



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



ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΣ ΖΑΜΠΟΥΝΗΣ
ΑΕΜ 5637

ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ Cu-Au ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024





ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΣ ΖΑΜΠΟΥΝΗΣ

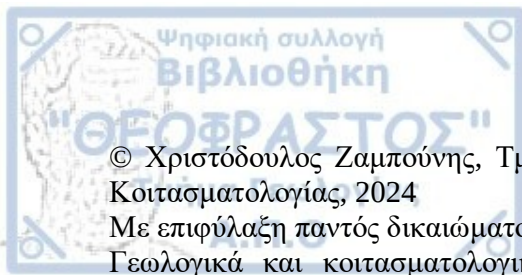
ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ
Cu-Au ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Χριστόδουλος Ζαμπούνης, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Χριστόδουλος Ζαμπούνης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Γεωλογικά και κοιτασματολογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος Cu-Au στις Σκουριές Χαλκιδικής – *Διπλωματική Εργασία*

© Christodoulos Zampounis, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2024

All rights reserved.

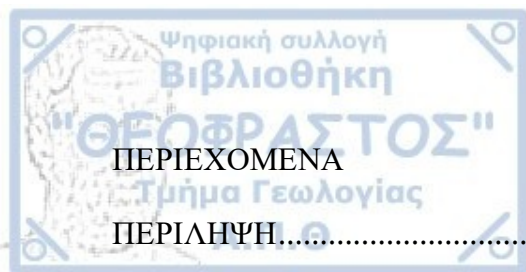
Geological features of Skouries Cu-Au deposit in Chalkidiki – *Bachelor Thesis*

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.

Εικόνα Εξωφύλλου: <https://rb.gy/u4vftm>





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ	7
2.1 Δημιουργία πορφυριτικών κοιτασμάτων.....	8
2.2 Ζώνες εξαλλοίωσης.....	11
2.3 Μορφές μεταλλοφορίας.....	14
2.4 Τύποι μεταλλοφορίας	15
3. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ.....	17
3.1 Γεωλογία της ΒΑ Χαλκιδικής.....	18
3.2 Κοιτασματολογικά στοιχεία ΒΑ χαλκιδικής	24
4. ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Au ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ	28
4.1 Γεωγραφική θέση-Γεωλογία περιοχής	29
4.2 Μορφή και φάσεις του κοιτάσματος των Σκουριών	29
4.3 Ομάδες φλεβών του κοιτάσματος των Σκουριών	32
4.4 Ορυκτολογική σύσταση και μεταλλοφορία του κοιτάσματος των Σκουριών.....	33
4.5 Παρουσία κρίσιμων μετάλλων (PGE) στο κοιτάσμα των Σκουριών.....	35
4.6 Ο χρυσός (Au) στις Σκουριές	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	40



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Γεωλογικά και κοιτασματολογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος Cu-Au στις Σκουριές Χαλκιδικής

Χριστόδουλος Ζαμπούνης

Η παρούσα διπλωματική πτυχιακή εργασία αφορά την μελέτη του κοιτάσματος Cu-Au στις Σκουριές της Χαλκιδικής. Πρόκειται για ένα παγκοσμίου κλάσης πορφυριτικό κοιτάσμα, με περιεκτικότητες χαλκού και χρυσού και σημαντική παρουσία των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας (PGE). Αποτελεί ένα από τα κοιτάσματα της ΒΑ Χαλκιδικής, όπου ανήκουν στην Σερβομακεδονική μάζα και τοποθετείται νότια του ρήγματος του Στρατωνίου. Το κοιτάσμα έχει μορφή κατακόρυφου μεταλλοφόρου σώματος (pipe-like body) και φιλοξενείται μέσα σε ένα σύμπλεγμα φλεβών, όπου είναι αποτέλεσμα διεισδύσεων μονζονιτικής και συηνιτικής σύστασης στα γειτονικά μεταμορφωμένα πετρώματα. Διακρίνονται 4 φάσεις των διεισδύσεων αυτών: α) χαλαζιακός μονζονίτης, β) πορφυριτικός συηνίτης, γ) πορφυριτικές συηνιτικές φλέβες, δ) στείρος συηνίτης. Η κύρια εξαλλοίωση του κοιτάσματος που παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό είναι η ποτασσική, ενώ οι μεγάλες ζώνες της προπυλιτικής και σερικιτικής εξαλλοίωσης δεν εμφανίζονται στο κοιτάσμα των Σκουριών. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται στις φλέβες και τα φλεβίδια του κοιτάσματος.



ABSTRACT

Geological features of Skouries Cu-Au deposit in Chalkidiki

Christodoulos Zampounis

The diploma thesis focuses on the study of Cu-Au deposit in Skouries, Chalkidiki. It is a world class porphyry deposit, which contains a significant amount of copper and gold and notable presence of platinum group elements (PGE). It is one of the deposits located in Northeastern Chalkidiki belonging to Serbomacedonian massif and it is located south of Stratoni fault. The deposit is characterized by a vertical ore body (pipelike body) and is hosted within veins, which resulted from monzonitic and syenitic intrusions into the adjacent metamorphic rocks. Four phases of these intrusions are distinguished: a) quartz monzonite, b) porphyritic syenite, c) porphyritic syenite dykes, d) barren syenite. The primary alteration is potassic and large zones of propylitic and sericitic alteration are not present in Skouries. The mineralization is found in the form of veins and veinlets in the deposit.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο τον Οκτώβριο του 2023.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των γεωλογικών και κοιτασματολογικών χαρακτηριστικών του κοιτάσματος Cu-Au στις Σκουριές Χαλκιδικής, ενός παγκοσμίου κλάσης πορφυριτικό κοιτάσμα πλούσιο με παρουσία μετάλλων της ομάδας της πλατίνας (PGE).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Β. Μέλφο, που ήταν ο επιβλέπων της πτυχιακής αυτής εργασίας, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, όπως και για την συνεχή στήριξη του με τις συμβουλές του κατά την συγγραφή αυτής της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τμήματος της Γεωλογίας του Α.Π.Θ. για την όρεξη και την προσπάθειά που κατέβαλαν για να μας μεταδώσουν τις γνώσεις και να μας κάνουν να αγαπήσουμε την Γεωλογία σαν επιστήμη. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

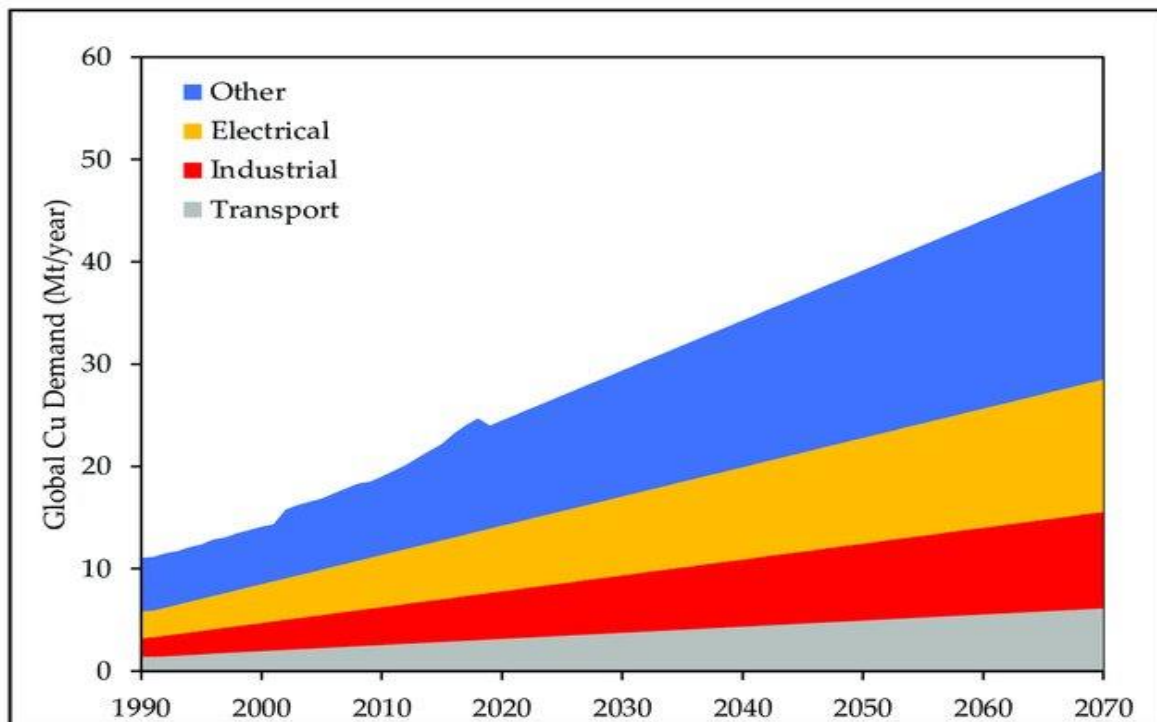
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος έχει ανάγκη τις ορυκτές πρώτες ύλες και τα πολύτιμα μέταλλα με αποτέλεσμα την εξόρυξη και την εκμετάλλευση κοιτασμάτων από την προϊστορική εποχή. Κατασκεύαζε εργαλεία για κυνήγι, για τις καλλιέργειες, όπλα ακόμη και κοσμήματα από χρυσό, ασήμι και χαλκό. Η περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής διαπιστώνεται πως αξιοποιείται από αρχαία χρόνια και συγκεκριμένα την περίοδο του Μεγάλου Αλεξάνδρου με 1 ΜΤ να έχει εξορυχθεί από τον Μαντέμ Λάκκο και την Ολυμπιάδα (Forward et al. 2011, McFall 2016). Περίοδος μεγάλης ακμής παρατηρείται προς το τέλος των βυζαντινών χρόνων με την αρχή της οθωμανικής αυτοκρατορίας, όπου τα μεταλλεία της ΒΑ Χαλκιδικής περνάνε από εναλλασσόμενες περιόδους ακμής και παρακμής, με την ίδρυση του Κοινού των Μαντεμοχωριών. Τον 20^ο αιώνα, η μεταλλευτική δραστηριότητα στην περιοχή σημειώνει μεγάλη πρόοδο και στις αρχές του 21^{ου} αιώνα ήδη τα περισσότερα κοιτάσματα αξιοποιούνται και τα υπόλοιπα βρίσκονται σε στάδιο έρευνας. Η περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής αποτελείται από πολυμεταλλικά κοιτάσματα αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων, τα οποία βρίσκονται στην Ολυμπιάδα, στις Μαύρες Πέτρες, στο Μαντέμ Λάκκο και στην Πιάβιτσα, και από το πορφυριτικό κοιτάσμα Cu-Au των Σκουριών (www.hellas-gold.com).

Η αξιοποίηση των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι σημαντική για την παγκόσμια οικονομία γιατί είναι πηγή σημαντικών ορυκτών πρώτων υλών και κρίσιμων μετάλλων. Τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι η πιο σημαντική πηγή χαλκού (Cu) και μολυβδαινίου (Mo) παγκοσμίως και είναι υπεύθυνη για το 60-70% της παραγωγής χαλκού και το 95% μολυβδαινίου σε όλο τον κόσμο. Στα πορφυριτικά κοιτάσματα περιέχονται και σημαντικές ποσότητες Au, Ag, Sn, Re, W, In, Pt, Pd και Se (Sinclair 2007). Ο χαλκός (Cu) είναι ένα από τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται περισσότερο στον κόσμο (Σχ. 1.1) και τα τελευταία χρόνια η ζήτηση του έχει εκτοξευθεί (USGS, 2009) λόγω της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της μετάβασης σε μία πιο βιώσιμη και αποδοτικότερη κοινωνία (Elshkaki et al. 2016). Το μολυβδαίνιο (Mo) είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό μέταλλο και αναγκαίο για μια κοινωνία που δεν θα χρησιμοποιεί πια ορυκτά καύσιμα. Κατά τον Kleijn (2011) κάτι τέτοιο για να επιτευχθεί θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν όλα τα αποθέματα που εξορύσσονται ετησίως. Η χρήση του μολυβδαινίου έχει αυξηθεί κατά 210.000 Mt τα τελευταία 70 χρόνια (Σχ.1.2) (USGS 2017). Τέλος, τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι και αξιοσημείωτη πηγή χρυσού (Au), ενός μετάλλου, όπου και αυτό τα τελευταία χρόνια έχει σημειώσει τεράστια ζήτηση από την παγκόσμια οικονομία (Σχ. 1.3).

Το πορφυριτικό κοιτάσμα Cu-Au των Σκουριών είναι ένα κοιτάσμα παγκόσμιας κλάσης με μεγάλα αποθέματα σε χαλκό και χρυσό και η αξιοποίησή του θα φέρει την Ελλάδα στην 3^η

θέση στην Ευρώπη σε παραγωγή χρυσού και θα αποτελέσει νέα πηγή εφοδιασμού της ευρωπαϊκής βιομηχανίας σε χαλκό και θα βοηθήσει στην μετάβαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην κυκλική οικονομία (www.hellas-gold.com).



Σχ. 1.1. Ζήτηση Cu (Teseletso and Adachi 2022).



Σχ. 1.2. Παγκόσμια παραγωγή μολυβδαινίου (Mo) μεταξύ 1900 μέχρι 2015 (USGS 2017).

Gold Demand and Price



Σχ. 1.3. Η τιμή και η ζήτηση του χρυσού ανά τον κόσμο (World Gold Council Data).

2. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

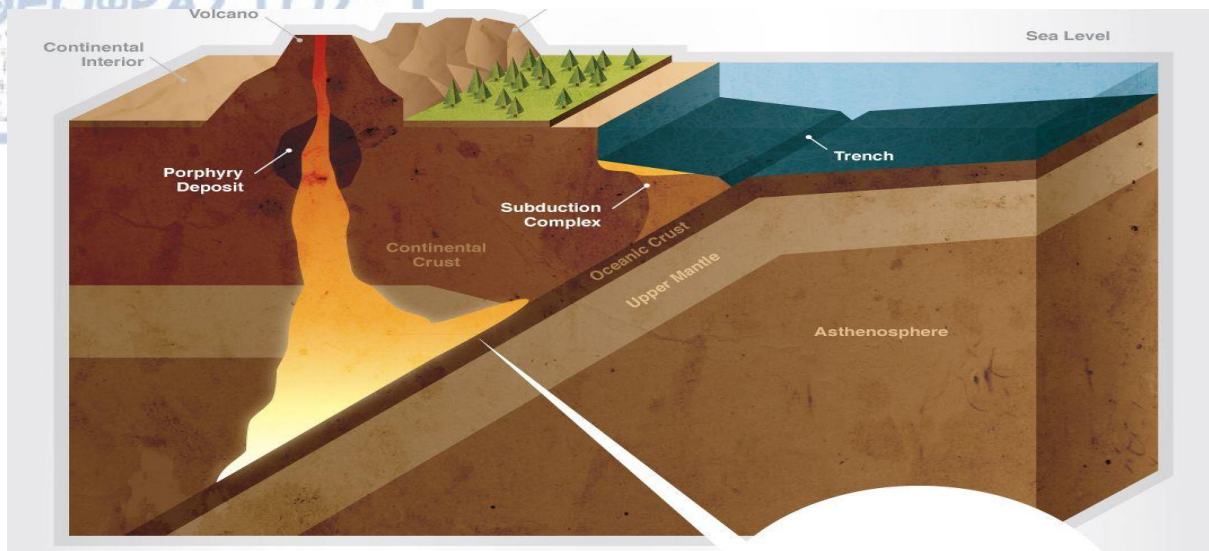
Τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι υποηφαιστειακά κοιτάσματα που περιέχουν σχετικά μικρές ποσότητες Cu, Au, Mo αλλά με πολύ μεγάλα αποθέματα. Τα κοιτάσματα αυτά δημιουργούνται από πολύ κοντά στην επιφάνεια έως 2 km βάθος και έχουν πολύ μεγάλες διαστάσεις. Η μεταλλοφορία συνήθως φιλοξενείται σε μαγματικά πετρώματα κυρίως όξινης και ενδιάμεσης σύστασης (γρανίτης, σηνίτης, γρανοδιορίτης, διορίτης, χαλαζιακός διορίτης) και συνοδεύονται από υδροθερμικά διαλύματα που προκαλούν εκτεταμένες εξαλλοιώσεις στα πετρώματα αυτά αλλά και στα γειτονικά τους και συμβάλουν στο σχηματισμό της μεταλλοφορίας. Η κυκλοφορία των υδροθερμικών διαλυμάτων σχετίζεται επίσης με την δημιουργία και γένεση ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης.

Το γεωτεκτονικό περιβάλλον όπου κάνουν συνήθως την εμφάνιση τους τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι σε ζώνες ορογένεσης εντός των ηπειρωτικών περιθωρίων ή νησιωτικών τόξων (Σχ. 2.1) και συνήθως σχετίζονται με ασβεσταλκαλικό μαγματισμό που δημιουργείται κατά τη βύθιση μιας λιθοσφαιρικής πλάκας (Σχ. 2.2) και σπανιότερα με αλκαλικό μαγματισμό.

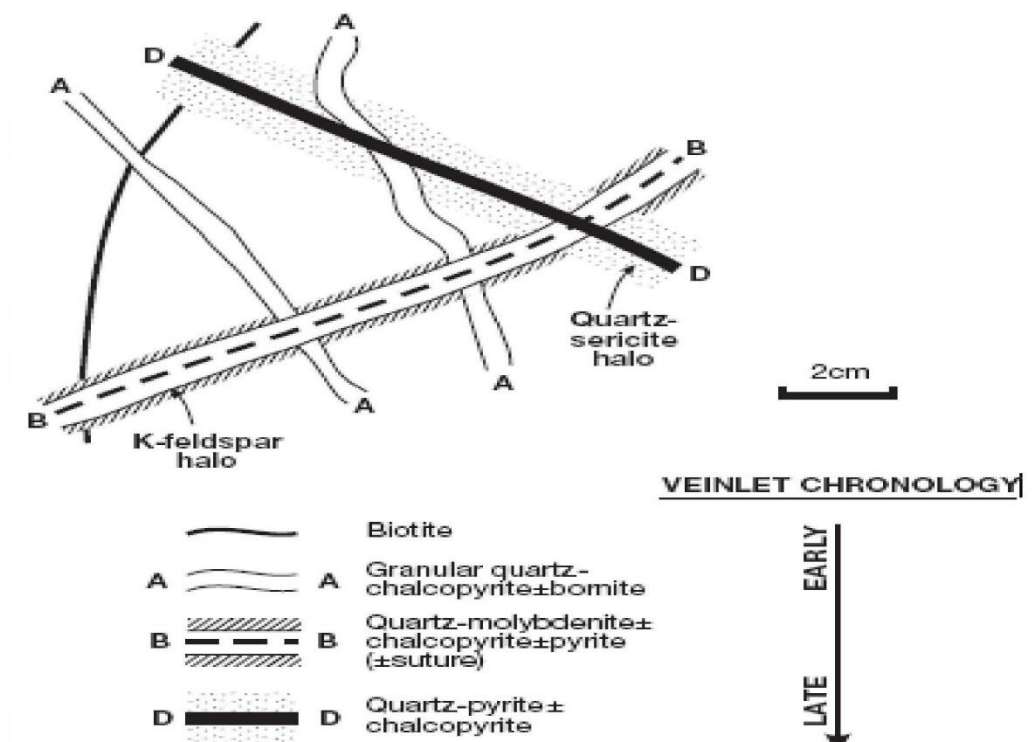
Η μεταλλοφορία των πορφυριτικών κοιτασμάτων παρατηρείται με μορφές φλεβών, πλέγμα φλεβών (stockworks), φρεατομαγματικών λατυποπαγών (breccia) και παράλληλων φλεβών (Σχ. 2.3). Τα κυριότερα ορυκτά της μεταλλοφορίας ενός πορφυριτικού κοιτάσματος είναι σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης, βορνίτης, μολυβδαινίτης, χρυσός και περιέχονται επίσης σε μικρότερες ποσότητες στοιχεία όπως Au, Ag, Pd, Pt, W, Te, Re.



Σχ. 2.1. Ορογενετική ζώνη εμφάνισης πορφυριτικών κοιτασμάτων σε παγκόσμια κλίμακα (Richards 2013).



Σχ. 2.2 Γένεση πορφυριτικού κοιτάσματος από σύγκλιση ωκεάνιας πλάκας σε ηπειρωτική πλάκα (Desjardins 2015).

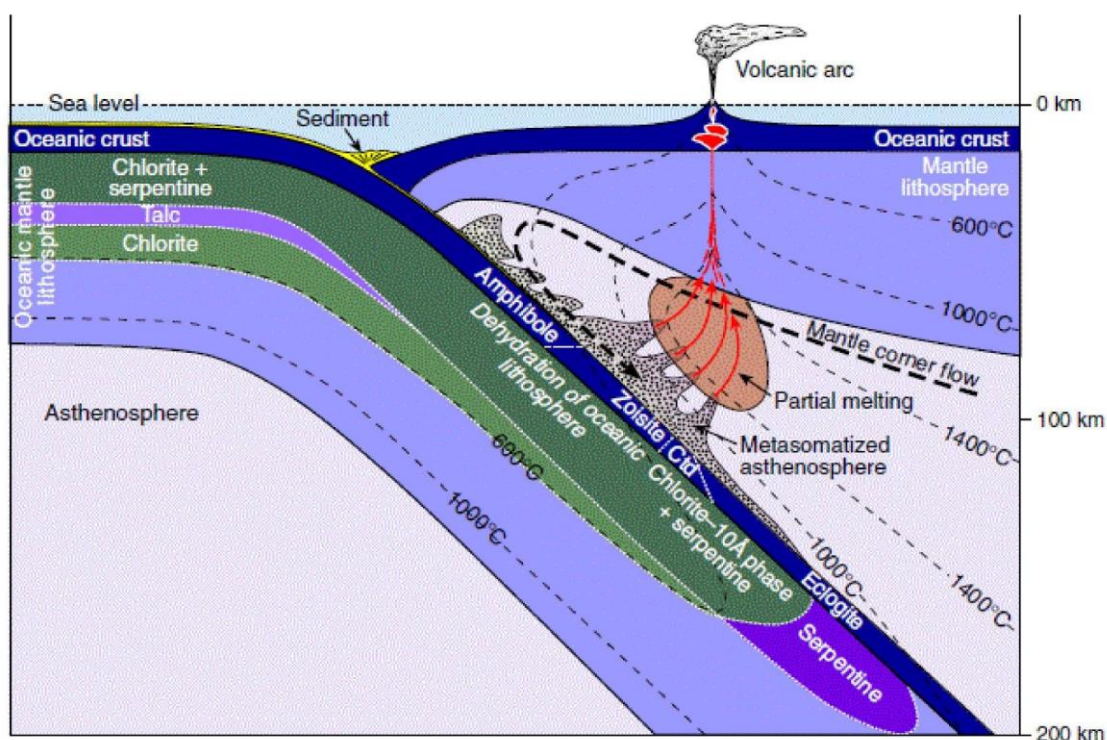


Σχ. 2.3. Σχέση των φλεβών στα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu-Mo (Sillitoe 2010).

2.1 Δημιουργία πορφυριτικών κοιτασμάτων

Η δημιουργία πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι μια πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Συμβαίνει κυρίως σε συμπίεστικά και εκτατικά περιβάλλοντα, όπου έχουμε σύγκλιση δύο λιθοσφαιρικών πλακών. Τέτοια περιβάλλοντα είναι ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια και νησιωτικά τόξα, όπου έχουμε την σύγκλιση μιας ωκεάνιας λιθοσφαιρικής πλάκας με μια

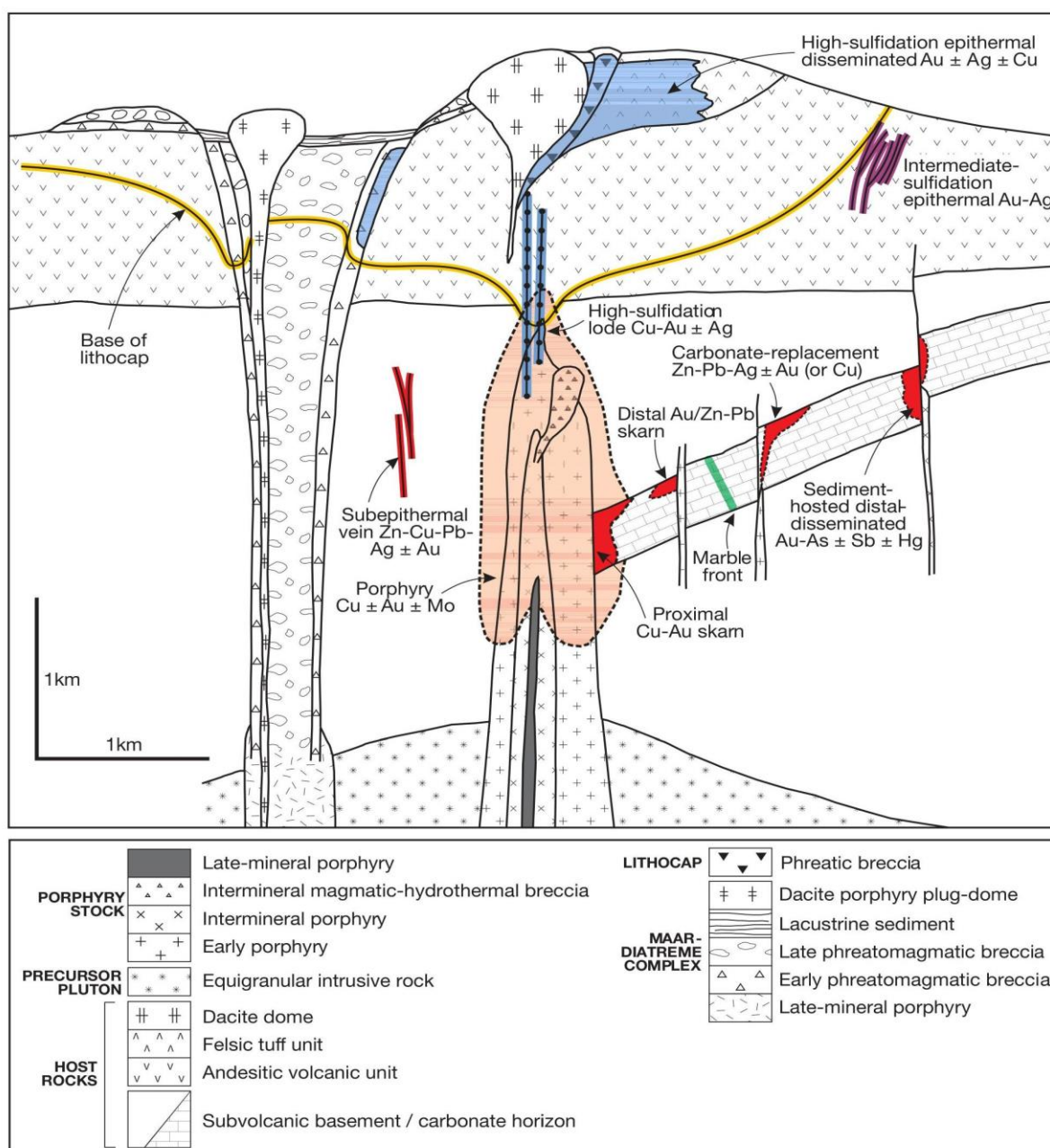
ηπειρωτική ή με μία ωκεάνια. Η ωκεάνια λιθοσφαιρική πλάκα (Σχ. 2.1.1) κορεσμένη σε νερό καταδύεται και θερμαίνεται μέσα στον μανδύα. Λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της βύθισης της ωκεάνιας πλάκας απελευθερώνονται ένυδρα συστατικά τα οποία με την σειρά τους ανέρχονται στην υπερκείμενη σφήνα του μανδύα και αλλάζουν την χημική σύστασή του. Η άνοδος του μάγματος προς την επιφάνεια ευνοείται από την εκτατική τεκτονική που επικρατεί μετά την σύγκρουση των δύο πλακών. Τα μάγματα αυτά είναι κυρίως ενδιάμεσης έως όξινης ασβεσταλκαλικής ή αλκαλικής σύστασης. Στην κύρια κρυστάλλωση του μάγματος δεν υπάρχει σχηματισμός κοιτασμάτων. Τα πορφυριτικά κοιτάσματα δημιουργούνται με τα τελευταία στάδια του μαγματισμού, τα οποία σχετίζονται με την υδροθερμική δραστηριότητα. Στο συγκεκριμένο στάδιο υπάρχει περαιτέρω ελάττωση της πίεσης και της θερμοκρασίας, το μάγμα ενισχύεται με πτητικά συστατικά και παρατηρείται η δημιουργία υδροθερμικών διαλυμάτων (Μέλλφος και Βουδούρης 2022).



Σχ. 2.1.1. Κατάδυση ωκεάνιας πλάκας κάτω από μια ηπειρωτική (Richards 2011).

Η δημιουργία των πορφυριτικών κοιτασμάτων αναλύεται από ένα μαγματικό-υδροθερμικό μοντέλο. Μεγάλες εκτάσεις υδροθερμικών συστημάτων αναπτύσσονται μέσα και πάνω από αυτές τις μαγματικές διεισδύσεις. Τα υδροθερμικά αυτά διαλύματα, εκτός από την μαγματική τους προέλευση, μπορεί να έχουν μετεωρική και ακόμη και μεταμορφική, διότι αλληλοεπιδρούν με γλυκό, μαγματικό αλλά και θαλασσινό νερό (Sinclair 2007). Στη συνέχεια, διεισδύουν μέσα στα μαγματικά πετρώματα, όπου προήλθαν από όξινα έως ενδιάμεσα

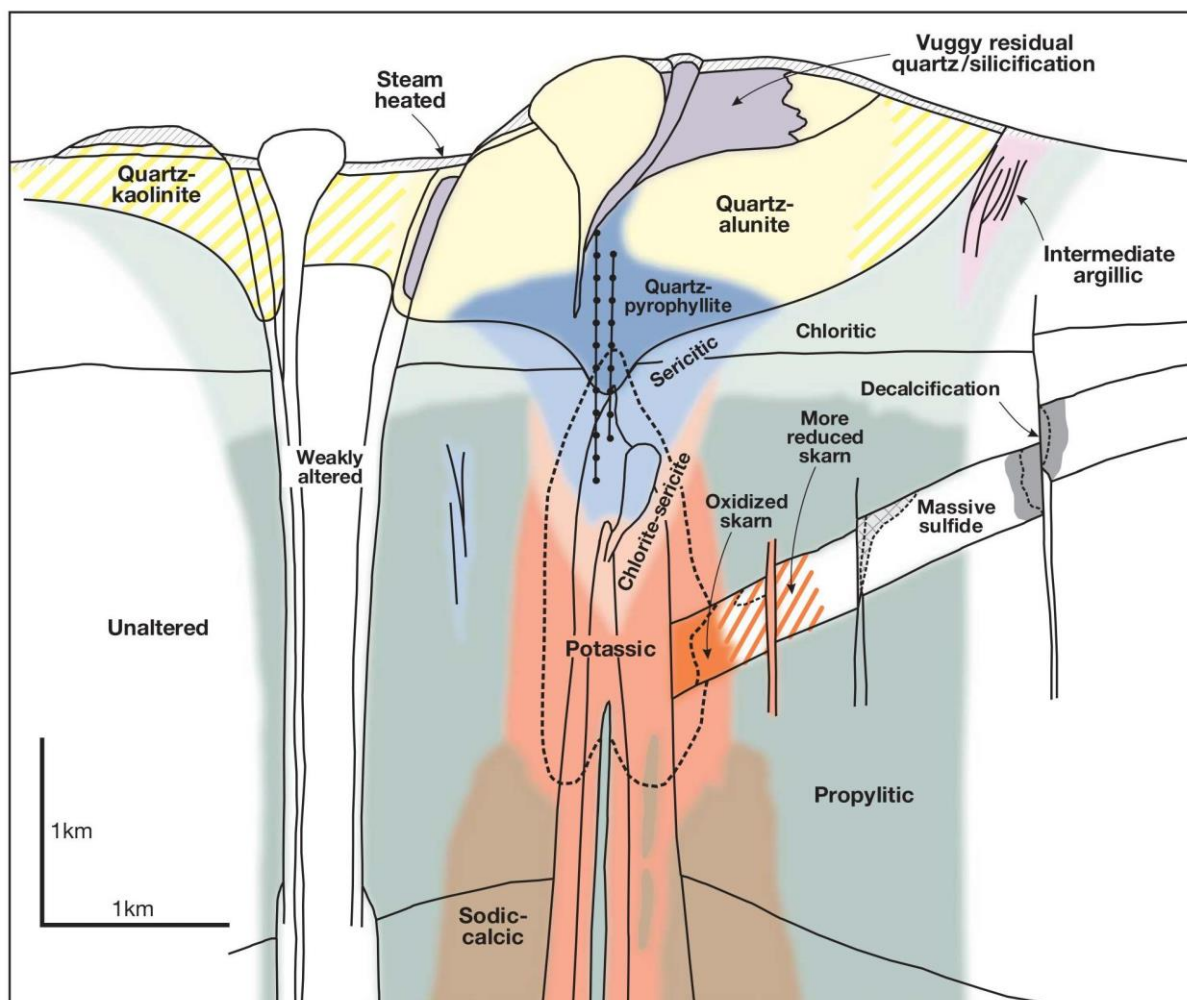
μάγματα, με την βοήθεια διακλάσεων, ρηγμάτων και της διαπερατότητας των πετρωμάτων και αντιδρούν με τα αυτά, όπου εκεί εμπλουτίζονται με μεταλλικά στοιχεία και με τις κατάλληλες συνθήκες σχηματίζονται μεταλλικά ορυκτά. Ο χώρος απόθεσης της μεταλλοφορίας βρίσκεται συνήθως μέσα στα πετρώματα που δημιουργήθηκαν από όξινα και ενδιάμεσα μάγματα (Sillitoe 2010). Το τελικό αποτέλεσμα (Σχ. 2.1.2) είναι μια μεγάλη έκταση υδροθερμικών εξαλλοιωμένων πετρωμάτων με τοποθετημένη στο κέντρο την μεταλλοφορία υπό μορφή φλεβών και breccias συνοδευόμενη και από άλλους τύπους μεταλλοφορίας όπως τύπου skarn, αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων και διάσπαρτης ιζηματογενούς μεταλλοφορίας (Sillitoe 2010).



Σχ. 2.1.2. Σχηματική αναπαράσταση πορφυριτικού κοιτάσματος (Sillitoe 2010).

2.2 Ζώνες εξαλλοίωσης

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι οι ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης που παρουσιάζονται στην έκταση του κοιτάσματος και η ζώνωση που παρατηρείται από το εσωτερικό προς το εξωτερικό (Σχ. 2.2.1).



Σχ. 2.2.1. Μοντέλο ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης σε πορφυριτικό κοιτάσμα (Sillitoe 2010).

Η γένεση των υδροθερμικών διαλυμάτων γίνεται στο τελικό στάδιο κρυστάλλωσης μάγματος όξινης ή ενδιάμεσης σύστασης. Από την στιγμή που παρατηρηθεί υγροποίηση του νερού και συμπύκνωση των μεταλλικών στοιχείων αρχίζει το υδροθερμικό στάδιο, όπου γίνεται και ο σχηματισμός των υδροθερμικών διαλυμάτων. Τα υδροθερμικά διαλύματα είναι θερμά ρευστά ή αέρια διαλύματα με το νερό να υπάρχει σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα από τα υπόλοιπα στοιχεία (K, Si, Al, Na, Cl, S). Παρουσιάζουν θερμοκρασίες από 100 έως 400 °C και πιέσεις πολύ υψηλές έως χαμηλές ανάλογα με το βάθος. Όσο πλησιάζουν την επιφάνεια θα

παρατηρείται ελάττωση της θερμοκρασίας και πίεσης. Η άνοδος τους διευκολύνεται δια μέσου ρηγμάτων, διακλάσεων, των ορίων των κόκκων των ορυκτών και της διαπερατότητας των πετρωμάτων. Κατά την άνοδο τους αντιδρούν με τα μαγματικά πετρώματα, τόσο κατά την διάρκεια της κρυστάλλωσης τους όσο και μετά από αυτήν, αλλά και με τα γειτονικά τους.

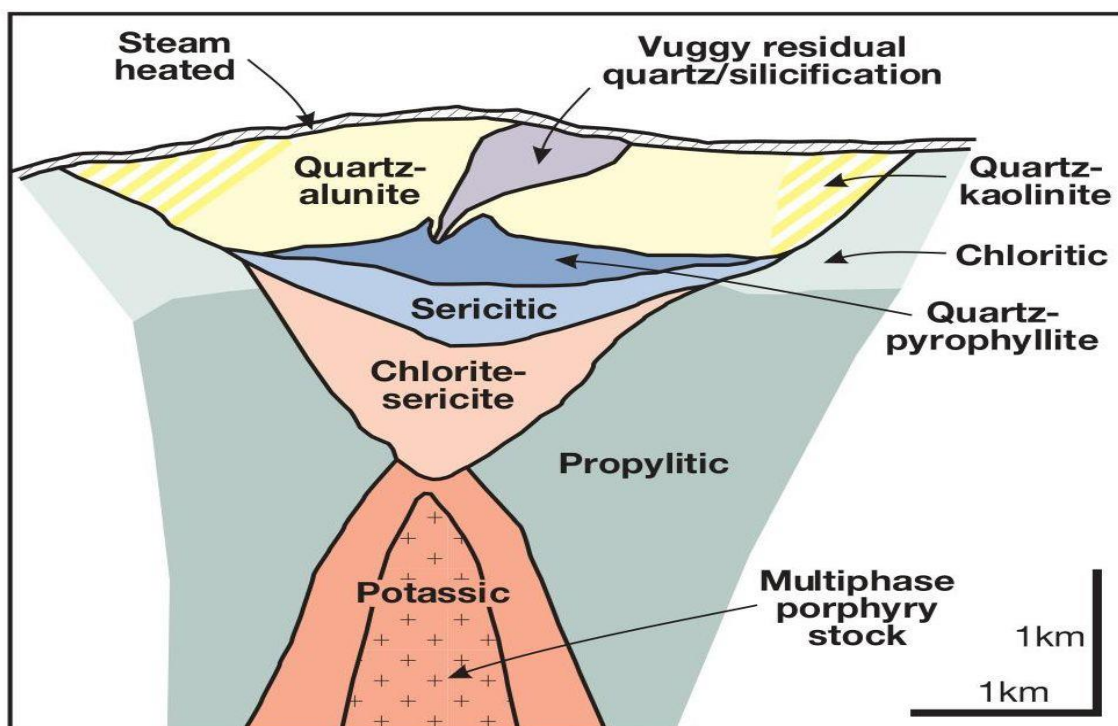
Η δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων στα πετρώματα προκαλεί την αλλαγή της αρχικής ορυκτολογικής και χημικής σύστασης των πετρωμάτων, όπου έχουμε την δημιουργία δευτερογενών ορυκτών, και την δημιουργία μεταλλοφορίας κατά ζώνες. Παρουσιάζεται μία κανονικότητα στις αλλαγές και τις μεταβολές αυτές και περιγράφεται με το μοντέλο των ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης (Lowell and Gilbert 1970, Sillitoe 2010). Ο τύπος των εξαλλοιώσεων ελέγχεται από την ορυκτολογική και χημική σύσταση των πετρωμάτων και τις συνθήκες που επικρατούν εκείνη την στιγμή στο συγκεκριμένο περιβάλλον όπως θερμοκρασία, πίεση και την σύσταση των ρευστών (Sinclair 2007).

Σύμφωνα με το ιδεατό μοντέλο των ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης (Σχ.2.2.2) και μεταλλοφορίας οι εξαλλοιώσεις είναι η ποτασσική, η νατριούχος-ασβεστούχος, σερικιτική, η αργιλική, η προχωρημένου σταδίου αργιλική και η προπυλιτική. Η ποτασσική εξαλλοίωση είναι εσωτερική, η προπυλιτική είναι η εξωτερική και ανάμεσά τους τοποθετούνται οι υπόλοιπες (Sinclair 2007).

- ✓ **Ποτασσική εξαλλοίωση (potassic alteration):** Σε αυτή την ζώνη παρατηρείται αντικατάσταση των πρωτογενών ορυκτών από δευτερογενή όπως δευτερογενή βιοτίτη, χαλαζία, δευτερογενή καλιούχο άστροιο, μικρές ποσότητες σερικήτη και ελάχιστο ανυδρίτη. Τα μεταλλικά ορυκτά που παρατηρούνται είναι βορνίτης, χαλκοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, μαγνητίτης, και πιο σπάνια μολυβδαινίτης.
- ✓ **Νατριούχος-ασβεστούχος εξαλλοίωση (sodic-calc alteration):** Η ζώνη αυτή τοποθετείται συνήθως πιο βαθιά από την ποτασσική. Παρατηρείται προσθήκη νατρίου (Na) και ασβεστίου (Ca) με αντικατάσταση μόνο των πλαγιοκλάστων από ολιγόκλαστο και ανδεδίνη, όπου είναι νατριούχα πλαγιόκλαστα και των φεμικών συστατικών από μαγνητίτη, τιτανίτη, ακτινόλιθο και πιο σπάνια από γρανάτη, διοψίδιο, επίδοτο, χλωρίτη. Στην συγκεκριμένη ζώνη δεν υπάρχουν μεταλλικά ορυκτά και θεωρείται στείρα.
- ✓ **Σερικιτική ή φυλλιτική εξαλλοίωση (sericitic or phyllic alteration):** Η ζώνη αυτή τοποθετείται ακριβώς πάνω από την ποτασσική. Τα ορυκτά από τα οποία αποτελείται αυτή η ζώνη είναι ο χλωρίτης, ο σερικήτης και ο χαλαζίας. Προέρχονται από εξαλλοιώσεις φεμικών ορυκτών και πλαγιοκλάστων όπως παραπάνω. Συνήθως μπορεί να αναλύονται σε δύο εξαλλοιώσεις όπου η μία είναι η φυλλιτική και η άλλη να είναι

η χλωριτική-σερικιτική. Στην τελευταία απλά παρατηρείται μεγάλη περιεκτικότητα σε χλωρίτη. Τα μεταλλικά ορυκτά της ζώνης αυτής είναι ο σιδηροπυρίτης, ο χαλκοπυρίτης και λιγότερο ο μολυβδαινίτης και ο μαγνητοπυρίτης.

- ✓ **Αργιλική εξαλλοίωση (argillic alteration):** Η ζώνη αργιλικής εξαλλοίωσης μπορεί να τοποθετείται πάνω από την σερικιτική αλλά κατά κύριο λόγο δεν έχει σαφή ανάπτυξη. Την χαρακτηρίζει η μετατροπή των καλιούχων αστρίων σε καολίνη, η οποία πραγματοποιείται υπό την επίδραση όξινων μαγμάτων. Περιέχει πολύ μικρές ποσότητες μεταλλοφορίας και συνήθως σιδηροπυρίτη.
- ✓ **Προχωρημένου σταδίου αργιλική εξαλλοίωση (advanced argillic alteration):** Η ζώνη αυτή δημιουργεί καλύμματα πάνω από την μεταλλοφορία του πορφυριτικού κοιτάσματος. Τα ορυκτά εξαλλοίωσης είναι χαλαζίας, καολίνης, πυροφυλλίτης και σερικίτης. Από μεταλλικά ορυκτά επικρατεί ο σιδηροπυρίτης.
- ✓ **Προπυλιτική εξαλλοίωση (propylitic alteration):** Τοποθετείται εξωτερικά με το σημαντικότερό της χαρακτηριστικό να είναι η επέκταση της μέχρι και 1.000μ σε γειτονικά πετρώματα. Προκαλεί τοπικό πρασίνισμα στα πετρώματα μέσα στην ζώνη. Τα κυριότερα ορυκτά εξαλλοίωσης είναι ο χλωρίτης, το επίδοτο και ο ασβεστίτης. Από μεταλλικά ορυκτά αποτελείται από σιδηροπυρίτη και μαγνητίτη.



Σχ. 2.2.2 Μοντέλο ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης σε πορφυριτικό κοιτάσμα (Sillitoe 2010).

2.3 Μορφές μεταλλοφορίας

Η μεταλλοφορία των πορφυριτικών κοιτασμάτων παρατηρείται σε διάφορες μορφές με τις κυριότερες να είναι η διάσπαρτη, με την μορφή φλεβών (παράλληλων, πλέγματος φλεβών) και με την μορφή breccias.

Η φλεβική μεταλλοφορία σχετίζεται με μαγματικές διεισδύσεις και σχηματίζεται με μορφές κατακόρυφων και παράλληλων φλεβών, φλεβιδίων (stockworks) και ακανόνιστων μικρών σωμάτων. Έχουν μήκος και πλάτος που δεν ξεπερνάει το 1 km, εκτός από δύο περιπτώσεις, όπου οι φλέβες σε πορφυριτικά κοιτάσματα εμφανίζονται με μήκος 4 km και 14 km. Παρατηρείται πως το μέγεθος των φλεβών δεν συνδέεται με το μέγεθος του πορφυριτικού κοιτάσματος. Οι διεισδύσεις, που σχετίζονται με την μεταλλοφορία και το κοιτάσμα διακρίνονται σε πολλές φάσεις. Στις πρώτες φάσεις ο βαθμός κρυστάλλωσης είναι πολύ μεγάλος, ενώ στις μεταγενέστερες είναι πολύ μικρός. Στις απομακρυσμένες περιοχές των πορφυριτικών κοιτασμάτων υπάρχουν λιγότερες έως και καθόλου διεισδύσεις (Sillitoe 2010).

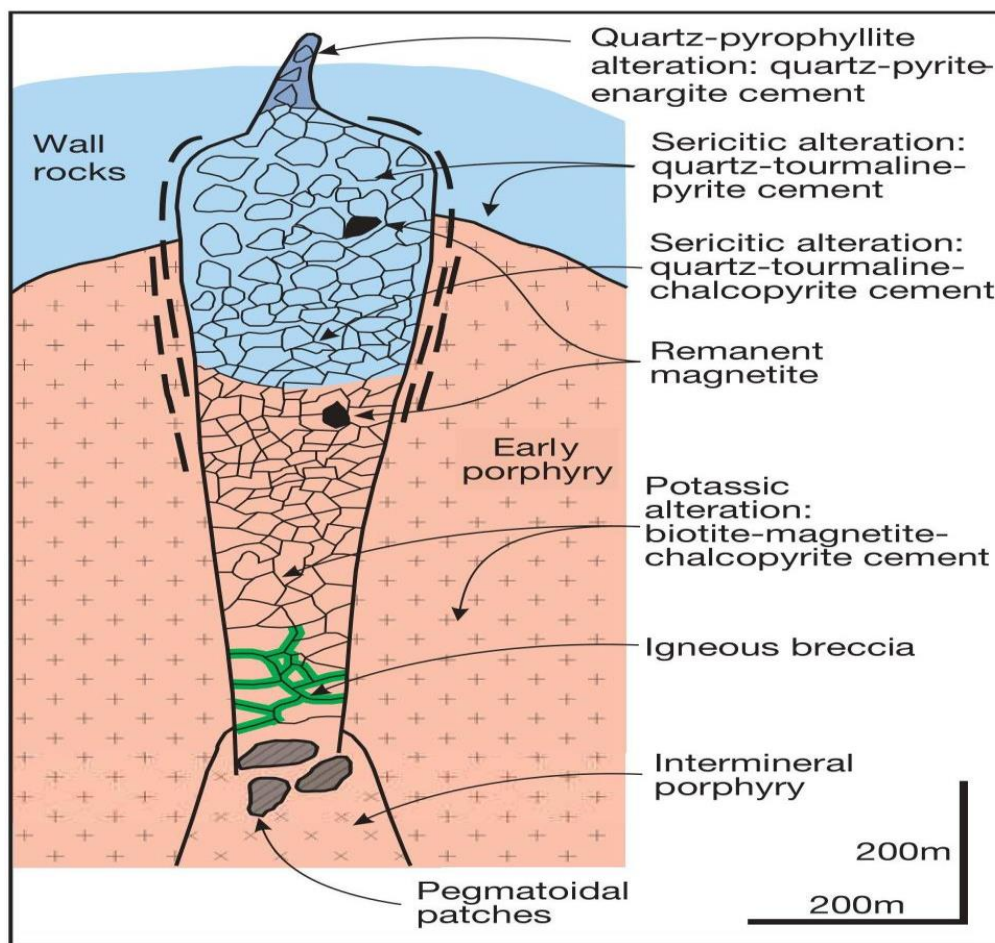
Στα πορφυριτικά κοιτάσματα υπάρχουν τρεις τύποι breccias, τα φρεατομαγματικά breccias (diatremes), τα μαγματικά-υδροθερμικά breccias και τα φρεατικά (μετεωρικά-υδροθερμικά) breccias.

Τα φρεατομαγματικά breccias (diatremes) εμφανίζονται κυρίως σε πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού (Cu) και σε επιθερμικά κοιτάσματα. Τα φρεατομαγματικά breccias είναι δίοδοι εκτόνωσης ηφαιστειακού υλικού που προέρχεται από φρεομαγματική εκρηκτική δραστηριότητα. Τα diatremes παρατηρούνται πολύ κοντά στο έδαφος περίπου έως 1 km με κάθετη ανάπτυξη 2 km σε παλαιοεπιφάνειες ηφαιστειών τύπου maar. Επίσης, αποτελούνται από πολύμεικτα υλικά με αποστρογγυλεμένα και γυαλιστερά τεμάχια. Ο τύπος υδροθερμικής εξαλλοίωσης που υπάρχει, εάν υπάρχει, είναι προχωρημένης αργλικής εξαλλοίωσης (Sillitoe 2010).

Τα μαγματικά-υδροθερμικά breccias (Σχ. 2.3.1) είναι ο κυριότερος και σημαντικότερος τύπος στα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu. Συνήθως περιέχεται σε μικρές ποσότητες στα πορφυριτικά κοιτάσματα (5-10%), όταν περιέχεται, εμφανίζονται από σωληνοειδείς έως διάσπαρτα σώματα και έχουν μεγάλη ποικιλία από υφές. Οι υφές εξαρτώνται από την σύσταση και την μορφή των τεμαχίων, από τον τύπο της υδροθερμικής εξαλλοίωσης και από την αναλογία matrix/cement. Τα τεμάχια τους είναι αποστρογγυλωμένα και γωνιώδη. Στις πρώτες φάσεις των μαγματικών-υδροθερμικών breccias παρατηρείται ποτασική εξαλλοίωση και στις μεταγενέστερες φάσεις σερικιτική. Τα ορυκτά που περιέχονται είναι ο βιοτίτης, ο μαγνητίτης, ο τουρμαλίνης, ο χαλαζίας, ο σιδηροπυρίτης και ο χαλκοπυρίτης. Η παρουσία και η περιεκτικότητα των ορυκτών εξαρτάται από την φάση και την υδροθερμική εξαλλοίωση. Η

διαφορά των μαγματικών-υδροθερμικών breccias με τα φρεατομαγματικά είναι η απουσία τοφικού υλικού στα πρώτα (Sillitoe 2010).

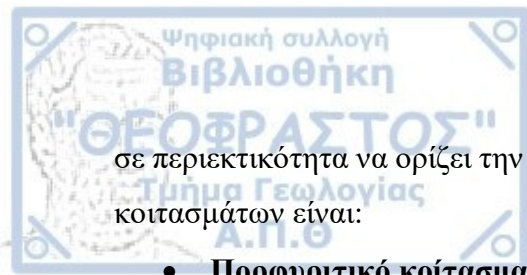
Τέλος τα φρεατικά (μετεωρικά-υδροθερμικά) breccias παρατηρούνται και αυτά κυρίως σε πορφυριτικά κοιτάσματα Cu. Εμφανίζονται με την μορφή φλεβών και πιο σπάνια ως μεγάλα σώματα και προέρχονται από το ψυχρό επιφανειακό νερό που διοχετεύεται στο μάγμα. Τα χαρακτηριστικά των τεμαχίων τους είναι γωνιώδη και αποστρογγυλωμένα. Οι τύποι των υδροθερμικών εξαλλοιώσεων είναι η σερικιτική έως την προχωρημένου σταδίου αργίλική, αλλά παρατηρείται και σε πολλές περιπτώσεις η απουσία εξαλλοιώσεων. Τα ορυκτά στα φρεατικά breccias είναι ο χαλαζίας, ο χαλκηδόνιος, ο αλουνίτης και ο βαρύτης (Sillitoe 2010).



Σχ. 2.3.1. Μοντέλο μαγματικών-υδροθερμικών breccias (Sillitoe 2010).

2.4 Τύποι μεταλλοφορίας

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα χαρακτηρίζονται από μια ποικιλομορφία τύπων μεταλλοφοριών όπου με βάση αυτές χωρίζονται σε κατηγορίες με το επικρατέστερο στοιχείο



σε περιεκτικότητα να ορίζει την ονομασία του κοιτάσματος. Οι κατηγορίες των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι:

- **Πορφυριτικό κοιτάσμα χαλκού (Cu)**
- **Πορφυριτικό κοιτάσμα μολυβδαινίτη (Mo)**
- **Πορφυριτικό κοιτάσμα βολφραμίου-μολυβδαινίτη (W-Mo)**
- **Πορφυριτικό κοιτάσμα κασσίτερου (Sn)**
- **Πορφυριτικό κοιτάσμα χαλκού-χρυσού (Cu-Au)**
- **Πορφυριτικό κοιτάσμα ασημιού (Ag)**

Εκτός από τα κύρια στοιχεία του κοιτάσματος που εξορύσσονται, συνυπάρχουν στο κοιτάσμα και παραπροϊόντα όπως Re, Bi, Zn, In Pb, PGE, τα οποία, όπως και τα κύρια στοιχεία, είναι σημαντικά για την παγκόσμια οικονομία (Sinclair 2007). Οι κυριότεροι τύποι πορφυριτικού κοιτάσματος είναι χαλκού, χρυσού και μολυβδαινίου μαζί με τα παραπροϊόντα τους.

3. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Στην ΒΑ Χαλκιδική παρατηρείται μία ποικιλία από κοιτάσματα και εμφανίσεις μεταλλικών ορυκτών (Σχ. 3.1). Στα 100 km από την Θεσσαλονίκη βρίσκονται τα μεταλλεία της Κασσάνδρας, εντός του δήμου Αριστοτέλη και περιέχουν το μεταλλείο της Ολυμπιάδας, τα μεταλλεία του Στρατωνίου και το έργο στις Σκουριές. Το μεταλλείο της Ολυμπιάδας βρίσκεται σε φάση παραγωγής, τα μεταλλεία του Στρατωνίου, τα οποία βρίσκονται στο Μαντέμ Λάκκο και τις Μαύρες Πέτρες, σε φάση συντήρησης και έρευνας και το έργο στις Σκουριές έτοιμο να οδηγηθεί σε φάση παραγωγής. Παρατηρούνται δύο διαφορετικοί τύποι κοιτασμάτων. Στην Ολυμπιάδα και στο Στρατώνι τα κοιτάσματα είναι πολυμεταλλικά κοιτάσματα (Pb-Zn-Au-Ag) αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων και στις Σκουριές είναι πορφυριτικό κοιτάσμα Cu-Au (Eldorado Gold Corp).



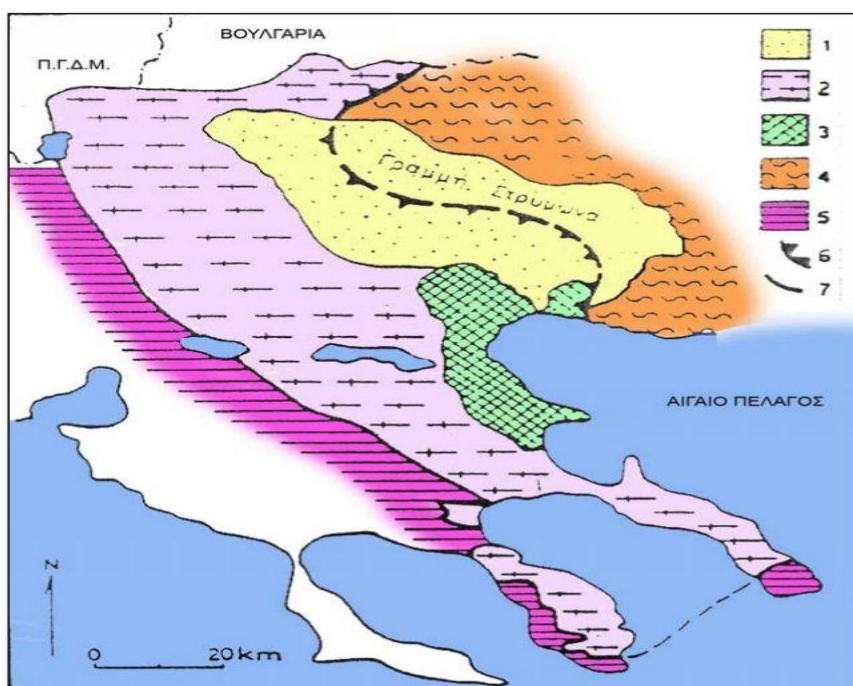
Σχ. 3.1. Εμφανίσεις και κοιτάσματα στην ΒΑ Χαλκιδική (Βασιλάτος 2013).

Τα κοιτάσματα αυτά αποτελούν μέρος της μεταλλογενετικής επαρχίας της Σερβομακεδονικής μάζας. Η μεταλλογενετική επαρχία της Σερβομακεδονικής μάζας

εκτείνεται από την Σερβία και το Κόσοβο μέχρι την βόρεια Ελλάδα και σχηματίζει μία ζώνη μεταλλοφορίας με διεύθυνση ΒΔ, η οποία ζώνη περιέχει πορφυριτικά κοιτάσματα Cu-Au, Cu skarn, πολυμεταλλικές φλέβες πλούσιες σε χρυσό και κοιτάσματα αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων. Τα αποθέματα των μεταλλείων σε χρυσό (Au) ανέρχονται περίπου στους 340 τόνους (Eldorado Gold Corp.). Τα μεταλλεία της Κασσάνδρας αποτελούν την πιο σημαντική μεταλλογενετική επαρχία της Σερβομακεδονικής μάζας στην Ελλάδα (Siron el at. 2018).

3.1 Γεωλογία της ΒΑ Χαλκιδικής

Τα κοιτάσματα της ΒΑ Χαλκιδικής ανήκουν στην Ελληνική ενδοχώρα και πιο συγκεκριμένα στην Σερβομακεδονική μάζα (Σχ. 3.1.1). Η Σερβομακεδονική μάζα βρίσκεται ανάμεσα της ζώνης του Αξιού και του ποταμού Στρυμόνα και αναλύεται σε δύο ενότητες, την ενότητα των Κερδυλλίων και την ενότητα του Βερτίσκου (Μουντράκης 2020).



Σχ. 3.1.1. Τεκτονικό σκαρίφημα της Σερβομακεδονικής μάζας, 1: μεταλλικά ιζήματα της κοιλάδας του Στρυμόνα, 2: ενότητα του Βερτίσκου, 3: ενότητα των Κερδυλλίων, 4: μάζα της Ροδόπης, 5: Περιοδοποική ζώνη, 6: ανατολικό όριο της Σερβομακεδονικής (Γραμμή Στρυμόνα), 7: δυτικό όριο της Σερβομακεδονικής (Μουντράκης 2020).

Η ενότητα των Κερδυλλίων περιλαμβάνει την ανατολική Χαλκιδική μεταξύ Στρυμόνα και Στρατωνίου. Τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται η ενότητα είναι κυρίως

μεταμορφωμένα όπως μιγματικοί βιοτιτικοί γνεύσιοι, γρανατούχοι διμαρμαρυγικοί γνεύσιοι, αμφιβολίτες, αμφιβολιτιωμένοι εκλογίτες και μάρμαρα. Η ενότητα των Κερδυλλίων θεωρείται ότι περιλαμβάνει τα πετρώματα με τους βαθύτερους ορίζοντες σ' όλη την Ελλάδα (Μουντράκης 2020).

Η ενότητα του Βερτίσκου περιλαμβάνει τον κορμό της Χαλκιδικής, τοποθετείται δυτικά της ενότητας των Κερδυλλίων και εξαπλώνεται προς Βορρά μέχρι τα σύνορα. Αποτελείται από βασικά πυριγενή πετρώματα που υπέστησαν μεταμόρφωση όπως ορθογνεύσιους, μαρμαρυγικούς σχιστολίθους, μεταγάββρους, μεταδιαβάσες και ορθοαμφιβολίτες και συχνά παρατηρούνται μέσα σε άλλα πετρώματα και σερπεντινικά σώματα με την βοήθεια τεκτονικών επαφών (Μουντράκης 2020).

Στην Σερβομακεδονική μάζα παρατηρείται η επίδραση πολλών φάσεων μεταμόρφωσης, την εκλογιτική, την αμφιβολιτική και την ανάδρομη πρασινοσχιστολιθική. Η εκλογιτική φάση παρατηρείται σε υπολειμματικούς κρυστάλλους μέσα σε μεταβασικά πετρώματα, που υποδεικνύουν την επίδραση της εκλογιτικής μεταμόρφωσης σε παλιά βασικά πετρώματα και τοποθετείται στο Παλαιοζωικό. Η αμφιβολιτική είναι η κύρια φάση μεταμόρφωσης, όπου συνοδεύτηκε από την παραμόρφωση και την ανάπτυξη της κύριας σχιστότητας των πετρωμάτων και τοποθετείται στο Άνω Παλαιοζωικό. Τέλος, παρατηρείται και η επίδραση μιας ανάδρομης πρασινοσχιστολιθικής φάσης και τοποθετείται στο Κρητιδικό (Μουντράκης 2020).

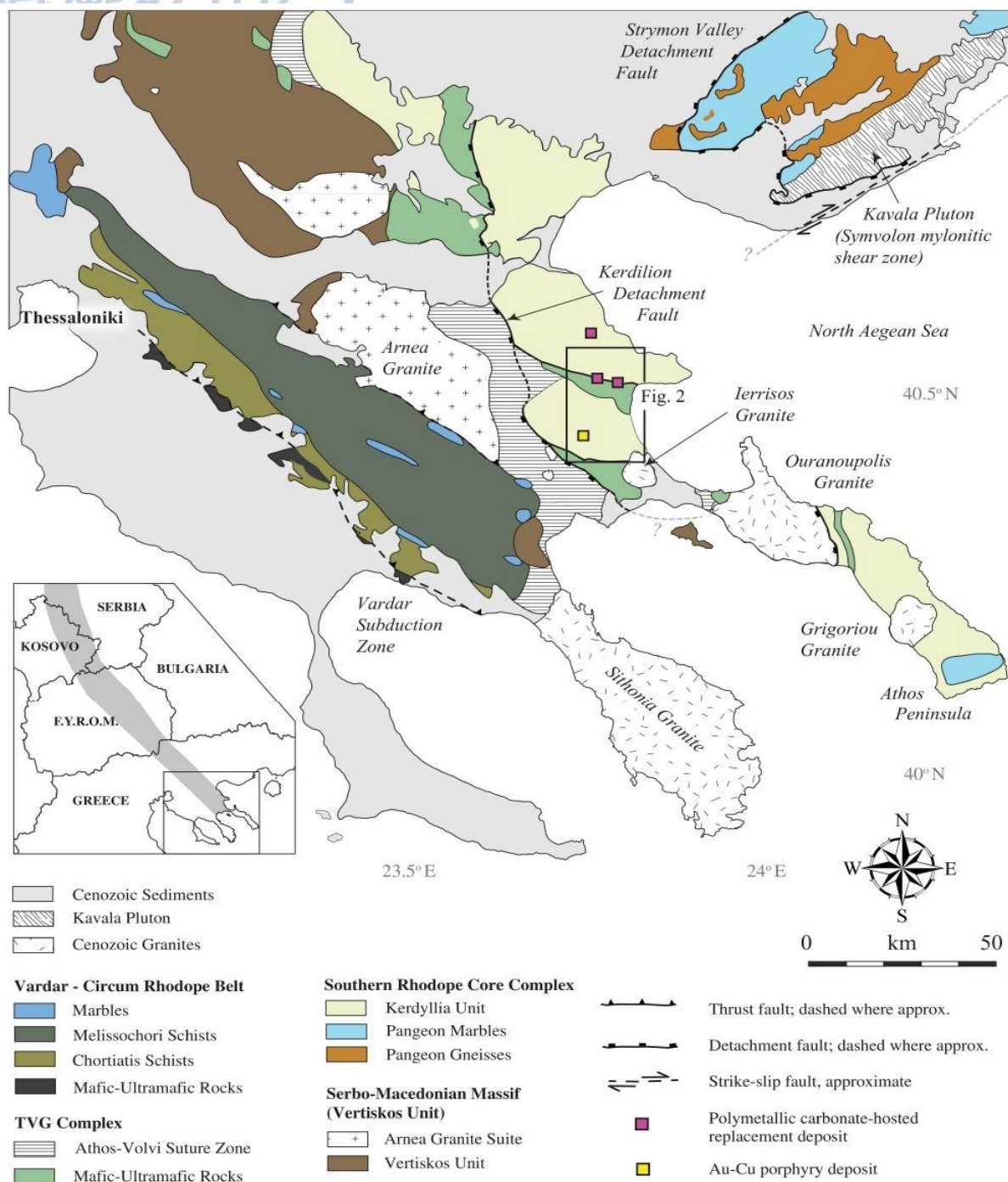
Ο μαγματισμός στην Σερβομακεδονική μάζα (Σχ. 3.1.2) ξεκινάει από το τέλος του Κρητιδικού και φτάνει μέχρι το Άνω Ηώκαινο και περιλαμβάνει τέσσερις μαγματικές φάσεις. Τα πυριγενή πετρώματα τέμνουν τα μεταμορφωμένα της Σερβομακεδονικής μάζας και διακόπτουν την συνέχειά τους. Χαρακτηρίζεται κυρίως από ασβεσταλκαλικούς γρανίτες που παρατηρούνται στην Ιερισσό, την Ουρανούπολη, στην Αρναία και σε άλλες περιοχές (Siron et al. 2016). Η πρώτη μαγματική φάση βασικής-υπερβασικής σύστασης παρατηρείται σε μεταβασικά πετρώματα μέσα στα μεταμορφωμένα πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας με υπολείμματα εκλογίτη και θεωρείται πως είναι προαλπικής ηλικίας. Η δεύτερη μαγματική φάση, με ηλικία στις αρχές του Παλαιοζωικού αιώνα και σύνδεση της με την Ερκύνια ορογένεσης, είναι γρανιτικής σύστασης και αντιπροσωπεύεται από γνεύσιους στις περιοχές των Κερδυλίων, του Βερτίσκου, της Ολυμπιάδας και άλλων περιοχών, όπου προγενέστερα ήταν γρανίτες. Η επόμενη φάση αντιπροσωπεύεται από τους γρανίτες της Αρναίας, του Λαχανά, του Μονοπήγαδου και άλλους, χρονολογείται στο Μεσοζωικό και θεωρείται σύγχρονοι της κύριας αλπικής πτύχωσης στο Ιουρασικό. Η τελευταία μαγματική φάση χρονολογείται στο Τριτογενές και ευθύνεται για την δημιουργία πολλών γρανιτών στην μάζα

της Ροδόπης με κυριότερους τον γρανίτη της Ιερισσού, της Σιθωνίας και της Μονής του Γρηγορίου Αγίου Όρους (Μουντράκης 2020).



Σχ. 3.1.2. Σκαρίφημα με τους κυριότερους πλουτωνικούς όγκους στην Σερβομακεδονική μάζα και οι ηλικίες τους (Μουντράκης 2020).

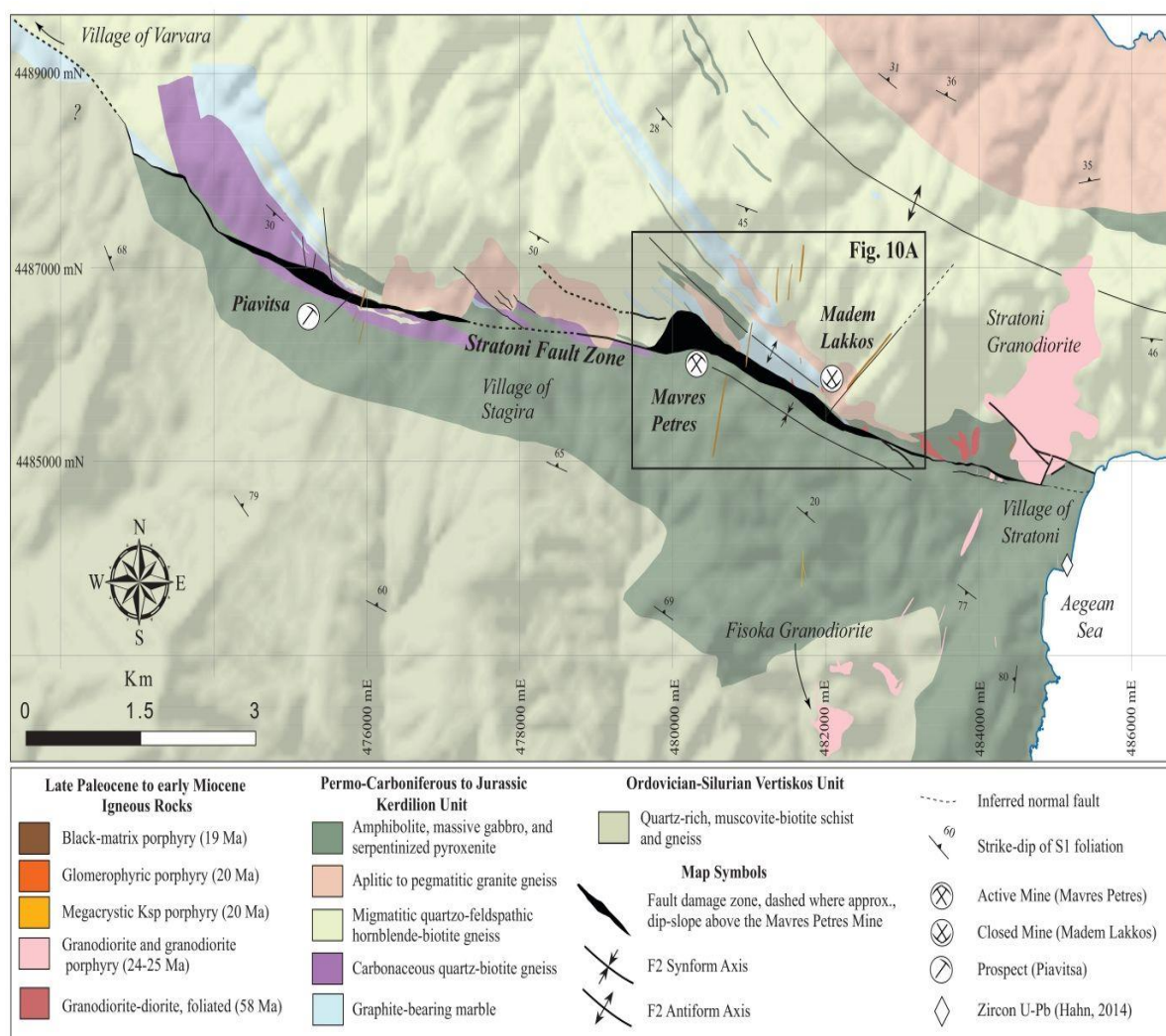
Η ενότητα των Κερδυλλίων και η ενότητα του Βερτίσκου διαχωρίζεται από ένα ρήγμα και σχηματίζει ένα ξεκάθαρο τεκτονικό σύνορο ανάμεσα τους (Σχ. 3.1.3). Στην ενότητα των Κερδυλλίων, επίσης, παρατηρείται ακόμη ένα σημαντικό ρήγμα, το ρήγμα του Στρατωνίου. Το ρήγμα του Στρατωνίου είναι ΔΒΔ διεύθυνσης αποτελούμενο από N-ΝΔ κανονικά ρήγματα. Βρίσκεται 12km από το χωριό του Στρατωνίου και δυτικά της Πιάβιτσας. Τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται το ρήγμα είναι μεταμορφωμένα, ίδια με της ενότητας Κερδυλλίων. Τέλος, παρατηρούνται και άλλα ρήγματα στην ενότητα αυτή, όπως το ρήγμα στο Γομάτι και το ρήγμα στον Βαθύλακκο (Siron et al. 2016).



Σχ. 3.1.3. Γεωλογικός χάρτης της Σερβομακεδονικής μάζας (Siron et al. 2016).

Το ρήγμα του Στρατωνίου (Σχ. 3.1.4) παρουσιάζει σημαντικό μεταλλογενετικό και γεωλογικό ρόλο, πέρα ότι αποτελεί τεκτονικό όριο των δύο ενοτήτων, για την περιοχή της Κασσάνδρας. Τα μεταλλοφόρα διαλύματα χρησιμοποιούν το ρήγμα του Στρατωνίου και άλλες ρηξιγενείς δομές ως ανοιχτό χώρο για την κυκλοφορία και την μεταφορά τους αλλά και την απόθεση μεταλλικών ορυκτών. Στην ζώνη του ρήγματος παρατηρείται τα κοιτάσματα των Μαύρων Πετρών και του Μαντέμ Λάκκου (κοιτάσματα μεικτών θειούχων αντικατάστασης

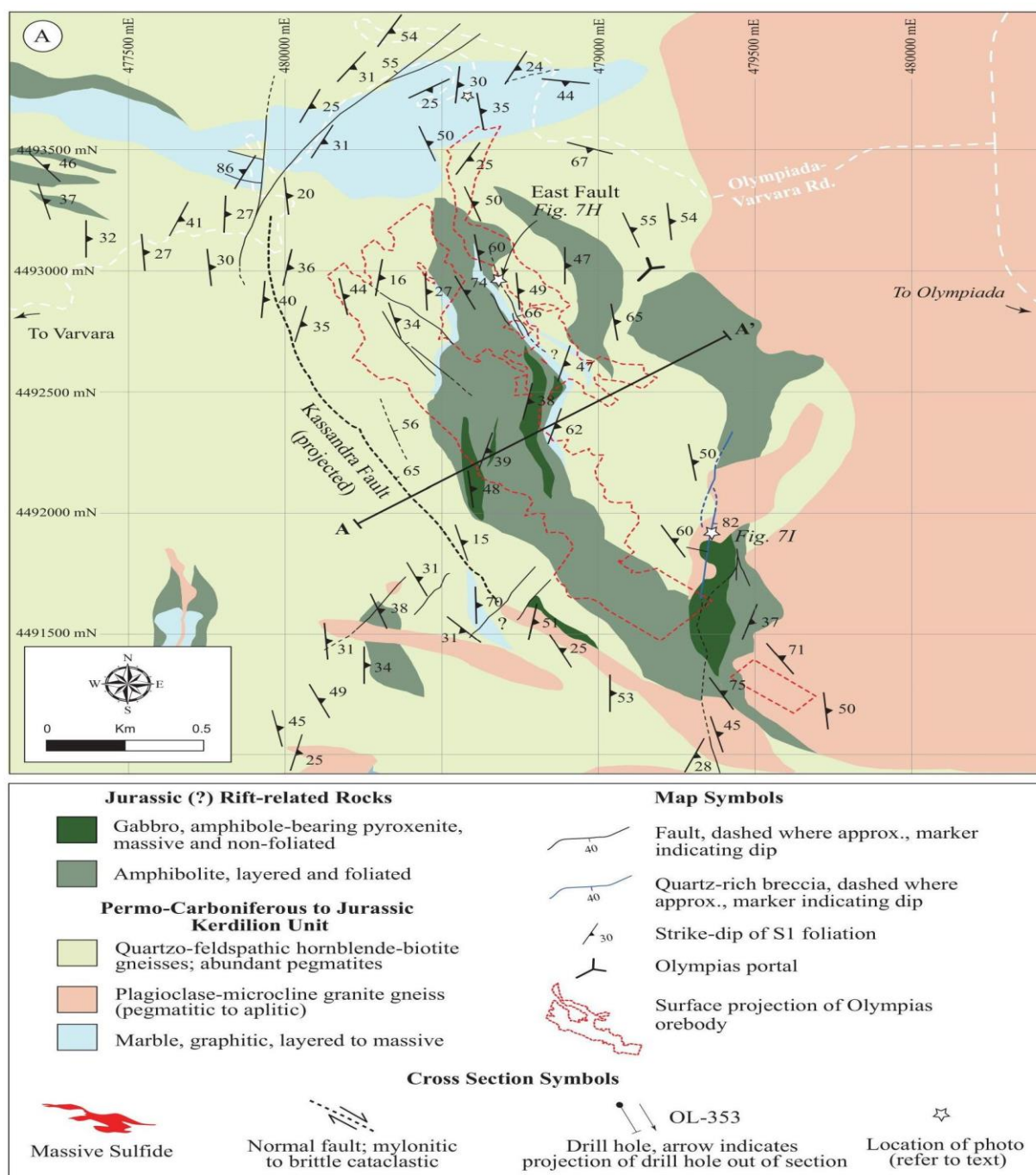
ανθρακικών πετρωμάτων), όπως και ένα μικρής κλίμακας κοίτασμα τύπου skarn και εμφανίσεις, πλούσιες σε χρυσό, φλεβών και breccias με χαλαζία και ροδοχρωσίτη. Το ρήγμα εκτείνεται μέχρι 12km από την θάλασσα του Αιγαίου στα ανατολικά έως το χωριό της Βαρβάρας στα δυτικά. Χωρίζει τους βιοτιτικούς και πλαγιокλαστικούς-μικροκλινικούς γνευσίους με ενστρώσεις οριζόντων μαρμάρου της υψηλότερης πλευράς βόρεια του ρήγματος από τους αμφιβολίτες, αμφιβολιτικούς γνευσιοσχιστόλιθους και υπερβασικά πετρώματα στην νότια πλευρά του ρήγματος (Siron el at. 2018).



Σχ. 3.1.4. Η ζώνη του ρήγματος του Στρατωνίου (Siron el at. 2018).

Μια άλλη εξίσου σημαντική δομή είναι η ζώνη ρηγμάτων της Κασσάνδρας, η οποία συνδέεται άμεσα με το κοίτασμα μεικτών θειούχων αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων στην Ολυμπιάδα. Η ζώνη βρίσκεται στο δυτικά του κοιτάσματος με ρήγματα που βυθίζονται

προς ΒΑ και χωρίζει τα μάρμαρα με τους χαλαζιακούς-αστριούχους βιοτιτικούς γνευσίους, τους πηγματιτικούς γρανιτικούς γνευσίους και τους αμφιβολίτες. Επίσης, αποτελείται από μυλωνιτικές διατμητικές ζώνες, όπου διακόπτονται από νεότερα ρήγματα που υπάρχουν στην ζώνη. Το κοίτασμα της Ολυμπιάδας και η ζώνη των ρηγμάτων τοποθετούνται στο κάτω τέμαχος (footwall) του ρήγματος του Στρατωνίου (Siron el at. 2018).



Σχ. 3.1.5 Γεωλογικός χάρτης του κοιτάσματος στην Ολυμπιάδα (Siron el at. 2018).

3.2 Κοιτάσματολογικά στοιχεία ΒΑ Χαλκιδικής

Τα κοιτάσματα στον Μαντέμ Λάκκο και στις Μαύρες πέτρες βρίσκονται κοντά στο χωριό του Στρατωνίου και είναι συμπαγών σουλφιδίων Pb-Au-Cu-Zn-Ag αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων με το πέτρωμα που φιλοξενεί την μεταλλοφορία να είναι το μάρμαρο. Στο κοιτάσμα του Μαντέμ Λάκκου (Σχ. 3.2.1) έχουν εξορυχθεί συνολικά 13.5 Mt Ag-Pb-Zn μεταλλεύματος, τα οποία έχουν εξαντληθεί, και τα αποθέματα των Μαύρων Πετρών ανέρχονται στα 1,87 Mt με περιεκτικότητες 160 g/t Ag, 6% Pb και 8.8% Zn (Eldorado Gold Corp. 2017). Η μεταλλοφορία και στα δύο κοιτάσματα τοποθετείται μέσα στους ορίζοντες των μαρμάρων, οι οποίοι αναπτύσσονται με μορφή αντικλίνου ΒΔ-ΝΑ, και έρχονται σε επαφή στα βόρεια με αμφιβολιτικούς γνέυσιους και στα νότια με το ρήγμα του Στρατωνίου. Στον ανώτερο ορίζοντα του μαρμάρου τοποθετείται η μεταλλοφορία των Μαύρων Πετρών (Σχ. 3.2.2) και στον κατώτερο ορίζοντα τοποθετείται του Μαντέμ Λάκκου (Βασιλάτος 2013). Στα κοιτάσματα του Στρατωνίου μπορούμε να διακρίνουμε δύο διαφορετικές φάσεις μεταλλοφοριών, μια πρώιμη συμπαγών σουλφιδίων αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων με κύρια μεταλλικά ορυκτά τον γαληνίτη και τον σφαλερίτη, και μία μεταγενέστερη διάσπαρτη πλούσια σε σιδηροπυρίτη, όπου βρίσκεται στο matrix των breccias και περιβάλλει προγενέστερες μεταλλοφορίες συμπαγών σουλφιδίων (Siron et al. 2016). Η εξορύξιμη ποσότητα χρυσού στα κοιτάσματα του Στρατωνίου είναι 5 g/t και οι κυριότερες πηγές του είναι ο αρσενικούχος σιδηροπυρίτης και ο αρσενοπυρίτης ή αλλιώς αόρατος χρυσός (Forward et al. 2010).



Σχ. 3.2.1. Το μεταλλείο του Μαντέμ Λάκκου στο Στρατώνι (Eldorado Gold Corp.).



Σχ. 3.2.2 Μεταλλοφορία στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών (Siron et al. 2018)

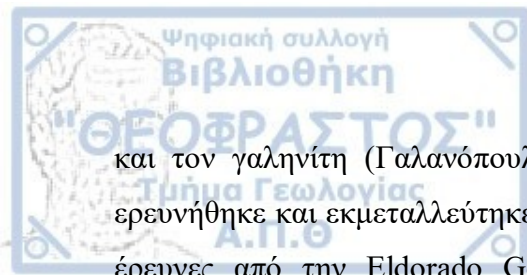
Το κοίτασμα στην Ολυμπιάδα (βρίσκεται κοντά στο χωριό της Ολυμπιάδας και 6 χιλιόμετρα από το ρήγμα του Στρατωνίου (Siron et al. 2018). Το κοίτασμα είναι πολυμεταλλικό Au-Ag-Pb-Zn αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων (Σχ. 3.2.3), όπως και τα κοιτάσματα του Στρατωνίου και τοποθετείται στον κατώτερο ορίζοντα μαρμάρου του σχηματισμού των Κερδυλλίων, ο οποίος αποτελείται από δύο φακούς και αναπτύσσεται μέσα βιοτιτικό γνεύσιο. Ο ορίζοντας του μαρμάρου που φιλοξενεί το κοίτασμα είναι ο ίδιος ορίζοντας που φιλοξενεί τα κοιτάσματα των Μαύρων Πετρών και του Μαντέμ Λάκκου (Kalogeropoulos et al. 1989). Στην επαφή του μαρμάρου με τον βιοτιτικό γνεύσιο και μέσα στο μάρμαρο εντοπίζεται η μεταλλοφορία και διακρίνεται στην ανατολική και την δυτική. Η διάκριση γίνεται λόγω της μετατόπισης που προήλθε από ρήγμα και μέχρι να συμβεί αυτό θεωρούνταν ένα ενιαίο μεταλλοφόρο σώμα (Βασιλάτος 2013). Το δυτικό μεταλλοφόρο σώμα βυθίζεται έως τα 1500 m προς ΝΔ και έχει πλάτος 250 m με κλίση 30–35° ανατολικά και το ανατολικό έχει πλάτος 75 m με κλίση 25–30° ΝΑ (Forward et al. 2010). Η μεταλλοφορία στο κοίτασμα εμφανίζεται με μορφή εγκοίλων, πλήρωσης σχισμών, ταινιωτές ή διάσπαρτες και με μορφή μεγάλων φακοειδών σωμάτων, παραμορφωμένη ή μη. Υδροθερμικά λατυποπαγή (breccias) εντοπίζονται, επίσης, στο κοίτασμα της Ολυμπιάδας που αποτελούνται από λατύπες

μεταλλεύματος και εξαλλοιωμένου απλίτη ή μαρμάρου και έχουν αποδοθεί στην τεκτονική δραστηριότητα και σε φαινόμενα καρστικοποίησης. Τα κύρια μεταλλικά ορυκτά της μεταλλοφορίας είναι ο σιδηροπυρίτης, ο σφαλερίτης, ο γαληνίτης και ο αρσеноπυρίτης (Kalogeropoulos et al. 1989). Τα αποθέματα του κοιτάσματος υπολογίζονται στα 16.1 Mt, με περιεκτικότητες 4.3 % Pb, 5.7% Zn, 128 g/t Ag και 7.9 g/t Au. Η συνολικά εξορύξιμη ποσότητα ασημιού και χρυσού ανέρχεται στους 1879 τόνους και στους 116 τόνους αντίστοιχα με παραγωγή 5 τόνων χρυσού ανά τον χρόνο (Eldorado Gold Corp. 2017). Η εξορύξιμη ποσότητα του χρυσού προέρχεται από τον αρσενικούχο σιδηροπυρίτη και τον αρσеноπυρίτη, όπως ακριβώς και στα κοιτάσματα του Στρατωνίου. Το κοιτάσμα της Ολυμπιάδας βρίσκεται σε φάση παραγωγής με μια εκτιμώμενη διάρκεια ζωής τα 25 χρόνια και φτάνει έως τα 790 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Melfos and Voudouris 2017).



Σχ. 3.2.3. Μεταλλοφορία του κοιτάσματος της Ολυμπιάδας και το ανθρακικό πέτρωμα που ην φιλοξενεί (Φωτογραφία: Β. Μέλφος).

Το κοιτάσμα της Πιάβιτσας είναι ακόμη ένα κοιτάσμα που συνδέεται με το ρήγμα του Στρατωνίου, όπως τα κοιτάσματα των Μαύρων Πετρών και του Μαντέμ Λάκκου, και πολλοί ερευνητές θεωρούν πως είναι η εξέλιξη του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου. Πρόκειται για ένα κοιτάσμα μαγγανίου αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων με πλούσιες σε χρυσό φλέβες και κύρια ορυκτά τον ροδοχρωσίτη, τον ροδονίτη, τον σιδηροπυρίτη, τον σφαλερίτη



και τον γαληνίτη (Γαλανόπουλος και Θεοδορούδης 1994). Το κοίτασμα της Πιάβιτσας ερευνήθηκε και εκμεταλλεύτηκε στην δεκαετία του 1960 και πρόσφατα πραγματοποιήθηκαν έρευνες από την Eldorado Gold το 2012, όπου βρέθηκαν τα εκτιμώμενα αποθέματα μεταλλοφορίας να ανέρχονται στους 10.54 Mt με περιεκτικότητες 5.7 g/t Au και 57 g/t Ag (Eldorado Gold Corp. 2017).

4. ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Au ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Το κοιτάσμα στις Σκουριές συμπληρώνει την σημαντικότερη μεταλλογενετική επαρχία της Σερβομακεδονικής μάζας. Πρόκειται για ένα κοιτάσμα πορφυριτικού χαλκού παγκόσμιας κλάσης ηλικίας Μειόκαινου και εντοπίζεται στην ΒΑ Χαλκιδική μαζί με τα υπόλοιπα κοιτάσματα της Κασσάνδρας. Το κοιτάσμα των Σκουριών εκμεταλλεύεται από την εταιρεία Eldorado Gold Corp. (Σχ. 4.1) και είναι έτοιμο να οδηγηθεί σε φάση παραγωγής. Τα αποθέματα του κοιτάσματος ανέρχονται στα 152.7 Mt μεταλλοφορίας με περιεκτικότητες 0.8 Au g/t, 0.5% Cu, 41 ppb Ru, 150 ppb Pt και 610 ppb Pd (Economou-Eliopoulos 2000, Eliopoulos et al. 2014, Eldorado Gold Corp. 2017). Οι συνολικές εξορύξιμες ποσότητες ανέρχονται στους 3.8 Moz χρυσού και 776 Mt χαλκού (Eldorado Gold Corp. 2017). Τα βασικότερα μεταλλικά ορυκτά στο κοιτάσμα είναι ο σιδηροπυρίτης, ο χαλκοπυρίτης, ο βορνίτης, ο μαγνητίτης, ο τετραεδρίτης και μικρές ποσότητες γαληνίτη και μολυβδαινίτη. Παρατηρούνται και σπάνια μέταλλα στο κοιτάσμα των Σκουριών, όπως το παλλάδιο, το τελλούριο και η πλατίνα (McFall et al. 2018).



Σχ. 4.1. Μεταλλείο στις Σκουριές Χαλκιδικής (Eldorado Gold Corp.).

4.1 Γεωγραφική θέση-Γεωλογία περιοχής

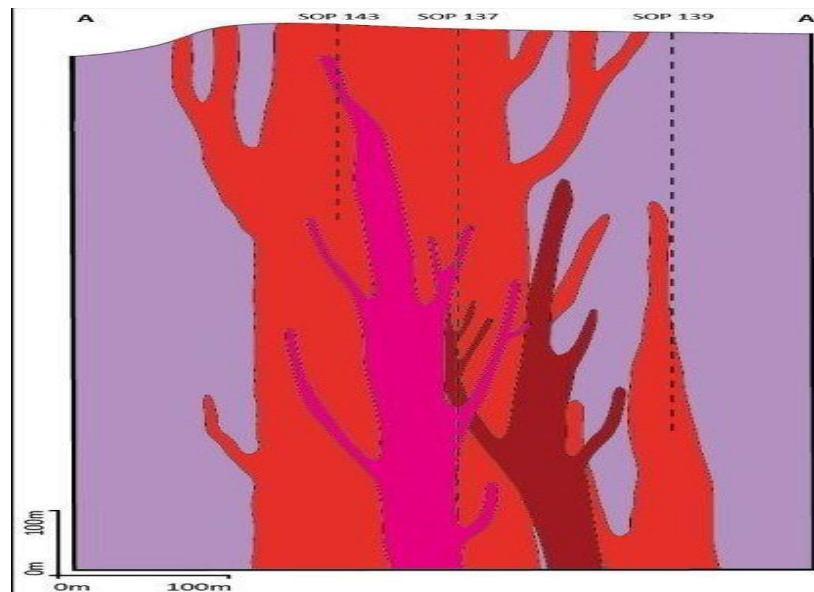
Το κοιτάσμα στις Σκουριές βρίσκεται στο Δήμο Αριστοτέλη, ΒΑ του χωριού Μεγάλη Παναγία και σε ίση απόσταση από τα χωριά Παλαιοχώρι, Νεοχώρι, Μεγάλη Παναγία και λίγο πιο μακριά από το χωριό Αρναία. Από τα δύο μεγάλα ρήγματα της περιοχής, βρίσκεται 8 χλμ. νότια του ρήγματος στο Στρατώνι και 1 χλμ. βόρεια του ρήγματος στο Γομάτι.

Όπως όλα τα κοιτάσματα της ΒΑ Χαλκιδικής, έτσι και αυτό ανήκει στην Σερβομακεδονική μάζα και αποτελεί την σημαντικότερη επαρχία της. Από τις δύο ενότητες που αποτελείται η Σερβομακεδονική μάζα (Σχ. 4.1.1.), η ενότητα του Βερτίσκου φιλοξενεί το πορφυριτικό κοιτάσμα Cu-Au των Σκουριών. Η ενότητα του Βερτίσκου αποτελείται από σχιστόλιθους, φακούς αμφιβολιτών και γνεύσιους που έχουν υποστεί μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Η μεταλλοφορία φιλοξενείται από ηφαιστειακές διεισδύσεις ασβεσταλκαλικής και σωσσονιτικής σύστασης με κατεύθυνση ΝΑ μέσα στην ενότητα του Βερτίσκου (McFall 2016). Η εκτατική τεκτονική της περιοχής είναι ο κύριος λόγος που οι υποηφαιστειακές διεισδύσεις μπορούν να φτάσουν υψηλότερα σημεία του φλοιού (Kockel et al. 1977, Perantonis 1982, Frei 1995, Economou-Eliopoulos 2005). Βρίσκονται στο κέντρο μιας περιοχής που δρα η εκτατική τεκτονική ανάμεσα σε δύο κανονικά ρήγματα με οριζόντια ολίσθηση (Kroll et al. 2002, Hahn 2015, McFall 2016). Η ηλικία δημιουργίας του κοιτάσματος των Σκουριών τοποθετείται στο Μειόκαινο με την ηλικία των ηφαιστειακών διεισδύσεων είναι 20.56 ± 0.48 Ma και την ηλικία της μεταλλογένεσης 19.9 ± 0.9 Ma (Hahn et al. 2012, McFall 2016). Ο ασβεσταλκαλικός μαγματισμός του Νεογενούς που παρατηρείται στην περιοχή δεν σχετίζεται άμεσα με υποβύθιση, αλλά προκλήθηκε κατά την διάρκεια μίας post-collisional εκτατικής φάσης μέσω μερικής τήξης του μανδύα και του φλοιού που είχαν τροποποιηθεί από την υποβύθιση (Rosu et al. 2005, Harangi et al. 2007, Harris et al. 2013, Richards 2015, McFall 2016).

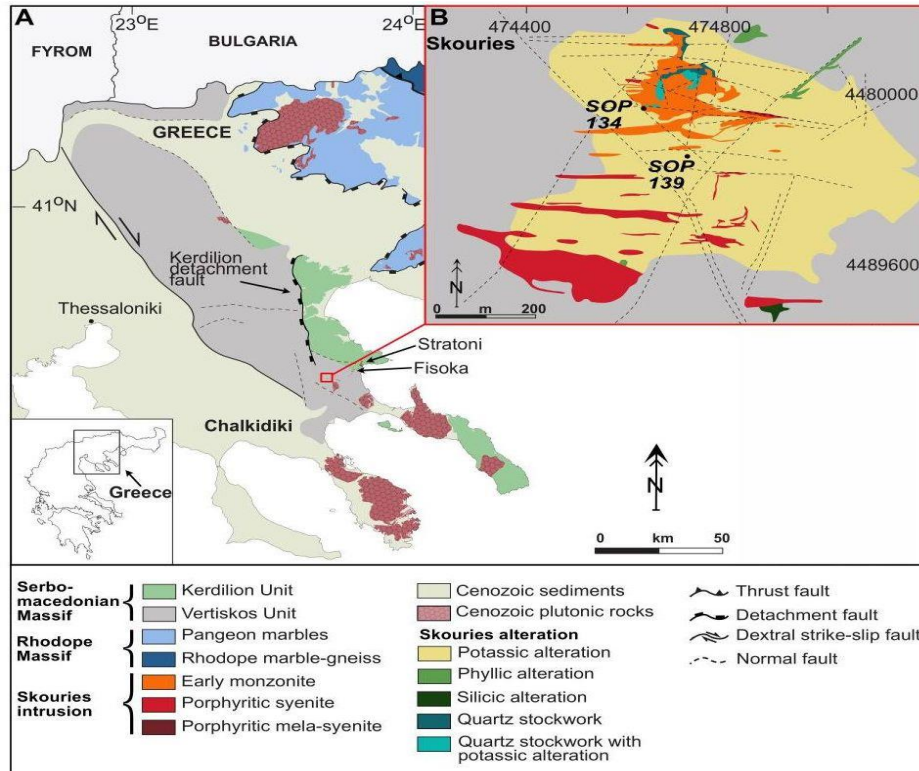
4.2 Μορφή και φάσεις του κοιτάσματος των Σκουριών

Το πορφυριτικό κοιτάσμα Cu-Au των Σκουριών εξαπλώνεται 200μ. σε διάμετρο και 900μ. σε βάθος, έχει μορφή κατακόρυφου μεταλλοφόρου σώματος (pipelike body) με επιφανειακές διαστάσεις 200x 150m (Σχ. 4.2.1) και χαρακτηρίζεται από διεισδύσεις μονζονιτικής και πορφυριτικής-συνιενικής σύστασης που σχηματίζουν συμπλέγματα φλεβών (stockworks) και φλέβες μεγάλης έκτασης (dykes) στα γειτονικά πετρώματα της ενότητας του Βερτίσκου. Παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό η ποτασσική εξαλλοίωση, ενώ οι μεγάλες ζώνες προπυλιτικής και σερικιτικής εξαλλοίωσης δεν εμφανίζονται στο κοιτάσμα των Σκουριών. Διακρίνονται 4 φάσεις των υποηφαιστειακών διεισδύσεων (Σχ. 4.2.1.), όπου με φθίνουσα

ηλικία είναι: α) χαλαζιακός μονζονίτης, β) πορφυριτικός συηνίτης, γ) πορφυριτικές συηνιτικές φλέβες, δ) στείρος συηνίτης (McFall et al. 2018).



Σχ. 4.2.1 Γεωμετρία του κοιτάσματος των Σκουριών (adapted from Kross 2002).



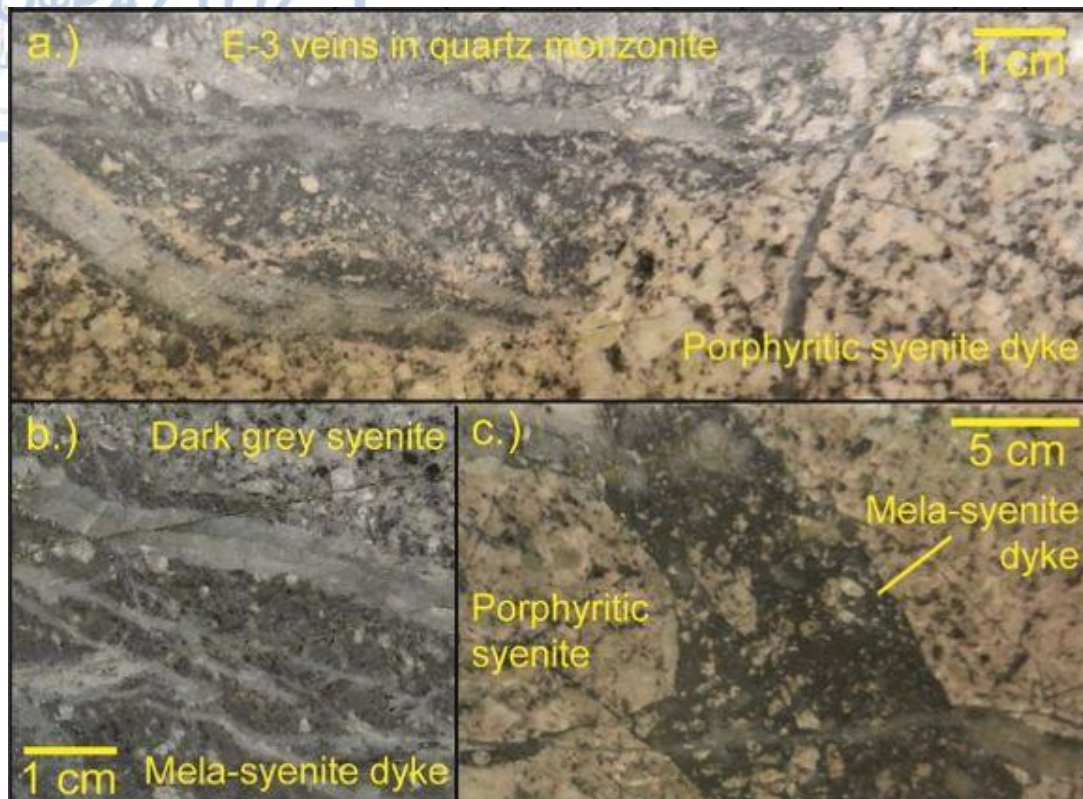
Σχ. 4.1.1. Α) Γεωλογικός χάρτης της Σερβομακεδονικής μάζας (modified after Siron et al. 2018), Β) Γεωλογικός χάρτης του κοιτάσματος των Σκουριών (modified after McFall et al. 2018).

Η πρώτη φάση με τον χαλαζιακό μονζονίτη συμβαίνει πριν την κρυστάλλωση και περιέχει 40-55% φαινοκρυστάλλους πλαγιокλάστων και αστρίων, 5-20% αλλοτριόμορφων φαινοκρυστάλλων βιοτίτη με διάμετρο 1-2 mm και 5-10% αλλοτριόμορφους φαινοκρυστάλλους χαλαζία 2-5 mm σε διάμετρο σε μία αφαντική μάζα, όπου έχει υποστεί σε μεγάλο βαθμό ποτασική εξαλλοίωση με αντικατάσταση πολλών φαινοκρυστάλλων σε καλιούχο άστριο. Τον χαλαζιακό μονζονίτη τον διαπερνάει ένα πρώιμο πλέγμα φλεβών που χαρακτηρίζει την φάση αυτή (McFall et al. 2018).

Η δεύτερη φάση με τον πορφυριτικό συηνίτη συμβαίνει ταυτόχρονα με την κρυστάλλωση, όπου διαπερνά τον χαλαζιακό μονζονίτη της πρώτης φάσης και το πρώιμο πλέγμα φλεβών. Ο πορφυριτικός συηνίτης φιλοξενείται σε μία αφαντική μάζα αποτελούμενη από καλιούχο άστριο και διάσπαρτο μαγνητίτη και περιέχει 60% αλλοτριόμορφους, υπιδιόμορφους φαινοκρυστάλλους αστρίων, 5-10% αλλοτριόμορφο βιοτίτη με διάμετρο <1 mm και 2% ιδιόμορφους κρυστάλλους αμφιβολίτη. Σε αυτή την φάση παρατηρούνται σπάνιοι αναλλοίωτοι φαινοκρύσταλλοι πλαγιокλάστων και αστρίων μαζί με μεγακρυστάλλους αστρίων με διάμετρο 1-4 cm, οι οποίοι έχουν υποστεί ποτασική εξαλλοίωση (McFall et al. 2018).

Η τρίτη φάση με τις πορφυριτικές συηνιτικές φλέβες, διακόπτουν και διακόπτονται από τον πορφυριτικό συηνίτη της δεύτερης φάσης και μετατρέπουν τα πετρώματα της πρώτης και δεύτερης φάσης των υποηφαιστειακών διεισδύσεων σε breccia. Η σύσταση των πορφυριτικών φλεβών αποτελείται από 5-20% υπιδιόμορφων έως ιδιόμορφων φαινοκρυστάλλων αλκαλιούχων αστρίων (2-3 mm), 5-10% υπιδιόμορφων φαινοκρυστάλλων βιοτίτη (1 mm), 3% ιδιόμορφων φαινοκρυστάλλων αμφιβολίτη (1 mm) και 1% διάσπαρτου μαγνητίτη (< 1 mm) σε μία αφαντική σκούρη-γκρι μάζα. Ο πορφυριτικός συηνίτης και οι πορφυριτικές συηνιτικές φλέβες σχετίζονται με το κύριο πλέγμα φλεβών που περιέχει την μεταλλοφορία Cu-Au.

Η τέταρτη φάση του στείρου συηνίτη τέμνει το πλέγμα φλεβών που φιλοξενεί την μεταλλοφορία Cu-Au και των φλεβών τις τρίτης φάσης και πρόκειται για έναν μεταγενέστερο σκουρόχρωμο συηνίτη (McFall et al. 2018).



Σχ. 4.2.2. Οι διάφορες φάσεις των υποηφαιστειακών διεισδύσεων στο κοίτασμα των Σκουριών (McFall et al. 2018).

4.3 Ομάδες φλεβών του κοιτάσματος των Σκουριών

Στο πορφυριτικό κοίτασμα Cu-Au στις Σκουριές παρατηρούνται 14 στάδια φλεβών και αλλοιώσεων, τα οποία έχουν ταξινομηθεί σε 3 κύριες ομάδες (Σχ.4.3.1): η πρώτη ομάδα (E) σχετίζεται με τον χαλαζιακό μονζονίτη και χαρακτηρίζεται ως πρώιμη ομάδα, η δεύτερη ομάδα (M) που σχετίζεται με τον πορφυριτικό συηνίτη και τις πορφυριτικές συηνιτικές φλέβες και η τρίτη ομάδα (L) που διαπερνά όλες τις προηγούμενες ομάδες (McFall et al. 2018).

Η πρώιμη ομάδα φλεβών (E) αποτελείται από 4 υποκατηγορίες: E-1, E-2, E-3, E-4 και σχετίζεται με τον χαλαζιακό συηνίτη της πρώτης φάσης. Η ποτασσική εξαλλοίωση χαρακτηρίζει την πρώτη ομάδα με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ορυκτά της εξαλλοίωσης όπως ορθόκλαστο, βιοτίτης και μαγνητίτης. Τα δευτερογενή ορυκτά αυτά αντικαθιστούν τους αστρίους, τους αμφιβολίτες και τους φαινοκρυστάλλους βιοτίτη. Οι φλέβες της πρώτης ομάδας χαρακτηρίζονται και από την υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνητίτη (McFall et al. 2018).

Οι φλέβες της δεύτερης ομάδας (M) σχετίζονται με τον πορφυριτικό συηνίτη και τις πορφυριτικές συηνιτικές φλέβες, οι οποίες τέμνουν τις φλέβες του πρώιμου σταδίου και χαρακτηρίζεται από ποτασσική εξαλλοίωση. Οι σύσταση των φλεβών αποτελείται από ορθόκλαστο, βιοτίτη, μαγνητίτη, βορνίτη και χαλκοπυρίτη. Οι φλέβες της δεύτερης ομάδας

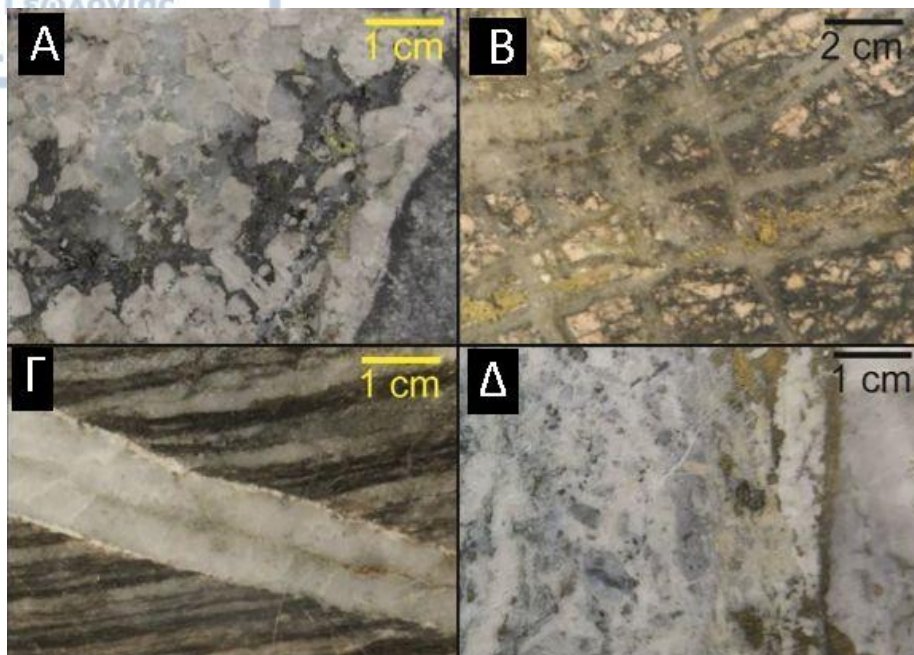
χωρίζονται σε 5 υποκατηγορίες, οι οποίες είναι M-1, M-2, M-3, M-4 και M-5. Η μεταλλοφορία Cu-Au των Σκουριών και ο διάσπαρτος βορνίτης και χαλκοπυρίτης της ποτασικής εξαλλοίωσης σχετίζεται κυρίως με την δεύτερη ομάδα φλεβών (M) και ειδικότερα με τις παρακάτω υποκατηγορίες:

- **M-3 φλέβες:** Οι φλέβες αυτές περιέχουν ορθόκλαστο, βιοτίτη, χαλαζία και συμπαγή χαλκοπυρίτη στο κέντρο με πλάτος 3-30mm και μπορεί να εμφανίζουν και ίχνη σουλφιδίων.
- **M-4 φλέβες:** Οι φλέβες M-4 περιέχουν βιοτίτη, ορθόκλαστο, χαλαζία, χαλκοπυρίτη και βορνίτη με πάχος 1-5cm. Ο χαλκοπυρίτης είναι μικρότερος σε περιεκτικότητα από τον βορνίτη και σχηματίζει δευτερογενείς φάσεις σε ρωγμές του χαλκοπυρίτη.
- **M-5 φλέβες:** Οι φλέβες αυτές είναι χαλαζιακές και περιέχουν σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη και βορνίτη, όπου σε αντίθεση με τις M-4 φλέβες η περιεκτικότητα του χαλκοπυρίτη είναι μεγαλύτερη από του βορνίτη (McFall 2016).

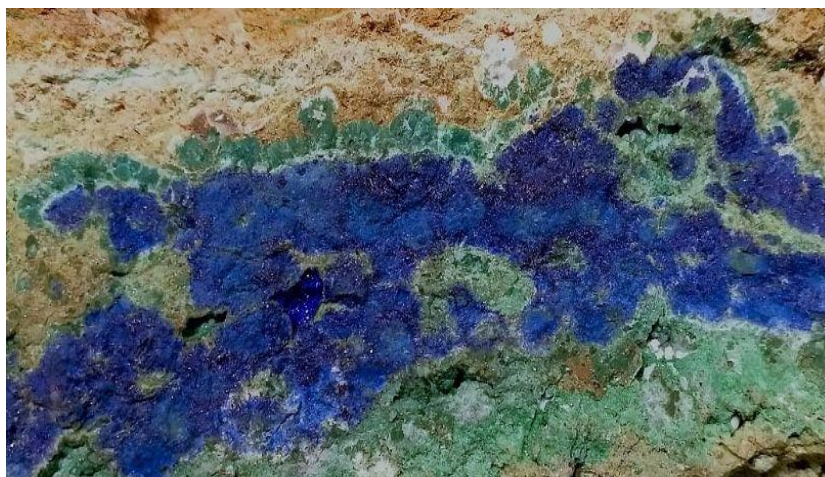
Η τρίτη ομάδα φλεβών (L) χαρακτηρίζεται από σερικιτική εξαλλοίωση και αποτελείται από σερικίτη, χαλαζία, ασβεστίτη, δολομίτη, καολίνη και μικρές συγκεντρώσεις ορυκτών αργλικής εξαλλοίωσης, όπου παρατηρούνται σε μικρά ρήγματα στο κοίτασμα. Οι υποκατηγορίες αυτής της ομάδας είναι οι εξής: L-1, L-2, L-3, L-4, L-5 (McFall et al. 2018).

4.4 Ορυκτολογική σύσταση και μεταλλοφορία του κοιτάσματος των Σκουριών

Η μεταλλοφορία στο κοίτασμα παρουσιάζεται σε ζώνες με κατακόρυφη ανάπτυξη. Στην επιφανειακή ζώνη, όπου είναι η ζώνη οξείδωσης, παρατηρούνται συγκεντρώσεις μαλαχίτη και αζουρίτη (Σχ. 4.4.1.), και τοποθετείται κάτω από μια ζώνη εμπλουτισμού περιεκτικότητας κυρίως κοβελλίνη (Perantonis 1982). Η υπόγεια ζώνη είναι η κύρια ζώνη που τοποθετείται το κοίτασμα με την μορφή φλεβιδίων και φλεβών (Σχ. 4.4.2) και το κοίτασμα φιλοξενείται στις υποκατηγορίες M-3, M-4, M-5 της δεύτερης ομάδας φλεβών. Σε αυτές τις υποκατηγορίες φλεβών φιλοξενούνται πολύτιμα μέταλλα, όπως ο χρυσός (Au) και ο άργυρος (Ag) και στο σύμπλεγμα φλεβών της υποκατηγορίας M-4 περιέχονται στοιχεία της πλατίνας (PGE) και αυτοφυής χρυσός (McFall 2016). Η κύρια μεταλλοφόρος παραγένεση αποτελείται από σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, βορνίτη και μαγνητίτη. Δευτερεύοντα ορυκτά στο κοίτασμα είναι ο χρυσός, τετραεδρίτης, σφαλερίτης, μερενσκυίτης, συλβανίτης, Au-τελλουρίδια και εσσίτης. Από πυριτικά ορυκτά επικρατεί ο χαλαζίας. Τα πλουσιότερα σε περιεκτικότητα Cu, Au τμήματα της μεταλλοφορίας παρατηρούνται το ένα κοντά στην επιφάνεια και το άλλο σε βάθος 350 m (Βασιλάτος 2013).



Σχ. 4.3.1. Οι 3 κύριες ομάδες φλεβών του κοιτάσματος των Σκουριών. Α) Φλέβες M-3 τύπου με κρυστάλλους ορθόκλαστου και βιοτίτη, Β) Φλεβίδια τύπου M-4 (stockwork), Γ) Φλέβα M-5 σε βιοτιτικό σχιστόλιθο, Δ) Πολυμεταλλική φλέβα τύπου L-4 με χαλαζία και βαρύτη (McFall et al. 2018).



Σχ. 4.4.1. Εμφάνιση αζουρίτη με μαλαχίτη (πηγή: mindat.org).



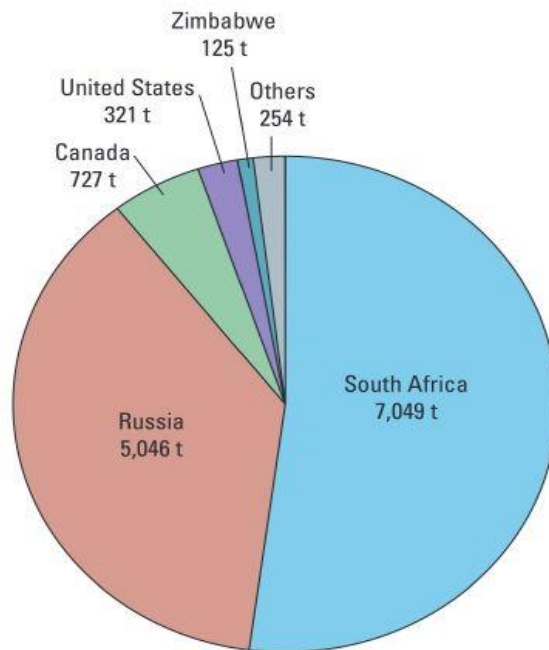
Σχ. 4.4.2. Η μεταλλοφορία του κοιτάσματος σε μορφή φλεβών. Qtz = χαλαζίας, Ccp = χαλκοπυρίτης, Bn = βορνίτης, Bt = βιοτίτης, Mag = μαγνητίτης (Siron et al. 2016).

4.5 Παρουσία κρίσιμων μετάλλων (PGE) στο κοιτάσμα των Σκουριών

Στην σημερινή εποχή με την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας μαζί με την αύξηση του πληθυσμού της Γης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των αναγκών σε ορυκτές πρώτες ύλες. Σε αυτές τις πρώτες ύλες ανήκουν και σπάνια μέταλλα, τα οποία ονομάζονται κρίσιμα. Ως κρίσιμης σημασίας μέταλλα ονομάζονται εκείνα όπου είναι πολύ σημαντικά για την παγκόσμια οικονομία, παράγονται από συγκεκριμένο αριθμό χωρών (Σχ. 4.5.1) και τα επόμενα 10 έτη εμφανίζουν κίνδυνο ανεπαρκούς προσφοράς. Τα ορυκτά της πλατίνας (PGE) ανήκουν στην συγκεκριμένη ομάδα μετάλλων και αποτελούνται από την πλατίνα (Pt), το παλλάδιο (Pd), όσμιο (Os), ιρίδιο (Ir), ρόδιο (Rh) και το ρουθένιο (Ru). Η κύρια χρήση των ορυκτών της πλατίνας είναι στην αυτοκινητιστική βιομηχανία στην παραγωγή καταλύτων, οι οποίοι βρίσκονται στις εξατμίσεις των αυτοκινήτων και μειώνουν τις επικίνδυνες εκπομπές αερίων. Ακόμη, έχει ένα μεγάλο φάσμα χρήσεων όπως παραγωγή εκρηκτικών και νιτρικού οξέος, στην ηλεκτρονική βιομηχανία, στην βιομηχανία πετρελαίου και την κοσμηματοποιία (U.S Geological Survey 2017).

Στο κοιτάσμα των Σκουριών παρατηρείται η παρουσία στοιχείων της πλατίνας (PGE) και του χρυσού (Au). Σύμφωνα με έρευνες που έλαβαν χώρα, οι περιεκτικότητες του Pd και του Pt κυμαίνονται από 60-610 ppb και 5-150 ppb αντίστοιχα και βρέθηκαν σε ζώνες ποτασσικής εξαλλοίωσης του πορφυριτικού συνήτη, όπου αποθηκεύεται το μεγαλύτερο ποσοστό Cu. Από την άλλη, στις φλέβες των τελευταίων φάσεων και σε ζώνες αργίλικής εξαλλοίωσης έχουμε απουσία των στοιχείων της πλατίνας (PGE) (Eliopoulos and Economou-Eliopoulos 1991). Σε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε δείγμα από γεώτρηση σε φλέβα που

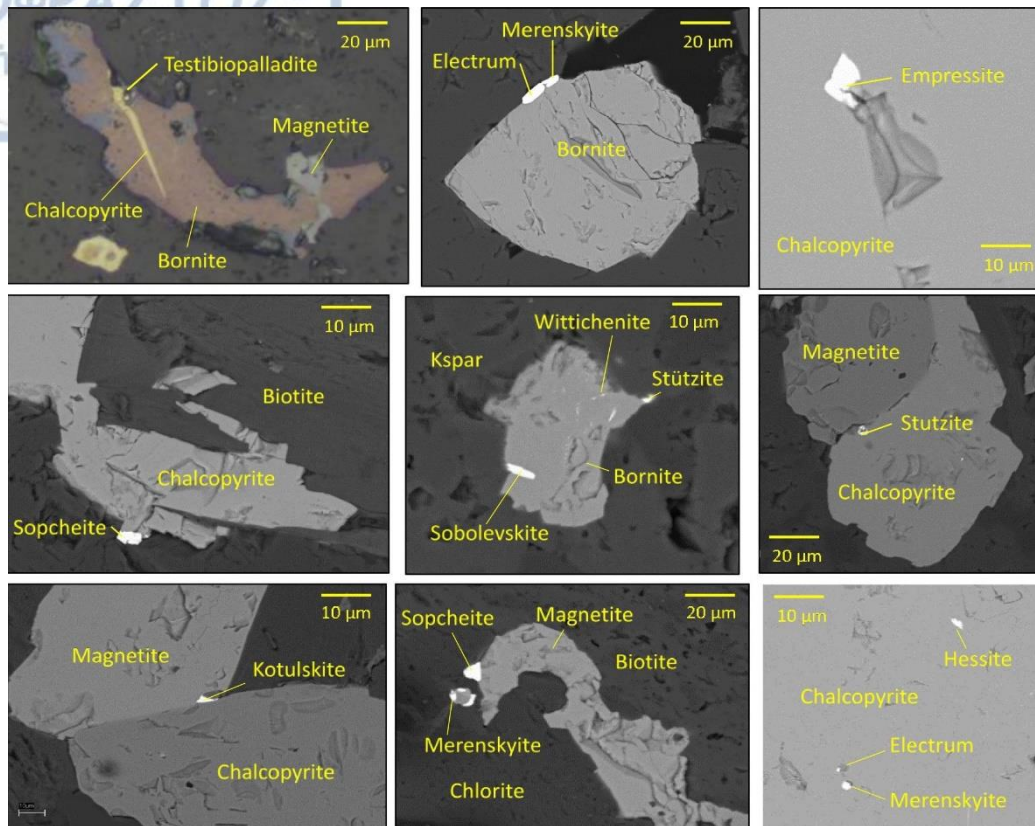
φιλοξενεί την μεταλλοφορία Cu-Au παρατηρήθηκε περιεκτικότητα Pd από 76 ppb έως 5000 ppm (Eliopoulos 2014).



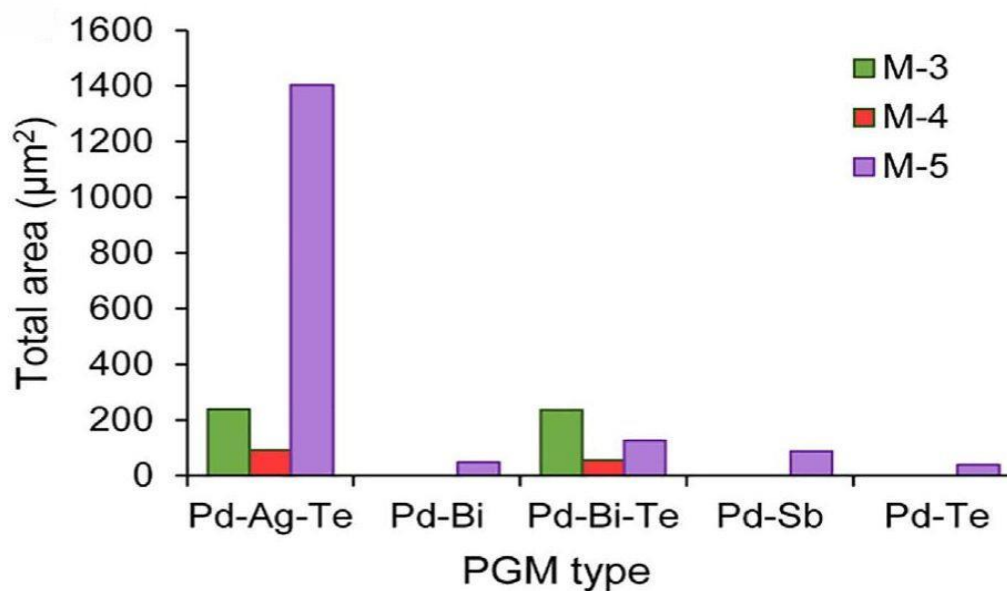
Σχ. 4.5.1. Η παγκόσμια παραγωγή των στοιχείων του PGE από το 1960 μέχρι το 2011 (U.S Bureau of Mines 1933-96, U.S Geological Survey 1997-2016).

Τα PGM (platinum group minerals) στις Σκουριές εμφανίζονται με πολύ μικρή διάμετρο <10μm. Σχετίζονται με τις φλέβες M-3, M-4, M-5, όπου βρίσκεται η μεταλλοφορία του κοιτάσματος, και συνήθως εντοπίζονται ως εγκλείσματα στον βορνίτη και στον χαλκοπυρίτη, αλλά και ελεύθερα στις φλέβες και σε ορυκτά της ποτασσικής εξαλλοίωσης. Τα εγκλείσματα αυτά εμφανίζονται κυρίως στις άκρες του ορυκτού με ακανόνιστη μορφολογία (Σχ. 4.5.2). Τα PGM στο κοιτάσμα των Σκουριών μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες (Σχ. 4.5.3), ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε ημι-πολύτιμα μέταλλα και είναι οι παρακάτω:

- **Η ομάδα Pg-Ag-Te:** Η ομάδα αυτή, εκτός από Pg, Ag, Te, περιέχει σε μικρές ποσότητες Bi, Au, Se σχετίζεται κυρίως με τον χαλκοπυρίτη και είναι η μόνη ομάδα που εμφανίζεται στις φλέβες M-3 και M-4.
- **Η ομάδα Pd-Bi:** Η ομάδα Pd-Bi περιέχει συνήθως σε μικρές ποσότητες Pt, Se, Ag, Au και σχετίζεται με τον βορνίτη. Εμφανίζεται στις φλέβες M-5.
- **Η ομάδα Pd-Te-Bi:** Η ομάδα αυτή σχετίζεται με τον βορνίτη και τον χαλκοπυρίτη και εμφανίζεται στις φλέβες M-5. Περιέχει Pt και μικρές ποσότητες Ag, Se και Sb.



Σχ. 4.5.2. Φωτογραφίες της ομάδας PGM και πολύτιμων μετάλλων στο κοίτασμα των Σκουριών (McFall 2016).



Σχ. 4.5.3. Οι ομάδες των στοιχείων της πλατίνας (PGM) κατανομημένες στις ομάδες φλεβών της μεταλλοφορίας (McFall et al. 2018).

Από τα στοιχεία των PGM, που βρέθηκαν στο κοίτασμα, αναγνωρίστηκαν ο sorcheite ($\text{Ag}_4\text{Pd}_3\text{Te}_4$), ο testibiopalladite ($\text{PdTe}(\text{Sb},\text{Te})$), ο merenskyite ($((\text{Pd},\text{Pt})(\text{Te},\text{Bi})_2)$) και ο sobolevskite (PdBi). Ο sorcheite, ο sobolevskite και ο testibiopalladite παρουσιάζονται μόνο στο κοίτασμα των Σκουριών και σε κανένα άλλο πορφυριτικό κοίτασμα. Επίσης, στο κοίτασμα των Σκουριών βρέθηκαν και ημι-πολύτιμα μέταλλα ως εγκλείσματα στον βορνίτη και τον χαλκοπυρίτη και ελεύθερα στις M-5 φλέβες. Τα ημι-πολύτιμα μέταλλα που αναγνωρίστηκαν είναι το electrum (AgAu), empressite (AgTe), hessite (Ag_2Te) και το stützite ($\text{Ag}_{5-x}\text{Te}_3$, $x=0.24-0.36$) (McFall 2016).

Τα κοιτάσματα εμπλουτισμένα από στοιχεία PGE είναι κυρίως κοιτάσματα σε post-subduction συνθήκες με οξειδωμένα μάγματα. Στην περίπτωση των Σκουριών λαμβάνοντας υπόψη την χημεία και τις συνθήκες των ρευστών, αλλά και την ορυκτολογία των PGE, διαπιστώθηκαν πέντε πιθανοί μηχανισμοί εμπλουτισμού του κοιτάσματος με PGE:

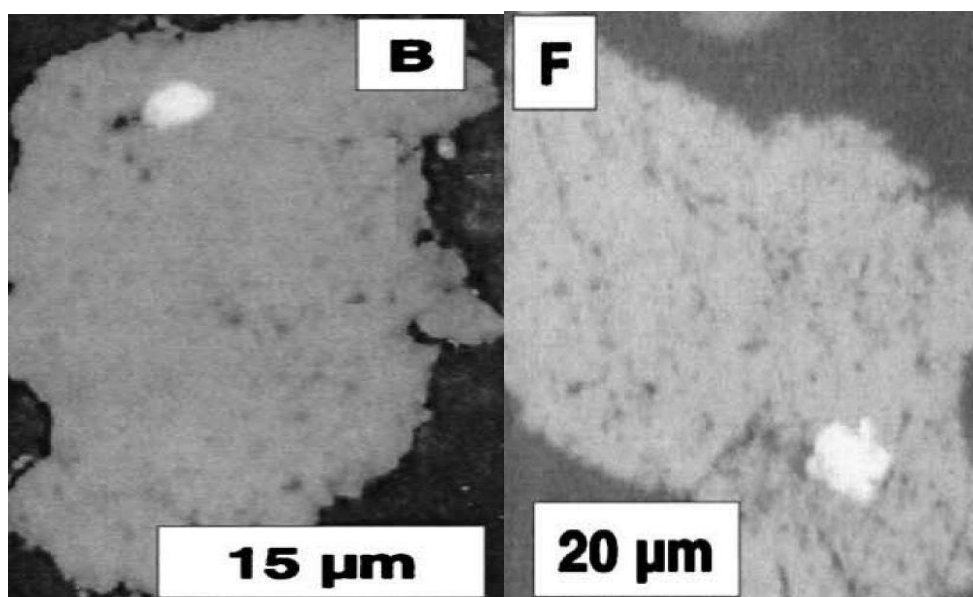
- Η οξειδωμένη πηγή μάγματος, η οποία επιτρέπει την άνοδο των PGE σε υψηλότερα σημεία του φλοιού και αυτό παρατηρείται από την παρουσία μαγνητίτη στις διεισδύσεις.
- Η προσθήκη S, Au, Cu, PGE κατά το τελευταίο στάδιο (late mafic dyking event) στον μαγματικό θάλαμο του κοιτάσματος.
- Ο σχηματισμός τήγματος σουλφιδίων που δεν αναμειγνύονται στον μαγματικό θάλαμο του κοιτάσματος με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η συγκέντρωση διάσπαρτων PGE, Bi, Te και Au. Οι συνθήκες που επιτρέπουν τον σχηματισμό του τήγματος των σουλφιδίων είναι η παρουσία μαγνητίτη και η προσθήκη βασικού τήγματος.
- Οι συνθήκες των ρευστών, που επιτρέπουν την αποτελεσματική μεταφορά των PGE και ημι-πολύτιμων μετάλλων κάτω από υδροθερμικές συνθήκες.
- Η παρουσία μεγάλης συγκέντρωσης ημι-πολύτιμων μετάλλων λειτουργεί ως συλλέκτης των PGE.

4.6 Ο χρυσός (Au) στις Σκουριές

Στα πορφυριτικά κοιτάσματα συνήθως ο χαλκός και ο χρυσός εμφανίζονται μαζί από τα πρώτα στάδια της μεταλλογένεσης και των εξαλλοιώσεων και η περιεκτικότητά τους είναι μεγαλύτερες στο κεντρικό τμήμα του κοιτάσματος. Η περιεκτικότητα σε χρυσό στα πορφυριτικά κοιτάσματα περιορίζεται από την ποσότητα του χρυσού που μπορεί να φιλοξενηθεί στα μεικτά θειούχα ορυκτά κατά τον σχηματισμό του κοιτάσματος σε υψηλές

θερμοκρασίες και συνήθως χάνετε είτε σε ατμούς υψηλής θερμοκρασίας είτε σε χαμηλής θερμοκρασίας ρευστά που προκαλούν αλλοίωση (Kesler et al. 2002).

Ο χρυσός στο κοίτασμα των Σκουριών συναντάται είτε ως αυτοφυής στις φλέβες του κοιτάσματος, είτε μέσα στα μεικτά θειούχα ορυκτά (Hoss et al. 2023). Αυτοφυής εμφανίζεται κυρίως στον χαλκοπυρίτη, ενώ εμφανίζεται στον βορνίτη, τον κοβελίνη και τον χαλκοσίνη ως μικρά εγκλείσματα (Σχ. 4.6.1). Ο χαλκοσίνης και ο κοβελίνης παρατηρείται πως δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλες περιεκτικότητες με 13ppm και 24.1ppm Au αντίστοιχα, αλλά έχουν υψηλότερες τιμές από τα άλλα θειούχα ορυκτά. Επίσης, παρατηρείται πως ο χρυσός στον κοβελίνη βρίσκεται σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σχέση με τον χαλκό που περιέχει ο κοβελίνης και πως περιέχει 7-30 φορές περισσότερο χρυσό από τον βορνίτη. Στο κοίτασμα διαπιστώνεται μια κατακόρυφη ζώνωση, όπου ο χρυσός είναι πιο άφθονος στα μεγαλύτερα βάθη του κοιτάσματος και αυτό παρατηρείται μέχρι τα 700μ. βάθος (Kesler et al. 2002).



Σχ. 4.6.1. Εγκλείσματα Au σε χαλκοσίνη στο κοίτασμα των Σκουριών (Kesler et al. 2002).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Eldorado Gold Corp., 2023. Assets; Resources and Reserves.

- Eliopoulos, D. G., Economou-Eliopoulos, M., & Zelyaskova-Panayiotova, M. (2014). Critical factors controlling Pd and Pt potential in porphyry Cu–Au deposits: Evidence from the Balkan Peninsula. *Geosciences*, 4(1), 31-49.
- Elshkaki, A., Graedel, T. E., Ciacchi, L., & Reck, B. K. (2016). Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global environmental change*, 39, 305-315.
- Forward, P., Francis, A., Lidell, N., 2010. Technical Report on the Stratoni Project Pb-Zn-Ag Deposit, Northern Greece. European Goldfields Limited, p. 49.
- Forward, P., Smith, D.J.F., Eng, C. & Francis, A., 2011. Skouries Cu / Au Project , Greece NI 43-101 Technical Report,
- Frei P (1995) Evolution of Mineralizing Fluid in the Porphyry Copper System of the Skouries Deposit, Northern Chalkidiki (Greece): Evidence from combined Pb-Sr and Stable Isotope Data. *Economic Geology* 90:746-762
- Hahn, A., 2015. Nature, timing and geodynamic context of polymetallic mineralisation in the Kassandra mining district, North Greece. Kingston University.
- Hahn, A., Naden, J., Treloar, P. J., Kiliass, S. P., Rankin, A. H., & Forward, P. (2012). A new time frame for the mineralisation in the Kassandra mine district, N Greece: deposit formation during metamorphic core complex exhumation. *Journal of Earth Sciences*, 96, 1079-1099.
- Harangi, S., Downes, H., Thirlwall, M., & Gméling, K. (2007). Geochemistry, petrogenesis and geodynamic relationships of Miocene calc-alkaline volcanic rocks in the Western Carpathian arc, eastern central Europe. *Journal of petrology*, 48(12), 2261-2287.
- Harris, A. C., Cooke, D. R., Blackwell, J. L., Fox, N., & Orovan, E. A. (2013). Volcanotectonic setting of world-class alkalic porphyry and epithermal Au±Cu deposits of the southwest Pacific.
- Henckens, M. L. C. M., Driessen, P. P. J., & Worrell, E. (2018). Molybdenum resources: Their depletion and safeguarding for future generations. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 61-69.
- Höss, A., Klemd, R., Keith, M., Haase, K. M., Melfos, V., Gerlach, L., ... & Voudouris, P. (2023). Evolution of the Skouries porphyry Cu-Au system by trace element variations.
- Kalogeropoulou, S. I., Kiliass, S. P., Bitzios, D. C., Nicolaou, M., & Both, R. A. (1989). Genesis of the Olympias carbonate-hosted Pb-Zn (Au, Ag) sulfide ore deposit, eastern Chalkidiki Peninsula, northern Greece. *Economic Geology*, 84(5), 1210-1234.

- Kesler, S. E., Chrysoulis, S. L., & Simon, G. (2002). Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews*, 21(1-2), 103-124.
- Kleijn, R., Van der Voet, E., Kramer, G. J., Van Oers, L., & Van der Giesen, C. (2011). Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy*, 36(9), 5640-5648.
- Kockel F, Mollat H, Walther H (1977) Erläuterung zur geologischen Karte der Chalkidiki und angrenzender gebiete. 1:100,000 Nord Griecheland , Hannover, Germany, 199
- Kroll, T., Müller, D., Seifert, T., Herzig, P. M., & Schneider, A. (2002). Petrology and geochemistry of the shoshonite-hosted Skouries porphyry Cu–Au deposit, Chalkidiki, Greece. *Mineralium Deposita*, 37, 137-144.
- Mao, J., Bierlein, F. P., Economou-Eliopoulos, M., & Eliopoulos, D. G. (2005). Mineralogical and geochemical characteristics of the Skouries porphyry-Cu-Au-Pd-Pt deposit (Greece): Evidence for the precious metal. In *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge: Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting Beijing, China, 18–21 August 2005* (pp. 935-938). Springer Berlin Heidelberg.
- McFall, K. A. (2016). *Critical metals in porphyry copper deposits* (Doctoral dissertation, University of Southampton).
- Mindat.org
- Perantonis G (1982) Genesis of porphyry copper deposits in Chalkidiki peninsula and W. Thrace, Greece. PhD Thesis, University of Athens
- Richards, J. P. (2015). Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. *Ore Geology Reviews*, 70, 323-345.
- Roşu, E., Seghedi, I., Downes, H., Alderton, D. H., Szakács, A., Pécskay, Z., ... & Nedelcu, L. (2004). Extension-related Miocene calc-alkaline magmatism in the Apuseni Mountains, Romania: origin of magmas. *Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology*, 84(1), 153-172.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), 3-41.
- Sinclair, W. D. (2007). Porphyry deposits. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, 5, 223-243.
- 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.

Siron, C. R., Thompson, J. F., Baker, T., Friedman, R., Tsitsanis, P., Russell, S.,... & Mortensen, J. (2016). Magmatic and metallogenic framework of Au-Cu porphyry and polymetallic carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining district, northern Greece.

Teseletso, L. S., & Adachi, T. (2022). Long-term sustainability of copper and iron based on system dynamics model. *Resources*, 11(4), 37.

www.hellas-gold.com

www.metalleiachalkidikis.gr

www.orykta.gr

Zientek, M. L., Loferski, P. J., Parks, H. L., Schulte, R. F., & Seal II, R. R. (2017). *Platinum-group elements* (No. 1802-N). US Geological Survey.

Βασιλάτος, Χ. (2013). *Συγκριτική μελέτη της γεωχημείας ιχνοστοιχείων και στοιχείων της ομάδας των σπάνιων γαιών (REE), τριτογενών γρανιτικών σωμάτων της Κεντρικής Μακεδονίας, που σχετίζονται ή μη, με γνωστή μεταλλοφορία: προσδιορισμός του γεωτεκτονικού περιβάλλοντος γένεσης των γρανιτικών σωμάτων* (Doctoral dissertation, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος)

Γαλανόπουλος, Β., & Θεοδορούδης, Α. (1994). Gold silver and base metals in the Manganese mineral assemblages of the NE Chalkidiki ore deposits= Χρυσός, Αργυρός και βασικά μέταλλα στις παραγενέσεις. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 30(1), 507-518.

Μέλφος Β., Βουδούρης Π., Σακελλάρης Γ. Α., 2021, Γενική Κοιτασματολογία.

Μέλφος Β., Θεσσαλονίκη 2020. Υποηφαιστειακά κοιτάσματα ή κοιτάσματα πορφυριτικού τύπου (παρουσίαση)

Μέλφος, Β., & Βουδούρης, Π. (2022). Κοιτάσματα της Ελλάδας [Προπτυχιακό εγχειρίδιο].

Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-32>

Μουντράκης Δ. Μ., 2020. Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας. University Studio Press, Β' Έκδοση. Θεσσαλονίκη.