



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



ΜΑΝΩΛΑ Μ. ΓΕΩΡΓΙΑ
ΑΕΜ 5795

ΤΟ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2022



ΜΑΝΩΛΑ Μ. ΓΕΩΡΓΙΑ

ΤΟ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Μανωλά Μ. Γεωργία, 2022
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Μανωλά Μ. Γεωργία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Το πορφυριτικό κοίτασμα στις Σκουριές Χαλκιδικής - *Διπλωματική Εργασία*

© Manola M. Georgia, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2022

All rights reserved.

The Skouries porphyry 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: Ορυκτά από το κοίτασμα στις Σκουριές Χαλκιδικής (Φωτογραφίες Βασίλης Μέλφος)





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΠΟΡΦΥΡΥΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ.....	8
3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ «ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΑΣΣΑΝΔΡΑΣ».....	16
4. Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΒΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ.....	19
5. Η ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ Cu-Au ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ.....	25
5.1 Πετρογραφικά χαρακτηριστικά των μονζονιτικών διεισδύσεων.....	29
5.2 Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις.....	31
5.3 Ρευστά εγκλείσματα.....	32
6. ΠΑΡΟΥΣΙΑ PGE ΚΑΙ Au ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ.....	35
6.1 Στοιχεία της πλατίνας-PGE.....	35
6.2 Χρυσός-Au.....	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	40



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πορφυριτικό κοίτασμα στις Σκουριές Χαλκιδικής

Γεωργία Μανωλά

Η παρούσα διπλωματική πτυχιακή εργασία αφορά την μελέτη του πορφυριτικού κοιτάσματος στις Σκουριές της ΒΑ Χαλκιδικής, νότια του ρήγματος του Στρατωνίου. Πρόκειται για μία μεταλλοφορία με σημαντικές περιεκτικότητες σε χρυσό και χαλκό, φιλοξενούμενη μέσα σε ένα σύμπλεγμα μονζονιτικών διεισδύσεων και στα γειτονικά μεταμορφωμένα πετρώματα. Το σύμπλεγμα αυτό αποτελείται από τα εξής πετρώματα: (1) ρόδινος μονζονίτης, (2) κύριος μονζονίτης, (3) intra-mineral και (4) στείρος μονζονίτης. Η κυκλοφορία των υδροθερμικών διαλυμάτων μέσα στα ρήγματα και τους πόρους δημιούργησε τρεις ζώνες εξαλλοίωσης: την ποτασσική, την προπυλιτική και την σερικιτική, δίνοντας η κάθε μία διαφορετική ορυκτολογική παραγένεση. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται με την μορφή φλεβών και φλεβιδίων. Στο κοίτασμα σημειώνονται σημαντικές περιεκτικότητες σε Pt, Pd και Au.



ABSTRACT

Skouries porphyry deposit in Chalkidiki

Georgia Manola

This diploma thesis focuses on the study of the porphyry type deposit in Skouries, Northeastern Chalkidiki, south of the Stratoni fault. This mineralization has significant gold and copper contents, and is hosted in a complex of monzonite intrusions and the adjacent metamorphic rocks. This complex consists of: (1) pink monzonite, (2) main monzonite, (3) intra-mineral monzonite and (4) barren monzonite. The circulation of the hydrothermal fluids inside the faults and intra-mineral pores has created three zones of alteration: potassic, propylitic and sericitic alteration, forming different mineral paragenesis. The mineralization is found in the form of veins and veinlets. In the porphyry deposit considerable amounts of Pt, Pd and Au were found.



Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε τον Οκτώβριο του 2021 από τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την υπόδειξη του θέματος, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη του πορφυριτικού κοιτάσματος των Σκουριών Χαλκιδικής, κοιτάσμα παγκόσμιας κλάσης με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα μέταλλα εξόρυξης του από τον άνθρωπο. Χαρακτηριστικό του γνώρισμα είναι η παρουσία μετάλλων της ομάδας της πλατίνας, χρυσού και χαλκού. Η μελέτη εξετάζει τις διεργασίες σχηματισμού, τη δομή και τα ορυκτά και τα στοιχεία που συμβάλλουν στην διαμόρφωση του κοιτάσματος.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Β. Μέλφο, που ήταν ο επιβλέπων της πτυχιακής αυτής εργασίας, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, όπως και για την συνεχή βοήθειά του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

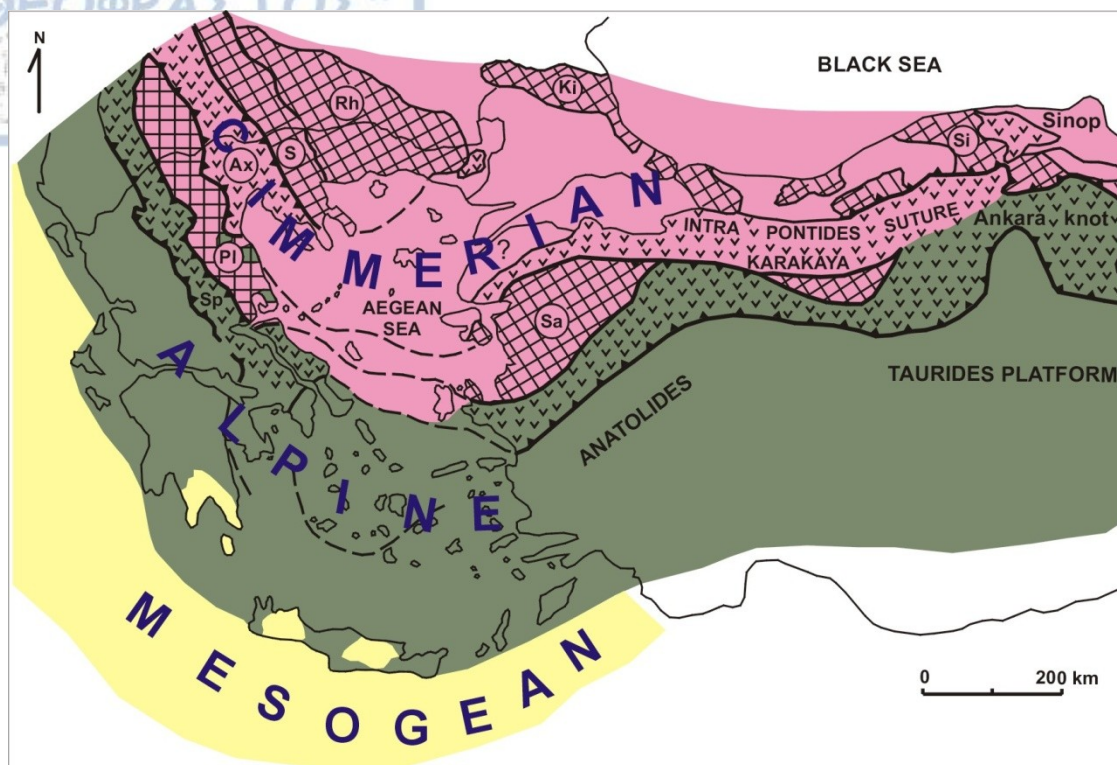
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την αρχαιότητα οι άνθρωποι είχαν εντάξει τα ορυκτά και τα πετρώματα στην καθημερινότητα τους. Κατασκεύαζαν εργαλεία για το κυνήγι, για τις καλλιέργειες, ακόμη και κοσμήματα από χρυσό και ασήμι. Η εξόρυξη και η εκμετάλλευση τους χρονολογείται από το την προϊστορική εποχή και αφορούσε τον χρυσό, τον χαλκό και το σίδηρο. Η περιοχή της Χαλκιδικής έγερνε το ενδιαφέρον των διαφόρων πολιτισμών, κυρίως για χρυσό και ασήμι, από το 350 π.Χ. κατά την κυριαρχία του Φιλίππου Β' και του ανάδοχου του, Μεγάλου Αλεξάνδρου. Ωστόσο, κατά την Ρωμαϊκή αυτοκρατορία η εκμεταλλευτική δραστηριότητα ήταν περιορισμένη και υπήρξε μια μικρή ανάπτυξη, η οποία διακοπτόταν συνεχώς, κατά την Βυζαντινή και Οθωμανική αυτοκρατορία. Σημαντική άνοδος υπήρξε τον 20^ο αιώνα, κυρίως τις δεκαετίες του 1960 και 1970, με τη χρήση σύγχρονων μέσων έρευνας και εκμετάλλευσης. Σημαντικές ενέργειες στην περιοχή έλαβαν χώρα οι οποίες συνέβαλλαν να αξιοποιηθούν ορισμένα από τα κοιτάσματα της Χαλκιδικής και άλλα να είναι στο στάδιο της έρευνας.

Τα κοιτάσματα πορφυριτικού τύπου περιέχουν σχετικά μικρές περιεκτικότητες μετάλλων (0,25-1κβ% Cu και <1 g/t Au) αλλά χαρακτηρίζονται με τεράστια αποθέματα λόγω των μεγάλων διαστάσεων των υποηφαιστειακών πετρωμάτων. Η εκμετάλλευση τους γίνεται σε όλο το πέτρωμα για αυτό και τα περισσότερα από αυτά τα μεταλλεία είναι επιφανειακά. Στην Ελλάδα τα πετρώματα ξενιστές που φιλοξενούν την μεταλλοφορία, προέρχονται από τον μαγματισμό που εμφανίστηκε στον ελληνικό χώρο κατά Ολιγόκαινο και το Μειόκαινο, εξαιτίας διαφόρων τεκτονικών διεργασιών.

Οι Ελληνίδες ζώνες και γενικότερα ο Ελληνικός χώρος διαμορφώθηκαν χάρη στις τεκτονορογενετικές διαδικασίες του Αλπικού κύκλου. Ο γεωτεκτονικός αυτός κύκλος σχετίζεται άμεσα με τον ωκεανό της Τηθύος.

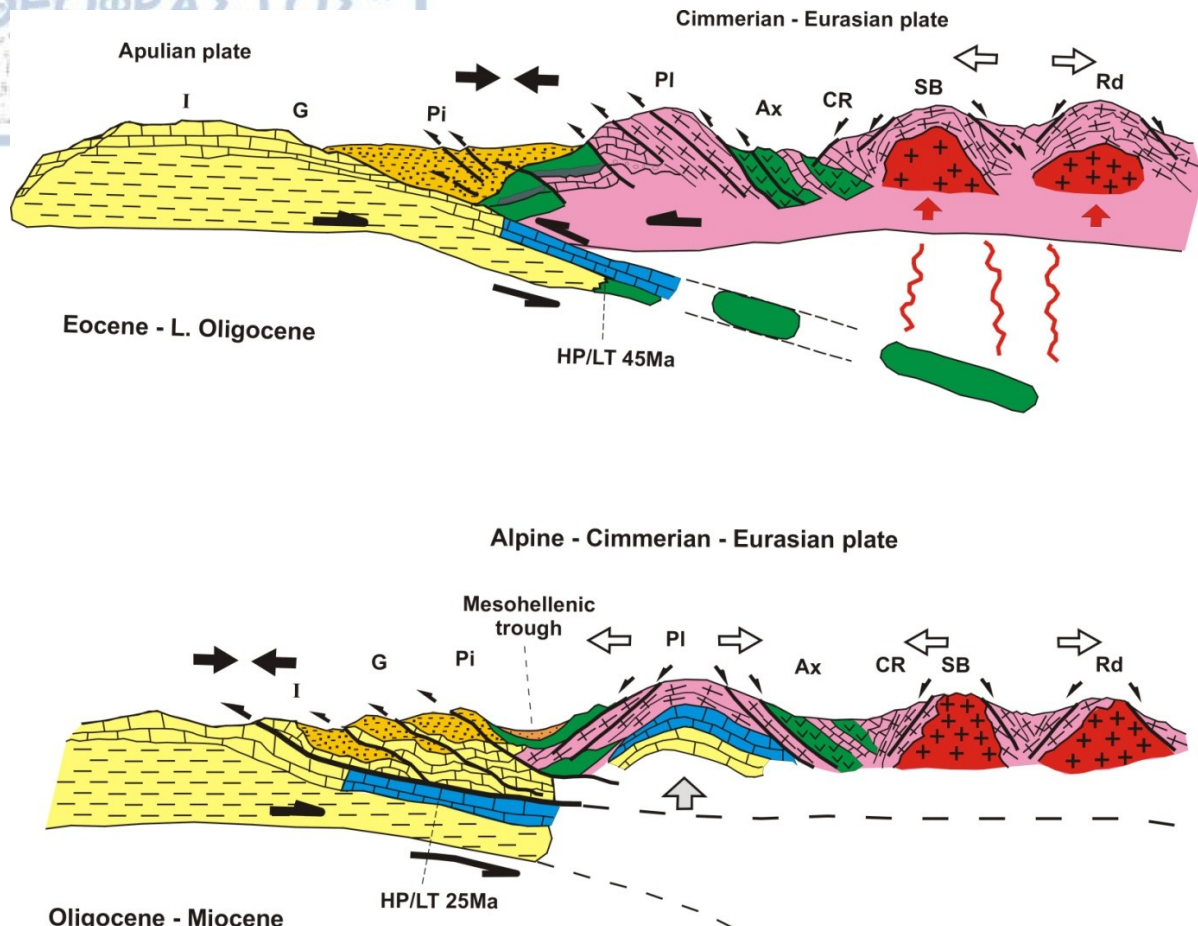
Το Ελληνικό ορογενές συνίσταται από τρεις διαφορετικές ορογενετικές φάσεις: την Κιμμερική, την Αλπική και την Μεσογειακή (Σχ. 1.1). Η Κιμμερική Ορογενετική φάση σχηματίστηκε πριν το Άνω Ιουρασικό και περιλαμβάνει τις ζώνες της Πελαγονικής, Σερβομακεδονικής, Ροδόπης και τις ζώνες των ωκεάνιων λεκανών (ζώνη Αξιού και Περιοδοπική ζώνη). Η Αλπική Ορογενετική φάση συγκροτήθηκε κατά το Κρητιδικό-Παλαιογενές την οποία συνιστούν οι ζώνες της Υποπελαγονικής, Πίνδου, Γαβρόβου, Ιονίου και Παξών. Τέλος, η Μεσογειακή Ορογενετική φάση συντέθηκε κατά το Μειόκαινο-Πλειόκαινο και η εμφάνιση της τοποθετείται νότια της Πελοποννήσου και στην νήσο Κρήτη (Μουντράκης 2020).



Σχ. 1.1. Χάρτης αναπαράστασης των τριών ορογενετικών φάσεων του Ελληνικού χώρου και η επέκταση μέχρι την Μ. Ασία (Μουντράκης 2020).

Αξιοσημείωτη είναι η επιρροή των δύο μεταμορφικών ζωνών HP/LT (υψηλής πίεσης-χαμηλής θερμοκρασίας) κατά το Ηώκαινο (45 Ma) και το Άνω Ολιγόκαινο-Μειόκαινο (25 Ma) (Σχ. 1.2). Ιδιαίτερα σημαντική είναι η μεταμόρφωση που προκλήθηκε από την υποβύθιση της Απουλίας κάτω από την Ευρασία. Προκλήθηκε η μεταμόρφωση των υπαρχόντων πετρωμάτων (ωκεάνιων και των ανθρακικών), ενώ ταυτόχρονα, στην Ελληνική Ενδοχώρα (μάζα Ροδόπης και Σερβομακεδονική μάζα) προκλήθηκε θέρμανση και εφελκυσμός. Έτσι, επήλθε ανύψωση και αναθόλωση του ηπειρωτικού φλοιού και μαγματική άνοδος. Χάρη στην άνοδο του μάγματος σχηματίστηκαν τα γρανιτικά σώματα που συναντώνται στην Χαλκιδική (και ολόκληρης της Ελληνικής Ενδοχώρας) μέσα στα μεταμορφωμένα πετρώματα (Μουντράκης 2020).

Η μάζα της Ροδόπης διαιρείται σε τρεις τεκτονικές περιοχές: το βόρειο μεταμορφικό σύμπλεγμα της Ροδόπης, το νότιο μεταμορφικό σύμπλεγμα της Ροδόπης και τη Σερβομακεδονική μάζα. Τη Σερβομακεδονική μάζα απαρτίζουν οι ενότητες Βερτίσκου και η ενότητα Κερδυλλίων. Στη Χαλκιδική η ενότητα Βερτίσκου της Σερβομακεδονικής μάζας διαχωρίζεται από το νότιο μεταμορφικό σύμπλεγμα της Ροδόπης λόγω του ρήγματος αποκόλλησης των Κερδυλλίων και την ζώνη ραφής του Άθως-Βόλβης (Σχ 4.2).



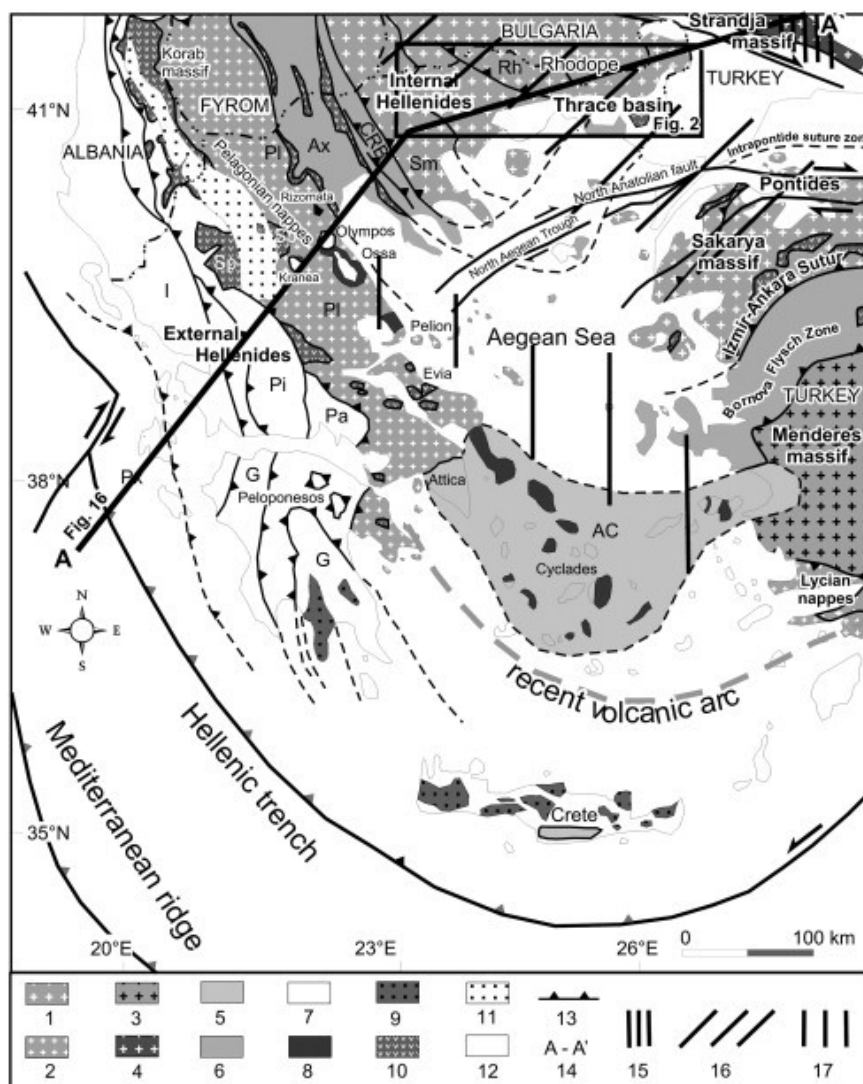
Σχ. 1.2. Σχηματικές τομές αναπαράστασης της εξέλιξης των Ελληνίδων ζωνών κατά την Αλπική ορογένεση (Μουντράκης 2020).

Η ενότητα Βερτίσκου (ηλικία σχηματισμού είναι το Σιλούριο) άνηκε στο ηφαιστειακό μαγματικό τόξο της Γκοντβάνας, το οποίο συσσωρεύτηκε στο Ευρασιατικό περιθώριο κατά το Λιθανθρακοφόρο. Τα πετρώματα της ενότητας αυτής είναι κυρίως λευκοκρατικοί γνεύσιοι, κυανοσχιστόλιθοι και σταυρολιθικοί σχιστόλιθοι, οι οποίοι δέχτηκαν την αμφιβολιτική μεταμόρφωση του Άνω Ιουρασικού- Κάτω Κρητιδικού.

Η ενότητα των Κερδυλλίων προέρχεται από ένα μαγματικό τόξο ηλικίας Περμίου-Λιθανθρακοφόρου, το οποίο καλύφθηκε από τα ανθρακικά πετρώματα της Τηθύος. Η ενότητα αυτή παρουσίασε ηφαιστειακή δραστηριότητα κατά το Άνω Ιουρασικό- Κρητιδικό αλλά και κατά το Κάτω Μειόκαινο, συμβάλλοντας στην εκταφή του μεταμορφικού θόλου. Την ενότητα συνιστούν ορθογνεύσιοι, παραγνεύσιοι, μάρμαρα, μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι και αμφιβολίτες.

Κατά το Τριαδικό υπήρξε ρήξη του Ευρωπαϊκού τόξου με αποτέλεσμα το άνοιγμα του ωκεανού του Βαρδάρη, την ανάπτυξη των μαφικών ενοτήτων και την εισχώρηση Α τύπου γρανιτών στην σειρά Αρναίας-Κερκίνης. Το κλείσιμο του ωκεανού ολοκληρώθηκε κατά το

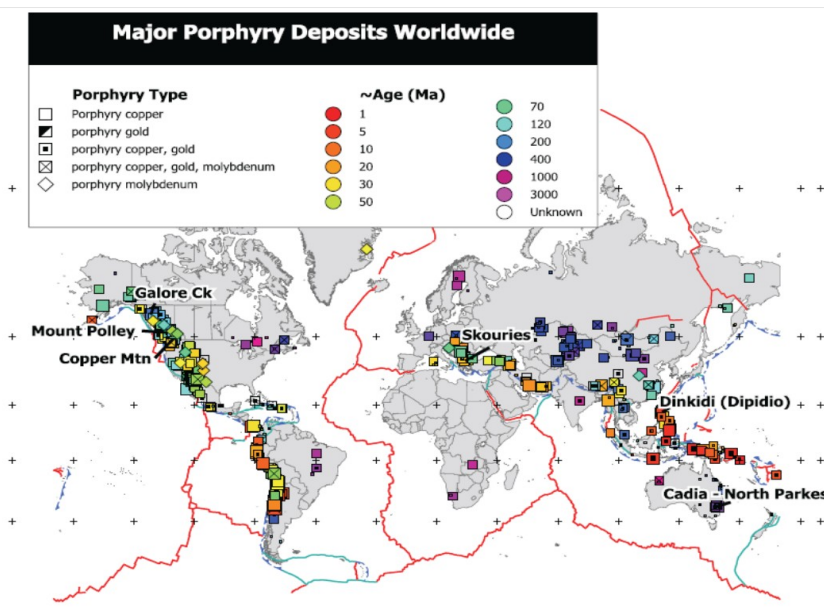
Κρητιδικό με την αμφιβολιτική μεταμόρφωση ασκώντας επίδραση στα πετρώματα της Σερβομακεδονικής και στους Τριαδικούς γρανίτες. Στην ενότητα των Κερδυλλίων παρατηρήθηκε ελαστική παραμόρφωση, η οποία συνοδεύτηκε με την άνω πρασινοσχιστολιθική-κάτω αμφιβολιτική μεταμόρφωση. Στην περιοχή του Αιγαίου υπήρξε έκταση κατά το Μέσο Ηώκαινο-Μέσο Ολιγόκαινο. Η έκταση αυτή επηρέασε και την Χαλκιδική, καθώς περιστράφηκε δεξιόστροφα κατά 30° και υπήρξε εκτατική μετατόπιση 120 km. Η εκτατική αυτή μετατόπιση οδήγησε στην εκταφή του νότιου μεταμορφικού συμπλέγματος της Ροδόπης. Στο Ολιγόκαινο ακολούθησε έντονη μαγματική δραστηριότητα λόγω της σύγκλισης και της έκτασης του φλοιού. Στο σχήμα 1.3 αποτυπώνεται η σημερινή κατάσταση που επικρατεί στον ελληνικό χώρο.



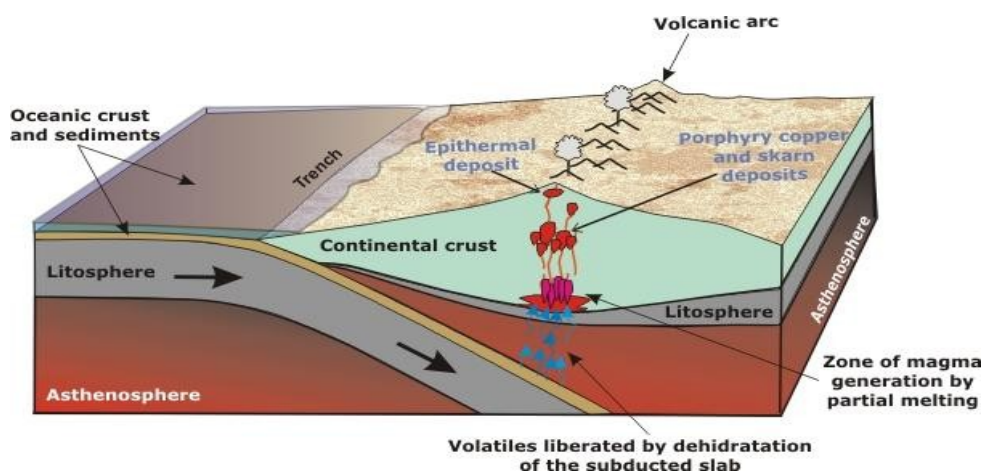
Σχ. 1.3. Γεωλογικός χάρτης των Ελληνίδων ζωνών απεικονίζοντας τις κύριες δομές και την συνέχεια τους στις διπλανές ορογενετικές ζώνες (Kiliyas et al. 2013).

2. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

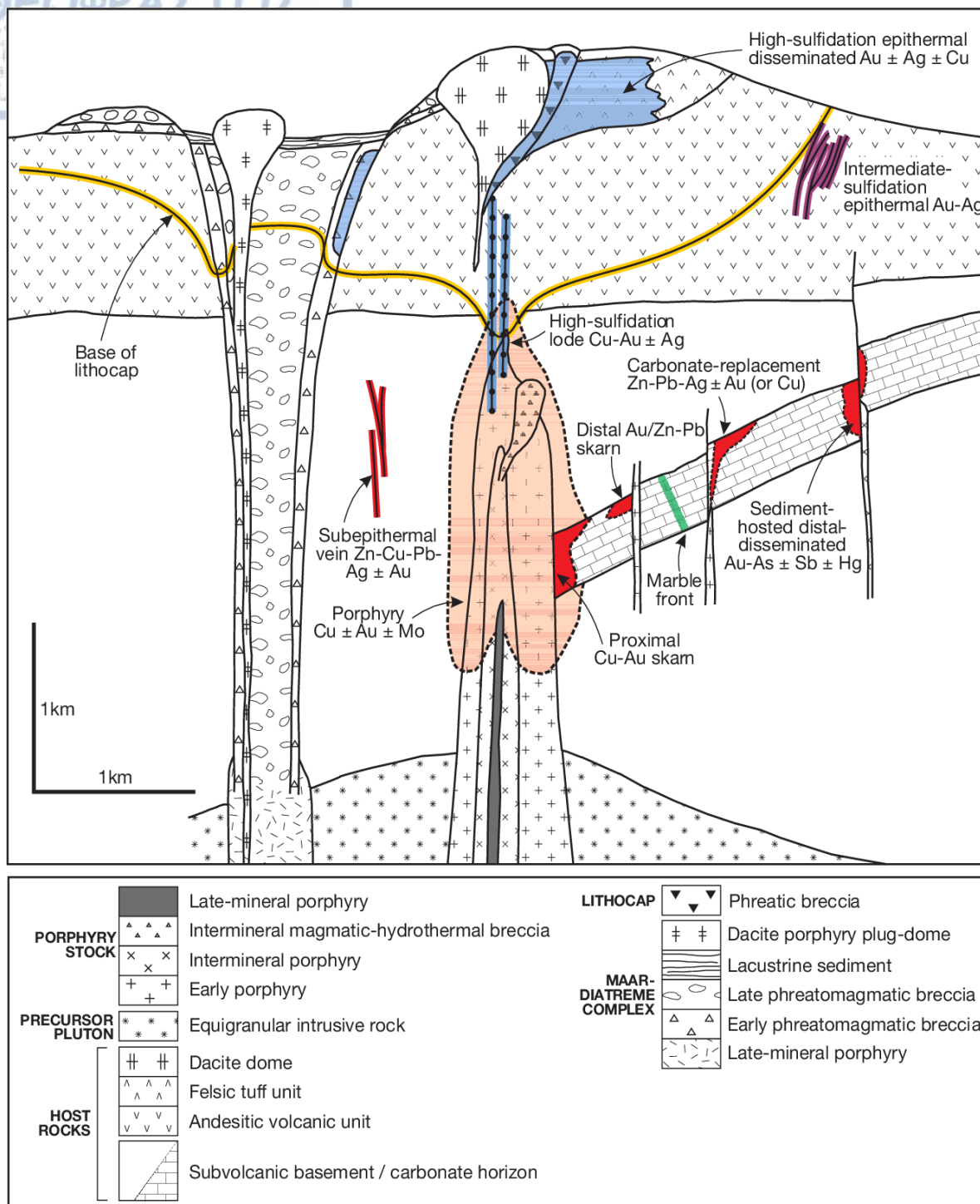
Οι σημαντικότεροι τύποι αυτών των κοιτασμάτων είναι του Cu, Au, Mo, W και Sn. Τα κοιτάσματα αυτά δημιουργούνται σε μικρό βάθος, από 2 km έως σχεδόν την επιφάνεια και συνδέονται με τα υποηφαιστειακά πετρώματα. Τα πετρώματα που φιλοξενούν την μεταλλοφορία είναι όξινης και ενδιάμεσης σύστασης (γρανίτης, συηνίτης, γρανοδιορίτης, διορίτης, χαλαζιακός διορίτης) (Σχ. 2.3). Σχετίζονται με ασβεσταλκαλικό ή αλκαλικό μαγματισμό, ο οποίος δηλώνει τη συσχέτιση των πετρωμάτων με την υποβύθιση των πλακών σε ορογενετικές ζώνες (Σχ. 2.2). Εντοπίζονται με τη μορφή φλεβών, διαποτίσεων (διάσπαρτη μεταλλοφορία) και πλέγματος φλεβιδίων (stockwork) στα υποηφαιστειακά (πορφυριτικά) ή γειτονικά πετρώματα (Σχ. 2.4). Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα κοιτάσματα σε παγκόσμια κλίμακα.



Σχ. 2.1. Τα πιο σημαντικά πορφυριτικά κοιτάσματα παγκοσμίως (Logan and Mihalynuk 2014)

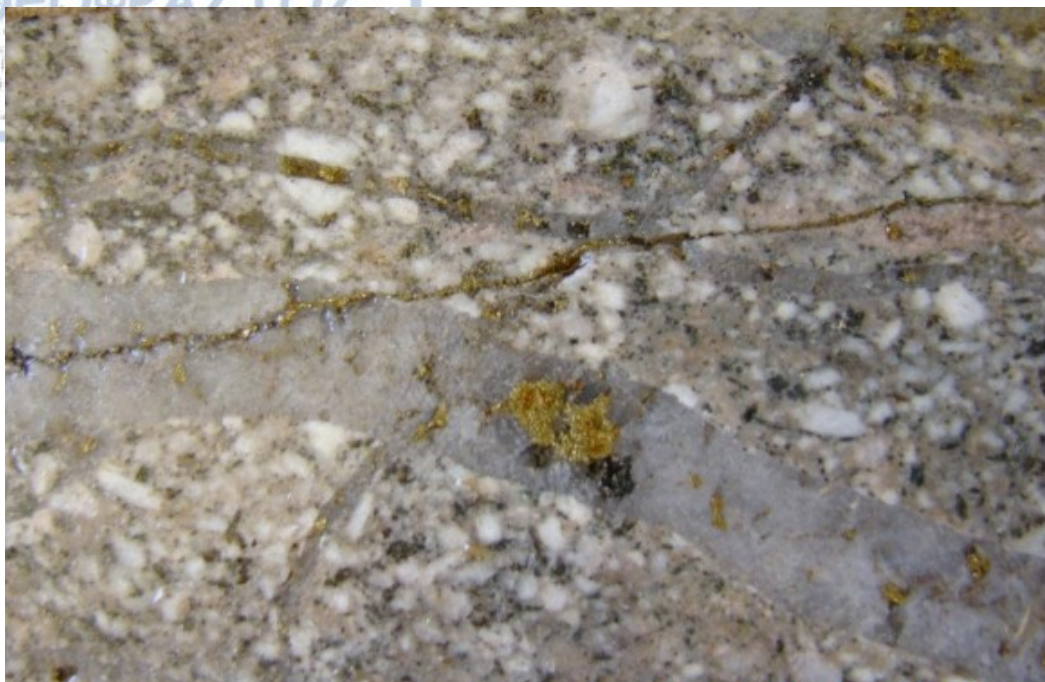


Σχ. 2.2. Απεικόνιση του τρόπου σχηματισμού των πορφυριτικών, επιθερμικών και τύπου skarn κοιτασμάτων (www.geo.fu-berlin.de)



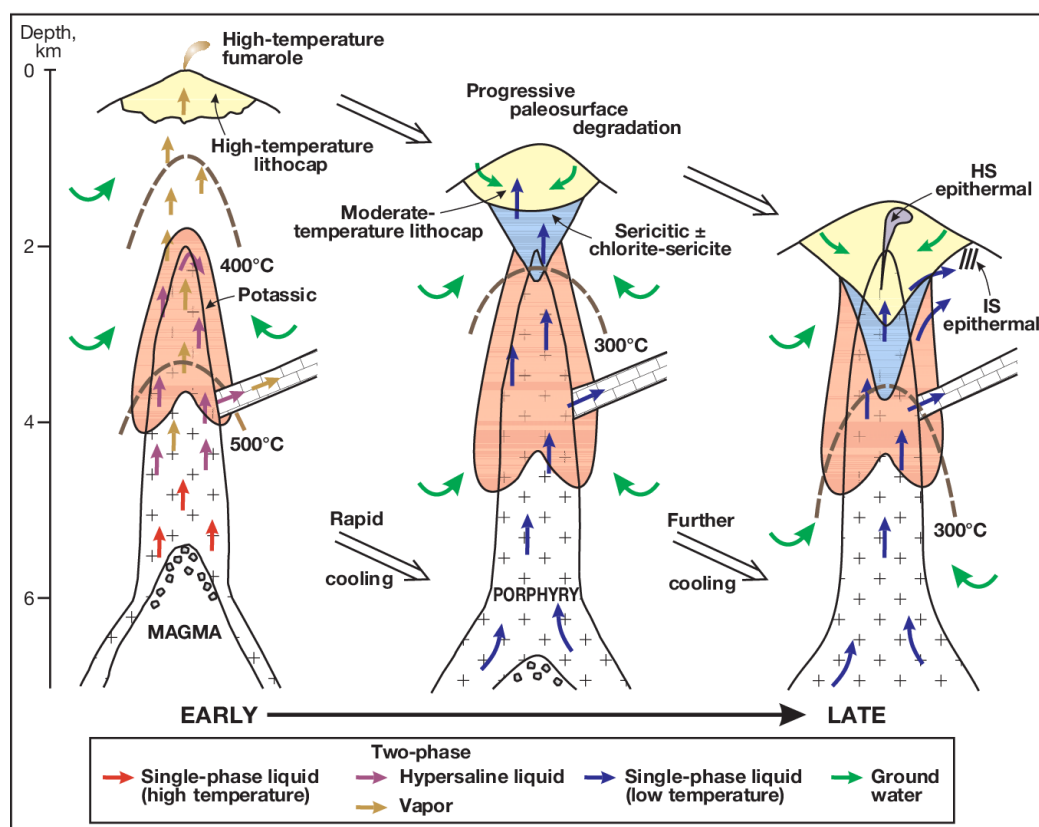
Σχ. 2.3. Ανατομία των πορφυριτικών κοιτασμάτων (Sillitoe 2010)

Καθοριστική είναι η σημασία των υδροθερμικών μεταλλοφόρων διαλυμάτων, καθώς είναι πλούσια σε μέταλλα, συμβάλλοντας στον σχηματισμό μιας μεταλλοφορίας. Ψύχονται με μεγάλη ταχύτητα λόγω του μικρού βάθους και αυτό κατευθύνει το μεταλλικό τους περιεχόμενο σε σύγχρονη απόθεση. Παρατηρείται λοιπόν μια πολύ έντονη τηλεσκοπική σύμπτυξη, με τους ιστούς και τις υφές να αποτυπώνουν ταχεία ψύξη.



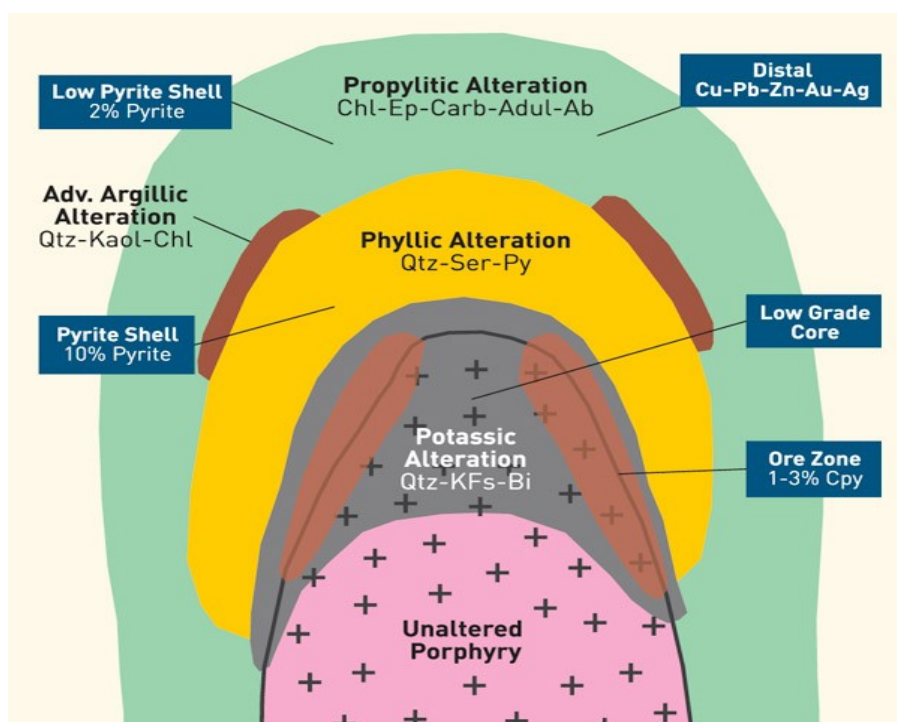
Σχ. 2.4. Χαλκοπυρίτης μέσα σε φλέβες χαλαζία, Σκουριές Χαλκιδικής (Φωτογραφία: Β. Μέλφος)

Τα κυριότερα ορυκτά των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι ο σιδηροπυρίτης, ο χαλκοπυρίτης, ο βορνίτης, $\pm$ χρυσός, $\pm$ μολυβδαινίτης. Επιπλέον, περιέχουν σημαντικές περιεκτικότητες σε Au, Ag, Sn, Pt, Pd, W, Re, Te τα οποία εξορύσσονται ως παραπροϊόντα. Το σχήμα 2.5 δείχνει την προέλευση των μετάλλων.



Σχ. 2.5. Τα μέταλλα προέρχονται από την καταδύομένη λιθοσφαιρική πλάκα και από τα γειτονικά πετρώματα (Sillitoe 2010)

Το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι οι ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης. Τα υδροθερμικά διαλύματα δημιουργούν εκτεταμένες ζώνες εξαλλοίωσης, οι οποίες επηρεάζουν την ορυκτολογική και χημική σύσταση των αρχικών πετρωμάτων (τόσο των μαγματικών όσο και των γειτονικών). Τα υδροθερμικά διαλύματα συνεχίζουν να κυκλοφορούν και μετά τη κρυστάλλωση του πετρώματος, μέσα σε αυτό αλλά και μέσω των ρηγμάτων, των διακλάσεων και των πόρων. Στα κοιτάσματα αυτά παρατηρείται μια μεταβολή της περιεκτικότητας σε χαλκό και σιδηροπυρίτη από τον πυρήνα προς την περιφέρεια. Συγκεκριμένα, έχουν ταξινομηθεί τέσσερις διαφορετικές ζώνες εξαλλοίωσης, οι οποίες είναι πάντα συγκεντρικές και η μία περιβάλλει την άλλη. Οι ζώνες εξαλλοίωσης από τον πυρήνα μέχρι την περιφέρεια είναι: ποτασική, σερικιτική ή φυλλιτική, αργλική και προπυλιτική (Σχ. 2.6) (Frei 1995).



Σχ. 2.6. Ζώνες εξαλλοίωσης στα πορφυριτικά συστήματα (earthsci.org)

Η ποτασική ζώνη αποτελεί μέρος του πυρήνα της εξαλλοίωσης (Σχ. 2.6). Σε αυτήν έχουν αντικατασταθεί τα πρωτογενή ορυκτά του μητρικού πετρώματος από δευτερογενή βιοτίτη, καλιούχο άστριο, χαλαζία, λίγο σερικήτη και ανυδρίτη. Ο βιοτίτης αντικαθιστά κατά ένα μέρος τα πλαγιόκλαστα και τα φεμικά ορυκτά ή εμφανίζεται διασκορπισμένος μεταξύ των αστρίων ή γεμίζει τα μικροφλεβίδια μαζί με τον χαλκοπυρίτη και τον ανυδρίτη. Οι

άστριοι αντικαθιστούν το ορθόκλαστο ή πλαγιόκλαστο ή συνυπάρχουν με τον χαλαζία μέσα στα μικροφλεβίδια (Σχ. 2.8).

Η φυλλιτική ή σερικιτική ζώνη περιβάλλει και καλύπτει την ποτασσική (Σχ. 2.6). Τα ορυκτά εξαλλοίωσης είναι σερικήτης, χαλαζίας, σιδηροπυρίτης, μαρμαρυγίας (μεγάλη περιεκτικότητα σε H_2O) και χλωρίτης. Περιέχει ένα μέρος της μεταλλοφορίας σε Cu. Ο σερικήτης επικρατεί στο εσωτερικό της ζώνης αυτής ενώ στα περιθώρια ο μαρμαρυγίας. Οι άστριοι έχουν δεχθεί την επίδραση της σερικιτίωσης, ενώ τα φεμικά της σερικιτίωσης εξαλλοίωσης ή της χλωριτίωσης. Ο σιδηροπυρίτης βρίσκεται σε αφθονία σχηματίζοντας φλεβίδια και διασπορές, ενώ ο χαλκοπυρίτης ποικίλει και είναι συνήθως διάσπαρτος.

Η αργιλική ζώνη δεν έχει σαφή ανάπτυξη και σε πολλά κοιτάσματα δεν υπάρχει (Σχ. 2.6). Χαρακτηρίζεται από την μετατροπή των αστρίων σε καολινίτη, μοντμοριλλονίτη, δικίτη και ιλλίτη. Ο σιδηροπυρίτης είναι μειωμένος σε σχέση με την προηγούμενη ζώνη.

Η προφυλλιτική ζώνη είναι η εξωτερική με ορυκτά εξαλλοίωσης τον χλωρίτη, το επίδοτο και τον ασβεστίτη (Σχ. 2.6). Σπάνια εντοπίζεται αλβίτης και αδουλαίος. Ο χλωρίτης και ο ασβεστίτης έχουν αντικαταστήσει τον βιοτίτη και τα φεμικά ορυκτά. Εκτός από τον χαλκοπυρίτη και τον σιδηροπυρίτη (σε μικρές περιεκτικότητες στη ζώνη αυτή) εμφανίζονται ο γαληνίτης και ο σφαλερίτης, καθώς και ίχνη χρυσού και αργύρου. Εκτείνεται στα γειτονικά πετρώματα με απόσταση μεγαλύτερη των 1000 m και προκαλεί ένα τοπικό πρασίνισμα στα πετρώματα (Σχ. 2.9).

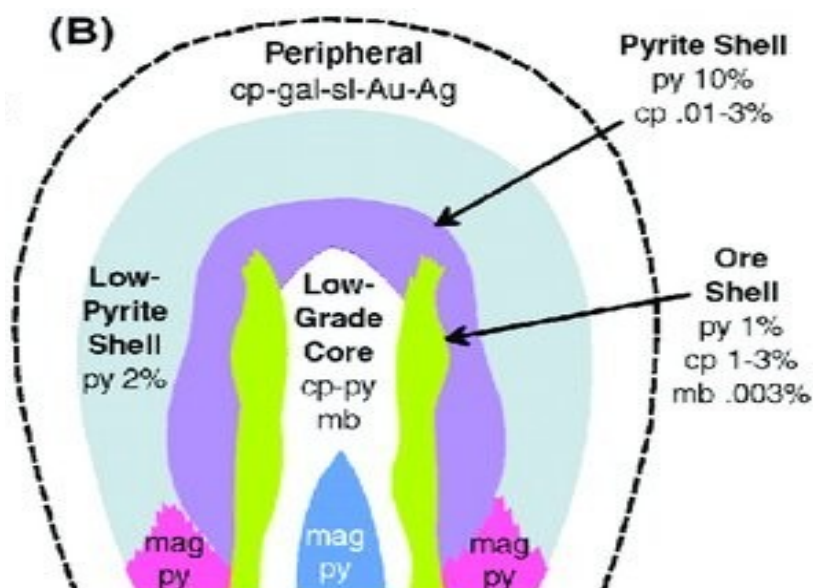
Όσον αφορά τη μεταλλοφορία, στην ποτασσική ζώνη (Σχ. 2.7) υπάρχει μία εσωτερική ζώνη φτωχή σε μεταλλοφορία με 0.3% Cu ως βορνίτη και χαλκοπυρίτη. Το ποσοστό των θειούχων είναι χαμηλό και ο λόγος σιδηροπυρίτη προς χαλκοπυρίτη είναι 1:2. Ο μαγνητίτης είναι σπάνιος ή δεν υπάρχει. Η μεταλλοφορία είναι διάσπαρτη. Γύρω από τη ζώνη αυτή είναι το κυρίως κοιτάσμα με 0.5% Cu, μορφή κυλινδρικού κελύφους, καλύπτοντας και ένα μέρος της σερικιτικής ζώνης, εκτός της ποτασσικής ζώνης. Η μεταλλοφορία είναι σε μορφή φλεβιδίων ή διάσπαρτη. Περιέχει 1-3% χαλκοπυρίτη και βορνίτη και 1% σιδηροπυρίτη.

Στην σερικιτική και αργιλική ζώνη (Σχ. 2.7), περιφερειακά του κελύφους με Cu, επικρατεί ο σιδηροπυρίτης με λίγο χαλκοπυρίτη (με αντίστοιχο λόγο 10:1 και Cu 0.1-0.5%). Η μεταλλοφορία εμφανίζεται με τη μορφή φλεβιδίων.

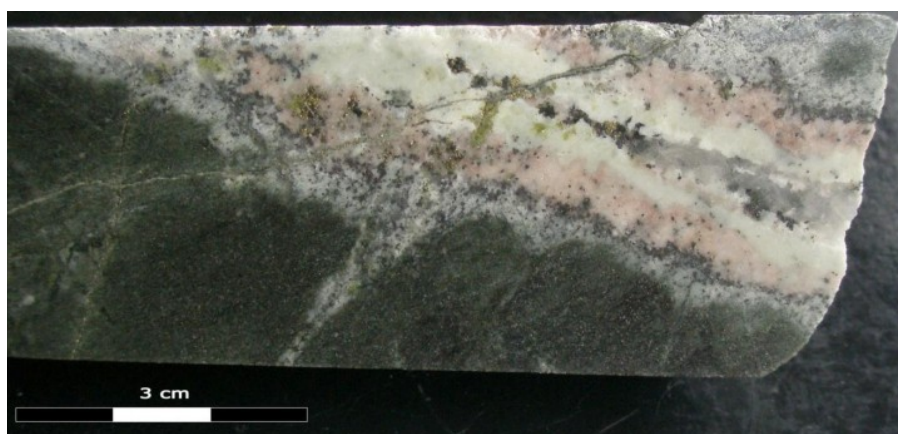
Στην εσωτερική προφυλλιτική ζώνη (Σχ. 2.7), η μεταλλοφορία χαρακτηρίζεται από φλεβίδια σιδηροπυρίτη που αποτελούν το 2-6% του πετρώματος. Υπάρχουν μικρά φλεβίδια τα οποία δηλώνουν υδροθερμικές παραγενέσεις.

Στην περιφερειακή ζώνη (Σχ. 2.7) εντοπίζονται τα ορυκτά του καθαρά υδροθερμικού σταδίου όπως είναι ο σιδηροπυρίτης, ο χαλκοπυρίτης, ο γαληνίτης, ο σφαλερίτης, και ο τετραεδρίτης με Au και Ag.

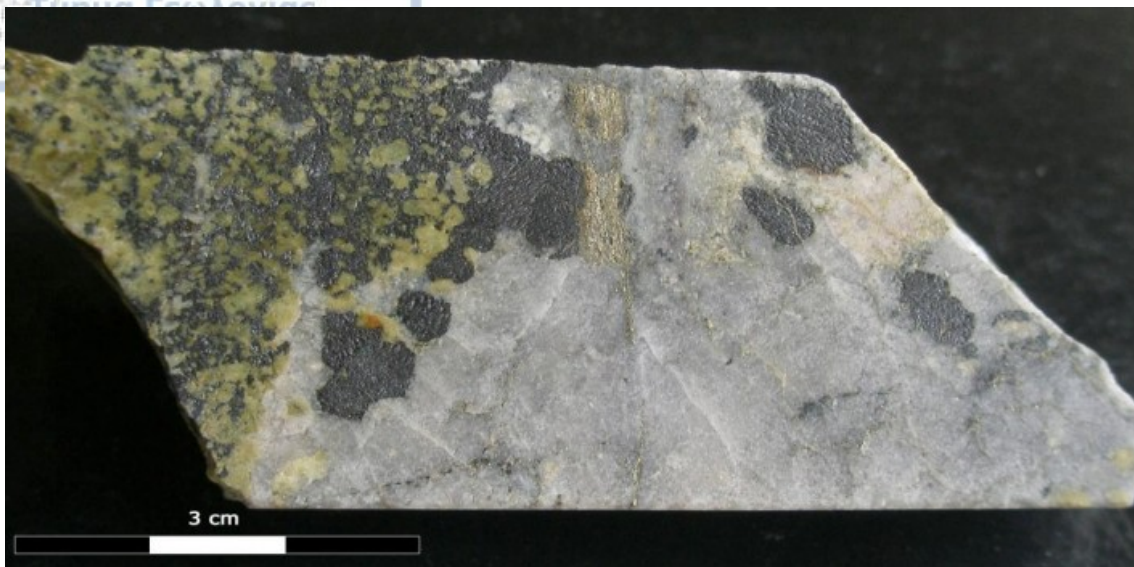
Η εξωτερική προπυλιτική ζώνη (Σχ. 2.7) αποτελείται από φλεβίδια σιδηροπυρίτη (2-6 κβ % και Cu=100-500 g/t). Τέλος, εμφανίζεται υπεργενής εξαλλοίωση, λόγω της επίδρασης του επιφανειακού νερού. Το νερό αυτό εκπλύνει συνήθως το ανώτερο τμήμα των κοιτασμάτων σχηματίζοντας μια στείρα ζώνη οξειδώσεως. Κάτω από αυτή βρίσκεται η ζώνη εμπλουτισμού με μεγάλο πάχος, όπου η περιεκτικότητα είναι τετραπλάσια της πρωτογενούς ζώνης (Σχ. 2.10, Σχ. 2.11). Στη ζώνη αυτή μπορεί να σχηματιστούν τα ορυκτά αζουρίτης και μαλαχίτης (ορυκτά του χαλκού).



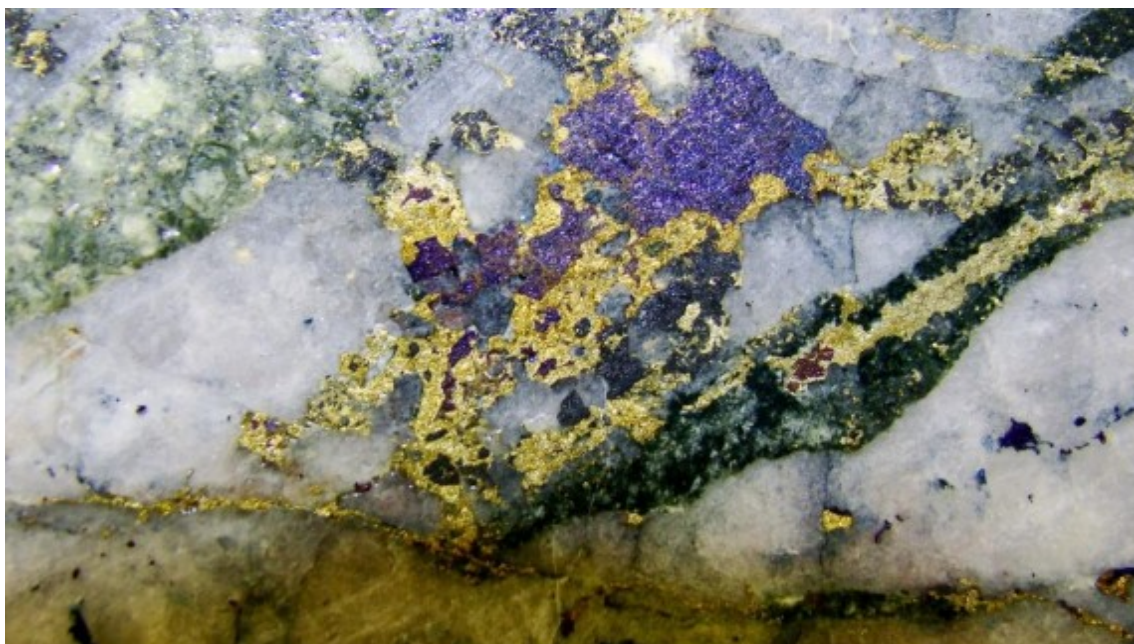
Σχ. 2.7. Ποσοστά των συγκεντρώσεων των ορυκτών στις ζώνες εξαλλοίωσης (www.researchgate.net)



Σχ. 2.8. Ποτασική εξαλλοίωση, υδροθερμικός Κ-άστριος και βιοτίτης, Φυσώκα Χαλκιδικής (Φωτογραφία: Β. Μέλφος)



Σχ. 2.9. Προπυλτική εξαλλοίωση, επίδοτο και μαγνητίτης, Φυσόκα Χαλκιδικής (Φωτογραφία: Β. Μέλφος)



Σχ. 2.10. Ποτασσική εξαλλοίωση, μαγνητίτη, χαλκοπυρίτης και βορνίτης, Σκουριές Χαλκιδικής (Φωτογραφία: Β. Μέλφος)



Σχ. 2.11. Υπεργενής εξαλλοίωση, αζουρίτης και μαλαχίτης, Σκουριές Χαλκιδικής (Φωτογραφία: Β. Μέλφος)

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ «ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΑΣΣΑΝΔΡΑΣ»

Τα «Μεταλλεία Κασσάνδρας» βρίσκονται στην βορειοανατολική Χαλκιδική (Σχ. 3.1), περίπου 100 χιλιόμετρα ανατολικά της Θεσσαλονίκης. Τα συγκεκριμένα μεταλλεία διαθέτουν υψηλές περιεκτικότητες των μετάλλων του Au, Ag, Cu, Pb και Zn. Στα πορφυριτικά κοιτάσματα και στα κοιτάσματα αντικατάστασης σε ανθρακικά πετρώματα, τα αποθέματα σε χρυσό (Au) υπολογίζονται σε περίπου 12 εκατομμύρια ουγκιές (Eldorado Gold Corp. 2016).



Σχ. 3.1. Χάρτης των Μεταλλείων Κασσάνδρας, όπου διακρίνονται τα κοιτάσματα που επιδέχονται εκμετάλλευσης, αυτά που πρόκειται να εκμεταλλευτούν και τα κοιτάσματα που είναι υπό έρευνα (Eldorado Gold Corp.)

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν την περιοχή σε μια από τις σημαντικότερες περιοχές στη Μεταλλογενετική Επαρχία της Σερβομακεδονικής μάζας (Siron et al. 2016). Τα κοιτάσματα που αποτελούν τμήματα των «Μεταλλείων Κασσάνδρας» της ΒΑ Χαλκιδικής (Σχ. 3.4) είναι αυτά των συμπαγών σουλφιδίων Pb-Zn-Ag-Au από αντικατάσταση ανθρακικών πετρωμάτων στην Ολυμπιάδα, στις Μαύρες Πέτρες και στο Μαντέμ Λάκκος και το πορφυριτικό κοίτασμα Cu-Au στις Σκουριές (Σχ. 3.2) (Μέλφος και Βουδούρης 2021).

Έρευνες για κοιτάσματα πιθανούς εκμετάλλευσης γίνονται στις περιοχές της Πιάβιτσας, Φυσώκας και Τσικάρα (Siron et al. 2016).

Ως κοίτασμα Στρατωνίου ορίζεται εκείνο που περιλαμβάνει το κοίτασμα στις Μαύρες Πέτρες, Μαντέμ Λάκκος και στην Πιάβιτσα.

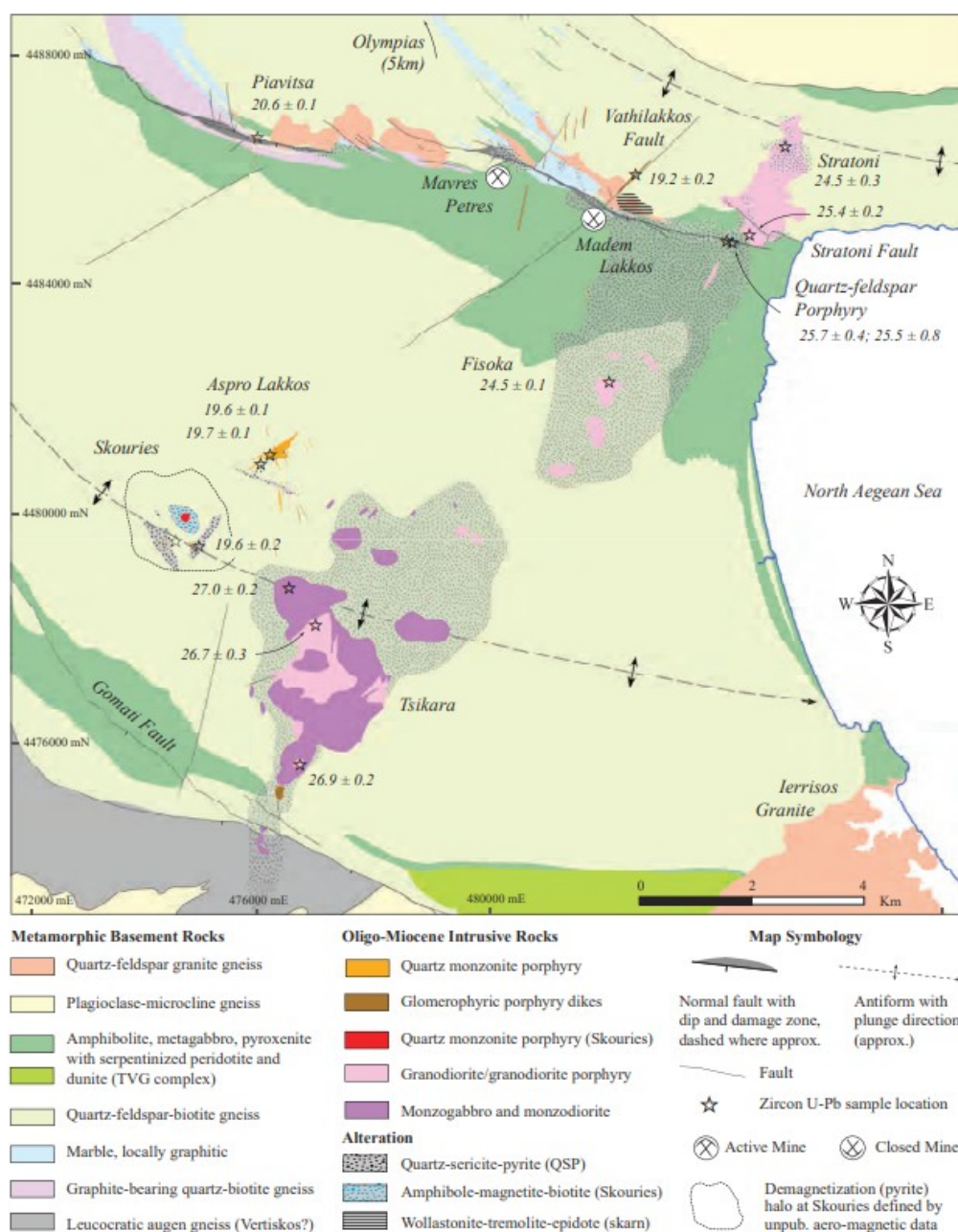


Σχ. 3.2. Φωτογραφία που λήφθηκε μέσω drone, η οποία αναπαριστά το μεταλλείο στις Σκουριές Χαλκιδικής (Eldorado Gold Corp.)



Σχ. 3.3. Μεταλλοφορία σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη και χαλαζία στην Ολυμπιάδα Χαλκιδικής (mindat.org)

Συγκεκριμένα, τα αποθέματα της Ολυμπιάδας (Σχ. 3.3) είναι 16,3 Mt μεταλλεύματος (μέσος όρος 8,6 g/t Au, 146 g/t Ag, 4,9% Pd, 6,5% Zn) (Eldorado Gold Corp. 2016) συμπεριλαμβάνοντας 1,86 Mt μεταλλεύματος (3,4 g/t Au από ανακτήσιμες συγκεντρώσεις παλαιότερων επιχειρήσεων). Παλαιότερες εκμεταλλεύσεις του κοιτάσματος στο Μαντέμ Λάκκος παρήγαγε 13,5 Mt Ag-Pb-Zn. Το υπολογιζόμενο απόθεμα στις Μαύρες Πέτρες είναι 1,1 Mt μεταλλεύματος (μέσος όρος 210 g/t Ag, 7,9% Pb, 10,5% Zn) (Eldorado Gold Corp. 2016). Τέλος, το κοιτάσμα στις Σκουριές έχει απόθεμα 283.6 Mt μεταλλεύματος (0,6 g/t Au, 0,43% Cu) (Eldorado Gold Corp. 2016).



Σχ. 3.4. Γεωλογικός χάρτης της νότιας περιοχής των «Μεταλλείων Κασσάνδρας» (Siron et al. 2016).

4. Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΒΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Η ΒΑ Χαλκιδική βρίσκεται στην Σερβομακεδονική μάζα (Σχ. 4.1), η οποία συγκροτείται από δύο ενότητες. Η μία ενότητα του κρυσταλλοσχιστώδους είναι η «ενότητα Κερδυλλίων», η οποία είναι κατώτερη και παλαιότερη, και η άλλη είναι η «ενότητα Βερτίσκου», ανώτερη και νεότερη. Οι δύο ενότητες χωρίζονται μεταξύ τους με το ρήγμα των Κερδυλλίων και την ζώνη ραφής Άθως-Βόλβης, αποτελούμενη από πετρώματα οφιολιθικής σύστασης.



Σχ. 4.1. Τεκτονικό σκαρίφημα της Σερβομακεδονικής μάζας, 1: μεταλικά ιζήματα της κοιλάδας του Στρυμόνα, 2: ενότητα του Βερτίσκου, 3: ενότητα των Κερδυλλίων, 4: μάζα της Ροδόπης, 5: Περιοδοπική ζώνη, 6: ανατολικό όριο της Σερβομακεδονικής (Γραμμή Στρυμόνα), 7: δυτικό όριο της Σερβομακεδονικής (Μουντράκης 2020).

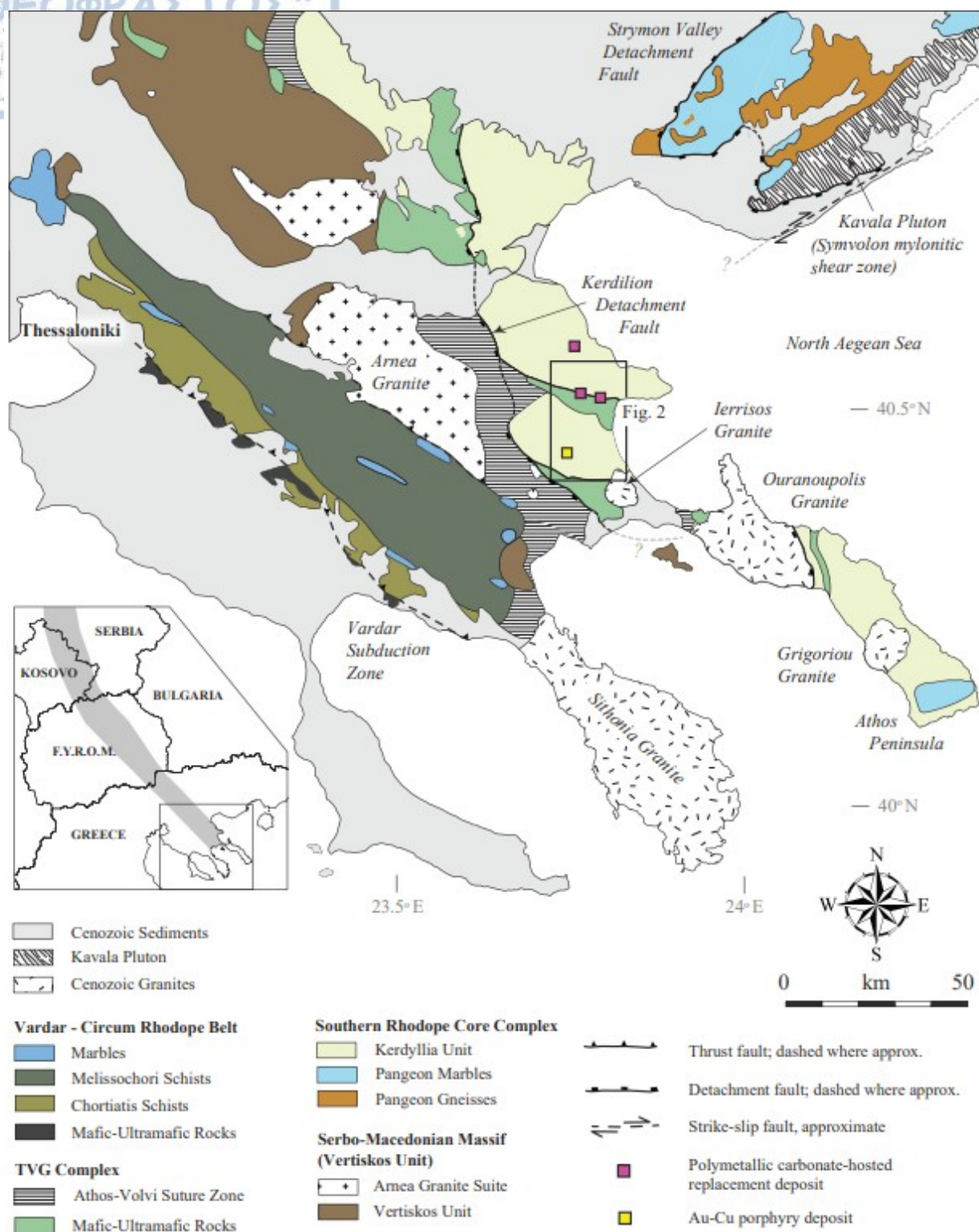
Η «ενότητα Κερδυλλίων» κατέχει την Ανατολική Χαλκιδική μεταξύ των εκβολών του Στρυμόνα και του Στρατωνίου. Τα πετρώματα που την συνιστούν είναι μεταμορφωμένα και πιο συγκεκριμένα γνεύσιοι (μιγματιτικοί, γρανατούχοι διμαρμαρυγικοί), αμφιβολίτες, εκλογίτες και μάρμαρα (Μουντράκης 2020).

Η «ενότητα Βερτίσκου» εντοπίζεται δυτικά της «ενότητας Κερδυλλίων» συμπεριλαμβάνει τον κορμό της Χαλκιδικής και εκτείνεται προς Βορρά μέχρι τα σύνορα. Συγκροτείται στους κατώτερους ορίζοντες από ορθογνεύσιους, μαρμαρυγικούς σχιστολίθους, ενώ στα ανώτερα στρώματα από μετα-γάββρους, μετα-διαβάσες και ορθοαμφιβολίτες (μεταμόρφωση βασικών πυριγενών πετρωμάτων) (Μουντράκης 2020).

Οι δύο ενότητες (Βερτίσκου και Κερδυλλίων) στην περιοχή της Χαλκιδικής (Σχ. 4.2) διαχωρίζονται μεταξύ τους χάρη στο ρήγμα αποκόλλησης των Κερδυλλίων (Siron et al. 2016). Εκτός του ρήγματος αυτού, στη ΒΑ Χαλκιδική συνέβαλλε και το ρήγμα Στρατωνίου. Η «ενότητα Κερδυλλίων» εμφανίζεται βόρεια του ρήγματος του Στρατωνίου, όπου συνίσταται από τα πετρώματα που έχουν προαναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους. Το ρήγμα Στρατωνίου αποτελεί μία ζώνη με γενική διεύθυνση ΔΒΔ, αποτελούμενο από Ν-ΝΔ κανονικά ρήγματα, μήκους 12 χλμ, από το χωριό του Στρατωνίου μέχρι δυτικά της Πιάβιτσας (Σχ. 3.4).

Η «ενότητα Βερτίσκου», στην περιοχή, θεωρήθηκε ότι βρίσκεται νότια του ρήγματος (άνω τέμαχος). Η σύσταση είναι αμφιβολιτική (πιθανή συσχέτιση με την ζώνης ραφής των Θερμών-Βόλβη-Γομάτι) με λεπτές ενστρώσεις (ακολουθίες) ασβεστιτικών-βιοτιτικών γνευσίων και σχιστολίθων. Το κάτω τέμαχος (βόρεια) συνιστάται από χαλαζιαστριούχους βιοτιτικούς γνευσίους, αλλά και από απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες. Ανάμεσα στα δύο τεμάχη παρατηρείται μία βαθμιαία μετάβαση από το ένα τέμαχος στο άλλο, εμφανές από την λιθολογία.

Και στα δύο τεμάχη εμφανίζονται μάρμαρα και αμφιβολίτες, με τα πρώτα να κυριαρχούν βόρεια του ρήγματος και τους αμφιβολίτες στα νότια. Η «ενότητα Κερδυλλίων» παρουσιάζετε και στα δύο τεμάχη, γεγονός που δηλώνει κυρίως η ύπαρξη των γνευσίων στο κάτω τέμαχος.



Σχ. 4.2. Γεωλογικός χάρτης του κορμού της Χαλκιδικής (Siron et al. 2016)

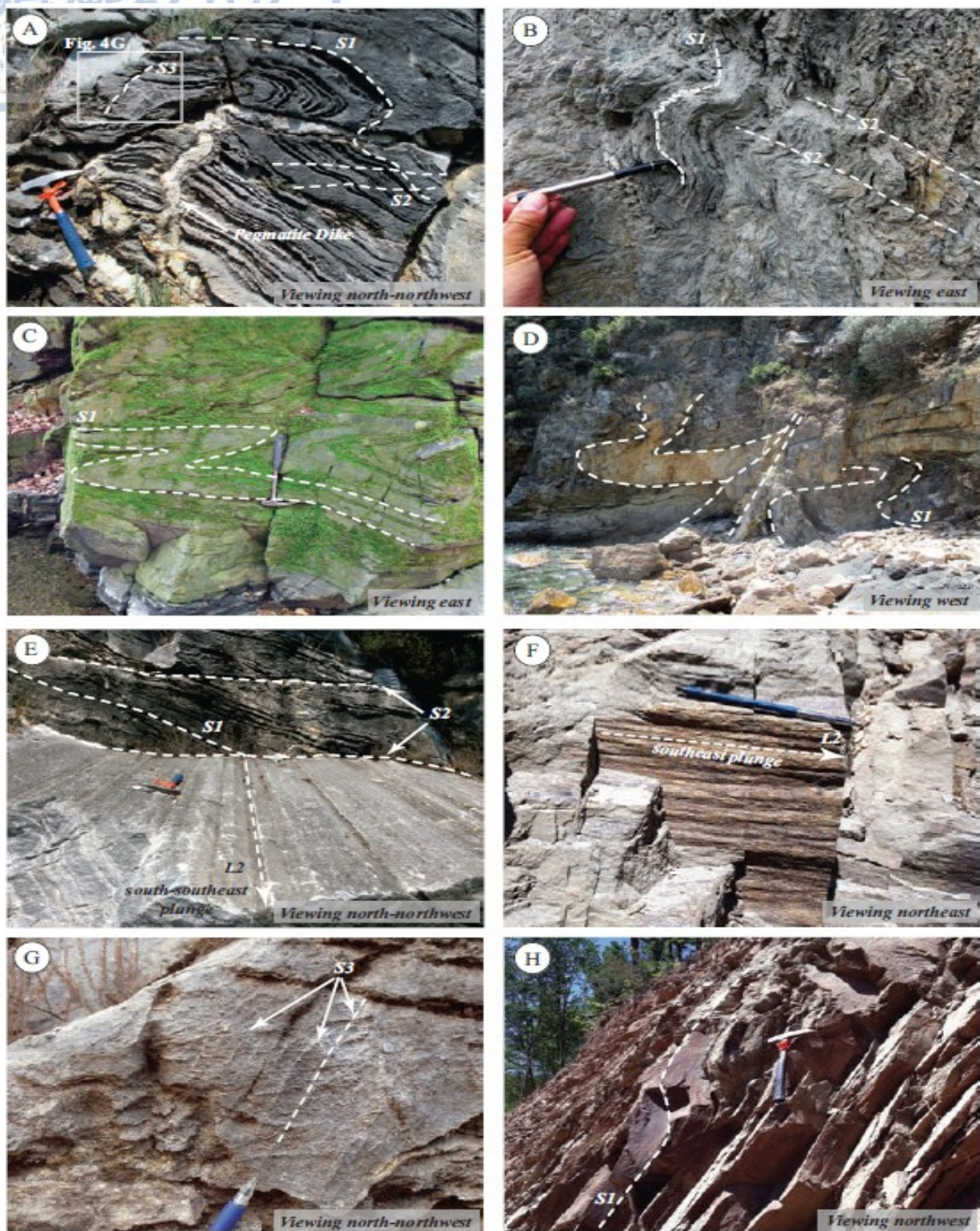
Ο μαγματισμός παρατηρείται από το Άνω Κρητιδικό μέχρι το Κάτω Ηώκαινο και χαρακτηρίζεται από ασβεσταλκαλικούς γρανίτες που εμφανίζονται στην Ιερισσό, στην Ουρανούπολη και σε άλλες περιοχές, οι οποίοι ξεπροβάλλουν στη ζώνη ραφής του Άθως-Βόλβης και στην «ενότητα Κερδυλλίων» (Σχ. 4.1). Σ' αυτούς παρατηρείται μία τεκτονική

υφή απόρροια της Αλπικής ορογένεσης. Οι ηλικίες σχηματισμού των γρανιτικών πετρωμάτων χρονολογούνται στο Καινοζωικό (Σχ. 4.4).

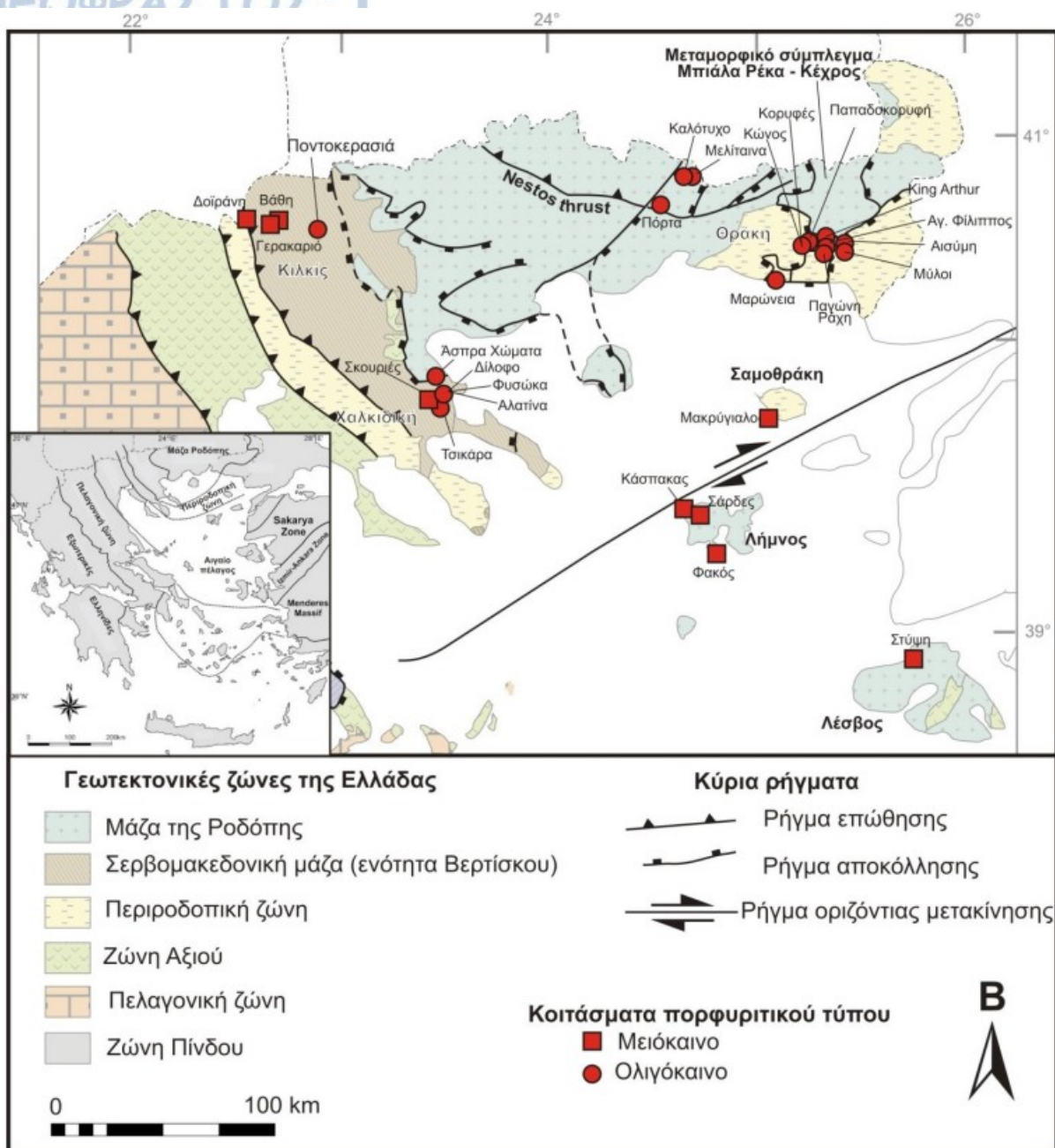
Η περιοχή της Κασσάνδρας είναι πλούσια σε τεκτονικές δομές (Σχ. 4.3). Σε αυτήν εμφανίζεται φολίδωση (S_1), καθορισμένη από ευθύγραμμα τοποθετημένα μεταμορφικά ορυκτά (π.χ. αμφίβολος). Ένα επακόλουθο ή συμμεταμορφικό γεγονός επέκτασης, οδήγησε στον σχηματισμό ισοκλινών πτυχών (F_2), συνοδευόμενες από υποπαράλληλα αξονικά επίπεδα σχισμών (S_2). Την επιμήκυνση αυτή ακολούθησε ένα αντίστοιχο γεγονός, μικρότερου βαθμού παραμόρφωσης, σχηματίζοντας μία ακόμη φολίδωση (S_3), περιλαμβάνοντας στο εσωτερικό της διάφορες υφές. Η φολίδωση αυτή συνδέεται με χιλιομετρικής κλίμακας κατακόρυφες και ανοιχτές πτυχές (F_3) ανατολικής βύθισης, σχηματίζοντας αντικλινικές μορφές στο κάτω τέμαχος των ρηγμάτων του Στρατωνίου και του Γοματίου (Σχ. 3.4). Και τα δύο είδη των πτυχών δείχνουν μια δυναμική συσχέτιση στο ρήγμα του Στρατωνίου και στη ζώνη ραφής Άθως- Βόλβη- Γομάτι.

Νεότερες κινήσεις του ρήγματος Στρατωνίου, δίνουν στα βόρεια ανάστροφα ρήγματα, αποτέλεσμα της συμπιεστικής τεκτονικής σε χαμηλού βαθμού αμφιβολιτικές συνθήκες. Επηρεασμένες από αυτές τις κινήσεις είναι οι πτυχές F_3 . Η αλλαγή εκτατικής τεκτονικής σε συμπιεστική, πιθανολογείται στο Ολιγόκαινο, δίνοντας στα ΝΔ μυλωνιτικές ζώνες, οι οποίες μεταμόρφωσαν τις προηγούμενες τεκτονικές υφές (των ανάστροφων ρηγμάτων). Οι επακόλουθες ημιθραυστικές παραμορφώσεις του Κάτω Ολιγοκαίνου χαρακτηρίζονται από κατακλαστικές δομές, με εσωτερικές φολιδώσεις και υφές (συμπίεσης). Ταυτόχρονα κρυσταλλώθηκαν ορυκτά σουλφιδίων τα οποία αποτυπώνονται πάνω στις υφές. Επιπλέον, έντονη είναι η παρουσία δεξιόστροφων ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης στα ΒΒΑ.

Κατά το Νεογενές, το ρήγμα Στρατωνίου επανεργοποιήθηκε χάρη στην εκτατική τεκτονική με διεύθυνση B-N στην περιοχή του Αιγαίου.



Σχ. 4.3. Εμφανίσεις των πτυχών, σχισμών και φολιδώσεων (Siron et al. 2018).



Σχ. 4.4. Τα κοιτάσματα πορφυριτικού τύπου, ηλικίας Ολιγοκαίνου-Μειόκαινου στην μάζα της Ροδόπης και της Σερβομακεδονικής μάζας (Melfos and Voudouris 2017 και Voudouris et al. 2019)

5. Η ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ Cu-Au ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ

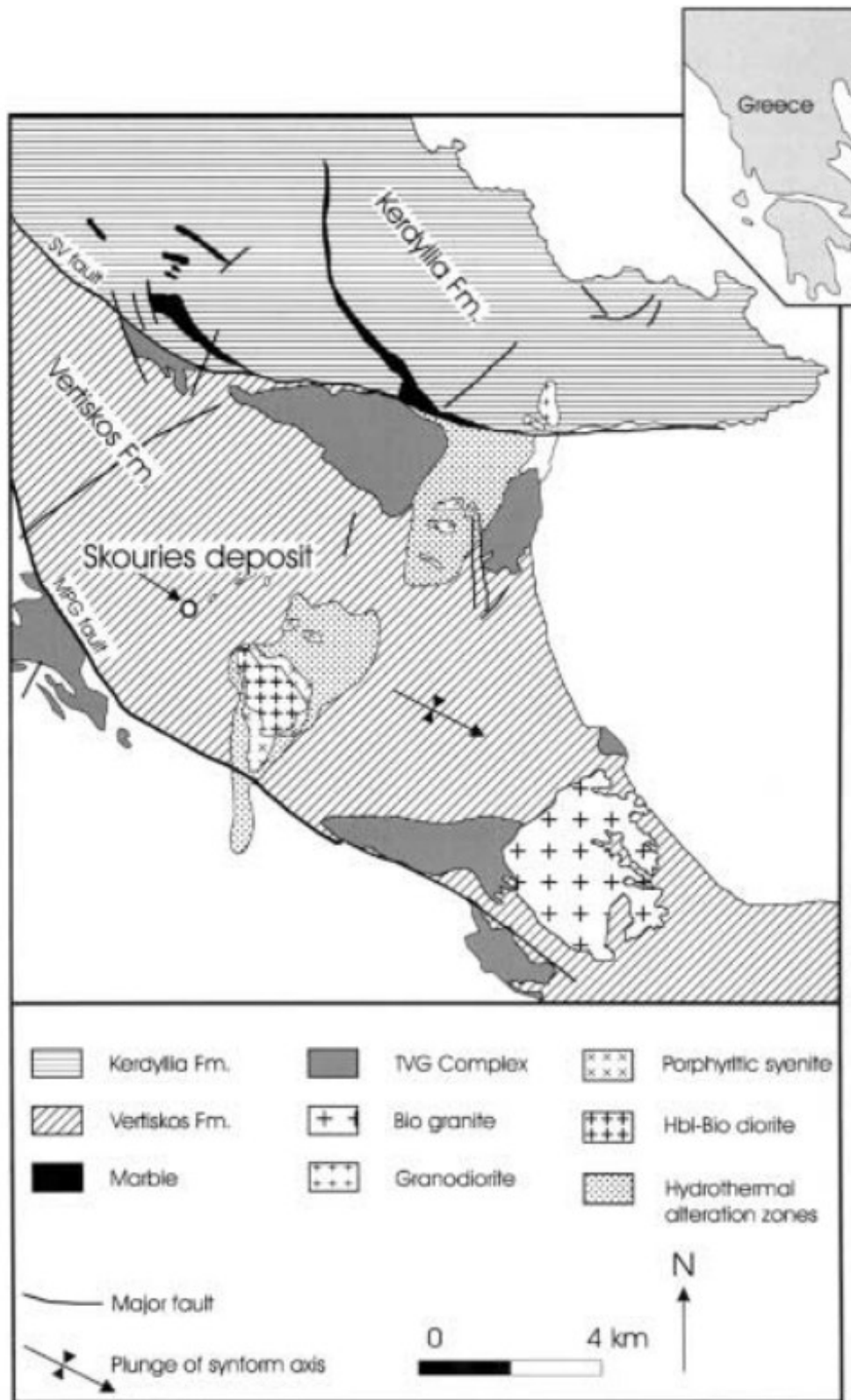
Το κοίτασμα των Σκουριών, στον κορμό της Χαλκιδικής και κοντά στο χωριό Μεγάλη Παναγία (Σχ. 5.1), πρόκειται για ένα παγκοσμίου κλάσης πορφυριτικό κοίτασμα, εξαιτίας των υψηλών περιεκτικοτήτων σε Cu και Au. Η θέση αυτή πήρε το όνομα της από την παρουσία μεταλλουργικών σκωριών, τα οποία δηλώνουν την εκμετάλλευση του από την αρχαιότητα. Το κοίτασμα αποτελεί τμήμα των «Μεταλλείων Κασσάνδρας» και περιέχει πιθανά και βεβαιωμένα αποθέματα 147.116 Mt με 0,77 g/t Au και 0,5 κβ% Cu, δηλαδή 3,63 Moz Au και 740 Mt Cu (Eldorado Gold Corp. 2021). Επίσης, εντοπίζονται και σπάνια μέταλλα, όπως είναι το Pt και το Pd, με αντίστοιχες περιεκτικότητες 0,15 ppm και 0,61 ppm, τα οποία δε ξεπερνούν τα 10 ppb (Μέλφος και Βουδούρης 2021).

Η μορφή του μεταλλοφόρου σώματος χαρακτηρίζεται ως κατακόρυφου σωλήνα (pipe-like intrusion), ελλειπτικού σχήματος (180 x 200 m²) και βάθους >700 m. Η μεταλλοφορία φιλοξενείται σε ένα σύμπλεγμα υποηφαιστειακών διεισδύσεων μονζονιτικής σύστασης και μέσα στα γειτονικά μεταμορφωμένα πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από αμφιβολίτες και σχιστόλιθους (μαρμαρυγιακούς και διμαρμαρυγιακούς της ενότητας Βερτίσκου) (Eliopoulos and Economou-Eliopoulos 1991; Kroll et al. 2002; Siron et al. 2016). Οι μονζονιτικές διεισδύσεις έχουν υψηλού K-ασβεσταλκαλικό χαρακτήρα και η ηλικία σχηματισμού τους τοποθετείται στο Μέσο Μειόκαινο (19-20 Ma). Με φθίνουσα ηλικία, οι τέσσερις διαφορετικές μονζονιτικές διεισδύσεις είναι: (1) ρόδινος μονζονίτης, (2) κύριος μονζονίτης, (3) intra-mineral μονζονίτης και (4) στείρος μονζονίτης (Kroll et al. 2002). Οι κύριες εξαλλοιώσεις που δέχτηκε το σύστημα είναι η ποτασσική, η προπυλιτική και η σερικιτική.

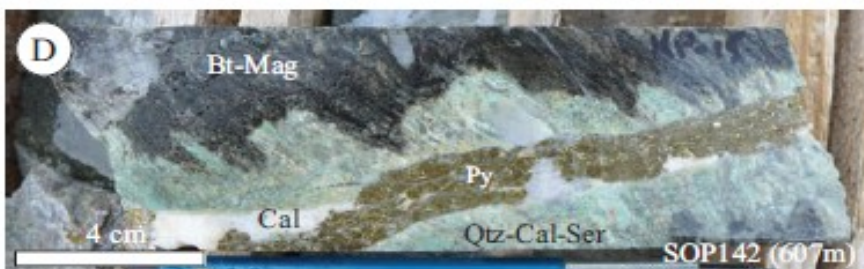
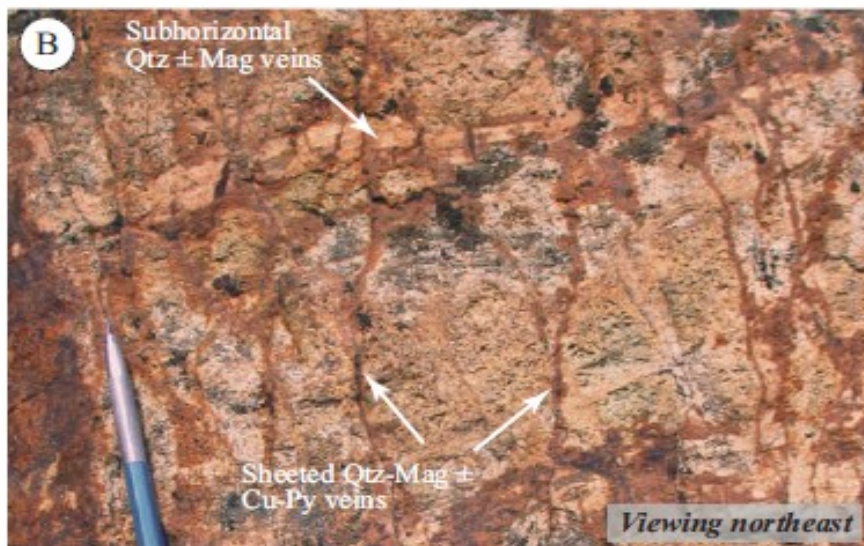
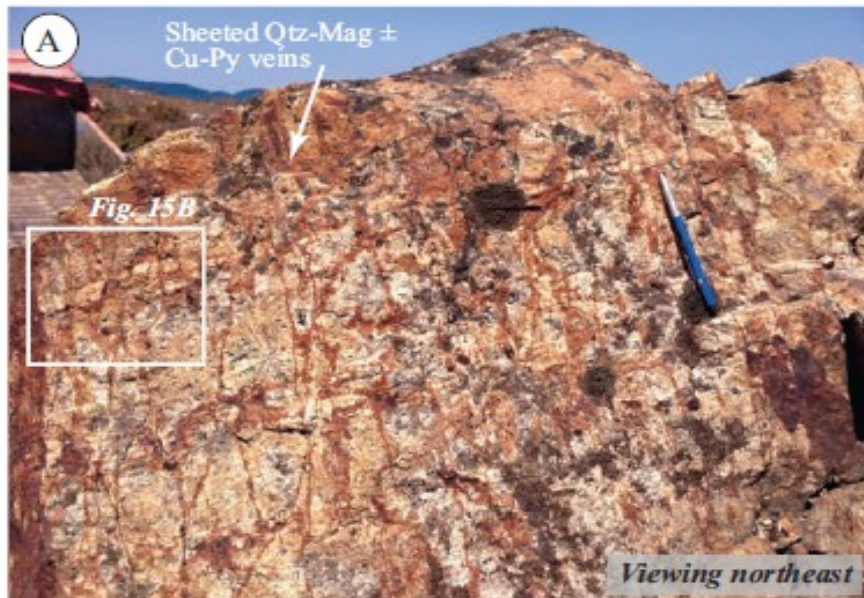
Τα κύρια μεταλλικά ορυκτά που συνιστούν το κοίτασμα είναι ο σιδηροπυρίτης, ο χαλκοπυρίτης, ο βορνίτης, ο μαγνητίτης, με μικρές περιεκτικότητες σε γαληνίτη και τετραεδρίτη και ίχνη μολυβδαινίτη (Σχ. 5.4). Ο χρυσός (Au) βρίσκεται αυτοφυής μέσα στον χαλκοπυρίτη αλλά και στον συλβανίτη. Ακόμη, βρέθηκαν μικροσκοπικά εγκλείσματα από τα σπάνια ορυκτά sorcheite, μερενσκίτης και κοτολσκήτης. Από τα πυριτικά ορυκτά επικρατεί ο χαλαζίας (Economou-Eliopoulos and Eliopoulos 2005).

Η μεταλλοφορία σχετίζεται με την υψηλού K-πυριτική εξαλλοίωση και χαρακτηρίζεται από ένα πυκνό δίκτυο φλεβιδίων μαγνητίτη, χαλαζία-μαγνητίτη-βιοτίτη και από φλέβες χαλαζία-μαγνητίτη (πρώτου σταδίου), φλέβες χαλαζία-χαλκοπυρίτη ± βορνίτη (ενδιάμεσου σταδίου) και πλούσιες σε σουλφίδια φλέβες χαλαζία-χαλκοπυρίτη ± βορνίτη (τελευταίου

σταδίου) (Melfos and Voudouris et al. 2019). Στο σχήμα 5.2 απεικονίζονται οι φλέβες και τα φλεβίδια του κοιτάσματος.

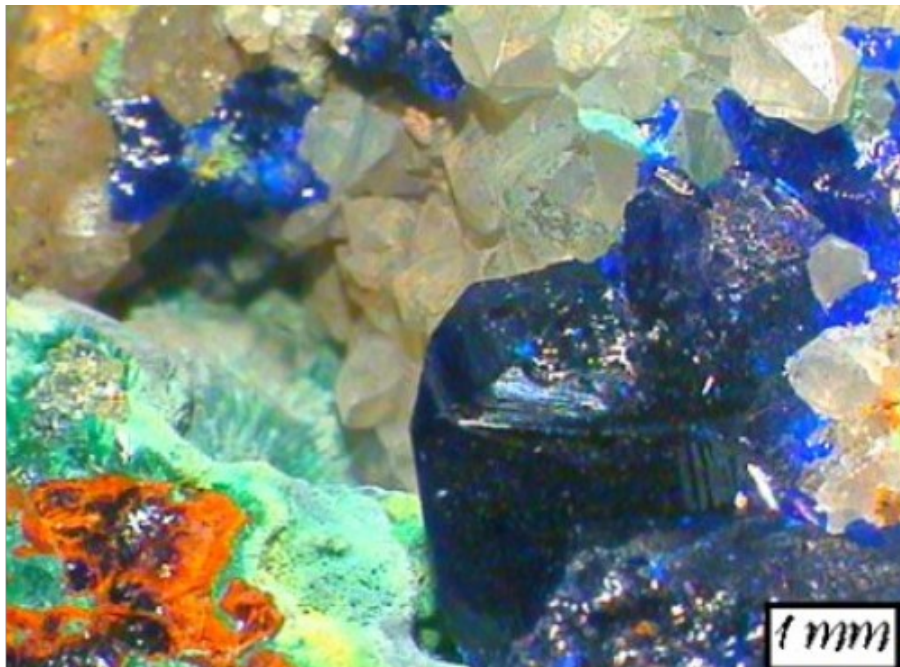


Σχ. 5.1. Γεωλογικός χάρτης του κορμού της ΒΑ Χαλκιδικής, υποδεικνύοντας την θέση του πορφυριτικού κοιτάσματος Cu-Au των Σκουριών (τροποποιημένο από Frei 1995)

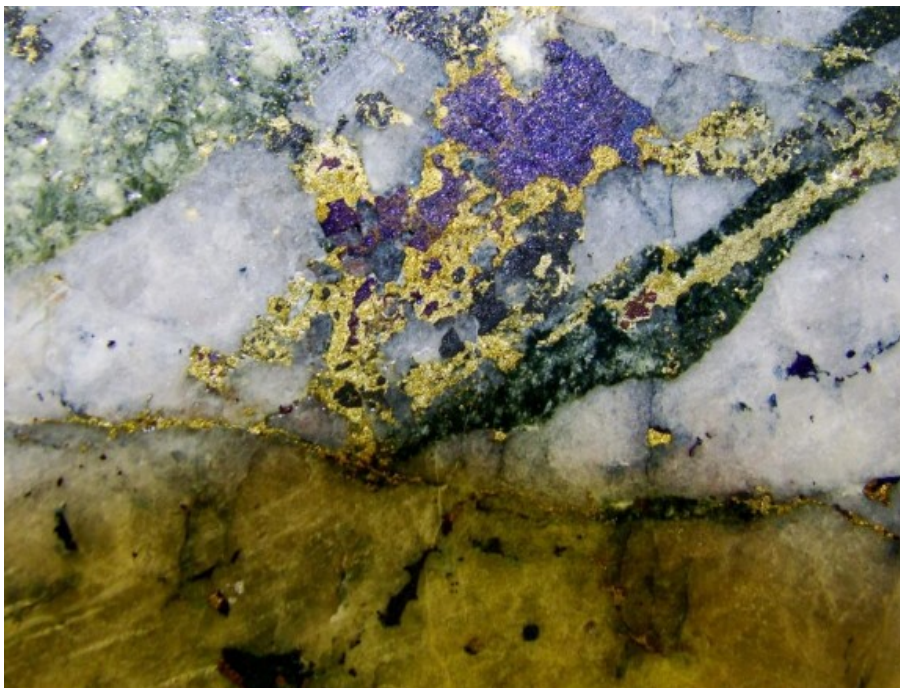


Σχ. 5.2. Οι φλέβες του κοιτάσματος των Σκουριών (Siron et al. 2018).

Η οξείδωση επηρεάζει κατακόρυφα την μεταλλοφορία. Στη ζώνη οξείδωσης (μέχρι τα 40m από την επιφάνεια) επικρατούν τα ορυκτά του μαλαχίτη, του αζουρίτη και φλεβίδια λειμωνίτη (Σχ. 5.3). Στη συνέχεια είναι η ζώνη αναγωγής (πάχους 2-3m) αποτελούμενη από κοβελλίνη, χαλκοσίνη, χαλκοπυρίτη, σιδηροπυρίτη και μαγνητίτη με μαλαχίτη, αζουρίτη. Το πρωτογενές κοίτασμα βρίσκεται κάτω από την ζώνη εμπλουτισμού.



Σχ. 5.3. Εμφάνιση αζουρίτη, μαλαχίτη και χαλαζία (πηγή: mindat.org)



Σχ. 5.4. Εμφάνιση μαγνητίτη, χαλκοπυρίτη, βορνίτη και χαλαζία (Φωτογραφία: Β. Μέλφος)

5.1 Πετρογραφικά χαρακτηριστικά των μονζονιτικών διεισδύσεων

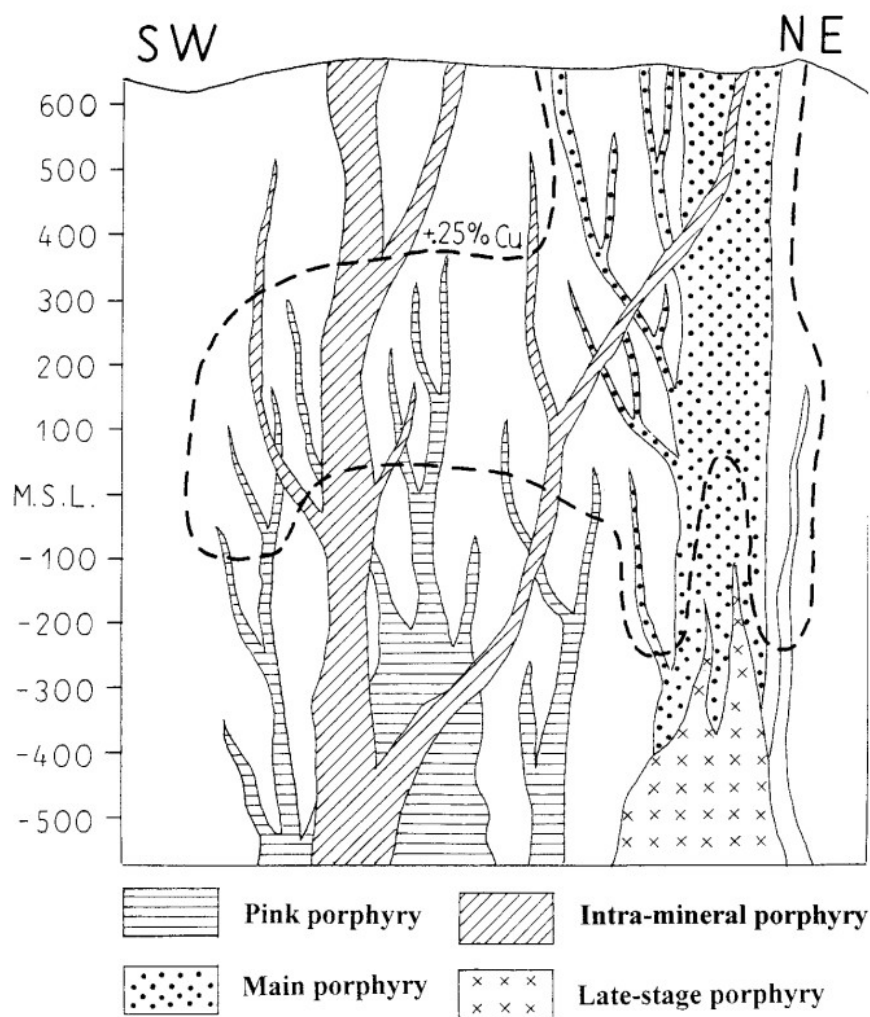
Ο ρόδινος πορφυριτικός μονζονίτης (Σχ. 5.5) είναι τραχύς, με πορφυριτικό ιστό και αποτελείται (το 60%) από φαινοκρυστάλλους αλκαλιούχων αστρίων (<40 mm), πλαγιοκλάστου (<8 mm), αμφίβολου (<3 mm) και απατίτη. Σε μερικές θέσεις περιέχει φλέβες ανυδρίτη (<2 mm). Το πέτρωμα επηρεάστηκε από την ποτασσική εξαλλοίωση, η οποία μετέτρεψε μερικώς το πλαγιόκλαστο σε ορθόκλαστο και την αμφίβολο σε βιοτίτη. Τέλος, εμφανίζονται Β τύπου φλέβες, αποτελούμενες από χαλαζία, σιδηροπυρίτη και χαλκοπυρίτη (0.5-4 mm) (Kroll et al. 2002).

Ο κύριος πορφυριτικός μονζονίτης (Σχ. 5.5) είναι στενά συνδεδεμένος με το κύριο μέταλλευμα και η μεταλλοφορία εντοπίζεται σε πλέγμα φλεβιδίων. Οι φλέβες είναι ασυνεχείς και έχουν διάφορα πάχη, τα οποία κυμαίνονται από 1 έως 10mm. Με τη μορφή φλεβιδίων εμφανίζεται ο χαλαζίας, ο χαλκοπυρίτης και ο βορνίτης. Συγκεκριμένα τα σουλφίδια αναδύονται ως ίχνη (στις Β τύπου φλέβες) ή διασπορές μέσα στις φλέβες του χαλαζία. Χαρακτηρίζεται με μέτρια υφή, με συνδυασμό ροζ και γκρι χρώματος και συγκροτείται (60 vol%) από φαινοκρυστάλλους πλαγιοκλάστου (<10 mm), αλκαλιούχων αστρίων (<8 mm), αμφίβολου (<5 mm) και απατίτη (<0.5 mm). Ο συγκεκριμένος μονζονίτης έχει αλλοιωθεί από την ποτασσική εξαλλοίωση. Απόρροια της εξαλλοίωσης είναι ο σχηματισμός ορθοκλάστου με τη μορφή φλεβών και ο σχηματισμός βιοτίτη-μαγνητίτη (assemblage), διαχέοντας την μεταλλοφορία. Σε ορισμένες θέσεις ο μαγνητίτης αντικαθίσταται από χαλκοπυρίτη (Kroll et al. 2002).

Ο intra-mineral πορφυριτικός μονζονίτης (Σχ. 5.5) διακόπτει τους προηγούμενους μονζονίτες. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι ο πορφυριτικός ιστός, η μέτρια με τραχεία υφή, το γκρι χρώμα και συνίσταται (45 vol%) από φαινοκρυστάλλους πλαγιοκλάστου (<8 mm), αλκαλιούχων αστρίων (<15mm), αμφιβόλου (<5mm) και απατίτη (<0.5 mm). Οι φλέβες που κυριαρχούν είναι S τύπου με χαλκοπυρίτη και βορνίτη, επηρεασμένος από την ποτασσική εξαλλοίωση. Η εξαλλοίωση έδωσε βιοτίτη και μαγνητίτη ως διασπορά ή σύμπλεγμα. Σε ορισμένες θέσεις τα φεμικά ορυκτά και ο μαγνητίτης αντικαθίστανται από χαλκοπυρίτη (Kroll et al. 2002).

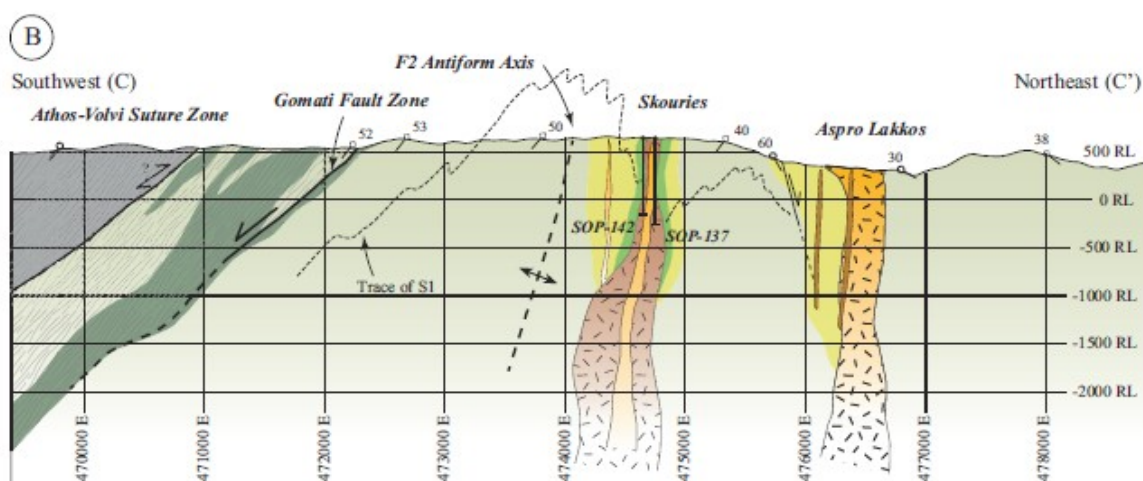
Κατά το τελευταίο στάδιο γένεσης της μεταλλοφορίας, υπήρξε έντονη αλλοίωση από τα ορυκτά του χλωρίτη, σιδηροπυρίτη και αιματίτη, καθώς και έντονη μετακίνηση και εναπόθεση του Cu και του Au σε φλέβες τύπου S. Οι φλέβες τύπου S αποτελούνται κυρίως από χαλκοπυρίτη και βορνίτη, αλλά και κοβελλίνη και διγενίτη. Αξιοσημείωτος είναι ο σχηματισμός ζώνης επαφής (άλως), κατά την επαφή της διείσδυσης με τα περιβάλλοντα

πετρώματα. Συγκεκριμένα, στις φλέβες τύπου S της μεταλλοφορίας που εξετάζεται, παρατηρείται στη ζώνη επαφής σιδηρούχος χλωρίτης. Η ύπαρξη απλίτη και φλεβών μονζονίτη υπονοούν μια βαθιά (τελευταίου σταδίου) διείσδυση, η οποία ονομάζεται late oxidized porphyry (Σχ. 5.5). Η διείσδυση αυτή, όπως και οι φλέβες μονζονίτη, αναπαριστούν μια κλασματική τήξη που έγινε σε βάθος και στο τελευταίο στάδιο. Οι ροζ-γκρι φλέβες έχουν μέτρια με τραχεία υφή, πορφυριτικό ιστό και αποτελούνται από φαινοκρυστάλλους (55 %vol) αλκαλιούχων αστρίων (<20 mm), πλαγιοκλάστου (<15 mm), αμφιβόλου (<5 mm), βιοτίτη (<2 mm) και μικροκρυστάλλους τιτανίτη (με σημαντικές συγκεντρώσεις Th) και απατίτη. Κατά θέσεις παρουσιάζουν έντονη ποτασική εξαλλοίωση με χαρακτηριστική την παρουσία υδροθερμικού βιοτίτη και μαγνητίτη. Τα φεμικά ορυκτά αντικαθίστανται από χλωρίτη και ανθρακικά ορυκτά (Kroll et al. 2002).



Σχ. 5.5. Αναπαράσταση του συμπλέγματος των υποηφιασטיακών διεισδύσεων μονζονιτικής σύστασης (Kroll et al. 2002).

Όσον αφορά τα γεωχημικά δεδομένα, τα οποία λήφθηκαν με μεθόδους XRF (κύρια στοιχεία), ICP και NAA, υποστηρίζουν μεγάλες περιεκτικότητες SiO_2 (62-68 κβ%) και χαμηλές MgO (1,1-2,2 κβ%). Ακόμη, τα στοιχεία του μανδύα είναι και αυτά σε μικρές περιεκτικότητες (<92 ppm V, <103 ppm Ni, <108 ppm Co) (Kroll et al. 2002). Οι συγκεντρώσεις του U και του Th είναι υψηλές, έως και 9 και 63 ppm αντίστοιχα, του Ba έως 2260 ppm και του Sr έως και 1230 ppm (Economou-Eliopoulos and Eliopoulos 2005). Στο σχήμα 5.6 ενδείκνυται η γεωλογική τομή του κοιτάσματος.



Σχ. 5.6. Γεωλογική τομή του κοιτάσματος (Siron et al. 2018).

5.2 Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις

Η δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων προκαλεί εκτεταμένες εξαλλοιώσεις στα πετρώματα, επηρεάζοντας την χημική και ορυκτολογική σύσταση τους. Τα υδροθερμικά διαλύματα κυκλοφόρησαν και μετά την κρυστάλλωση των υποηφαιστειακών πετρωμάτων (μέσα σε αυτό αλλά και στα γειτονικά πετρώματα), μέσω των πόρων, των ρηγμάτων και των διακλάσεων. Το σύμπλεγμα των πορφυριτών των Σκουριών έχει δεχτεί τέτοια επίδραση, προκαλώντας εκτεταμένες εξαλλοιώσεις και πιο συγκεκριμένα την ποτασσική, την προπυλιτική και τη σερικιτική.

Η ποτασσική εξαλλοίωση, τόσο στη μελέτη αυτού του συστήματος όσο και σε άλλες μελέτες πορφυριτών, σηματοδοτεί το τέλος της κρυστάλλωσης του μάγματος. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 590-640°C. Στο σύστημα των Σκουριών, η κερυστίλβη αντικαθίσταται από βιοτίτη και ο πρωτογενής βιοτίτης μετατρέπεται σε δευτερογενή. Επιπλέον, ο μαγνητίτης οξειδώνεται σε αιματίτη (μαρτιτίωση). Τα επικρατέστερα ορυκτά είναι ο δευτερογενής ροζ K-άστριος και ο χαλαζίας (Frei 1995).

Η προπυλιτική εξαλλοίωση χωρίζεται σε δύο στάδια, λόγω της ποικιλίας των θερμοκρασιών (στάδιο I-480°C, στάδιο II-380°C), άρα επικρατούν δύο διαφορετικά συστήματα φλεβών (γενιές). Οι φλέβες αποτελούμενες από χαλαζία και σουλφίδια τέμνουν τόσο τους μονζονίτες όσο και τα μεταμορφωμένα πετρώματα της ενότητας. Σε αυτές αποτέθηκε το μεγαλύτερο μέρος του Cu. Το πρώτο σύστημα φλεβών συνιστά ο χαλαζίας και στο εσωτερικό ο σιδηροπυρίτης και ο χαλκοπυρίτης. Στο δεύτερο σύστημα επικρατεί κυρίως ο χαλαζίας, με τα ορυκτά του σιδηροπυρίτη, του χαλκοπυρίτη και του ασβεστίτη να εμφανίζονται σαν μια «μικρή γραμμή». Αυτό συμβαίνει διότι αποτέθηκαν τελευταία. Η συνύπαρξη χαλαζία, χλωρίτη και ασβεστίτη χαρακτηρίζουν μία τυπική προπυλιτική εξαλλοίωση. Στην προπυλιτική εξαλλοίωση παρατηρούνται ρευστά εγκλείσματα υψηλής αλατότητας (Frei 1995).

Τέλος, οι μονζονίτες δέχτηκαν την επίδραση μίας σερίκιτικής εξαλλοίωσης, πολύ μικρότερης θερμοκρασίας (210°C). Χαρακτηρίζεται ως τοπική και ανομοιογενής και απέθεσε σιδηροπυρίτη και χαλκοπυρίτη (Frei 1995).

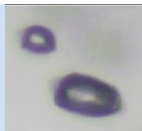
5.3 Ρευστά εγκλείσματα

Ένα ρευστό έγκλεισμα αποτελεί μια μικροσκοπική φυσαλίδα υγρού ή/και αερίου μέσα σε ένα κρύσταλλο. Κατά τον σχηματισμό του ορυκτού, από μία υγρή ουσία μικροσκοπικές φυσαλίδες αυτής παγιδεύονται μέσα στον κρύσταλλο. Τα εγκλείσματα δίνουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες σχηματισμού του ορυκτού που περικλείει, τόσο για την σύνθεση του όσο και για την θερμοκρασία και την πίεση.

Στο πορφυριτικό κοίτασμα των Σκουριών παρατηρούνται τέσσερις διαφορετικοί τύποι ρευστών εγκλεισμάτων, πρεσβεύοντας ο κάθε τύπος κάτι διαφορετικό. Συγκεκριμένα, οι τύποι I, III, IV και πιθανόν II (Σχ. 5.7). Σε αυτά εφαρμόστηκε η φασματοσκοπία Raman για την αναγνώριση CO₂ και CH₄, μικροθερμομετρία, ανάλυση SEM κ.ά., στα οποία βρέθηκαν σημαντικές περιεκτικότητες των στοιχείων K, Ca, Mn, Fe, Li, Mg, Rb, Sr, Y, Cs, Ba, La, Th και U (McFall 2016).

Ο τύπος I των εγκλεισμάτων έχει ακανόνιστο σχήμα. Η φασματοσκοπία Raman εντόπισε CO₂ στην φυσαλίδα, σχηματίζοντας μία «ταινία», η οποία δεν αναμίχθηκε με την υπόλοιπη φυσαλίδα. Οι κύριες φάσεις που ανιχνεύθηκαν ήταν η υγρή (H₂O) και η αέρια (CO₂). Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 5-20 μm και βρίσκονται στο κέντρο του κρύσταλλου ή ως ίχνη σε ζώνες ανάπτυξης, αλλά όχι στα όρια του κρυστάλλου. Η θερμοκρασία σχηματισμού είναι 340°C, ενώ η θερμοκρασία τήξης -3.2°C. Ο μέσος όρος της αλατότητας υπολογίστηκε

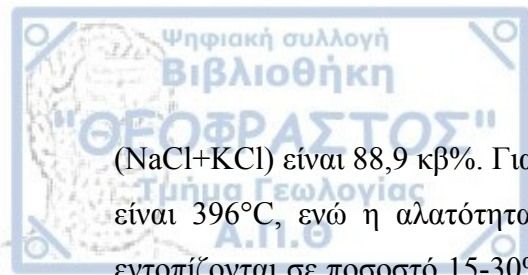
5,23 κβ% NaCl. Οι αέριες φυσαλίδες εντοπίζονται σε ποσοστό 10-20%, δηλαδή το έγκλεισμα έχει στερεή μορφή (McFall 2016).

Τύπος εγκλείσματος	Δείγμα
Τύπος I	
Τύπος II	
Τύπος IIIA	
Τύπος IIIB	
Τύπος IV	

Σχ. 5.7. Οι τύποι εγκλείσματος στο κοίτασμα των Σκουριών (φωτογραφίες από McFall 2016)

Ο τύπος II των εγκλεισμάτων έχει ορθογώνιο σχήμα ή σχήμα διαμαντιού. Ως κύριες φάσεις περιλαμβάνει την υγρή (H_2O) και την αέρια (CO_2). Περιέχει ένα θυγατρικό ημιδιαφανές ορυκτό, τον αλίτη (NaCl) που βρίσκεται στα άκρα του εγκλείσματος. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 15-30 μm και εντοπίζονται τόσο στα άκρα του κρυστάλλου όσο και ως ίχνη μέσα στον κρύσταλλο. Η θερμοκρασία σχηματισμού είναι $462^\circ C$, ενώ η θερμοκρασία τήξης $-6.5^\circ C$. Η εκτιμώμενη αλατότητα είναι 9,95 κβ% NaCl. Οι αέριες φυσαλίδες εντοπίζονται σε ποσοστό 80-95%, το οποίο δηλώνει ότι ο τύπος αυτός των εγκλεισμάτων είναι κυρίως αέριος (McFall 2016).

Ο τύπος III των εγκλεισμάτων υποδιαιρείται σε δύο μικρότερους τον IIIA και τον IIIB. Ο πρώτος τύπος, ο IIIA, περιέχει υγρή και αέρια φάση, αλλά και τα ορυκτά του αλίτη, αιματίτη και συλβίτη ως κύριες φάσεις. Ως θυγατρικά ορυκτά έχει τον ανυδρίτη, τον βαρύτη και τα αδιαφανή ορυκτά του $FeCl$. Ο δεύτερος τύπος, ο IIIB, περιέχει υγρή (H_2O) και αέρια (CO_2) φάση, αλλά και τα ορυκτά του αλίτη και συλβίτη ως κύριες. Τα θυγατρικά ορυκτά είναι ο αιματίτης, ο ανυδρίτης, ο βαρύτης και τα αδιαφανή ορυκτά $FeCl$. Το σχήμα και των δύο τύπων είναι στρόγγυλο με αρνητική μορφολογία και η διάμετρος 5-50 μm . Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας σχηματισμού του τύπου IIIA είναι $413^\circ C$, ενώ ο μέσος όρος της αλατότητας



(NaCl+KCl) είναι 88,9 κβ%. Για την θερμοκρασία σχηματισμού, ο μέσος όρος του τύπου ΠΒ είναι 396°C, ενώ η αλατότητα υπολογίζεται (NaCl+KCl) 83 κβ%. Οι αέριες φυσαλίδες εντοπίζονται σε ποσοστό 15-30%, δηλαδή η μορφή των εγκλεισμάτων είναι στερεή. Σε αυτό τον τύπο βρέθηκαν σημαντικές περιεκτικότητες Cu (McFall 2016).

Τέλος, ο τύπος IV έχει σχήμα στρόγγυλο, αρνητικής μορφολογίας ή σχήματος «δάκρυ» με διάμετρο 5-20 μm . Οι κύριες φάσεις είναι κυρίως η αέρια (CO_2) αλλά και η υγρή (H_2O). Οι αέριες φυσαλίδες εντοπίστηκαν σε ένα ποσοστό 90-100%, δηλαδή η μορφή αυτών των εγκλεισμάτων είναι κυρίως αέρια (McFall 2016).

6. ΠΑΡΟΥΣΙΑ PGE ΚΑΙ Au ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ

6.1 Στοιχεία της πλατίνας-PGE

Στη σημερινή εποχή, όπου η τεχνολογία εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς, σε συνδυασμό με τον ολοένα αυξανόμενο πληθυσμό της Γης, η ανάγκη για χρήση των σπάνιων μετάλλων φαντάζει πιο σημαντική από ποτέ. Στόχος λοιπόν είναι, η ανακάλυψη και εκμετάλλευση κοιτασμάτων πλούσια σε κρίσιμα μέταλλα. Κρίσιμα μέταλλα ονομάζονται εκείνα τα μέταλλα που είναι στοιχειώδους σημασίας σε πολλές εφαρμογές, είναι δύσκολο να αντικατασταθούν και η προμήθεια τους γίνεται από περιορισμένο αριθμό χωρών. Τα κρίσιμα μέταλλα είναι το Sb, Be, Co, Ga, Ge, In, Mg, Nb, Ta, W, Mn, Cr, βορικά, C, φωσφορικά, Si καθώς οι σπάνιες γαίες (REE-rare earth elements) και τα ορυκτά της πλατίνας (PGE-platinum group elements).

Τα στοιχεία της πλατίνας (PGE) συνιστούν το παλλάδιο (Pd), το όσμιο (Os), η πλατίνα (Pt), το ιρίδιο (Ir), το ρόδιο (Rh) και το ρουθίνιο (Ru). Η κύρια χρήση τους στην βιομηχανία είναι ως καταλυτικοί μετατροπείς, που μειώνουν τις επικίνδυνες εκπομπές αερίων από τα αυτοκίνητα. Ακόμη χρησιμοποιούνται και για τη παρασκευή νιτρικού οξέος, εκρηκτικών και νιτρικού οξειδίου. Συγκεκριμένα, η Pt χρησιμοποιείται στην βιομηχανία πετρελαίου για την διύλιση του αργού πετρελαίου. Το Pd και η Pt χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική βιομηχανία και στη κοσμηματοποιία (McFall 2016).

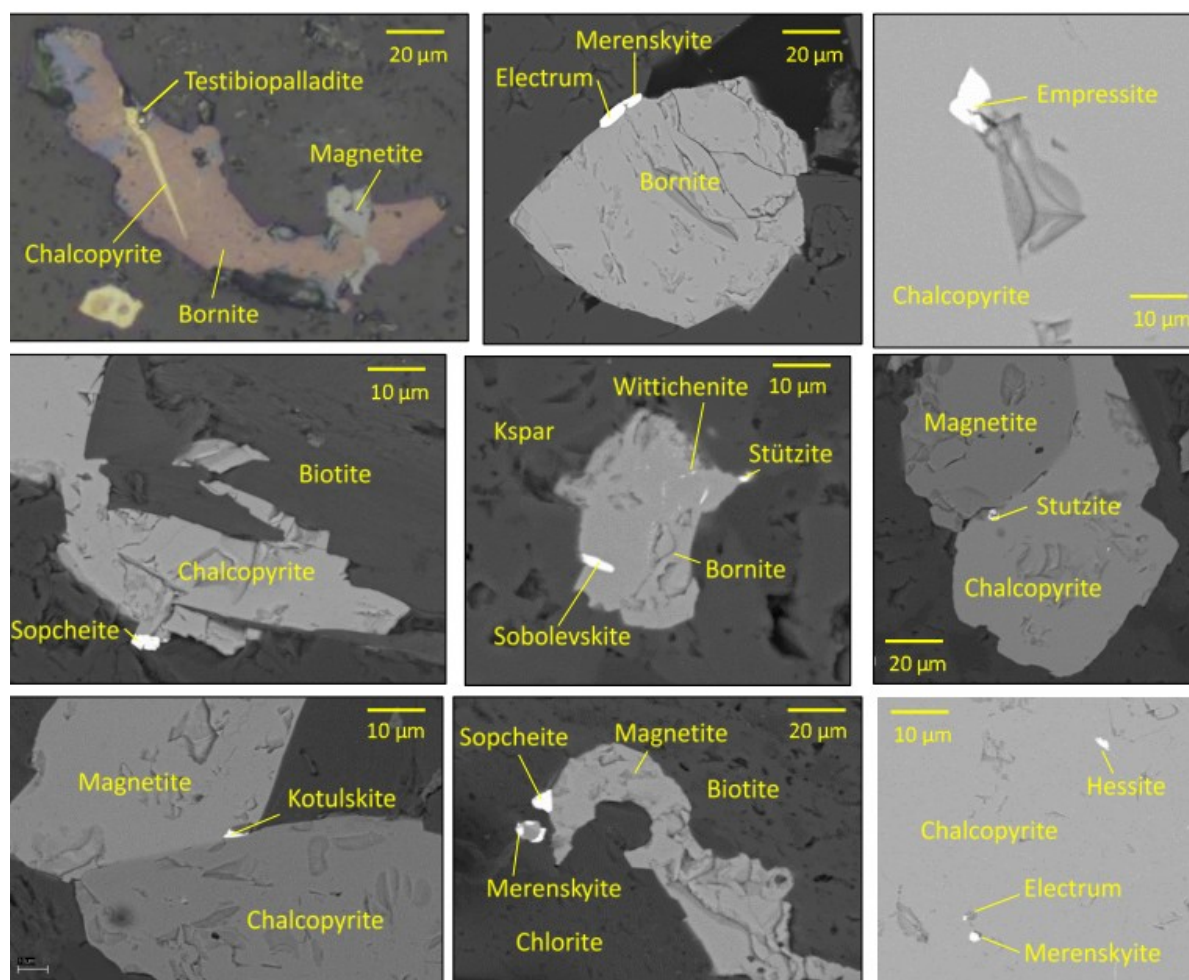
Στο κοίτασμα των Σκουριών αξιοσημείωτη είναι η παρουσία των στοιχείων της πλατίνας (PGE), αλλά και του χρυσού (Au). Η παρουσία τους είναι στενά συνδεδεμένη με τα βασικά και υπερβασικά μαγματικά συστήματα. Στις Σκουριές παρατηρούνται μεγάλες περιεκτικότητες Pt, Pd και Au τα οποία θεωρούνται ότι σχετίζονται με τη μεταφορά των υδροθερμικών διαλυμάτων. Σύμφωνα με τις τελευταίες έρευνες που έλαβαν χώρα, οι περιεκτικότητες του Pd κυμαίνονται από 52 έως 610 ppb και του Pt έως 150 ppb.

Στο κοίτασμα έγιναν διάφορες αναλύσεις και επιλέχθηκαν πολλά δείγματα για την μελέτη αυτών των στοιχείων. Τα δείγματα που λήφθηκαν είναι αντιπροσωπευτικά της κύριας φλεβικής μεταλλοφορίας, οι οποίες αποτελούνται από φλεβίδια σουλφιδίων συνοδευόμενα με χαλαζία και ίνες μαγνητίτη, της ζώνης οξειδωσης και δειγμάτων γεωτρήσεων, τα οποία βρίσκονταν στην επαφή του υποηφαιστειακού πετρώματος με τα περιβάλλοντα πετρώματα.

Στα περισσότερα δείγματα βρέθηκαν Pd, Pt, Ag και Au. Ακόμη, σε μικρές περιεκτικότητες εντοπίστηκαν Ru και σε ακόμη πιο μικρές Os, Ir, Rh. Το κοίτασμα εκτός

από αυτά τα στοιχεία περιέχει και σημαντικές περιεκτικότητες σε Cu, Ba, Sr, Te, B, Bi, Co και Se (Eliopoulos and Economou-Eliopoulos 1991).

Τα PGM (platinum group minerals) (Σχ. 6.1) μέσα στα οποία βρέθηκαν τα στοιχεία της πλατίνας είναι μικρής διαμέτρου $<10 \mu\text{m}$. Σχετίζονται με τις φλέβες χαλαζία-βορνίτη-χαλκοπυρίτη ($\pm$ μαγνητίτη) και εμφανίζονται τα στοιχεία ως εγκλείσματα μέσα σε αυτά. Όλα τα ορυκτά εντοπίζονται στα φλεβίδια του κύριου πορφυριτικού μονζονίτη και έχουν σχέση με την ποτασική εξαλλοίωση, όπου τόσο στα φλεβίδια όσο και στα ορυκτά της ποτασικής εξαλλοίωσης βρίσκονται ελεύθερα. Από τα ορυκτά αυτά αναγνωρίστηκαν ο sorcheite ($\text{Ag}_4\text{Pd}_3\text{Te}_4$), ο sobolevskite (PdBi), ο merenskyite ($(\text{Pd},\text{Pt})(\text{Te},\text{Bi})_2$), ο koltuskite ($\text{Pd}(\text{Te},\text{Bi})$) και ο testibiopalladite ($\text{PdTe}(\text{Sb},\text{Te})$). Ακόμη, βρέθηκαν στο κοίτασμα των Σκουριών ημι-πολύτιμα μέταλλα όπως είναι το electrum (AgAu), empressite (AgTe), hessite (Ag_2Te) και το stutzite ($\text{Ag}_5\text{-xTe}_3$, ($x=0.24\text{-}0.36$)) (McFall 2016, 2018).



Σχ. 6.1. Φωτομικρογραφίες που αναπαριστούν τα PGM και τα ημιπολύτιμα μέταλλα (McFall 2016)

Τα PGE στο κοίτασμα των Σκουριών είναι μικρής διαμέτρου $<10 \mu\text{m}$. Διαπιστώθηκαν ότι είναι στενά συνδεδεμένα με τα φλεβίδια του κύριου πορφυριτικού μονζονίτη, στα οποία αποθηκεύεται το μεγαλύτερο ποσοστό του Cu. Αυτό διαπιστώνεται από έρευνες που έγιναν τόσο στο παρελθόν όσο και στα νεότερα χρόνια (Economou-Eliopoulos and Eliopoulos 2000; McFall 2016), καθώς υπολογίστηκαν μεγάλες συγκεντρώσεις Pd και Pt, σε περιοχές που έχουν υποστεί ποτασσική εξαλλοίωση. Η μεταφορά τους γίνεται υδροθερμικά, με την βοήθεια των ρευστών εγκλεισμάτων (υψηλή οξείδωση, θερμοκρασία και αλατότητα), μέσα στα οποία παρατηρήθηκε κυρίως το Pd. Φιλοξενούνται ως εγκλείσματα μέσα στον χαλκοπυρίτη και στον βορνίτη (ορυκτά του Cu) αλλά και ελεύθερα μέσα στις φλέβες και μέσα στα ορυκτά της ποτασσικής εξαλλοίωσης. Έτσι εξακριβώνεται και η ύπαρξη των PGM μέσα σε αυτά τα εγκλείσματα (McFall 2016). Δεν σχετίζονται με το τελευταίο μαγματικό επεισόδιο ούτε και με την αργλική εξαλλοίωση (Σχ. 6.2).

Τα στοιχεία της πλατίνας θεωρείται ότι προέρχονται από την επανάτηξη, της παλαιότερα υποβαθμισμένης, ανώτερης πλάκας της λιθόσφαιρας (Economou-Eliopoulos and Eliopoulos 2000). Το κοίτασμα χαρακτηρίζεται ως post-collisional, τοποθετημένο πάνω σε μία post-subduction τεκτονική περιοχή και δείχνει τηγμένες συγκεντρώσεις φλοιού σε βάθος.

Για τις Σκουριές διαπιστώθηκαν πέντε (5) πιθανοί μηχανισμοί εμπλουτισμού του κοιτάσματος σε PGE. Αυτοί είναι:

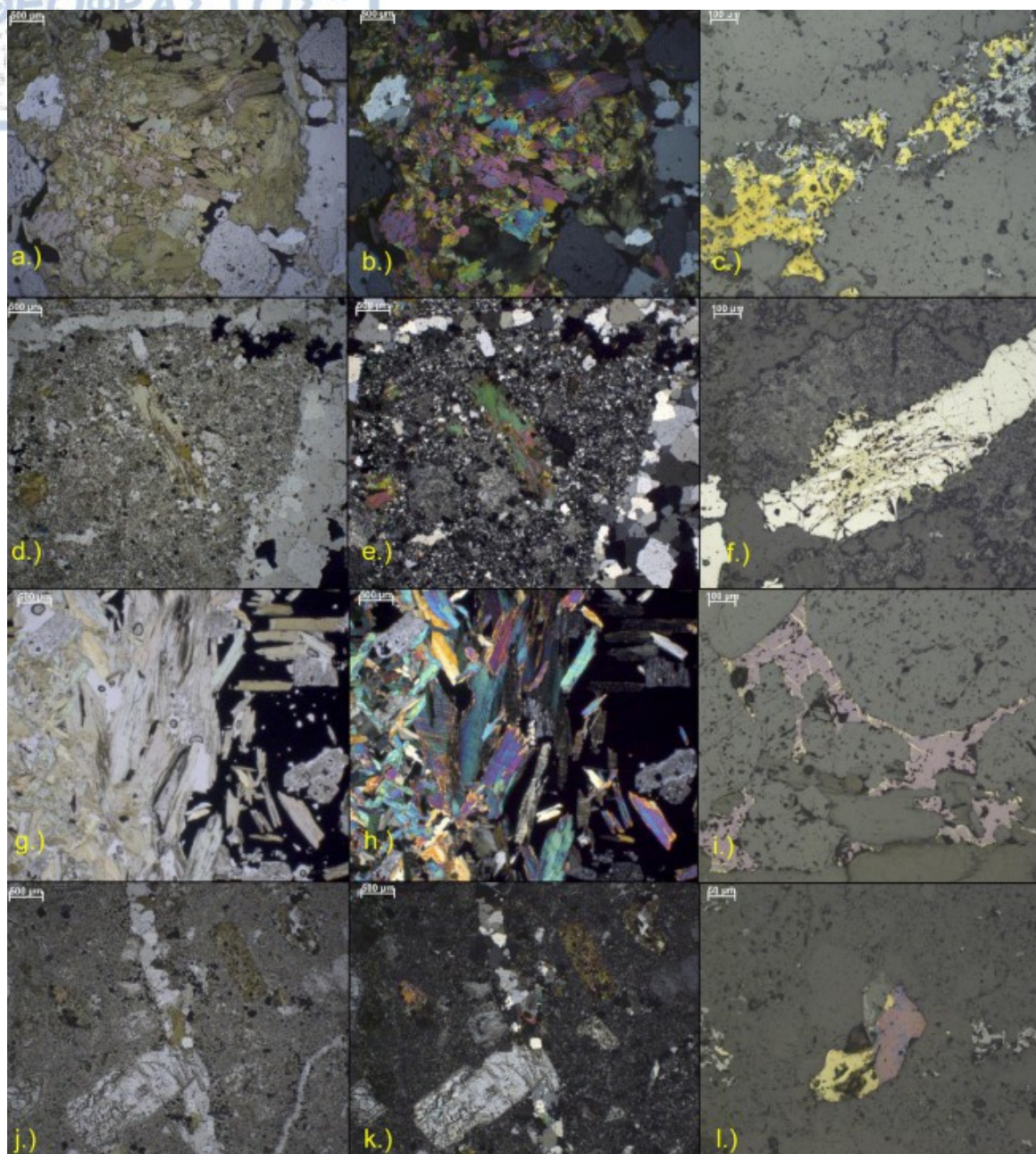
1) Η οξειδωμένη πηγή μάγματος, η οποία επιτρέπει την μετακίνηση των PGE στα υψηλά τμήματα του φλοιού.

2) Κατά το τελευταίο στάδιο (late stage mafic event-late stage dyking event) προστίθενται S, Au, Cu και PGEs μέσα στο θάλαμο του μάγματος, το οποίο αποτελεί την πηγή του κοιτάσματος.

3) Ο σχηματισμός τήγματος σουλφιδίων που δεν αναμειγνύονται μέσα στον θάλαμο του μάγματος (πηγή κοιτάσματος), επιτρέπει την συγκέντρωση διάσπαρτων PGEs, Bi, Te και Au. Ο σχηματισμός αυτού του τήγματος ενοείται από τον μαγνητίτη ή από την είσοδο του βασικού τήγματος.

4) Οι συνθήκες των ρευστών επιτρέπουν την αποτελεσματική υδροθερμική μεταφορά των PGEs και των ημιπολύτιμων μετάλλων. Οι υψηλά οξειδωμένες, υψηλής θερμοκρασίας και αλατότητας συνθήκες επιτρέπουν την υδροθερμική μεταφορά των κρίσιμων μετάλλων (Pd, Bi, Te).

5) Τα ημιπολύτιμα μέταλλα λειτουργώντας ως συλλέκτες των PGE.



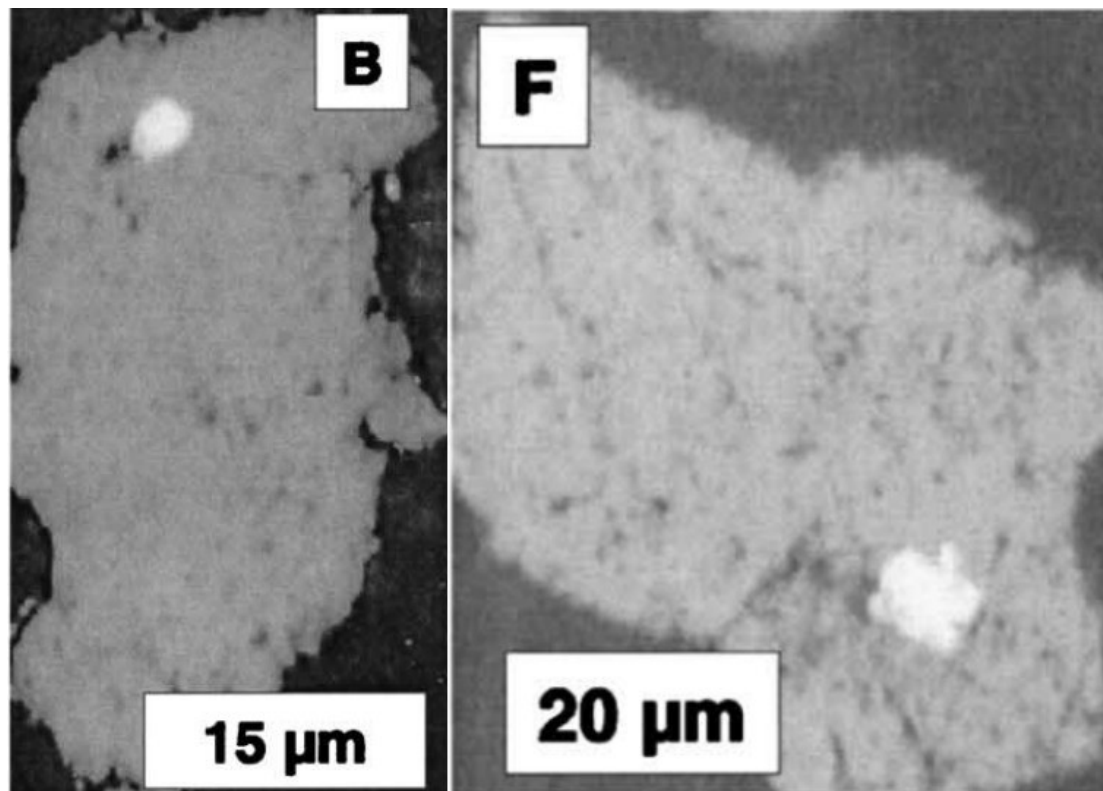
Σχ. 6.2. Μικροφωτογραφίες των κύριων εξαλλοιώσεων και της μεταλλοφορίας στις Σκουριές (McFall 2018)

6.2 Χρυσός-Au

Η εμφάνιση Au στο κοίτασμα συνδέεται με την ύπαρξη του Cu. Στην πλειονότητα των πορφυριτικών κοιτασμάτων ο χρυσός και ο χαλκός (τα αυτοφυή στοιχεία) εμφανίζονται από τα πρώτα στάδια της μεταλλογένεσης και των εξαλλοιώσεων (Kesler et al. 2002).

Ο χρυσός στο κοίτασμα των Σκουριών περιέχεται μέσα στα ορυκτά του χαλκού (χαλκοπυρίτης, βορνίτης, χαλκοσίνης, κοβελλίνης). Συνήθως εμφανίζεται αυτοφυής στον χαλκοπυρίτη (Eliopoulos and Economou-Eliopoulos 1991). Ωστόσο παρατηρείται και στον

βορνίτη με την περιεκτικότητα των 1,69 ppm. Ακόμη, στον χαλκοσίνη και τον κοβελλίνη αναλύθηκαν και παρατηρήθηκαν εγκλείσματα (κόκκοι) χρυσού (Σχ. 6.3), όχι όμως τόσο μεγάλης περιεκτικότητας (13 ppm σε χαλκοσίνη και 24,1 ppm σε κοβελλίνη) (Kesler et al. 2002).



Σχ. 6.3. Εγκλείσματα (κόκκοι) Au σε χαλκοσίνη στο πορφυριτικό κοίτασμα των Σκουριών (Kesler et al. 2002)

Σύμφωνα με τις πρώτες αναλύσεις που έλαβαν χώρα σε δείγματα του κοιτάσματος, έντονος είναι ο εμπλουτισμός σε Pd, Au και Ag. Πιο συγκεκριμένα για τον χρυσό οι πρώτες τιμές που καταγράφηκαν κυμαίνονται από 250 έως 7220 ppb (Eliopoulos and Economou-Eliopoulos 1991). Επιπλέον, περισσότερες γεωχημικές αναλύσεις έδωσαν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την πηγή προέλευσης του Au, η οποία φαίνεται πως είναι ίδια και για το Pd, Ag και Te και σχετίζεται με την πυριτίωση. Στις αναλύσεις των πετρωμάτων βρέθηκαν περιεκτικότητες και από άλλα πολύτιμα μέταλλα (Σχ. 6.4).

Ο χρυσός περιέχεται μέσα σε σύμπλοκα ιόντων και με αποτέλεσμα να μπορεί να μετακινηθεί. Τα κύρια σύμπλοκα περιέχουν σουλφίδια, χλωρίδια, αμμωνία και θειοαρσενικό. Η μεταφορά του χρυσού ως σύμπλοκο με το θειοαρσενικό επιτυγχάνεται σε διαλύματα χαμηλών θερμοκρασιών (<300°C) με ουδέτερο έως αλκαλικό pH. Τα σύμπλοκα των χλωριδίων και του χρυσού επικρατούν σε διαλύματα υψηλής θερμοκρασίας (>300°C),

υψηλής αλατότητας και χαμηλής περιεκτικότητας θείου. Η μεταφορά του χρυσού σε παρόμοια κοιτάσματα των Σκουριών (πορφυριτικά χαλκού πλούσια σε Au) πρέπει να γίνεται με την βοήθεια των συμπλόκων χλωριδίων. Τα πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού διαμορφώνουν καταστάσεις υψηλών θερμοκρασιών και αλατότητας, χωρίς να δίνει την δυνατότητα στα θειοσύμπλοκα να σχηματιστούν.

Location	Alteration type	Sample	ppb			Pd/Pt	ppm						Fe (wt.%)
			Pd	Pt	Au		Te	Se	As	Cu	Pb	Zn	
Greece													
Skouries A. porphyry	potassic–propylitic zone	C.Sk7	200	5	1900	40	1.8	14	1	11,000	50	38	5.7
		main minerals: quartz, orthoclase,	C.Sk8	110	10	3100	11	1.1	25	2	40,000	26	27
	albite, anorthite, biotite,	Sk.977	60	< 10	2500		1.6	6	2	9000	30	40	7.4
	pyrite, chalcopyrite, magnetite	* Sk.Po.or	76	< 10	910		0.63	8	4	5000	25	150	6.7
	oxidized zone (main minerals:	Sk971	75	< 10	960		0.8	9	3	36,000	20	30	7.2
	quartz, malachite, hematite,	Sk972	45	5	3500	9	0.8	7	2	39,000	22	35	2
	magnetite)	Sk974	65	< 10	1700		1.1	11	2	9600	18	40	6.2
		Sk975	490	< 10	2600		2.5	18	2	11,000	24	30	5.1
		C.Sk6	480	10	7200	48	2.7	20	2	23,000	26	10	6.9
	concentrate chalcopyrite	Sk.Po.F	2400	40	22,000	60	18.5	190	6700	210,000	110	17,000	
	alteration zone (propylitic)	* Sk.B.or	11	< 10	670		0.33	3	3	500	30	40	
	concentrate chalcopyrite	Sk.B.F	75	20	8200	3.8	4	45	97	56,000	32	300	
B. country rocks													

Σχ. 6.4. Συγκεντρώσεις σε πολύτιμα μέταλλα (Eliopoulos and Economou-Eliopoulos 2000)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Earthsci.org; Porphyry Deposits.

Economou-Eliopoulos, M., Eliopoulos, D. G., 2000. Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their significance. *Ore Geology Reviews* 16, 59-70.

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. Chapter 9-17 pp.937.

Eldorado Gold Corp., 2021. Assets; Operations & Projects; Skouries, Greece.

Eldorado Gold Corp., 2021. Assets; Resources and Reserves.

Eliopoulos, D. G., Economou-Eliopoulos, M., 1991. Platinum Group Elements and Gold Contents in the Skouries Porphyry Copper Deposit, Chalkidiki Peninsula, Northern Greece. *Economic Geology* 86, 740-749.

Frei, R., 1995. Evolution of Mineralizing Fluid in the Porphyry Copper System of the Skouries Deposit, Northeast Chalkidiki (Greece): Evidence from Combined Pb-Sr and Stable Isotope Data. *Economic Geology* 90, 746-762.

Freie Universitat Berlin, 2022. Home; GeoLearning; Mountain Building; Porphyry Copper.

- Kesler, S. E., Chrysoulis, E. L., Simon, G., 2002. Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews* 21, 103-124.
- Kiliyas, A., Falalakis, G., Sfeikos, A., Papadimitriou, E., Vamvaka, A., Gkarlaouni, Ch., 2013. The Thrace basin in the Rhodope province of NE Greece- A tertiary supradetachment basin and its geodynamic implications. *Tectonophysics* 595-596, 90-105.
- 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(1), 137-144.
- Logan, J. M., Mihalynuk, M. G., 2014. Tectonic Controls on Early Mesozoic Paired Alkaline Porphyry Deposit Belts (Cu-Au ± Ag-Pt-Pd-Mo) Within the Canadian Cordillera. *Economic Geology* 109 (4), 827-858.
- McFall, K. A., 2016. Critical Metals in Porphyry Copper Deposits: Fluid inclusions, chapter 4. 1, 7, 96-113, 141-142, 147, 149, 159, 161-162, 164 pp.
- McFall, K. A., Naden, J., Roberts, S., Baker, T., Spratt, J., & McDonald, I. (2018). Platinum-group minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit. *Ore Geology Reviews*, 99, 344-364.
- Mindat.org. εικόνες μεταλλοφοριών
- Safari, M., Maghsoudi, A., & Pour, A. B., 2018. Application of Landstat-8 and ASTER satellite remote sensing data for porphyry copper exploration: a case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran. *Geocarto international*, 33(11), 1186-1201.
- Sillitoe, R. H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3-41.
- Siron, C. R., Rhys, D., Thompson, J. F. H., Baker, T., Veligrakis, Th., 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, 309-346.
- Siron, C. R., Thompson, J. F. H., Baker, T., Friedman, R., Tsitsanis, P., Russell, S., Randall, S., Mortensen, J., 2016. Magmatism and Metallogenic Framework of Au-Cu Porphyry and Polymetallic Carbonate-Hosted Replacement Deposits of Kassandra Mining District, Northern Greece. Chapter 2. Society of Economic Geologists. Special Publication 19, 29-55.
- Voudouris, P., Mavrogonatos, C., Spry, P.G., Baker, T., Melfos, V., Klemd, R., Haase, K., Repostock, A., Djiba, A., Bismayer, U., Tarantola, A., Scheffer, C., Moritz, R., Kouzmanov, K., Alfieris, D., Papavassiliou, K., Schaarschmidt A., Galanopoulos, E., Galanos, E., Kolodziejczyk, J., Stergiou, C., Melfou, M., 2019. Porphyry and epithermal

deposits in Greece: An overview, new discoveries and mineralogical constraints on their genesis. Ore Geology Reviews 107, 654-691.

Wikipedia; Fluid inclusions.

Βασιλάτος Χ. Δ., 2013. Συγκριτική μελέτη της γεωχημείας ιχνοστοιχείων και στοιχείων της ομάδας των σπανίων γαιών (REE), τριτογενών γρανιτικών σωμάτων της Κεντρικής Μακεδονίας, που σχετίζονται ή μη, με γνωστή μεταλλοφορία-Προσδιορισμός του γεωτεκτονικού περιβάλλοντος γένεσης γρανιτικών σωμάτων. Διδακτορική διατριβή. Αθήνα 2013. 15-18σ.

Μέλφος, Β., & Βουδούρης, Π. (2022). Κοιτάσματα της Ελλάδας [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-32>
Μέλφος Β., Θεσσαλονίκη 2020. Υποηφαιστειακά κοιτάσματα ή κοιτάσματα πορφυριτικού τύπου (παρουσίαση)

Μιχαηλίδης Κ. Μ., Βαβελίδης Μ. Κ., Φιλιππίδης Α. Α., Θεσσαλονίκη 1986. Σημειώσεις κοιτασματολογίας Ι, σ. 58-62

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