υψηλή περιεκτικότητα στις διεισδύσεις λόγω του τιτανίτη. Λόγω της καλιούχου εξαλλοίωσης στις φλέβες, παρατηρείται υδροθερμικός βιοτίτης και

μαγνητίτης. Τέλος από υδροθερμικό χλωρίτη και ανθρακικά έχουν αντικατασταθεί σχεδόν τα μαφικά ορυκτά.

Ενδιάμεσος πορφύρης: Αποτελείται από πορφυριτικό μέσο έως αδρόκοκκο γκρι μονζονίτη με 45% κατ' όγκο φαινοκρυστάλλους αμφιβόλων, απατίτη, πλαγιοκλάστων και αλκαλικών αστρίων, μέσα σε λεπτοκρυσταλλική μάζα αστρίων. Η μεταλλοφορία του είναι μικρή έως μέτρια από φλέβες τύπου S χαλκοπυρίτη-βορνίτη. Η καλλιούχος εξαλλοίωση είναι ισχυρή και αποτελείται από υδροθερμικό μαγνητίτη και βιοτίτη. Κατά θέσεις ο χαλκοπυρίτης έχει αντικαταστήσει φαινοκρυστάλλους μαφικών ορυκτών καθώς και κόκκους μαγνητίτη. Από έντονη εξαλλοίωση χλωρίτη-σιδηροπυρίτη-σπεκιουλαρίτη πυροδοτούν το τελευταίο στάδιο της μεταλλοφορίας καθώς επίσης και της μετανάστευσης χαλκού και χρυσού σε υψηλότερα επίπεδα.

Κύριος πορφύρης: Σχετίζεται με υψηλού βαθμού μεταλλοφορία τύπου stockwork. Αποτελείται από μεσόκοκκο ροζ-γκρι μονζονίτη και περιέχει 60% κατ' όγκο φαινοκρυστάλλους αλκαλικών αστρίων, πλαγιοκλάστων, απατίτη και αμφιβόλων μέσα σε λεπτόκοκκη μάζα αστρίων. Το πέτρωμα υπέστη καλιούχο εξαλλοίωση με παρουσία υδροθερμικού βιοτίτη-μαγνητίτη και ορθοκλάστου. Η μεταλλοφορία πυροδοτείται στις φλέβες χαλκοπυρίτη-χαλαζία-βορνίτη. Τα θειούχα ορυκτά βρίσκονται τόσο σε φλέβες όσο και διάσπαρτα στο πέτρωμα.

Ροζ μονζονιτικός πορφύρης: Είναι χονδρόκοκκος με πορφυριτικό ιστό και περιέχει 60% κατ' όγκο φαινοκρυστάλλους αμφιβόλων, αλκαλικών αστρίων, απατίτη και πλαγιοκλάστων σε λεπτοκρυσταλλική μάζα αστρίων. Σε κάποια σημεία περιέχονται φλέβες ανυδρίτη. Το πέτρωμα υπέστη ήπια καλιούχο εξαλλοίωση, έχοντας ως αποτέλεσμα την μερική αντικατάσταση των φαινοκρυστάλλων αμφιβόλων από υδροθερμικό βιοτίτη και των πλαγιοκλάστων από ορθόκλαστο. Ο ροζ μονζονίτης παρουσιάζει μικρό βαθμό μεταλλοφορίας και σχετίζεται με φλέβες τύπου B σιδηροπυρίτη-χαλκοπυρίτη-χαλαζία. Τέλος σε κάποια σημεία εντοπίζονται φλέβες μολυβδαινίτη.



Σχηματική απεικόνιση του εδαφικού προφίλ της κατανομής χαλκού και η ανάλογη περιεκτικότητα στους εδαφικούς ορίζοντες (Πηγή: Eldorado Gold)

6.2.4 Εξαλλοιώσεις και μεταλλοφορία

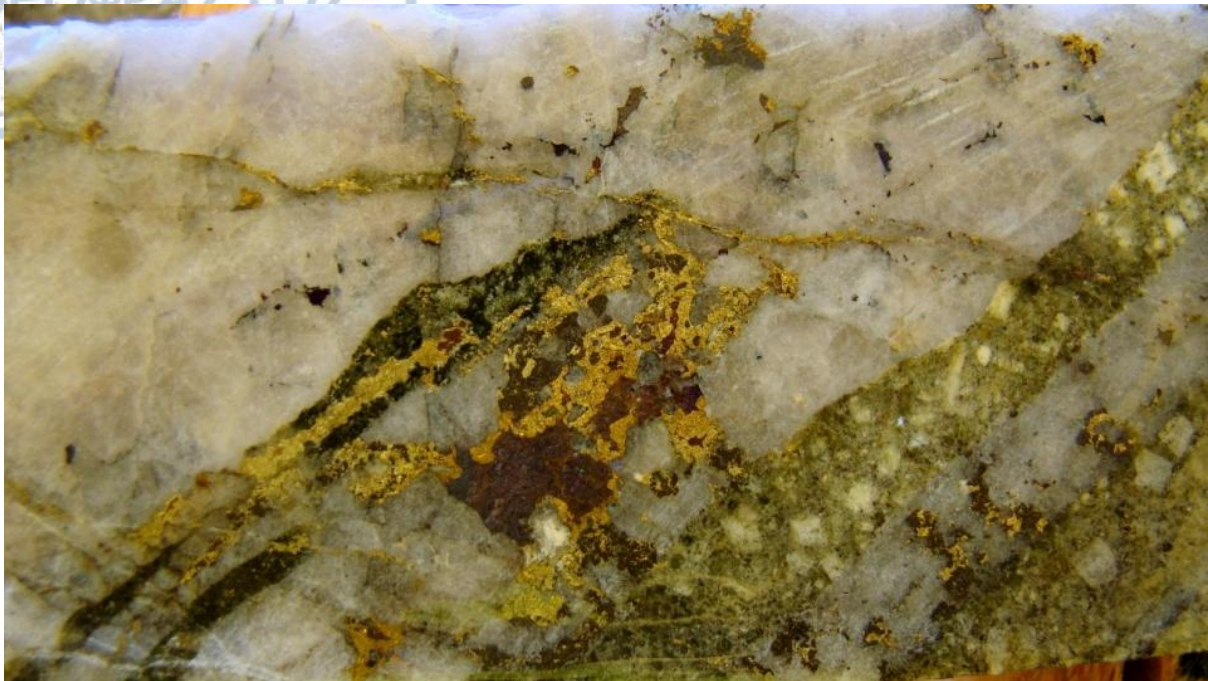
Εξ αιτίας της υδροθερμικής δραστηριότητας τα πετρώματα εμφανίζουν εκτεταμένη εξαλλοίωση. Κυρίως το πέτρωμα επηρεάστηκε από την καλιούχο εξαλλοίωση και σε κάποια επιμέρους τμήματα από την προπυλιτική.

Το κοίτασμα παρουσιάζεται με την μορφή φλεβών και διάσπαρτων τμημάτων έχοντας την γενική μορφή τύπου Stockwork. Σημαντικά ορυκτά του κοιτάσματος είναι ο χαλκοπυρίτης, ο βορνίτης, ο σιδηροπυρίτης, ο μαγνητίτης και σε μικρές περιεκτικότητες ο τετραεδρίτης και ο γαληνίτης. Μέσα στον βορνίτη και τον χαλκοπυρίτη με την μορφή εγκλεισμάτων βρίσκεται χρυσός. Επιπλέον εκτείνεται μια ζώνη οξείδωσης που αποτελείται από μαλαχίτη, γκαιτίτη, αζουρίτη και γιαιοσίτη. Στην συνέχεια παρουσιάζεται μια ζώνη

εμπλουτισμού όπου επικρατεί ο χαλκοσίνης και ο κοβελίνης μ' εγκλείσματα χρυσού. Από ορυκτολογικά δεδομένα συμπεραίνεται πως ο φλεβικός χαλκοπυρίτης περιέχει χαλαζία και θειούχα Cu-Fe και διακρίνεται σε δύο γενιές. Στην δεύτερη γενιά κόκκων χαλκοπυρίτη και βορνίτη έχει βρεθεί ο μερενσκυίτης κύριο ορυκτό του Pd. Αυτή η σύνδεση μεταξύ θειούχων βασικών μετάλλων και σε τελλουρίδια παλαδίου και χρυσού σε σύνδεση με γεωχημικά και πειραματικά δεδομένα (Cabri, 1965, Nyman et al., 1990, Eliopoulos & Economou – Eliopoulos, 1991), καταλήγουν πως ο χαλκός αποτέθηκε σε θερμοκρασίες 350 έως 490 °C. Τα στοιχεία Pd, Au και Ag σχηματίστηκαν σε θερμοκρασίες μικρότερες των 350 βαθμών μετά την απόθεση των θειούχων βασικών μετάλλων.



Σχήμα 6.2a Απεικόνιση ζώνης οξείδωσης, με χρώμα μπλε αντικατοπτρίζεται το ορυκτό αζουρίτης, με πράσινο ο μαλαχίτης και με καφέ διάφορα ένυδρα ορυκτά του Fe (B. Μέλφος).

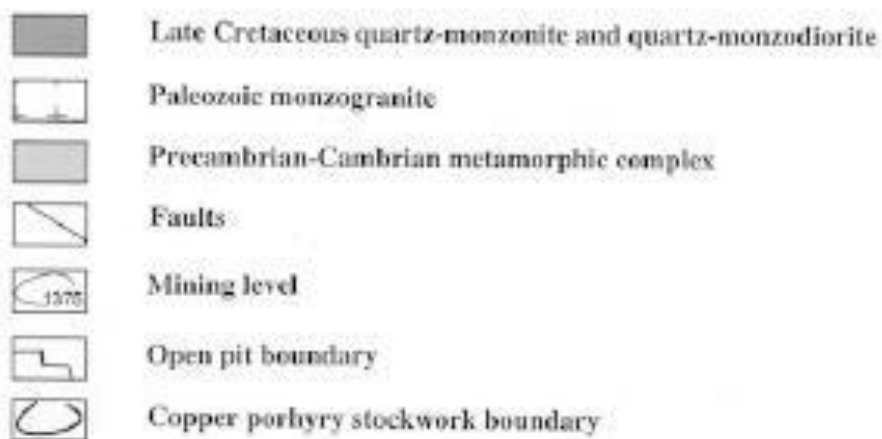
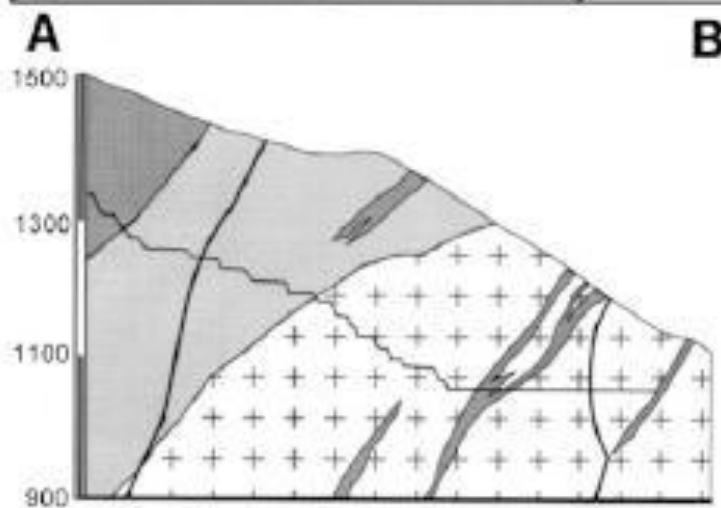
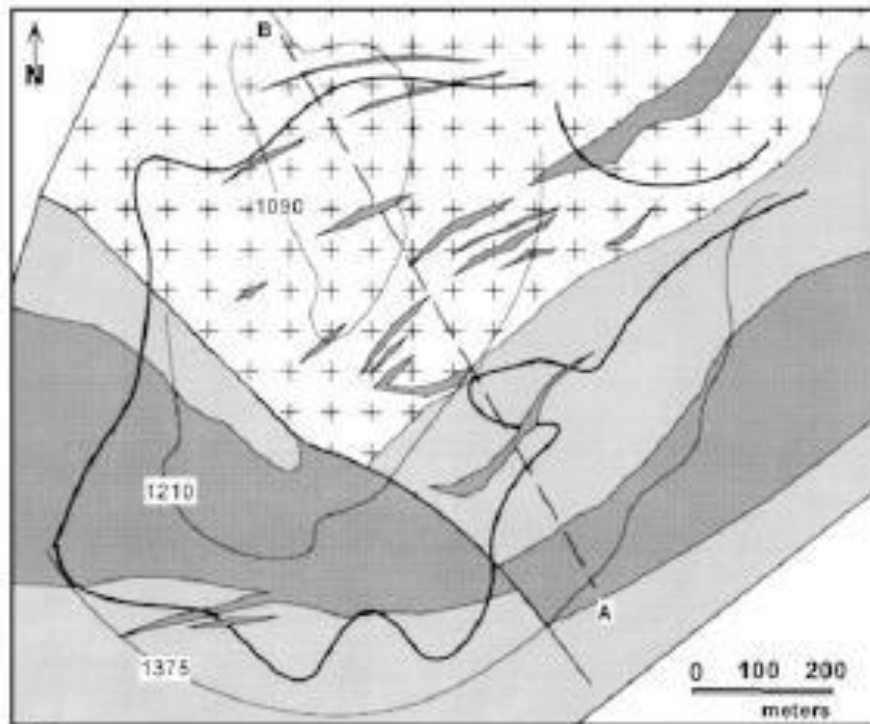


Σχήμα 6.2 β Εμφάνιση φλεβών χαλκοπυρίτη με βορνίτη (Β. Μέλφος).

6.3 Elatsite

6.3.1 Γεωγραφική θέση και γεωλογία ευρύτερης περιοχής

Ανατολικά της Σόφια και 15 km νότια της πόλης Etropole, στο βορειότερο σημείο της ζώνης Panagyurishte – Etropole δεσπόζει το κοίτασμα πορφυριτικού χαλκού Elatsite. Η ζώνη μεταλλοφορίας αποτελείται από πλουτωνικά και ηφαιστειακά πετρώματα. Τα πλουτωνικά εκτείνονται σε διεύθυνση βορρά- νότου, στις Βαλκανίδες και στην Ροδόπη. Η σύστασή τους είναι ασβεσταλκαλική και γεωτεκτονικά συντελούν νησιωτικό τόξο, με ηλικία στο Άνω-Κρητιδικό. Τέλος αποτελεί τμήμα του Δειναρικού τόξου (Heinrich & Neubauer, 2002).



Σχ.6.3 Τομή και γεωλογικός χάρτης του κοιτάσματος Elatsite (Popov et al., 2000)

6.3.2 Εξαλλοιώσεις και μεταλλοφορία

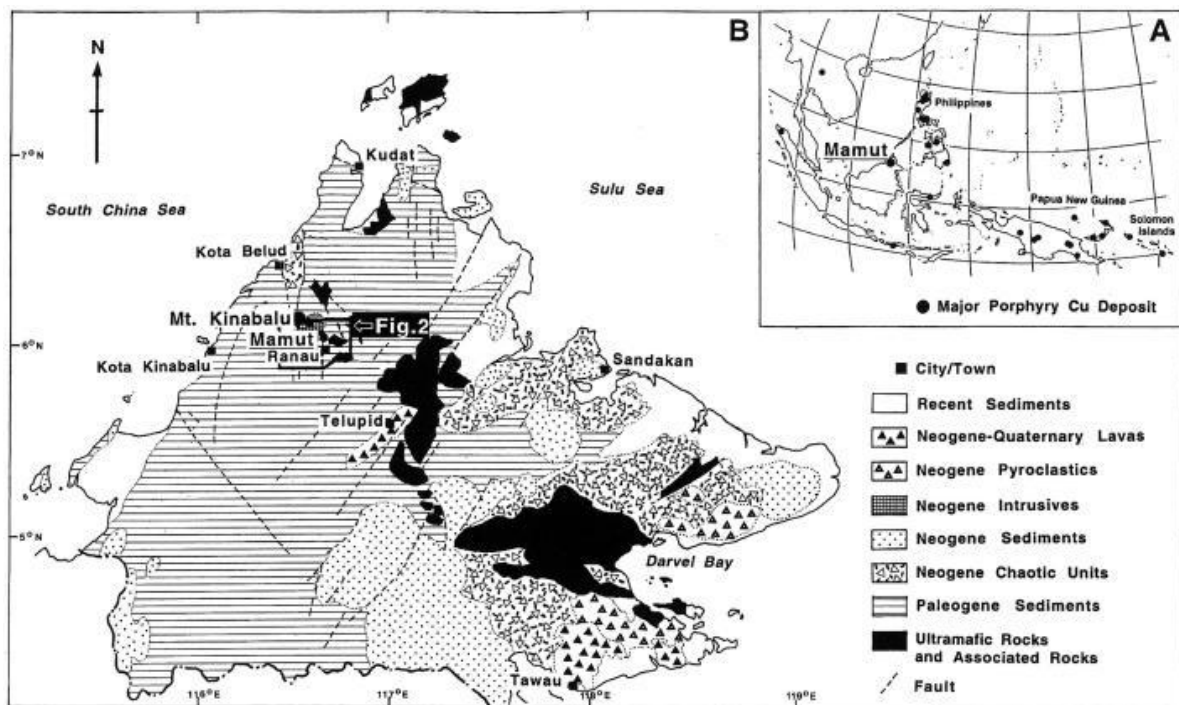
Λόγω της έντονης και εκτεταμένης πυριτίωσης καθώς επίσης και του διαφορετικού τύπου εξαλλοίωσης που υπέστη το πέτρωμα δεν διακρίνονται οι ζώνες. Περιορισμένη έκταση καταλαμβάνουν η προπυλιτική και η καλιούχος εξαλλοίωση και συνδέονται με την παραγένεση βορνίτη- χαλκοπυρίτη- μαγνητίτη. Η καλιούχος ζώνη αποτελείται από βιοτίτη, ανυδρίτη και καλιούχο άστριο με κυρίαρχο ορυκτό τον βιοτίτη. Η αυξημένη χλωριτίωση του πρωτογενούς και του δευτερογενούς βιοτίτη σημάνει την σταδιακή αλλαγή της καλιούχου εξαλλοίωσης σε προπυλιτική. Επιπλέον εμφανίζονται και άλλα ορυκτά όπως ανυδρίτης, σερικίτης, αλβίτης, επίδοτο και ενίοτε ασβεστίτης. Οι φλέβες χαλκοπυρίτη και βορνίτη συνδέονται συχνά από χλωρίτη και χαλαζία. Η κυρίαρχη ζώνη εξαλλοίωσης είναι η πυροφυλλιτική και συνδέεται με την παραγένεση χαλκοπυρίτη-σιδηροπυρίτη σε όλη την έκταση του κοιτάσματος. Χαρακτηρίζεται από διάχυτη πυριτίωση όπως και σερικιτίωση των αστρίων. Σε κάποια σημεία παρατηρείται και αργλική εξαλλοίωση, λόγω της μετατροπής του πετρώματος σε αργλικά ορυκτά (ιλίτη και καολινίτη).

Διακρίνονται τέσσερις διαδοχικές φάσεις μεταλλοφορίας στο συγκεκριμένο κοίτασμα. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει μαγνητίτη και χαλαζία και τα μεταλλοφόρα ορυκτά είναι ο χαλκοπυρίτης και ο βορνίτης. Η δεύτερη φάση αποτελείται από χαλκοπυρίτη, σιδηροπυρίτη και χαλαζία. Η τρίτη φάση από σιδηροπυρίτη και χαλαζία, ενώ η τέταρτη αποτελείται από γαληνίτη, σφαλερίτη και χαλαζία. Στα κεντρικά σημεία του κοιτάσματος λαμβάνουν χώρα οι δύο πρώτες φάσεις και συνδέονται με καλιούχο εξαλλοίωση με χαρακτηριστικά ορυκτά καλιούχο άστριο, βιοτίτη, χαλαζία και κατά θέσεις σερικίτη. Στα επιφανειακά και περιφερειακά τμήματα εδραιώνονται οι άλλες δύο φάσεις, οι οποίες σχετίζονται με υδροθερμικές εξαλλοιώσεις προπυλιτικού τύπου. Κατά θέσεις έχει δράσει και η αργλική εξαλλοίωση. Διάσπαρτη και τύπου Stockwork είναι η μεταλλοφορία με χαλκοπυρίτη, βορνίτη, σιδηροπυρίτη και μαγνητίτη. Συνοπτικά στην περιφέρεια επικρατεί ο σιδηροπυρίτης και στο κέντρο ο χαλκοπυρίτης. Επιπλέον ορυκτά της ομάδας Pt και εγκλεισμάτων χρυσού συναντώνται στον χαλκοπυρίτη.

6.4 Mamut Μαλαισίας

6.4.1 Γεωγραφική θέση και γεωλογία ευρύτερης περιοχής

Το κοίτασμα πορφυριτικού τύπου Cu-Au Mamut, βρίσκεται στην ανατολική Μαλαισία, στα ορεινά του νησιού Βόρνεο. Το κοίτασμα συνδέεται με διεισδύσεις χαλαζιακού μονζονίτη και η ηλικία του είναι Άνω Μειοκαινική. Από γεωτεκτονική άποψη οι μαγματικές διεισδύσεις συνδέονται με την σύγκρουση της μικροπλάκας Kalimantan και του τόξου Sulu. Επίσης λαμβάνουν χώρα μαγματικά πετρώματα υπερβασικής σύστασης. Αυτά προέρχονται από μερική τήξη του ανώτερου μανδύα. Υπερκείμενα των μαγματικών πετρωμάτων είναι τα ιζήματα αποτελούμενα από λεπτόκοκκους ψαμμίτες με ενστρώσεις τουρβιδιτών και ιλυόλιθους. Κατά θέσεις σε αυτά τα πετρώματα φιλοξενείται το κοίτασμα.



Σχ.6.4 Γεωλογικός χάρτης και τοποθεσία κοιτάσματος Mamut (Clennel, 1991 & Tongkul, 1991).

6.4.2 Εξαλλοιώσεις και μεταλλοφορία

Η υδροθερμική εξαλλοίωση στα πετρώματα είναι έντονη. Στον αδαμελλίτη διακρίθηκαν τέσσερις ζώνες εξαλλοίωσης οι οποίες από το κέντρο προς την περιφέρεια είναι οι ακόλουθες: 1) καλιούχος ζώνη 2) ζώνη υδροθερμικού βιοτίτη –χαλαζία 3) πυροφυλλιτική ζώνη 4) αργιλική ζώνη. Οι ζώνες είναι εμπλουτισμένες με K και φτωχές σε Ca και Na. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται στην προφυλλιτική και καλιούχο ζώνη σε χαλαζιακό πλέγμα

φλεβών αλλά και διάσπαρτη. Κύριο ορυκτό είναι ο χαλκοπυρίτης και σε μικρότερη ποσότητα ο σιδηροπυρίτης και ο μαγνητοπυρίτης. Σε κόκκους χαλκοπυρίτη έχουν βρεθεί ίχνη Pt και Pd. Επιπλέον το κοίτασμα έχει υποστεί πυριτίωση. Στην περιφέρεια συναντάται η αργιλική και πυροφυλλιτική ζώνη οι οποίες συνδέονται με μεταλλοφορία Zn-Sb, Pb, Au και Pt. Το κοίτασμα Mamut συνδέεται με υδροθερμική εξαλλοίωση 4 παραγενέσεων. 1) διάσπαρτο μέταλλευμα Cu – Au 2) μεταλλοφορία Cu – Au τύπου stockwork σε χαλαζιακό πλέγμα 3) μεταλλοφορία Pb-Zn 4) μεταλλοφορία Sb. Στα πρώτα δύο στάδια κυριαρχεί ο μαγνητοπυρίτης, μαγνητίτης, χαλκοπυρίτης και σιδηροπυρίτης. Ο μαγνητίτης καλύπτει μεγαλύτερο μέρος σε σχέση με τα θειούχα. Σε κόκκους χαλκοπυρίτη έχουν βρεθεί εγκλείσματα ορυκτών του Pd και Pt. Στα δύο τελευταία στάδια υπερτερεί η μεταλλοφορία Zn-Pb-Sb συνδεόμενη με φλέβες δολομίτη-χαλαζία.

6.5 Ok tedi, Παπούα - Νέα Γουινέα

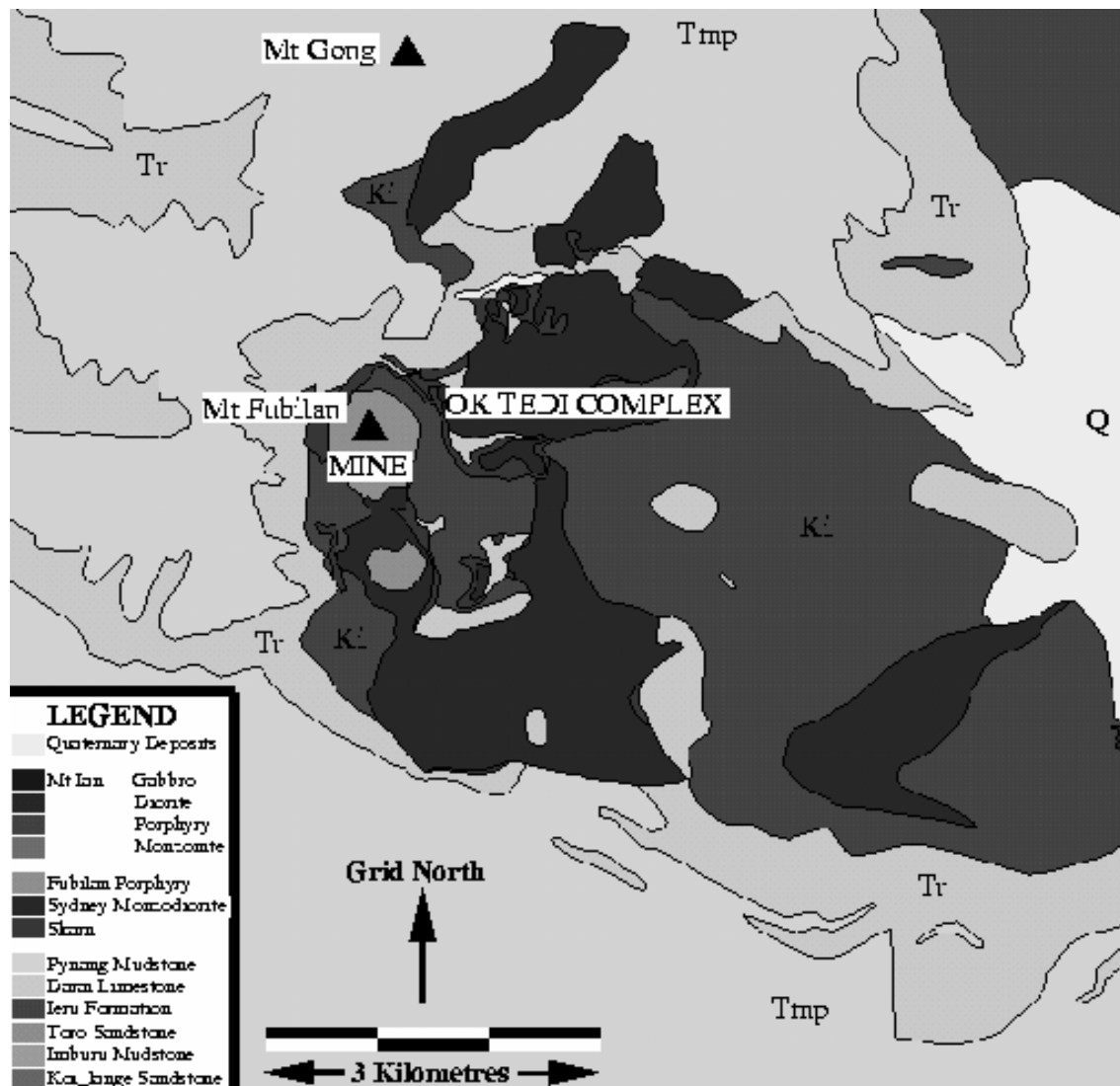
6.5.1 Γεωγραφική θέση και γεωλογία ευρύτερης περιοχής

Το κοίτασμα πορφυριτικού τύπου Cu – Au Ok Tedi βρίσκεται στη δυτική πλευρά της Παπούα – Νέα Γουινέα στο όρος Fubilan. Το κοίτασμα βρίσκεται στο υψόμετρο των 1700μ., 18km ανατολικά των συνόρων με την Ινδονησία και 20 km BA της Tabubil. Γεωτεκτονικά συνδέεται με την υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την ηπειρωτική της Αυστραλίας. Αυτό το καθεστώς προκάλεσε πτύχωση και θραύση στα πετρώματα. Σε πετρώματα Μεσοζωικής και τεταρτογενούς ηλικίας βρίσκονται μαγματικές διεισδύσεις που φιλοξενούν το κοίτασμα (Μειόκαινο-Πλειόκαινο). Τα πετρώματα που συμπεριλαμβάνουν το κοίτασμα είναι θαλάσσια ιζήματα ηπειρωτικού περιθωρίου όπως νηριτικοί ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και ιλύολιθοι. Τα ιζήματα αυτά χαρακτηρίζονται από εφελκυστικά γεγονότα. Σχετιζόμενος με τις μαγματικές διεισδύσεις είναι ο μονζονίτης (Πλειόκαινο), χαρακτηρίζεται ως σημαντικά εξαλλοιωμένος και περιλαμβάνει μικρή περιεκτικότητα χαλκού-χρυσού.

6.5.2 Εξαλλοιώσεις και μεταλλοφόρα

Το κοίτασμα αποτελείται από δύο φάσεις καλιούχου εξαλλοίωσης. Η πρώτη αποτελείται από μαρμαρυγίες δύο χρωμάτων (σκούρου καφέ και πράσινου), τα οποία υποδηλώνουν και την προέλευσή τους. Μερικώς έχουν υποστεί εξαλλοίωση σε αργιλικά ορυκτά. Χαρακτηριστικά ορυκτά της φάσης είναι ο μαγνητίτης, ο χαλκοπυρίτης και το ρουτίλιο. Η δεύτερη φάση και νεότερη, είναι πιο έντονα εξαλλοιωμένη με παρουσία χαλκοπυρίτη, μολυβδαινίτη, χρυσό, βορνίτη και φλογοπίτη.

Η μεταλλοφορία είναι διάσπαρτη. Εκτός από τα αναφερόμενα ορυκτά περιφερειακά τοποθετείται μεταλλοφορία στον σφαλερίτη και γαληνίτη. Αν και έχουν βρεθεί ίχνη Pd στον χαλκοπυρίτη, απουσιάζουν τα ορυκτά της Pt. Εξ' αιτίας της χημικής αποσάρθρωσης η οξείδωση θειούχων ορυκτών είναι εκτεταμένη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ζώνης οξείδωσης πλούσια σε χρυσό και ανεπαρκής σε χαλκό. Σε κατώτερο ορίζοντα υπάρχει και η ζώνη εμπλουτισμού πλούσια σε χαλκοσίνη και διγενίτη.



Σχ.6.5 Απεικόνιση του κοιτάσματος Ok Tedi Q=Τεταρτογενείς αποθέσεις, Trg=Γάββροι, K=σχιστόλιθοι, Tr= ασβεστόλιθοι, Tmp=ιλυόλιθοι, SM= Μονζοδιορίτης Σύδνεϋ, FP=Πορφύρης Fubilan (Hendry et al. 2005).

7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο χαλκός είναι ένα στοιχείο ευρέως εξαπλωμένο τόσο στον φλοιό της γης όσο στις λίμνες, στα ποτάμια και στους ωκεανούς. Τόσο ο αυτοφυής, όσο και τα ορυκτά του χαλκού παρουσιάζουν έντονο οικονομικό ενδιαφέρον. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι υψίστης σημασίας για την ζωή του έμβιου κόσμου. Πολλά είναι τα υπό εκμετάλλευση κοιτάσματα χαλκού σ' όλο τον κόσμο, με σημαντική παραγωγή.

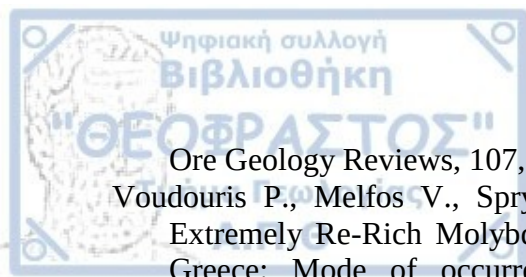
Σύμφωνα με έρευνες έχει βρεθεί πως οι πόροι χαλκού ξεπερνούν τους 3000 εκατ. τόνους (USGS 2013), στα οποία δεν προσθέτονται τα αποθέματα σε βαθειά θάλασσα και σε υποθαλάσσιες ζώνες με θειούχες ενώσεις. Δεν πρέπει βέβαια να ξεχνάμε πως ποσοστό των αποθεμάτων είναι ήδη σε χρήση.

Σημαντικό ρόλο παίζει η ανάκτηση προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Το 41% της ζήτησης του χαλκού προέρχεται τα από την ανακύκλωση. Εν κατακλείδι οι μελλοντικές τεχνολογικές ιδέες και πολιτικές πρέπει να συμπεριλαμβάνουν τόσο την εξόρυξη πρωτογενούς χαλκού όσο και του δευτερογενούς μέσω της ανακύκλωσής του.

8.Βιβλιογραφία

- BAS, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.
- Carten, R. B. (1986). Sodium-calcium metasomatism; chemical, temporal, and spatial relationships at the Yerington, Nevada, porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 81(6), 1495-1519.
- Clark, A.H., 1993, Are outsize porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive?: Society of Economic Geologists Special Publication 2, p. 213–283. Muntean and Einaudi (2000, 2001)
- Eliopoulos, D. G., & Economou-Eliopoulos, M. (1991). Platinum-group element and gold contents in the Skouries porphyry copper deposit, Chalkidiki Peninsula, northern Greece. *Economic Geology*, 86(4), 740-749.
- Fornadel A.P., Voudouris P., Paul G.S., Melfos V. (2012). Mineralogical, stable isotope, and fluid inclusion studies of spatially related porphyry Cu and epithermal Au-Te mineralization, Fakos Peninsula, Limnos Island, Greece. *Mineralogy and Petrology*, 105, 85-111.
- Frei, R., 1992, Isotope (Pb, Rb-Sr,S,O,C,U-Pb) geochemical investigations on Tertiary intrusives and related mineralizations in the Serbomacedonian Pb-Zn, Sb+Cu-Mo metallogenic province in Northern Greece, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Switzerland, Ph.D. Thesis, 231 p.
- GEOLOGY, v. 90, p. 2–16.
- Gustafson, L.B., and Hunt, J.P., 1975, The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 70, p. 857–912.
- Gustafson, L.B., and Quiroga, J., 1995, Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile: *ECONOMIC*
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., Jr., and Gonzalez-Urien, E., 2000, Exploration for epithermal gold deposits: Reviews in *Economic Geology*, v. 13, p. 245–277. Phillips et al. 1974,
- Heinrich, C. A., & Neubauer, F. (2002). Cu–Au–Pb–Zn–Ag metallogeny of the Alpine–Balkan–Carpathian–Dinaride geodynamic province. *Mineralium Deposita*, 37.
- Kockel, F., Mollat, H., and Gundlach, H., 1975, Hydrothermally altered and (copper) mineralized porphyritic intrusions in the Serbo-Macedonian Massif (Greece), *Mineralium Deposita*, v. 10, p. 195-204.
- 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, 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., Melfos 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, 182, 26 p.
- Moritz, R., Márton, I., Orтели, M., Marchev, P., Voudouris, P., Bonev, N., Spikings, R., Cosca, M., 2010. A review of age constraints of epithermal precious and base metal deposits of the Tertiary Eastern Rhodopes: coincidence with Late Eocene-Early Oligocene tectonic plate reorganization along the Tethys. In: Christofides, G. (Ed.), *Proceedings of the XIX Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association*, Thessaloniki. *Scientific Annals of the School of Geology A.U.Th.* 100, pp. 351–358.

- Muntean, J., Einaudi, M.T., 2000. Porphyry gold deposits of the Refugio district, Maricunga belt, Northern Chile. *Econ. Geol.* 95, 1445–1472.
- Muntean, J.L., Einaudi, M.T., 2001. Porphyry-epithermal transition: Maricunga belt, northern Chile. *Econ. Geol.* 96, 743–772.
- Ortelli, M., Moritz, R., Voudouris, P., Cosca, M., Spangenberg, J., 2010. Tertiary porphyry and epithermal association of the Sapes-Kassiteres district, Eastern Rhodopes, Greece. In: *Proceedings of the 8th Swiss Geoscience Meeting, Fribourg, 19th-20th November 2010*, pp. 83–84.
- Ortelli, M., Moritz, R., Voudouris, P., Spangenberg, J., 2009. Tertiary porphyry and epithermal association of the Sapes-Kassiteres district, Eastern Rhodopes, Greece. In: Williams, P., et al., (Eds.), *Smart science for exploration and mining. Proceedings 10th SGA meeting, Townsville, Australia*, pp. 536–538.
- Papoulis, D., & Tsolis-Katagas, P. (2008). Formation of alteration zones and kaolin genesis, Limnos Island, northeast Aegean Sea, Greece. *Clay Minerals*, 43(4), 631-646.
- Proffett, J. M. (2003). Geology of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper-gold deposit, Argentina. *Economic Geology*, 98(8), 1535-1574.
- Sillitoe, R. H. (2008). Special paper: major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera: distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations. *Economic Geology*, 103(4), 663-687.
- Sillitoe, R.H., 1998, Major regional factors favouring large size, high hypogene grade, elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposits, in Porter, T.M., ed., *Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits: A global perspective*: Adelaide, Australian Mineral Foundation, p. 21–34.
- Sillitoe, R. H. (1997). Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3), 373-388.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Econ. Geol.* 105, 3–41.
- Sillitoe, R.H., and Perelló, J., 2005, Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery: *ECONOMIC GEOLOGY 100TH ANNIVERSARY VOLUME*, p. 845–890.
- Titley, S. R., Thompson, R. C., Haynes, F. M., Manske, S. L., Robison, L. C., & White, J. L. (1986). Evolution of fractures and alteration in the Sierrita-Esperanza hydrothermal system, Pima County, Arizona. *Economic Geology*, 81(2), 343-370.
- Geraghty et al. 1988,
- Voudouris P (2006) A comparative mineralogical study of Te-rich magmatic-hydrothermal systems in northeastern Greece. *Mineral Petrol* 87:241–275
- Voudouris P, Alfieris (2005) New porphyry – Cu±Mo occurrences in the north eastern Aegean, Greece: Ore mineralogy and epithermal relationships. In: Mao J, Bierlein FP (eds) *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Springer Verlag, p 473–476.
- Voudouris P, Skarpelis N (1998) Epithermal gold-silver mineralization at Perama (Thrace) and Lemnos Island. *Geol Soc Greece Bull* 32:125–135 \
- Voudouris P., Mavrogonatos C., Melfos V., Spry P.G., Magganas A., Alfieris D., Soukis K., Tarantola A., Periferakis A., Kołodziejczyk J., Scheffer C., Repstock A., Zeug M. (2019). The geology and mineralogy of the Stypsi porphyry Cu-Mo-Au-Re prospect, Lesvos Island, Aegean Sea, Greece. *Ore Geology Reviews*, 112.
- Voudouris P., Mavrogonatos C., Spry P.G., Baker T., Melfos V., Klemm R., Haase K., Repstock A., Djiba A., Bismayer U., Tarantola A., Scheffer C., Moritz R., Kouzmanov K., Alfieris D., Papavassiliou K., Schaarschmidt A., Galanopoulos E., Galanos E., Kołodziejczyk J., Stergiou C., Melfos M. (2019). Porphyry and epithermal deposits in Greece: an overview, new discoveries, and mineralogical constraints on their genesis.



- Ore Geology Reviews, 107, 654–691.
- 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, 165-191.
- Voudouris P., Melfos V., Spry P.G., Kartal T., Schleicher H., Moritz R., Ortelli M. (2013). The Pagoni Rachi/Kirki Cu-Mo±Re±Au deposit, Northern Greece: Mineralogical and fluid inclusion constraints on the evolution of a telescoped porphyry-epithermal system. *Canadian Mineralogist*, 51, 411-442.
- Voudouris P.C., Melfos V., Spry P.G., Bindi L., Kartal T., Arikas K., Moritz R., Ortelli M. (2009). Rhenium-rich molybdenite and rheniite (ReS₂) in the Pagoni Rachi-Kirki Mo-Cu-Te-Ag-Au deposit, Northern Greece: Implications for the rhenium geochemistry of porphyry style Cu-Mo and Mo mineralization. *Canadian Mineralogist*, 47, 1013-1036.
- Wilkinson, W.H., Jr., Vega, L.A., and Titley, S.R., 1982, Geology and ore deposits at Mineral Park, Mohave County, Arizona, in Titley, S.R., ed., *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*: Tucson, University of Arizona Press, p. 523–541.
- Μουντράκης Δ. (2010). Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. University Studio Press. 374 σ.
- Σακελλαρίου, Δ. Θ. (1993). Tectonometamorphic evolution of the geotectonic units of the Chalkidiki peninsula. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 28(1), 165-177.
- <http://www.indicoresources.com/s/CopperPorphyryDeposits.asp>
 - orykta.gr/oryktes-protes-yles-tis-ellados/metalleytika-orykta/130-halkopyrites
 - copperalliance.gr/about-copper-and-its-alloys-resources
 - orykta.gr/geologia-oryktologia/oryktoi-poroi-koitasmatologia

