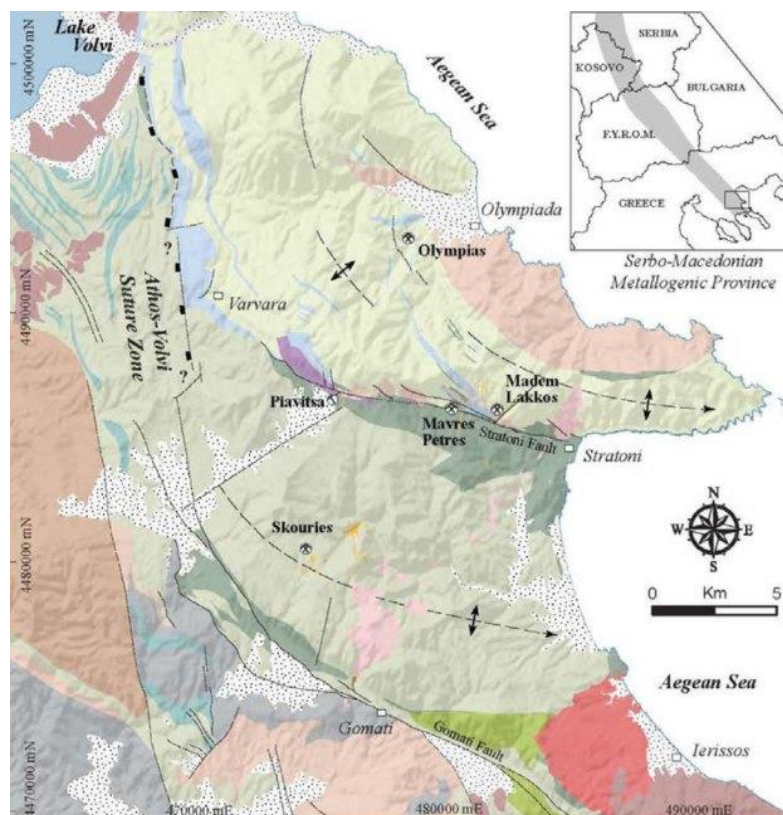




ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΙΔΗΣ
ΑΕΜ 5962

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024





ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΙΔΗΣ

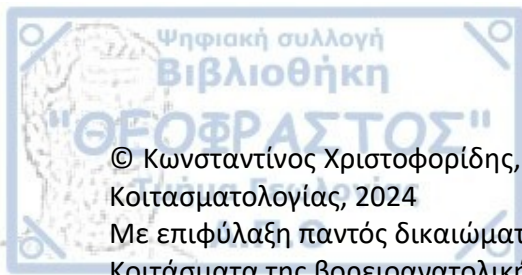
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Κωνσταντίνος Χριστοφορίδης, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Κωνσταντίνος Χριστοφορίδης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Κοιτάσματα της βορειοανατολικής Χαλκιδικής – *Πτυχιακή Εργασία*

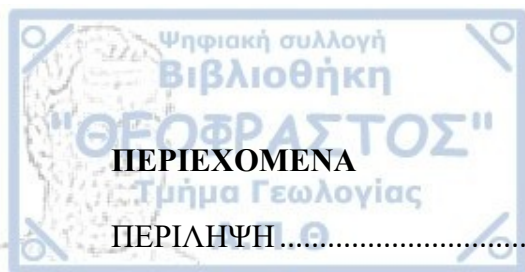
© Constantine Christoforidis, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2024
All rights reserved.
Ore deposits of north-eastern Chalkidiki – *Bachelor Thesis*

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://i0.wp.com/smartexploration.eu/wp-content/uploads/2018/09/Greece_Hellas-Gold-Site.jpg?resize=622%2C1024&ssl=1





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2.1 ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΤΥΠΟΥ SKARN ΣΤΟ ΜΑΝΤΕΜ ΛΑΚΚΟ.....	10
2.2 ΠΟΛΥΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	12
2.2.1 Κοίτασμα Πιάβιτσας.....	14
2.2.2 Κοίτασμα Μαύρων Πετρώων.....	16
2.2.3 Κοίτασμα Ολυμπιάδας.....	18
2.3 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ Cu-Au.....	23
2.3.1 Πορφυριτικό κοίτασμα Σκουριών.....	24
3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ.....	30
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	35
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	36



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κοιτάσματα της βορειοανατολικής Χαλκιδικής

Κωνσταντίνος Χριστοφορίδης

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως θέμα τα κοιτάσματα της βορειοανατολικής Χαλκιδικής. Το πρώτο κεφάλαιο πραγματεύεται την γεωλογία της Χαλκιδικής με ιδιαίτερη έμφαση στο βορειοανατολικό τμήμα της χερσονήσου. Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στα κοιτάσματα τύπου skarn, το τρίτο αναφέρεται στα πολυμεταλλικά κοιτάσματα αντικατάστασης, και το τέταρτο στα πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού και χρυσού. Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παραθέτει συνοπτικά την ιστορία της μεταλλευτικής δραστηριότητας στην περιοχή από την αρχαιότητα έως σήμερα, καθώς ακόμα και τα σημαντικότερα μεταλλεία που συναντώνται στην περιοχή.

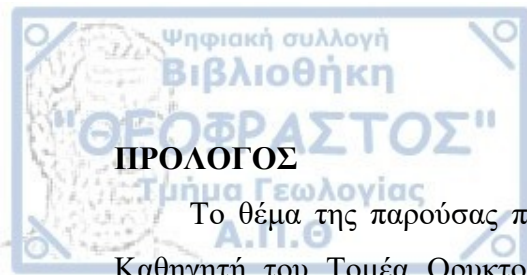


ABSTRACT

Ore deposits of north-eastern Chalkidiki

Constantine Christoforidis

The present thesis refers to the deposits of northeastern Chalkidiki. The first chapter discusses with the geology of Chalkidiki with special emphasis on the northeastern part of the area. The second chapter deals with the skarn deposits, the third deals with the polymetallic replacement type deposits and the fourth with the porphyry copper and gold deposits. The fifth chapter summarizes the history of the mining activity in the region since the antiquity and presents the major mines in the area.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

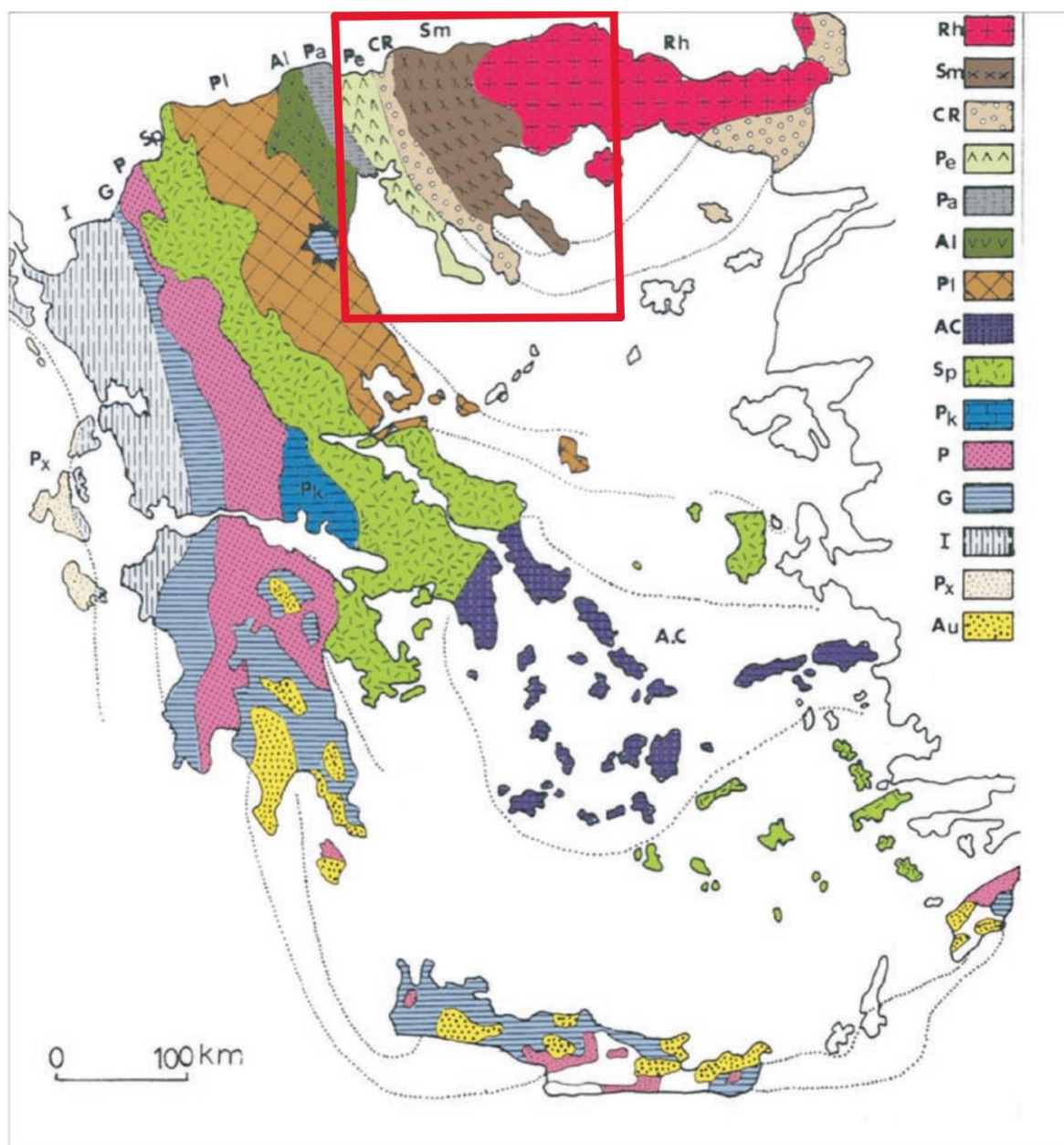
Το θέμα της παρούσας πτυχιακής - διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο τον Οκτώβριο του 2023.

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση των κύριων τύπων κοιτασμάτων που εμφανίζονται στην περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής, καθώς επίσης και της παρουσίας των μεθόδων εξόρυξης και οικονομικής εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων αυτών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα αυτής της πτυχιακής, Καθηγητή κ. Β. Μέλφο για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, όπως και για την συνεχή στήριξη του με τις συμβουλές του κατά την συγγραφή της εργασίας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χερσόνησος της Χαλκιδικής στο μεγαλύτερο μέρος της, τοποθετείται στην Ελληνική Ενδοχώρα. Εξάίρεση αποτελούν δύο λεπτές μακρόστενες λωρίδες (με πάχος περίπου 18-22 χιλιόμετρα) διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, που υπάγονται στις λεγόμενες Εσωτερικές Ελληνίδες ζώνες (Σχ. 1.1). Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από τρεις γεωτεκτονικές ζώνες, οι οποίες εκτείνονται από τα βόρεια σύνορα της Ελλάδας, έως το Βόρειο Αιγαίο.



Σχ. 1.1. Γεωτεκτονική απεικόνιση της ζωνών στις οποίες χωρίζεται ο ελληνικός χώρος. Στο επισημασμένο τετράγωνο απεικονίζεται η περιοχή της χερσονήσου της Χαλκιδικής (Μουντράκης, 2020).

Από δυτικά προς ανατολικά πρόκειται, για την ζώνη Αξιού (υποζώνη Παιονίας), την Περιοδοπική ζώνη και την Σερβομακεδονική. Η ζώνη Αξιού (υποζώνη Παιονίας) μαζί με

την Περιοδοπική ζώνη ανήκουν στις Εσωτερικές Ελληνίδες. Από το κεντρικό περίπου κομμάτι της Χαλκιδικής και προς ανατολάς, βρίσκεται η Σερβομακεδονική ζώνη. Ενώ από την γραμμή Στρυμόνα και ανατολικά ξεδιπλώνεται η μάζα της Ροδόπης. Από τις τελευταίες δύο γεωτεκτονικές ενότητες είναι που συντίθεται η Ελληνική Ενδοχώρα (Kockel et al. 1975, Μουντράκης 2020).

Στο ελληνικό τμήμα της η Σερβομακεδονική μάζα διακρίνεται από ανατολή προς δύση στην ενότητα Βερτίσκου και στην ενότητα Κερδυλλίων αντίστοιχα. Οι λιθολογικές διαφορές βοήθησαν στην διάκριση των δύο αυτών ενοτήτων, με ιδιαίτερη βαρύτητα να δίνεται στον βαθμό μεταμόρφωσης των πετρωμάτων που βρέθηκε να είναι πιο χαμηλός στην ενότητα Βερτίσκου κυρίως επειδή εκεί εντοπίστηκαν θέσεις διαμορφωθείσες υπό την επιρροή πρασινοσχιστολιθικής μεταμόρφωσης.

Στην ενότητα Κερδυλλίων παρουσιάζονται εκτεταμένου πάχους μάρμαρα, σε αντιπαράβολή με εκείνη του Βερτίσκου όπου αυτά εμφανίζονται ορισμένες φορές σποραδικά και άλλες φορές σε λεπτές ενστρώσεις. Αντιθέτως, μέσα στα πετρώματα της ενότητας Βερτίσκου εμπεριέχονται τεκτονικά, σχιστοποιημένα σώματα σερπεντινίτη που όμως δεν εμφανίζονται στην ενότητα Κερδυλλίων.

Η ενότητα Βερτίσκου κατατάσσεται ηλικιακά ως Προπαλαιοζωική, ενώ αποτελείται κυρίως από γνευσίους. Πιο συγκεκριμένα εντοπίζονται σε αυτήν διμαρμαρυγικοί και μοσχοβιτικοί γνεύσιοι. Κατά τόπους παρατηρούνται εναλλαγές μέσα σε αυτά τα πετρώματα, γρανατούχοι, μοσχοβιτικοί και ενίοτε τουρμαλινικοί γνεύσιοι ενώ παρατηρούνται και οφθαλμογενέσιοι.

Η ενότητα Κερδυλλίων κατατάσσεται ηλικιακά στο Προοκάμβριο, ενώ αποτελείται από γνευσίους που αποτελούν τους βαθύτερους ορίζοντες στην Σερβομακεδονική μάζα, ίσως μάλιστα από τους πιο βαθείς σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο (Σακελλαρίου, 1989). Ως κυρίαρχο πέτρωμα της ενότητας Κερδυλλίων θεωρούνται οι βιοτιτικοί γνεύσιοι που ανάλογα με το βάθος τους μετατρέπονται σε μιγματιτικούς γνεύσιους.

Οι μαγματικές διεισδύσεις εξαιτίας των οποίων διακόπτεται η συνέχεια των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Σερβομακεδονικής διαχωρίζονται σε 4 φάσεις μαγματισμού. Αρχικά η πρώτη φάση, προαλπικής ηλικίας, είναι βασικής-υπερβασικής σύστασης στην ζώνη επαφής ενοτήτων Κερδυλλίων και Βερτίσκου. Έπειτα η δεύτερη, ηλικίας Άνω Παλαιοζωικού, είναι γρανιτικής σύστασης και εντοπίζεται στους γνευσίους των περιοχών Βερτίσκο, Κερδυλλίων και Ολυμπιάδας. Ενώ η τρίτη φάση μαγματισμού, χρονολογείται στο Μεσοζωικό, και σχετίζεται με τους γρανίτες της Αρναίας, του Λαχανά, του Μονοπήγαδου, τον χαλαζιακό διορίτη στο όρος Βερτίσκο και άλλους. Τέλος η τέταρτη

φάση (Ηώκαινο - Ολιγόκαινο), θεωρείται μετα-ορογενετική, όξινη έως ενδιάμεση και οδήγησε στην δημιουργία του γρανίτη Ιερισσού, του γρανίτη Σιθωνίας, του γρανοδιορίτη του Στρατωνίου, των χαλαζιακών διοριτών της Μεγάλης Παναγίας και άλλα. Αυτή η φάση συνδέεται με κάποιες εμφανίσεις πηγματιτικών, πορφύρων καθώς και απλιτικών φλεβών οι οποίες παρουσιάζουν αξιόλογη μεταλλοφορία.

Ο γρανίτης της Αρναίας έχει επωθηθεί επί των πετρωμάτων της ενότητας Βερτίσκου. Οριοθετείται από ρήγμα το οποίο έχει σχετικά μικρή γωνία κλίσης και νοτιοδυτικής διεύθυνσης κλίσης. Στα δυτικά του εφάπτεται επί των πετρωμάτων της Περιοδοπικής ζώνης. Ουσιαστικά αποτελεί έναν έντονα αποσαθρωμένο διμαρμαρυγικό και μοσχοβιτικό γρανίτη. Ο εν λόγω γρανίτης αποτελεί έναν από τους πλουτωνίτες οι οποίοι έχουν διεισδύσει στην ευρύτερη περιοχή κατά το Μεσοζωικό, ενώ καταλαμβάνει την έκταση νοτιοδυτικά της λίμνης Βόλβης μέχρι και την Αρναία. Ως ηλικία διείσδυσης του γρανιτικού σώματος βρέθηκε να είναι το Ανώτερο Ιουρασικό. Παράλληλα κατά το Άνω Ιουρασικό έως και το Κάτω Κρητιδικό υπέστη μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης (De Wet et al. 1989).

Όσον αφορά την βορειοανατολική Χαλκιδική (περιοχή Μεταλλείων Κασσάνδρας), πολλαπλές μελέτες υποδεικνύουν ότι η περιοχή βρίσκεται σε ένα πολύπλοκο τεκτονικό και μαγματικό περιβάλλον. Το ρήγμα Κερδυλλίων με διεύθυνση Βορρά-Νότου και Στρατωνίου με διεύθυνση Ανατολής-Δύσης καθορίζει τον διαχωρισμό μεταξύ δύο διακριτών τεκτονικών συνόλων: του ανώτερου σχηματισμού Βερτίσκου και του κατώτερου σχηματισμού Κερδυλλίων. Ο Βερτίσκος ηλικίας Σιλουρίου, που θεωρείται τμήμα της Σερβομακεδονικής Μάζας, αποτελείται από παραμορφωμένους ορθογενέσιους και μεταμορφωμένα πετρώματα που έφθασαν σε μεταμόρφωση αμφιβολιτικού βαθμού κατά τη διάρκεια του Μεσοζωικού. Ο σχηματισμός Κερδυλλίων της Ροδόπης αποτελείται από βιοιτιτικούς γενέσιους, αμφιβολίτες και μάρμαρα ηλικίας από το Πέρμιο έως το ύστερο Ιουρασικό. Υπέστησαν αμφιβολιτική μεταμόρφωση με συνθήκες μερικής τήξης από το Ηώκαινο, ταυτόχρονα με την απομάκρυνση του συμπλέγματος του μεταμορφωμένου πυρήνα της νότιας Ροδόπης. Το ρήγμα των Κερδυλλίων έχει προηγουμένως ερμηνευθεί ως δομή αποκόλλησης που σχετίζεται με την εκταφή.

Τα Ολιγοκαινικά- Μειοκαινικά, ασβεσταλκαλικά έως αλκαλικά μαγματικά πετρώματα στην περιοχή εντοπίζονται κατά μήκος ενός διαδρόμου με ΒΑ διεύθυνση. Αυτό το μείζον μαγματικό γεγονός άρχισε πριν από περίπου 28 Ma με τη διείσδυση του γρανοδιορίτη Στρατωνίου στο ρήγμα του Στρατωνίου. Ο επακόλουθος μαγματισμός γύρω στα 26-24 Ma περιλαμβάνει χαλαζιακά-διοριτικά πορφυριτικά σώματα κυρίως μέσα στο υποκείμενο τέμαχος του ρήγματος. Το επεισόδιο αυτό συνδέεται χωρικά και χρονικά με μικρά

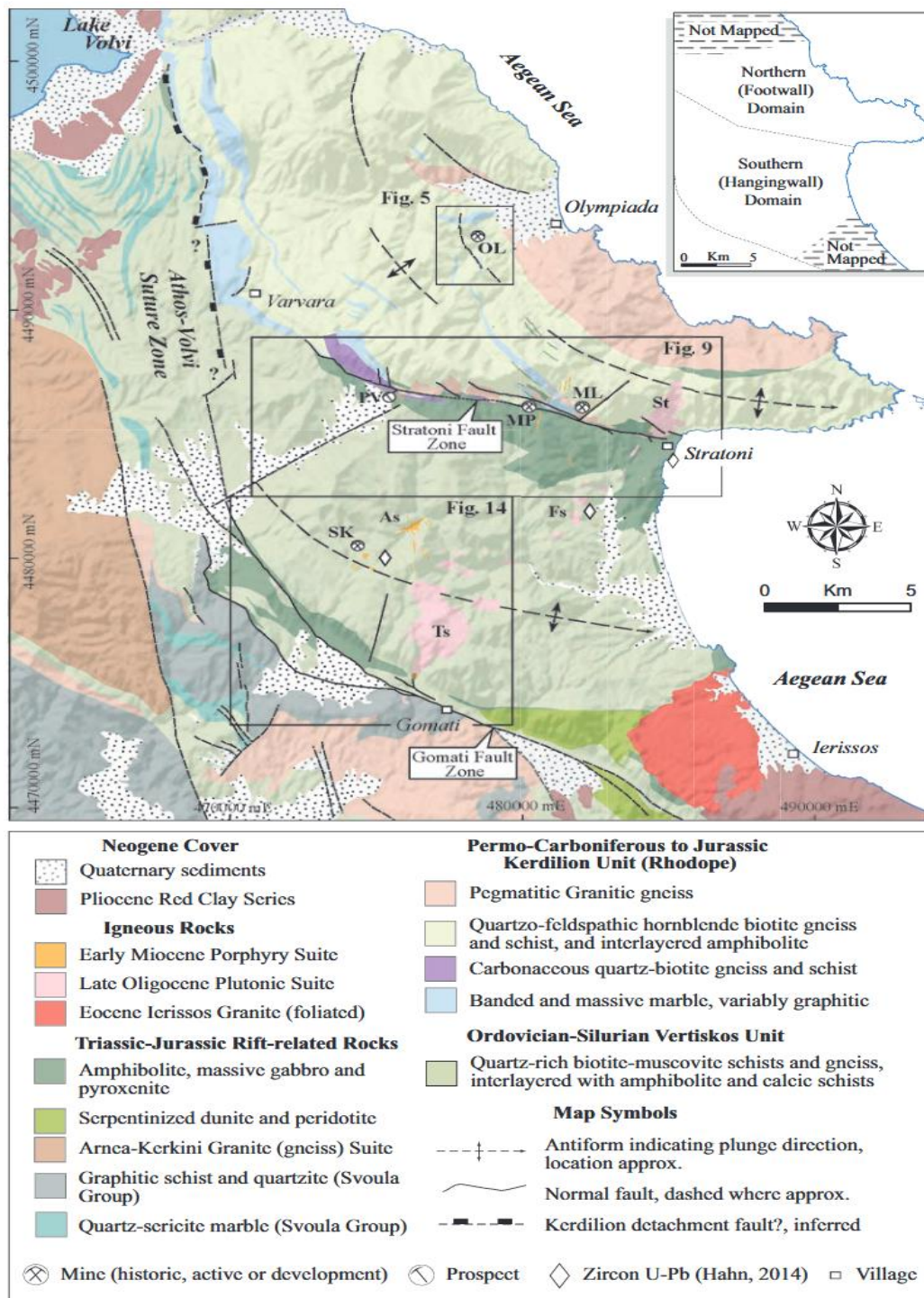
κοιτάσματα τύπου Cu-skarn και μεγαλύτερα κοιτάσματα αντικατάστασης ανθρακικών βασικών μετάλλων που εντοπίζονται κατά μήκος του ρήγματος Στρατωνίου. Ένα τελικό μαγματικό γεγονός συνέβη γύρω στα 20-19 Ma με την τοποθέτηση του πορφυριτικού συνημονζονίτη στις Σκουριές, που σχετίζεται με μεταλλοφορία Cu-Au, και μιας ζώνης πορφυριτικού τραχείτη με BA διεύθυνση, που τέμνει παλαιότερα κοιτάσματα θειούχων στις Μαύρες Πέτρες και την Ολυμπιάδα (Siron et al. 2016).

Η τεκτονική λοιπόν αρχιτεκτονική της περιοχής των Μεταλλείων Κασσάνδρας δημιουργήθηκε υπό πλαστικές συνθήκες και αργότερα αναμορφώθηκε στο θραυστικό τεκτονικό περιβάλλον. Ένας περιφερειακά εκτεταμένος διεισδυτικός (S1) ιστός ορίζεται από μια ρηχή φολίδωση. Η επακόλουθη παραμόρφωση δημιουργήσε κεκλιμένες, στενές έως ισοκλινείς (F2) πτυχές που παρουσιάζουν στροφή από πάνω προς τα βορειοανατολικά και αξονική επίπεδη (S2) σχιστότητα υποπαράλληλη προς την φολίδωση. Ένα μεταγενέστερο γεγονός είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τοπικών απότομα βυθιζόμενων (S3) πτυχώσεων. Τα γεγονότα αυτά τροποποιούνται από μια δεύτερη γενιά πτυχώσεων (F4) που παρήγαγε όρθιες, ανοικτές έως κλειστές πτυχές κλίμακας χιλιομέτρων. Η πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του ρήγματος Κερδυλλίων σταμάτησε γύρω στα 26 Ma, συγχρόνως με τη μετάβαση σε ένα θραυστικό τεκτονικό περιβάλλον, την έναρξη του μαγματισμού και το σχηματισμό των πορφυριτικών μεταλλοφοριών και των κοιτασμάτων αντικατάστασης. Οι προεξέχουσες νεοτεκτονικές δομές μετά την εξόρυξη είναι πανταχού παρούσες και εμφανίζουν ημιτονοειδείς συνιστώσες ολίσθησης και κανονικές συνιστώσες μετατόπισης με νότια κλίσης (Siron et al. 2016) (Σχ. 1.2).

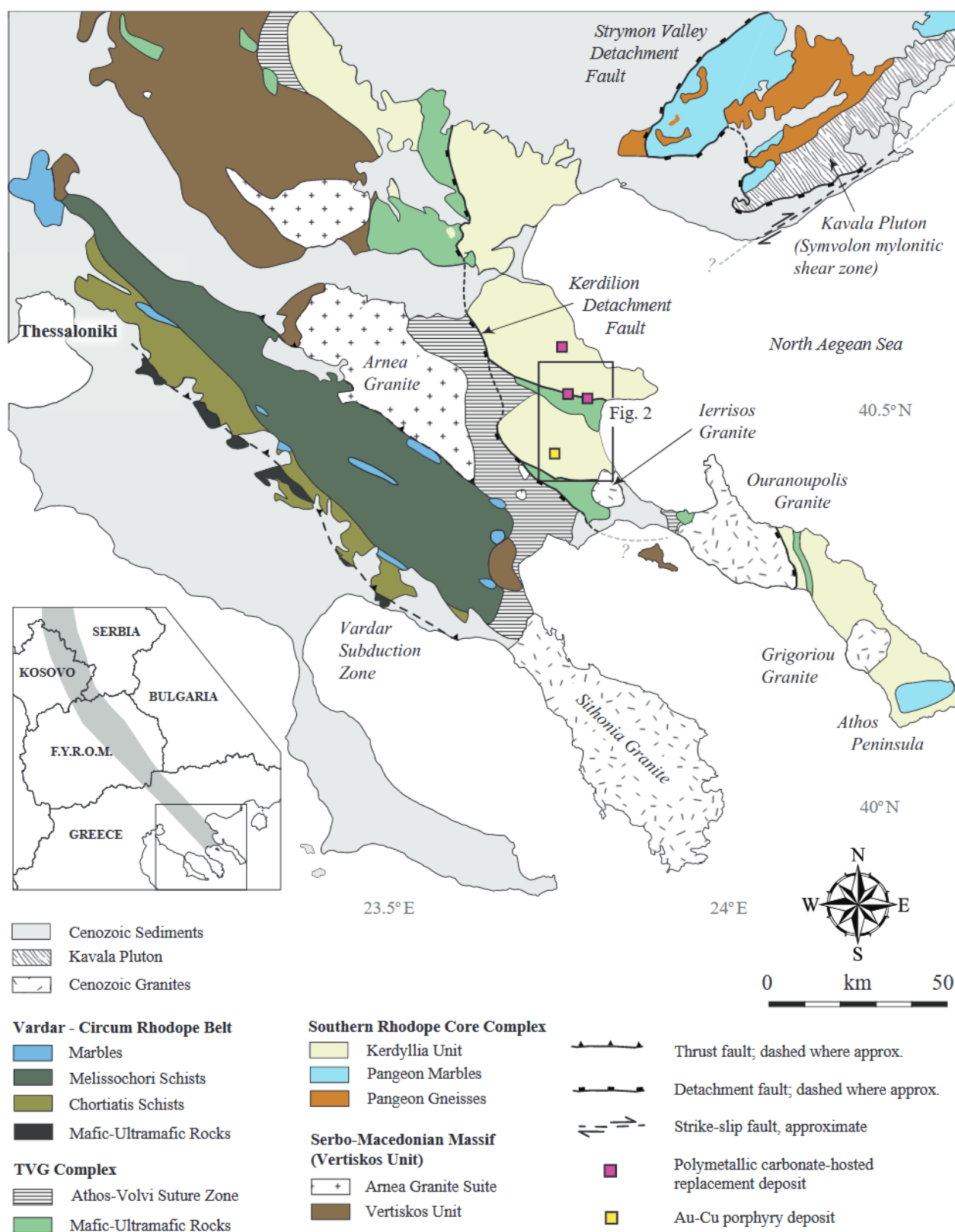
Τα κοιτάσματα της βορειοανατολικής Χαλκιδικής είναι γνωστά και ως «Μεταλλεία Κασσάνδρας». Η μεταλλευτική αυτή περιοχή περιέχει 12 Moz χρυσού σε πορφυριτικά και διείσδυση μεταλλοφορίας θειούχων που φιλοξενείται σε ανθρακικά πετρώματα. Πολυμεταλλικά κοιτάσματα πλούσια σε Au απαντώνται στην Ολυμπιάδα (18Mt με 8,1 g/t Au, 125g/t Ag, 4,9% Pb και 6,5% Zn πόρους) και στην Πιάβιτσα, και πλούσια σε Ag μεταλλοφορία στις Μαύρες Πέτρες (1,14Mt με 181g/t Ag, 6,8% Pb και 11,3% Zn) και στο Μαντέμ Λάκκο (>10Mt). Το πορφυριτικού τύπου κοιτάσμα Cu-Au των Σκουριών στα νότια έχει μετρημένο και υποδεικνυόμενο πόρο 283,6 Mt με περιεκτικότητα 0,6g/t Au και 0,43% Cu (Siron et al. 2018) (Σχ. 1.3).

Τα κοιτάσματα τα οποία εντοπίζονται στον σχηματισμό Κερδυλλίων και κατά μήκος του ρήγματος Στρατωνίου παρουσιάζουν έντονο μεταλλευτικό και κοιτασματολογικό ενδιαφέρον λόγω της παρουσίας θειούχων και πολύτιμων μετάλλων. Παράλληλα, στην ενότητα Βερτίσκου εντοπίζονται τα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu-Au. Τα πετρώματα της

ενότητας Κερδυλλίων έχουν πτυχωθεί με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μια ευρύτερη αντικλινική δομή. Το αντίκλινο των Κερδυλλίων έχει διεύθυνση ΑΝΑ-ΔΒΔ ενώ βυθίζεται προς ΝΑ. Στα βόρεια οριοθετείται από τον αμφιβολιτικό γνεύσιο, ενώ στα νότια από το ρήγμα Στρατωνίου. Στο συγκεκριμένο αντίκλινο και εντός του μαρμάρου των Κερδυλλίων, πλησίον της επαφής με το ρήγμα Στρατωνίου, είναι που φιλοξενείται η μεταλλοφορία των μεικτών θειούχων (skarn).



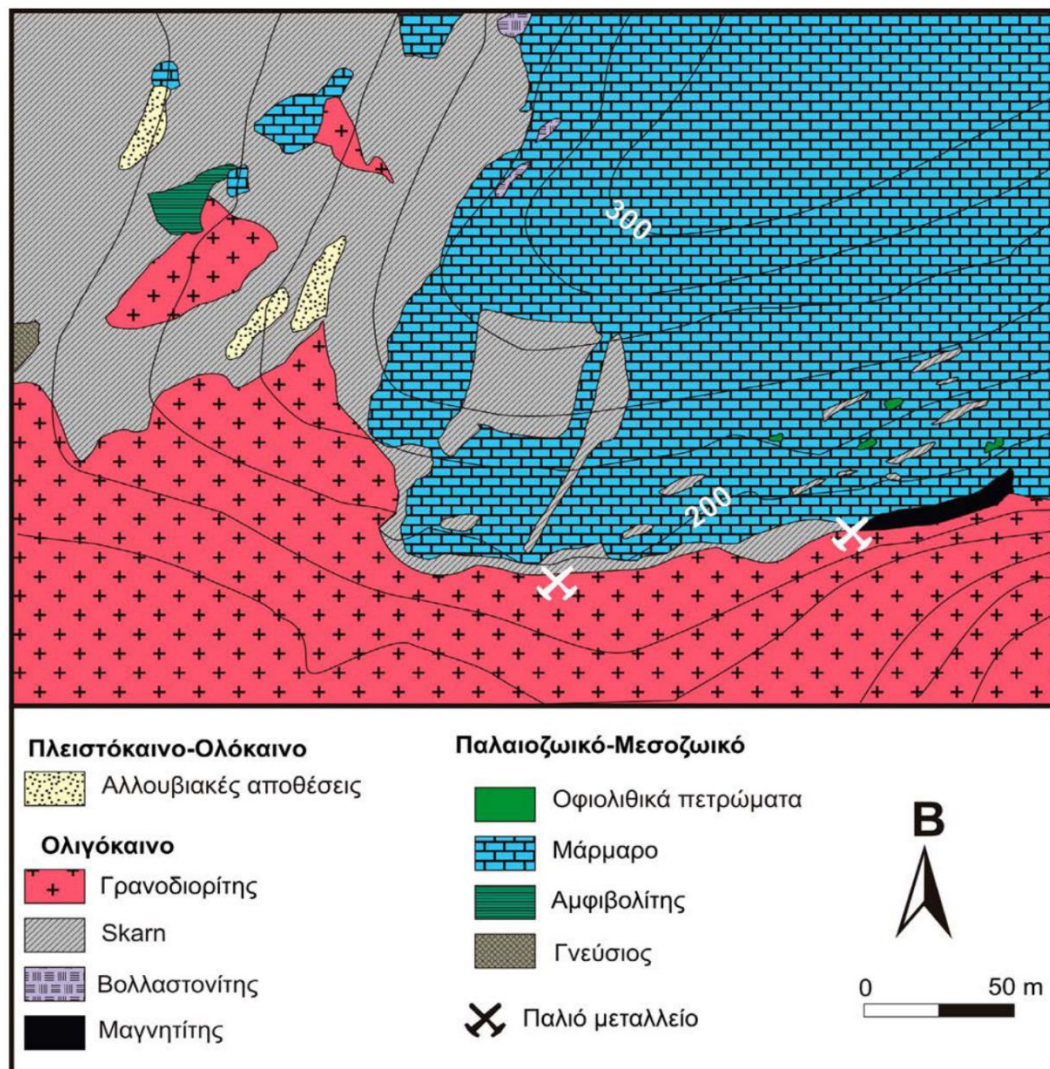
Σχ. 1.2. Γεωλογικός χάρτης των «Μεταλλείων Κασσάνδρας (από Siron et al. 2016).



Σχ. 1.3. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της χερσονήσου Χαλκιδικής με το ρήγμα αποκόλλησης του Στρυμόνα και το βόρειο τμήμα του ρήγματος αποκόλλησης Κερδυλλίων. Στον ένθετο χάρτη απεικονίζεται η θέση της Ολιγοκαινικής-Μειοκαινικής μεταλλογενετικής ζώνης της Σερβομακεδονικής Μάζας (γκρι) (Siron et al. 2016).

2.1 ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΤΥΠΟΥ SKARN ΣΤΟ ΜΑΝΤΕΜ ΛΑΚΚΟ

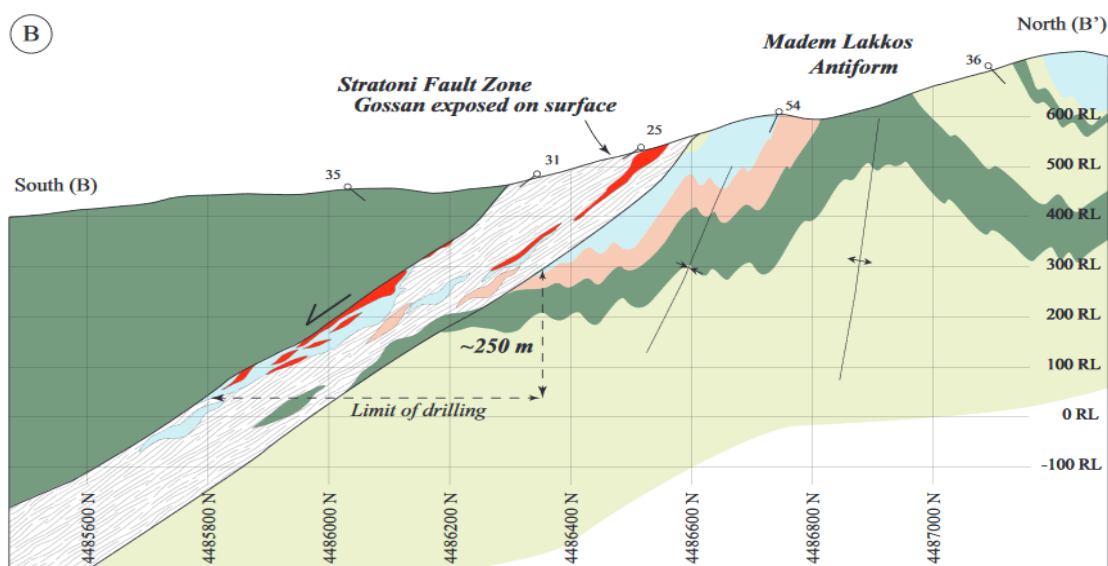
Τα κοιτάσματα τύπου skarn στο Μαντέμ Λάκκο (Σχ. 2.1) περιορίζονται κυρίως σε φακούς μαρμάρου που περιέχονται εντός και δίπλα της ζώνης του ρήγματος Στρατωνίου. Η μεταλλοφορία αποτελείται από skarn και συμπαγή θειούχα ορυκτά.



Σχ. 2.1 Γεωλογικός χάρτης της μεταλλοφορίας Fe-Cu-Bi-W-Au τύπου skarn (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

Όσον αφορά την γεωτεκτονική του τοποθέτηση, το κοίτασμα τύπου skarn εμφανίζεται σε ένα σημαντικό σκέλος του ρήγματος Στρατωνίου μέσα σε μια πολύπλοκα πτυχωμένη και διαρρηγμένη ακολουθία αποτελούμενη από αμφιβολίτη, μάρμαρο, βιοτιτικό γνεύσιο και λεπτόκοκκο γρανιτικό γνεύσιο. Οι επαφές μεταξύ των ενοτήτων είναι συνήθως εντός της ζώνης ρήγματος Στρατωνίου. Η πτύχωση S1 έχει διεύθυνση δυτικά-βορειοδυτικά και μέτρια κλίση προς τα νοτιοδυτικά στο υποκείμενο και βόρεια-βορειοδυτικά στο υπερκείμενο τέμαχος. Η μεταλλοφορία φιλοξενείται σε μάρμαρο, γρανιτικό γνεύσιο και απλίτη. Η μεταλλοφορία ελέγχεται από ρήγματα και ζώνες ρηχών σχετικά πτυχώσεων που εκτείνονται

προς ανατολάς. Η κοντινή μεταλλοφορία στο Στρατώνι μετατοπίζεται από το ομώνυμο ρήγμα με διεύθυνση ΔΒΔ και επηρεάζεται ποικιλοτρόπως από υδροθερμικές αλλοιώσεις ελεγχόμενες από ρήγματα και φλέβες με θειούχα βασικά μέταλλα. Το δεξιόστροφο πλευρικό ρήγμα Βαθύλακκος με ΒΑ διεύθυνση μετατοπίζει το ρήγμα Στρατωνίου και η μεταλλοφορία συμπαγών θειούχων σε βάθος (Haines, 1998) (Σχ. 2.2).



Σχ. 2.2. Γεωλογική τομή η οποία απεικονίζει την αντικλινική δομή του Μαντέμ Λάκκο καθώς και το ρήγμα του Στρατωνίου, (Siron et al. 2018).

Ορυκτολογικά, το μεγαλύτερο και σημαντικότερο κοίτασμα εντοπίζεται ανατολικά του ανενεργού μεταλλείου στο Μαντέμ Λάκκο κατά μήκος του ρήγματος Στρατωνίου. Πρόκειται για ένα χαλκούχο skarn που συνδέεται με χαλαζιο-αστριούχες πορφυριτικές φλέβες, απλιτικής σύστασης. Το αρχικό άνυδρο στάδιο του skarn χαρακτηρίζεται από γρανάτη και διοψίδιο, με μικρή συμμετοχή ανυδρίτη, επιδότο και μαγνητίτη. Σε μεταγενέστερο στάδιο σχηματίστηκαν ένυδρα ορυκτά όπως χλωρίτης, ακτινόλιθος, επίδοτο, καθώς και ασβεστίτης και χαλαζίας (Gilg 1993, Siron et al. 2016, 2019).

Ένα πρώιμο γεγονός μεταλλοφορίας skarn είναι εμφανές στο κοίτασμα και αποτελείται από ένα σύνολο ορυκτών υψηλής θερμοκρασίας (ανδραδίτη, γρανάτη-διοψίδιο σε συνδυασμό με λίγο ανυδρίτη με επίδοτο και μαγνητίτη). Η ανάδρομη μεταβολή των πρωτογενών ασβεστιτικών ορυκτών του skarn σε ένυδρες φάσεις (π.χ. χλωρίτης και ακτινόλιθος με υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο) συνοδεύεται από σιδηροπυρίτη και χαλκοπυρίτη με μικρές ποσότητες μαγνητοπυρίτη, μακινναβίτη, βισμούθινίτη, κουβανίτη και ίχνη γαληνίτη, τενναντίτη, γαληνοβισμούθινίτη, αϊκινίτη και κοζαλίτη. Τα μαγνησιούχα skarn συνδέονται χωρικά με το δολομιτικό μάρμαρο και αποτελούνται από ένα προγενέστερο σύνολο ορυκτών από φορστεριτικό ολιβίνη, μαγνητίτη και σιδηροπυρίτη.

Η ανάδρομη αλλοίωση των πρωτογενών ορυκτών του skarn είχε ως αποτέλεσμα τη μετατροπή του ολιβίνη σε σερπεντίνη και τάλκη καθώς ακόμα και την ανάπτυξη άλλων ένυδρων ορυκτών φάσεων, συμπεριλαμβανομένων του τρεμολίτη, του φλογοπίτη, του Mg-χλωρίτη και την προσθήκη ασβεστίτη και ανυδρίτη. Ο σιδηροπυρίτης που σχετίζεται με την ανάδρομη αυτή αλλοίωση περιέχει εγκλείσματα μαγνητοπυρίτη, μακινναβίτη, κουβανίτη και χαλκοπυρίτη. Η ορυκτολογία των συμπαγών θειούχων χωρίς skarn περιλαμβάνει γαληνίτη, σφαλερίτη και σιδηροπυρίτη με μικρές εμφανίσεις ή ίχνη χαλκοπυρίτη, αρσеноπυρίτη και τετραεδρίτη-τενναντίτη. Ο μαγνητοπυρίτης εμφανίζεται σε αφθονία συνδυαστικά πάντα με σώματα αντικατάστασης πλούσια σε σιδηροπυρίτη (Nicolau, 1960).

Η νεότερη φάση των διάσπαρτων θειούχων επικαλύπτει εν μέρει τα θειούχα ενώ χαρακτηρίζεται από υφές αντικατάστασης, breccia, φλέβες και πλήρωση κοιλοτήτων ανοικτού χώρου. Η συγκεκριμένη μορφή μεταλλοφορίας εμφανίζει υψηλή περιεκτικότητα σε χαλαζία και αποτελείται από σιδηροπυρίτη με μικρότερα ποσοστά σφαλερίτη, γαληνίτη, αρσеноπυρίτη και χαλκοπυρίτη, μικρό ποσοστό τετραεδρίτη-τενναντίτη και βουλανζερίτη με ίχνη άλλων θειούχων ορυκτών (Siron et al. 2016, 2018).

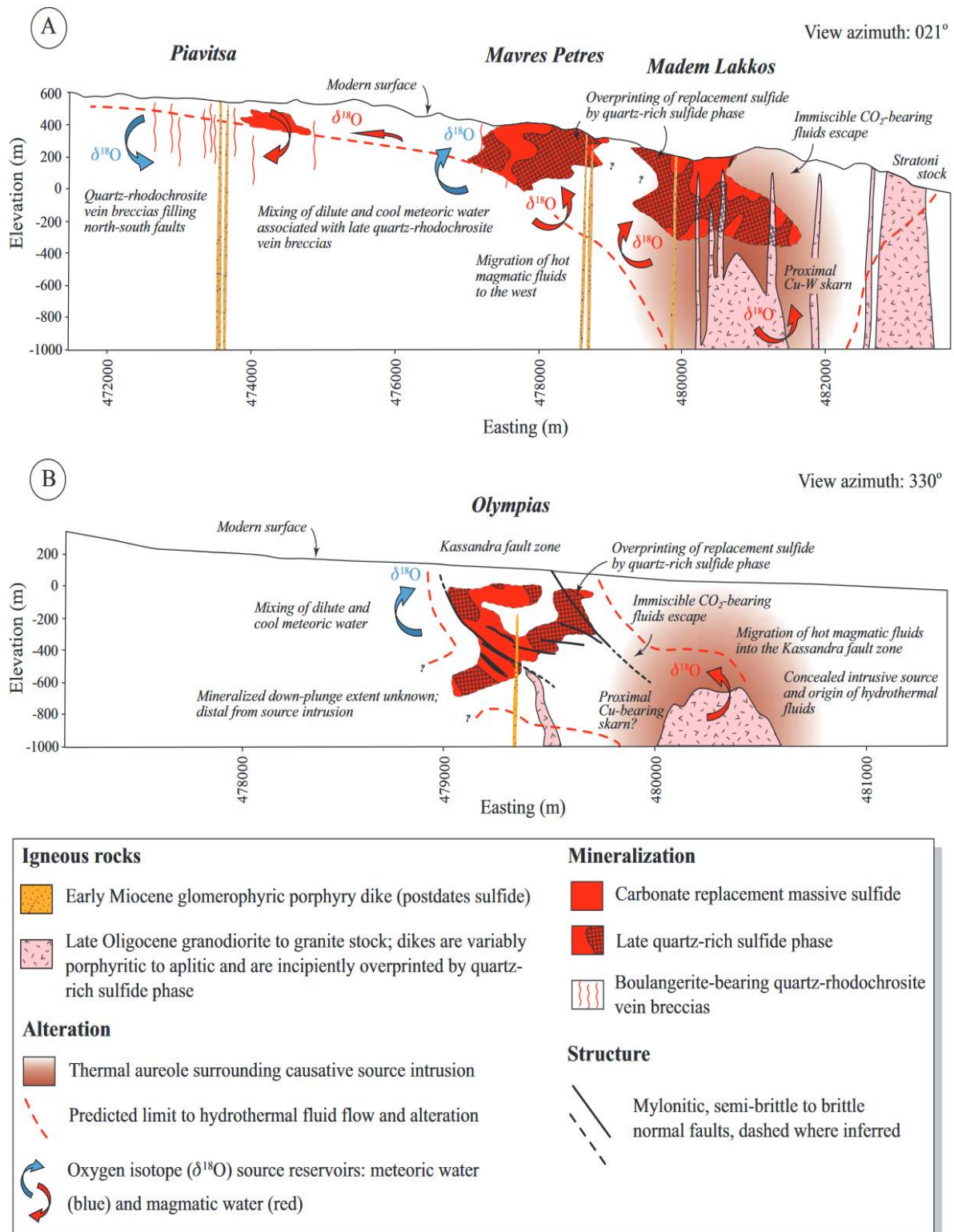
Τέλος, ο χρυσός φτάνει έως 5,1 g/t, με μέσο όρο 0,3 g/t, κάτι που δείχνει ότι η μεταλλοφορία skarn είναι φτωχότερη σε χρυσό από την αντίστοιχη μεταλλοφορία αντικατάστασης Pb-Zn κατά μήκος του ρήγματος Στρατωνίου (Μαντέμ Λάκκος, Μαύρες Πέτρες, Πιάβιτσα). Οι χημικές αναλύσεις έδειξαν επίσης 0,8% Pb & Zn. Στο αρχικό πρόδρομο στάδιο σχηματισμού της skarn μεταλλοφορίας, τα υδροθερμικά διαλύματα είχαν υψηλή θερμοκρασία (400-450° C) με τη συμμετοχή ρευστών πλούσιων σε CO₂ και σε H₂O υψηλής αλατότητας (14-45 κβ% NaCl), ενώ στο ανάδρομο στάδιο η θερμοκρασία τους υπολογίζεται σε 240-278° C (Gilg 1993, Siron et al. 2016, 2019).

2.2 ΠΟΛΥΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Τα σημαντικότερα κοιτάσματα συμπαγών θειούχων Pb-Zn-Ag-Au από αντικατάσταση στην βορειοανατολική Χαλκιδική, εντοπίζονται στην Ολυμπιάδα και στο Στρατόνι (Μαντέμ Λάκκος, Μαύρες Πέτρες, Πιάβιτσα) και έχουν παραχωρηθεί στην Eldorado Gold. Σήμερα γίνεται εκμετάλλευση στην Ολυμπιάδα και στις Μαύρες Πέτρες, το κοιτάσμα στον Μαντέμ Λάκκο έχει εξοφληθεί, και η Πιάβιτσα προγραμματίζεται να εξορυχθεί στο άμεσο μέλλον.

Τα πετρώματα της περιοχής ανήκουν στην ενότητα Κερδυλλίων της Σερβομακεδονικής μάζας που έχουν υποστεί υψηλού βαθμού μεταμόρφωση. Αποτελούνται κυρίως από γνεύσιους, αμφιβολίτες και μάρμαρα και είναι Παλαιοζωικής ηλικίας. οι μεταλλοφορίες φιλοξενούνται μέσα στα μάρμαρα στην επαφή με τους γνεύσιους, και σχηματίζουν

χαρακτηριστικές μορφές φακών (mantos) και σωλήνων (chimneys) (Kalogeropoulos et al. 1989, Gilg 1993, Siron et al. 2016, 2018, 2019) (Σχ. 2.3).



Σχ. 2.3. Απλοποιημένη τομή η οποία εμφανίζει την διαδικασία και τις διεργασίες που κάτω από τις οποίες δημιουργήθηκαν τα κοιτάσματα αντικατάστασης στην βορειοανατολική Χαλκιδική (Siron et al. 2019).

Όπως αναφέρθηκε ήδη η ενότητα Κερδυλλίων διαχωρίζεται από την ενότητα του Βερτίσκου, της Σερβομακεδονικής μάζας, μέσω του ρήγματος αποκόλλησης των Κερδυλλίων στα δυτικά, και με το κανονικό ρήγμα του Στρατωνίου στα νότια. Γι' αυτό τον λόγο τα πετρώματα και ιδίως τα μάρμαρα, εμφανίζουν έντονη πλαστική και θραυσιγενή παραμόρφωση. Η πλαστική παραμόρφωση έχει δημιουργήσει μυλωνιτίωση των πετρωμάτων κατά μήκος ζωνών διάτμησης (shear zones), ενώ η θραυσιγενής παραμόρφωση διακρίνεται με την έντονη κατάκλαση των πετρωμάτων και με εκτεταμένα τεκτονικά λατυποπαγή (breccias) (Kydonakis et al. 2016).

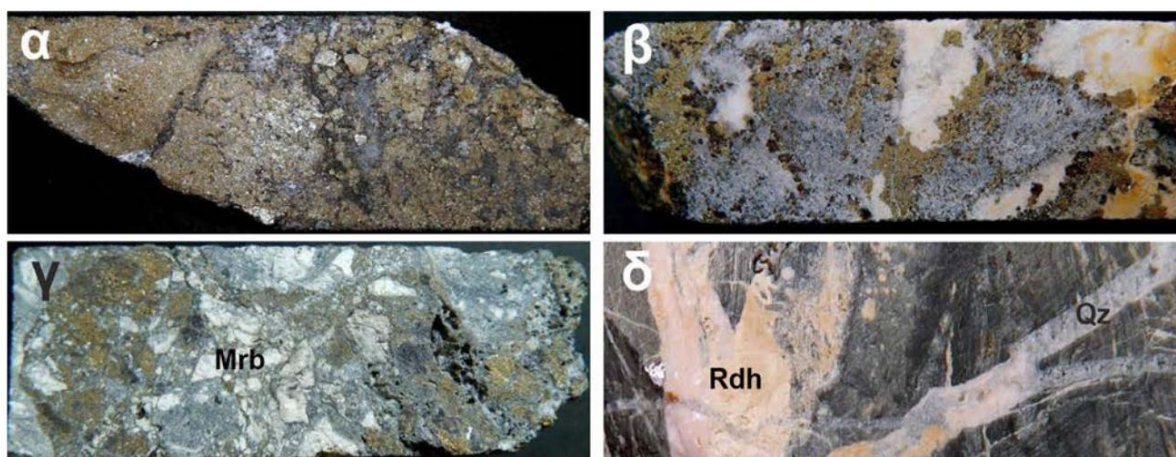
Τα παραμορφωτικά γεγονότα έχουν Ολιγοκαινική ηλικία και συνδέονται με τον μαγματισμό υψηλού-Κ ασβεσταλκαλικού χαρακτήρα και τον σχηματισμό των πολυμεταλλικών κοιτασμάτων από αντικατάσταση. Το σημαντικότερο μαγματικό πέτρωμα στην περιοχή είναι ο γρανοδιορίτης Στρατωνίου (25,4 Ma) που αναπτύσσεται κατά μήκος και βόρεια του ομώνυμου ρήγματος, στο υπερκείμενο τέμαχος (hanging wall), ενώ στα γειτονικά πετρώματα διεισδύουν πλήθος πηγματιτικών και μαγματικών φλεβών. Εξαιτίας της μεταμόρφωσης της περιοχής, η οποία συνέβη από το Παλαιόκαινο έως το Ηώκαινο προέκυψαν ανακτητικά πετρώματα. Τα πετρώματα αυτά είναι οι πηγματίτες.

2.2.1 Κοίτασμα Πιάβιτσας

Η περιοχή της Πιάβιτσας ήταν γνωστή για τη μεταλλοφορία μαγγανίου στην οποία μάλιστα πραγματοποιούταν επιφανειακού τύπου εκμετάλλευση τη δεκαετία του 1960. Η ζώνη του ρήγματος του Στρατωνίου χάνει τη συνέχειά της δυτικά των Μαύρων Πετρών και φαίνεται να στρέφεται προς τα νότια κατά μήκος της επαφής γρανιτικού γνεύσιου με βιοτιτικούς σχιστόλιθους και μάρμαρα που περιέχουν γραφίτη (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

Παράλληλα μέσα από ένα εκτεταμένο πρόγραμμα γεωτρήσεων εντοπίστηκε ένα σημαντικό κοίτασμα Pb-Zn-Au-Ag από αντικατάσταση σε ανθρακικά πετρώματα, αντίστοιχο με αυτό της Ολυμπιάδας. Τα πιθανά αποθέματα του κοιτάσματος υπολογίζονται στα 6,6 Mt μεταλλεύματος με 4,8 g/t Au και 54 g/t Ag, και 1 Moz Au και 11,4 Moz Ag. Το κοίτασμα βρίσκεται κατά μήκος του ρήγματος Στρατωνίου και εκτείνεται περί τα 4 χιλιόμετρα, στα δυτικά των κοιτασμάτων στις Μαύρες Πέτρες και στο Μαντέμ Λάκκο. Το γεγονός ότι η συνεχής δραστηριότητα του ρήγματος ήταν σύγχρονη του σχηματισμού της μεταλλοφορίας οδήγησε σε μια έντονη πλαστική και θραυσιγενή παραμόρφωση (Siron et al. 2018, 2019). Στο κοίτασμα αυτό απαντώνται θειούχα και φλέβες χαλαζία και ροδοχρωσίτη που φέρουν Au (Σχ. 2.4).

Οι απολήψεις από τις εξορύξεις και τους πυρήνες των γεωτρήσεων περιγράφουν ένα ευρύ σύνολο ρηγμάτων με διεύθυνση ΔΒΔ με δευτερεύουσες διακλαδώσεις με διεύθυνση Β που καθορίζουν συλλογικά το δυτικό τμήμα της ζώνης ρηγμάτων Στρατωνίου. Τα σώματα αντικατάστασης πλούσια σε χαλαζία και μαγγάνιο αποτελούν την επιφανειακή έκφραση των ασυνεχών ζωνών θειούχων εις βάθος. Τα θειούχα αυτά περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό σε φακούς μαρμάρου που παρασύρονται εντός της ζώνης ρήγματος Στρατωνίου σε ένα περιβάλλον παρόμοιο με το κοίτασμα των Μαύρων Πετρών. Οι φλέβες φιλοξενούνται κυρίως σε χαλαζία, μοσχοβίτη και εντός σχιστόλιθων, γνευσίων και αμφιβολιτών. Η μεταλλοφορία χρυσού εντοπίζεται γενικά εκεί όπου τα ρήγματα τέμνουν λοξά τους κύριους άξονες της ζώνης ρήγματος του Στρατωνίου. Οι φλέβες χαλαζία και ροδοχρωσίτη παρουσιάζουν ομοιότητες με τις φλέβες στα ανώτερα τμήματα των κοιτασμάτων Ολυμπιάδας και Μαύρων Πετρών. Οι καλά διατηρημένες φλέβες ροδοχρωσίτη που φέρουν Αι εμφανίζουν ταινιωτές υφές υπό μορφή κρούστας που διαπλέκονται με βουλανζερίτη, ο οποίος εμφανίζεται επίσης ως λεπτό ινώδες στρώμα πλήρωσης κοιλοτήτων (Siron et al. 2019).



Σχ. 2.4. Φωτογραφίες από το κοίτασμα στην Πιάβιτσα. α. Συμπαγής μεταλλοφορία σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη. β. Ημισυμπαγής μεταλλοφορία σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη με σύνδρομο ορυκτά χαλαζία και ασβεσίτη. γ. Λατυποπαγές ημισυμπαγούς μεταλλοφορίας με σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη. Οι λατύπες αποτελούνται από μάρμαρο. δ. Επιθερμικές φλέβες ροδοχρωσίτη και χαλαζία (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

Τα σπασίματα με γωνιώδη θραύσματα ροδοχρωσίτη εικάζεται ότι σχηματίστηκαν κατά τα μεταγενέστερα στάδια του γεγονότος μεταλλοφορίας. Οι φλέβες και οι υφές των breccia είναι τυπικές για επιθερμικά περιβάλλοντα και υποδηλώνουν ένα σχετικά ρηχό, χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλον για την Πιάβιτσα σε σύγκριση με την αντικατάσταση στην μεταλλοφορία skarn στα ανατολικά.

Καταλήγοντας, η μεταλλοφορία εμφανίζει έντονη κατάκλαση σε συνδυασμό με σχηματισμό λατυποπαγούς. Οι λατύπες και σε αυτήν την περίπτωση αποτελούνται από κατακλαστίτες μαρμάρου. Η συμπαγής και η ημισυμπαγής μεταλλοφορία αποτελούν τους πλουσιότερους τύπους σε χρυσό και άργυρο, κυρίως μέσα στα λατυποπαγή (Siron et al. 2016, 2018, 2019). Ο τρίτος τύπος περιλαμβάνει μεταλλοφόρες φλέβες επιθερμικού χαρακτήρα, εμφανιζόμενες συχνά με ταινιωτή υφή (banded veins) και πλούσιες σε Au. Ο τύπος αυτός συνίσταται από σιδηροπυρίτη, ενώ πολλές φορές εντοπίζεται και βουλανζεριτίης. Ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης και ο ροδοχρωσίτης αποτελούν τα σύνδρομα ορυκτά της μεταλλοφορίας (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

2.2.2 Κοίτασμα Μαύρων Πετρών

Το κοίτασμα Pb-Zn-Ag αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων στις Μαύρες Πέτρες εντοπίζεται κατά μήκος του ρήγματος Στρατωνίου με κλίση προς τα νότια. Το μεταλλοφόρο σώμα φιλοξενείται εντός της ενότητας Κερδυλλίων στο όριο με την ενότητα Βερτίσκου. Η μεταλλοφορία σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια δύο σταδίων (Melfos and Voudouris 2017). Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου τα υδροθερμικά ρευστά κινήθηκαν μέσω ενός δικτύου που προκλήθηκε από τη διασταύρωση των ρηγμάτων, τις διακλαδώσεις των ρηγμάτων και τις μεταβολές των τάσεων μεταξύ των ενσφηνωμένων μαρμαρίνων φακών (Siron et al. 2018), με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια μεταλλοφορία αντικατάστασης συμπαγών θειούχων (Melfos and Voudouris 2017). Αυτή κυριαρχείται από γαληνίτη και σφαλερίτη με μικρότερες ποσότητες σιδηροπυρίτη και αρσеноπυρίτη. Κατά τη διάρκεια ενός δεύτερου σταδίου η μεταλλοφορία επικαλύφθηκε από μεταγενέστερα ρευστά που οδήγησαν, μεταξύ άλλων, σε εκτενή παρουσία σιδηροπυρίτη.

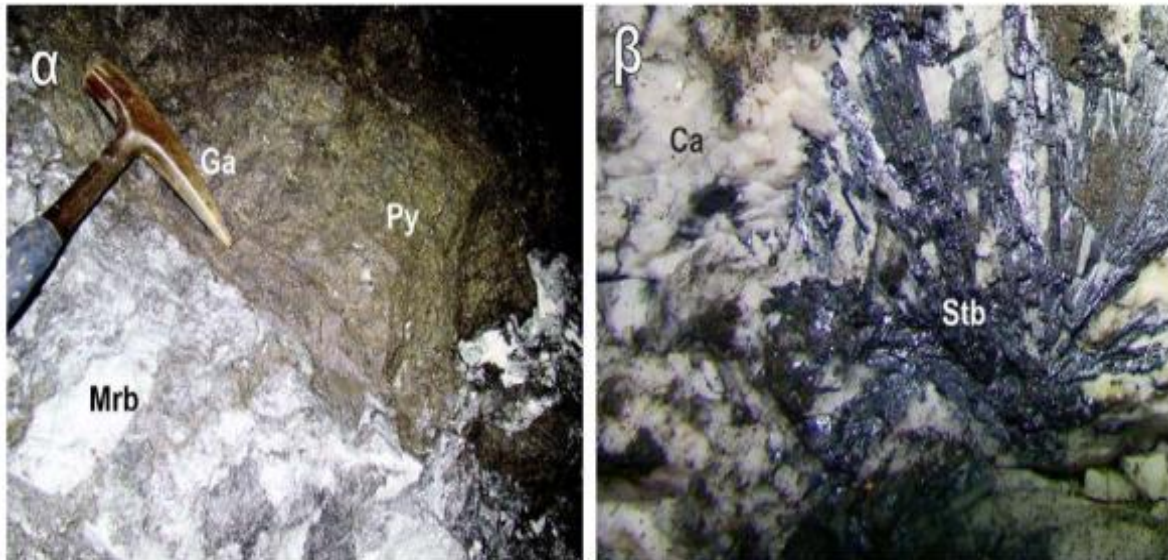
Ο σιδηροπυρίτης είναι εμφανής είτε ως μικρά εγκλείσματα σε σφαλερίτη και γαληνίτη, είτε εμφανίζεται με την μορφή διάσπαρτων κρυστάλλων. Ο συμπαγής σιδηροπυρίτης έχει συνήθως μέγεθος κόκκων μικρότερο από 1 mm και εμφανίζεται στη εντός του σφαλερίτη και του γαληνίτη, ενώ ο διάσπαρτος σιδηροπυρίτης έχει μέγεθος έως και μερικά εκατοστά. Οι σιδηροπυρίτες και των δύο τύπων είναι εμφανίζουν ζώνωση και εμφανίζονται μαζί με τον λιγότερο άφθονο αρσеноπυρίτη. Η ζώνωση αντανακλά μια αυξανόμενη περιεκτικότητα σε As προς τα περιθώρια των κόκκων. Αυτός ο σιδηροπυρίτης με ζώνη As επικαλύπτει τοπικά ένα προγενέστερο στάδιο σιδηροπυρίτη φτωχού σε As. Στον διάσπαρτο σιδηροπυρίτη, η αύξηση του As συμβαδίζει με το Au, από μερικά ppm στους πυρήνες των κρυστάλλων, μέχρι περίπου 20 ppm Au. Ωστόσο, ο πρώιμος σχηματισμένος ελαφρώς εμπλουτισμένος σε As σιδηροπυρίτης φαίνεται να είναι στείρος σε Au.

Ο αρσеноπυρίτης εμφανίζεται ενδιάμεσα μεταξύ των κόκκων σιδηροπυρίτη, ως κρύσταλλοι μεγέθους κάτω του χιλιοστού στο πέτρωμα ξενιστή. Ο χρυσός είναι ετερογενώς κατανεμημένος σε αυτόν και γενικά κυμαίνεται μεταξύ 3 και 25 ppm αν και έχουν μετρηθεί συγκεντρώσεις έως και 135 ppm Au. Η συγκέντρωση Sb κυμαίνεται μεταξύ 200-2000 ppm και υπάρχουν ίχνη Co (2-15 ppm), Cu (2-40 ppm), Ag (2-35 ppm) και Te (2-18 ppm). Οι αναλύσεις LA-ICP-MS τόσο του σιδηροπυρίτη όσο και του αρσеноπυρίτη παρουσιάζουν συνήθως ομαλά προφίλ προς τα κάτω, υποδεικνύοντας ότι ο Au είναι συνδεδεμένος σε πλέγμα και στις δύο αυτές φάσεις. Σε ένα τμήμα της μεταλλοφορίας που είναι πλούσιο σε σφαλερίτη, έχει παρατηρηθεί τετραεδρίτης ως εγκλείσματα σε γαληνίτη, εκτός από διάφορες φάσεις Pb-Sb-Bi-Ag-(As) που πιθανώς αντιπροσωπεύουν στερεά διαλύματα μεταξύ των ορυκτών γαληνίτη-αντιμονίτη-ματιλδίτη (George L, et al. 2015).

Οι θειούχες μεταλλοφορίες περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό στη ζώνη του ρήγματος Στρατωνίου και φιλοξενούνται από φακούς μαρμάρων που είναι πολύπλοκα εμφωλευμένοι με γραφιτικό χαλαζία-βιοτιτικό γνεύσιο και σχιστόλιθο, γρανιτικό γνεύσιο και αμφιβολίτη. Η ενότητα μαρμάρων ερμηνεύεται ότι είναι ισοδύναμη με τα μάρμαρα στα οποία φιλοξενούνται τα κοιτάσματα Μαντέμ Λάκκος και Ολυμπιάδας (Kalogeropoulos et al., 1989).

Η υφή και η ορυκτολογία των θειούχων είναι παρόμοια με τα κοιτάσματα στο Μαντέμ Λάκκο και στην Ολυμπιάδα. Οι θειούχες μεταλλοφορίες των Μαύρων Πετρών αποτελούνται από συμπαγή έως ταινιωτό, αδρόκοκκο σιδηροπυρίτη-σφαλερίτη-γαληνίτη που συνοδεύεται από αρσеноπυρίτη-αντιμονίτη και ίχνη χαλκοπυρίτη. Τα κυρίαρχα συμπαγή θειούχα σφαλερίτη έχουν παρουσιάζουν συμπαγή αρσеноπυρίτη στον δυτικό τομέα της μεταλλοφορίας. Ο σιδηροπυρίτης που εμφανίζεται μέσα σε θειούχα ορυκτά πλούσια σε σφαλερίτη αναπτύσσεται τοπικά και μοιάζει με τον σιδηροπυρίτη με ραβδωτή υφή που εμφανίζεται στο κοίτασμα της Ολυμπιάδος (Siron et al, 2016). Νεότερα breccia που σχετίζονται με την μεταλλοφορία της ζώνης του ρήγματος Στρατωνίου διασταυρώνουν τοπικά την θειούχο μεταλλοφορία. Τα πυριτωμένα breccia που περιέχουν ινώδη έως βελονοειδή βουλανζερίτη και αρσеноπυρίτη, εμφανίζονται σε στενή σχέση με φλέβες χαλαζία-ροδοχρωσίτη και φλεβικά breccia, τα οποία συνήθως παρουσιάζουν υψηλές περιεκτικότητες Au. Τόσο τα πυριτωμένα breccia όσο και τα breccia φλεβών χαλαζία-ροδοχρωσίτη επικαλύπτουν τις θειούχες μεταλλοφορίες, επιδεικνύοντας παρόμοιες σχέσεις υφής και παραγένεσης με τα κοιτάσματα στο Μαντέμ Λάκκο και στην Ολυμπιάδα.

Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί πως το κοίτασμα στις Μαύρες Πέτρες περιέχει 0,9 Mt μεταλλεύματος με μέσο όρο 6,5% Pb και 9,5% Zn (Μέλφος και Βουδούρης, 2022) (Σχ. 2.5).



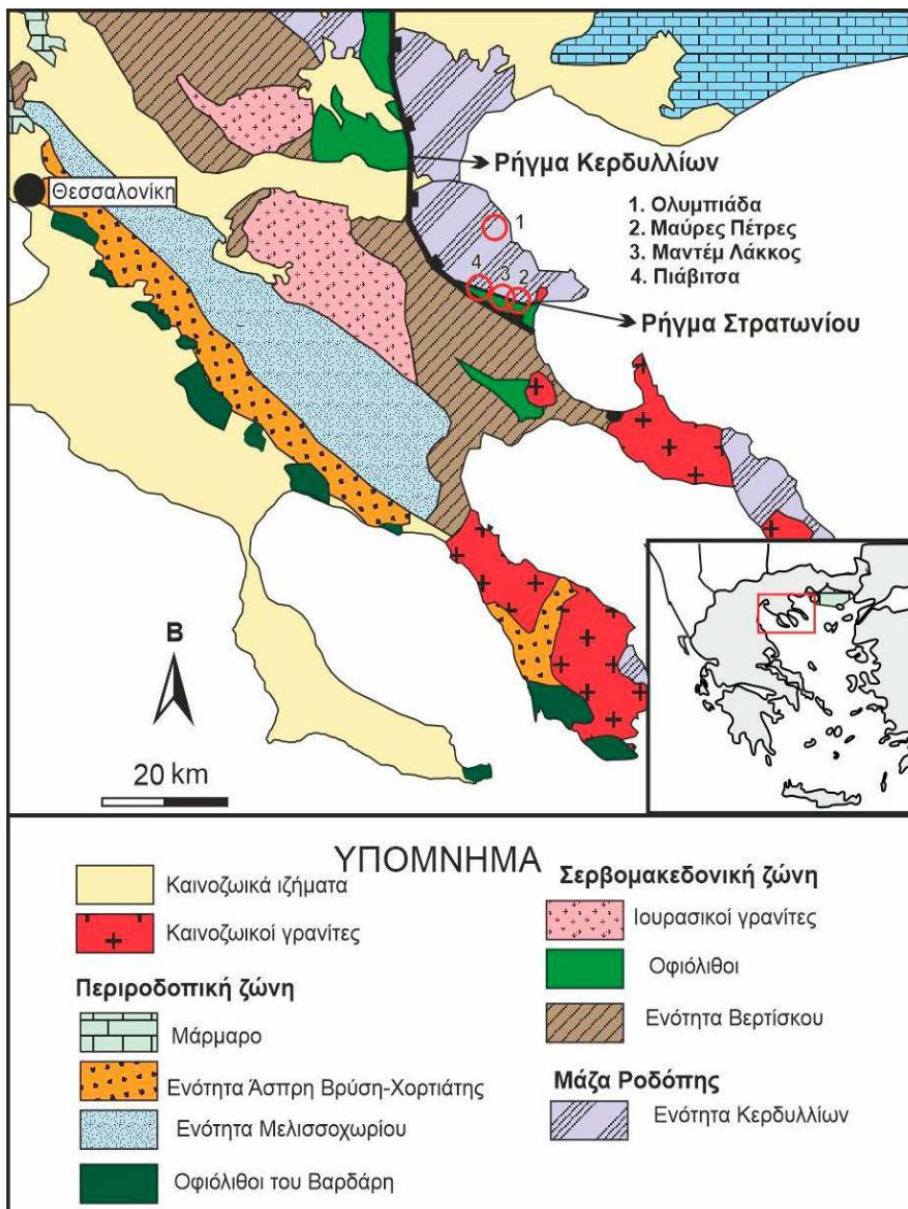
Σχ. 2.5. Φωτογραφίες από τις Μαύρες Πέτρες. α. Συμπαγής μεταλλοφορία σιδηροπυρίτη και γαληνίτη που αντικαθιστά το μάρμαρο. β. Μεταλλοφορία αντιμονίτη με ασβεστίτη ως σύνδρομο ορυκτό (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

2.2.3 Κοίτασμα Ολυμπιάδας

Το κοίτασμα της Ολυμπιάδας, είναι ένα πολυμεταλλικό κοίτασμα αντικατάστασης Au-Ag-Pb-Zn, 8 km βόρεια του ρήγματος Στρατωνίου (Σχ. 2.6), ενώ φιλοξενείται στα μάρμαρα της ενότητας Κερδυλλίων (Kalogeropoulos et al. 1989, Gilg 1993, Siron et al. 2016, 2018, 2019). Η ηλικία του έχει χρονολογηθεί στο Ολιγόκαινο (22,6 Ma). Την περιοχή διέπει η ύπαρξη δύο, αρκετά μεγάλων, κανονικών ρηγμάτων το, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, ρήγμα της Κασσάνδρας και το, με διεύθυνση Β-Ν, ανατολικό ρήγμα, τα οποία έχουν αναγνωριστεί κυρίως μέσα στις υπόγειες στοές και με τις ερευνητικές γεωτρήσεις. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο ρήγματα είναι που εντοπίζεται το μεγαλύτερο τμήμα του κοιτάσματος.

Πιο συγκεκριμένα εντοπίζεται μέσα σε αμφιβολιτικά μεταμορφωμένα πετρώματα του συμπλέγματος των Κερδυλλίων, τα οποία θεωρούνται από πολλούς γεωλόγους δυτικό τμήμα του συμπλέγματος της Ροδόπης. Η ακολουθία αντιπροσωπεύει μια μεταμορφωμένη θαλάσσια ιζηματογενή-ηφαιστειακή ακολουθία Μεσοζωικής ή παλαιότερης ηλικίας. Ηωκαινικές και Ολιγοκαινικές είναι οι γρανιτικές διεισδύσεις που εμφανίζονται σε όλη την ακολουθία των Κερδυλλίων, κυρίως ως πηγματίτες και γρανιτικοί δόμοι διαφόρων γενεών μεταμορφικής ηλικίας. Κυριαρχείται από μια ακολουθία βιοτίτη - χαλαζία - αστρίων και περιέχει αρκετούς ορίζοντες μαρμάρου και αμφιβολίτη. Η ακολουθία επηρεάζεται από μεταμορφική διεισδυτική παραμόρφωση που εκδηλώνεται με μια κυρίαρχη, ρηχής βύθισης στρωματοειδή παράλληλη φολίδωση. Τουλάχιστον δύο άλλα γεγονότα σχηματισμού

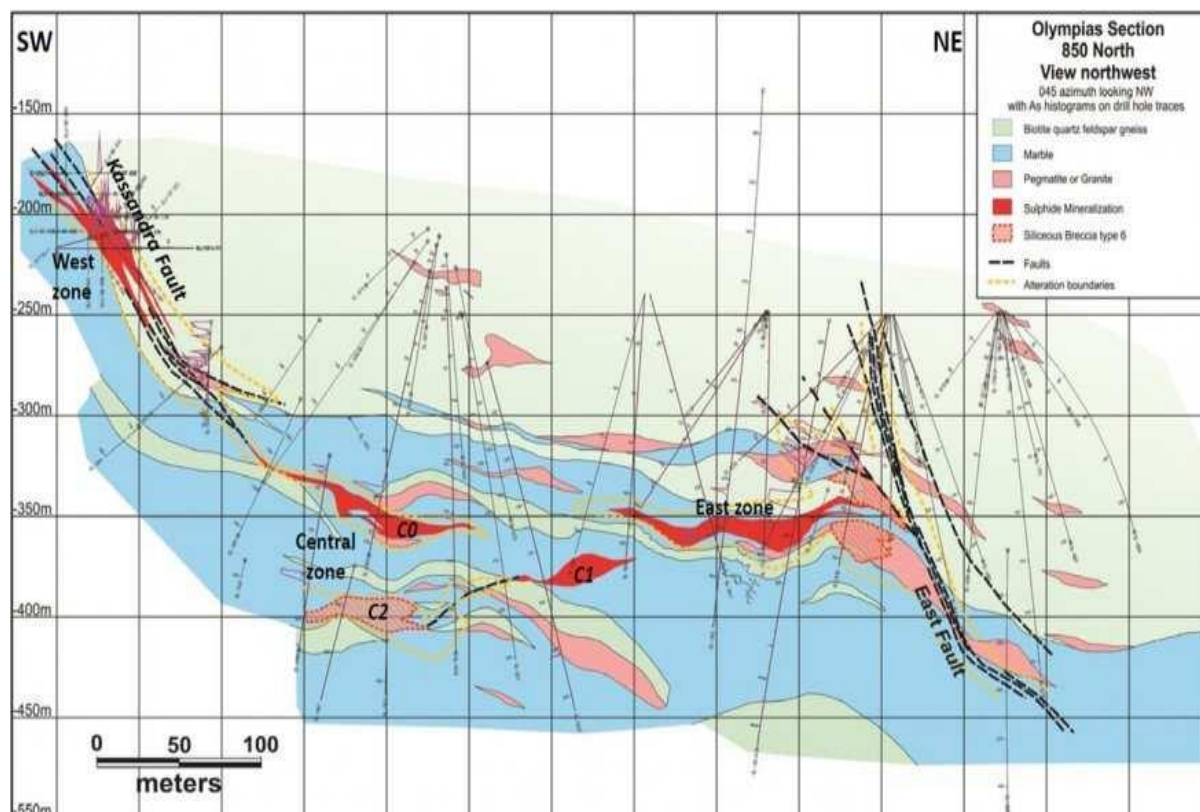
φολίδωσης επηρεάζουν την ακολουθία με προοδευτικά μικρότερη παραμόρφωση, καθώς και σημαντική ύστερη εκτατική διάρρηξη. Τα σύνολα ορυκτών και η κανονική κινηματική σε συνδυασμό με το κοίτασμα και το δίκτυο ρηγμάτων στην Ολυμπιάδα είναι συμβατά με εκείνα που παρατηρήθηκαν επίσης στο πολύ μεγαλύτερο ρήγμα του Στρατωνίου σε συνδυασμό με το εκεί κοίτασμα θειούχων. Αυτές οι σχέσεις υποδηλώνουν ότι τα συστήματα ρηγμάτων και το κοίτασμα παράπλευρα στο ρήγμα Στρατωνίου στην περιοχή της Ολυμπιάδας ήταν πιθανότατα ταυτόχρονες και σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια μιας φάσης περιφερειακής επέκτασης προς βόρεια-βορειοανατολικά και νότια-νοτιοδυτικά.



Σχ. 2.6. Ενδεικτικός χάρτης που παρουσιάζει την ακριβή θέση τόσο των κοιτασμάτων αντικατάστασης όσο και των δύο μεγάλων ρηγμάτων της περιοχής της ΒΑ Χαλκιδικής, (Siron et al. 2019).

Το δίκτυο εκτατικών ρηγμάτων που ορίζεται από μυλωνίτες και από breccia μπορεί να αποτελεί το σύστημα ρηγμάτων που ελέγχει το κοίτασμα στην Ολυμπιάδα, δεδομένου ότι οι φακοί θειούχων συνήθως εμφανίζονται κατά μήκος των προεξοχών ή έχουν στα περιθώριά τους στενές δομές αυτών των τύπων.

Μεγάλο μέρος του κοιτάσματος εμφανίζεται μεταξύ του ανατολικού και του ρήγματος Κασσάνδρας, σε μια περιοχή που αποτελεί τον τερματισμό του ρήγματος, καθώς αλληλεπιδρά με την ανατολική διαστρωμάτωση της ακολουθίας, ενδεχομένως με μετατόπιση στο ενδιάμεσο και μια ελαφριά μετατόπιση προς το ανατολικό ρήγμα. Τα ρηγά δευτερεύοντα ρήγματα με νοτιοδυτική κλίση εντοπίζονται στην θέση των φακών της κεντρικής ζώνης δεδομένης και της υπερκάλυψης του κοιτάσματος πάνω σε breccia και της μη εξοφλημένης ανεκμετάλλευτης φύσης του κοιτάσματος θειούχων (Σχ. 2.7).



Σχ. 2.7. Γεωλογικός χάρτης που παρουσιάζει τα γεωλογικά χαρακτηριστικά και την μορφολογία του κοιτάσματος της Ολυμπιάδας καθώς επίσης και τα πετρώματα μέσα στα οποία αυτό φιλοξενείται (Eldoradogold.com).

Ως κύρια μεταλλικά ορυκτά συνίσταται σιδηροπυρίτης, αρσενικούχος σιδηροπυρίτης, αρσενοπυρίτης, γαληνίτης και σφαλερίτης. Τα δευτερεύοντα ορυκτά αποτελούνται από χαλκοπυρίτη, τετραεδρίτη, βουλανζερίτη, βουρνονίτη, αντιμονίτη, μαγνητοπυρίτη, μαρकाσίτη, γεωχρονίτη, μακιναβίτη, κουβανίτη, κοβελλίνη, εναργίτη και γραφίτη. Στα κύρια σύνδρομα ορυκτά του κοιτάσματος περιλαμβάνονται ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης, ο δολομίτης,

ο ανκερίτης και ο ροδοχρώσιτης ενώ, κατά την υδροθερμική εξαλλοίωση σχηματίστηκαν αργίλικα ορυκτά κυρίως ιλλίτης και σερίκίτης. Το κοίτασμα επίσης χαρακτηρίζει μία ζώνωση ανάλογη με το βάθος, καθώς στα βαθύτερα της τμήματα κάνουν την εμφάνιση τους τύποι που απαρτίζονται από συμπαγή συσσωματώματα θειούχων, απεναντίας στα ανώτερα τμήματα επικρατούν τύποι με μεγαλύτερο πλήθος από σύνδρομα ορυκτά και μεγαλύτερο εύρος εξαλλοιώσεων (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

Αρχικά, όσον αφορά τα βασικά μέταλλα με σιδηροπυρίτη και κυρίαρχους τύπους μεταλλοφορίας, ορίζονται οι παρακάτω διαβαθμισμένες παραλλαγές.

Τύπος μεταλλοφορίας 1: Μεταλλοφορία γαληνίτη-σφαλερίτη με σιδηροπυρίτη: Αυτός ο τύπος εμφανίζεται συνήθως ως συμπαγής μεσαίου μεγέθους έως και χονδρόκοκκος σφαλερίτης-γαληνίτης-πυρίτης-αρσеноπυρίτης με μεταβλητή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη. Τα θειούχα ορυκτά είναι τυπικά ογκώδη αλλά μπορεί να είναι ταινιωτά. Αυτός ο τύπος μεταλλοφορίας είναι ευρέως διαδεδομένος και κυρίαρχη πηγή μετάλλων Zn-Pb-Ag στο συγκεκριμένο κοίτασμα.

Τύπος μεταλλοφορίας 2: Μεταλλοφορία με κυρίαρχο τον σιδηροπυρίτη: Γενικά περιλαμβάνει σιδηροπυρίτη με παρουσία ασβεστίτη. Παρουσιάζονται μεταβλητές ποσότητες αρσеноπυρίτη, γαληνίτη και σφαλερίτη διαμέσου ή διάσπαρτα στον σιδηροπυρίτη. Αυτός ο τύπος μεταλλοφορίας, όπου παρατηρήθηκε, εμφανίζεται γενικά σε χωρική συσχέτιση με τον τύπο μεταλλοφορίας 1. Ο τύπος μεταλλοφορίας 2 δεν βρέθηκε τόσο άφθονος όσο οι τύποι 1 ή 3. Τέλος διαβαθμίζεται στον τύπο μεταλλοφορίας 7 με την αύξηση της περιεκτικότητας σε As.

Τύπος μεταλλοφορίας 3: Μίξη σιδηροπυρίτη-σφαλερίτη-γαληνίτη-αρσеноπυρίτη: Τύπος που ορίζεται ως μια μεταβατική ποικιλία μεταξύ των τύπων 1 και 2 με υψηλή περιεκτικότητα σε βασικά μέταλλα και σε σιδηροπυρίτη-αρσеноπυρίτη, συχνά εμφανίζεται σε ζώνες. Μπορεί τοπικά να έχει υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη. Οι υπόγειες παρατηρήσεις υποδηλώνουν ότι οι πλούσιες σε σιδηροπυρίτη αρσеноπυρίτη ταινίες αυτού του τύπου μεταλλοφορίας μπορούν να παρατηρηθούν παραπλήσια προς τον τύπο μεταλλοφορίας 7.

Έπειτα και όσον αφορά τους τύπους μεταλλοφορίας πλούσιους σε αρσеноπυρίτη και σιδηροπυρίτη ορίζονται οι παρακάτω τύποι.

Τύπος μεταλλοφορίας 6: Γκρίζα πυριτική μεταλλοφορία, συχνά σε breccia. Αυτός ο τύπος μεταλλοφορίας περιλαμβάνει συνήθως ένα γκρίζο πυριτικό πλούσιο στυλ που έχει μεταβλητή περιεκτικότητα σε θειούχα ορυκτά, με την περιεκτικότητα σε αυτά συχνά να ποικίλλει έντονα μέσα στο διάστημα. Μπορεί να ποικίλλει από ταινιωτό πυριτικό και μη

σπασμένο έως εκτεταμένα διαστήματα γκρίζου πυριτικού breccia που περιέχει γωνιώδη αλλοιωμένα θραύσματα. Σε ορισμένους τομείς εμφανίζεται πρισματικός χαλαζίας. Τα έντονα θρυμματισμένα διαστήματα είναι συχνά χαμηλής περιεκτικότητας σε θειούχα. Ο αρσеноπυρίτης, ο σιδηροπυρίτης με λιγότερο σφαλερίτη και γαληνίτη είναι τα κυρίαρχα θειούχα ορυκτά, ο αρσеноπυρίτης μπορεί να είναι ακανθοειδής. Ίχνη στον τύπο 7 σε πολλές περιοχές.

Τύπος μεταλλοφορίας 7: Μεταλλοφορία πλούσια σε αρσеноπυρίτη-κύρια πηγή Au. Αποτελείται από γκρίζα, συμπαγή και ταινιωτή μεταλλοφορία που κυριαρχείται από μπλοκ ή ακτινωτό αρσеноπυρίτη και σιδηροπυρίτη με χαλαζία κοινό ως άλας. Εντοπίζεται συνήθως σε συνδυασμό με τον τύπο μεταλλοφορίας 6 και μπορεί να έχει ζώνες και ίχνη βασικών μετάλλων.

Οι πρόσθετοι τύποι μεταλλοφορίας είναι περιφερειακοί των άλλων τύπων και αντιπροσωπεύουν αλλοίωση των τοιχωμάτων ή πλευρικές παραλλαγές στο ύψος του κοιτάσματος. Συνήθως περιέχουν χαμηλού βαθμού συγκεντρώσεις βασικών μετάλλων ή/και χρυσού, αλλά οι οποίες μπορεί να επεκτείνουν τοπικά τις μεταλλοφορίες, ιδίως στο βόρειο τμήμα του κοιτάσματος. Σε αυτές περιλαμβάνονται: Τύπος μεταλλοφορίας 4 και 5: Πυριτική αλλοίωση (τύπος 4) και φλέβες θειούχων ορυκτών (τύπος 5) και ο τύπος μεταλλοφορίας 8: Μεταλλοφορία πλούσια σε μαγγάνιο (David Rhys et al. 2013).

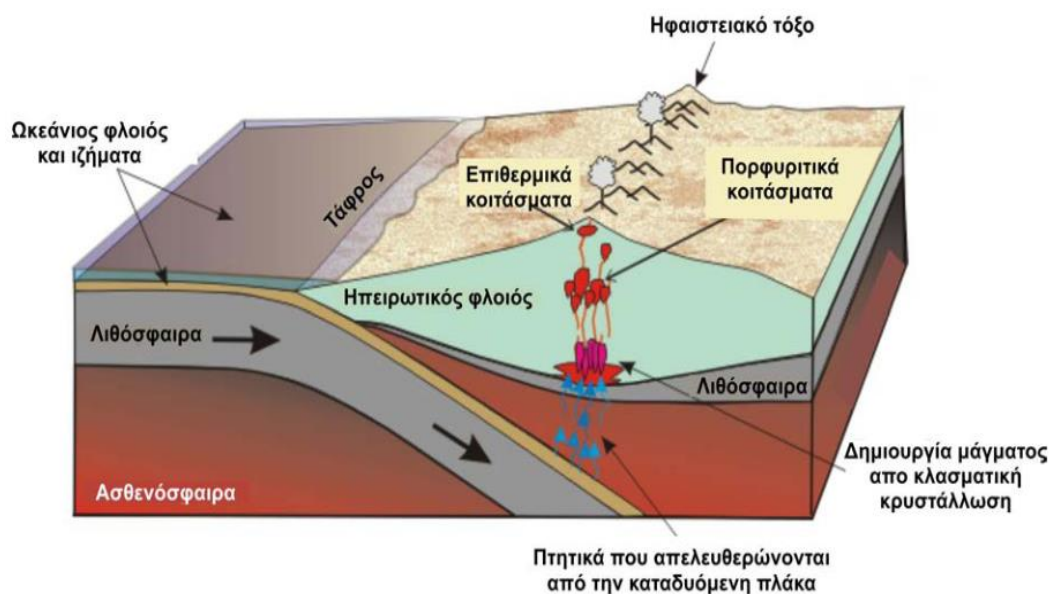


Σχ. 2.8. Αεροφωτογραφία μέρους του εργοταξίου στο μεταλλείο Ολυμπίδας (hellas-gold.com).

Τέλος ενδεικτικό της σημαντικότητας του κοιτάσματος της Ολυμπιάδας είναι ότι αυτό περιέχει 13,4 Mt μεταλλεύματος με μέσο όρο 4,8% Pb, 6,3% Zn, 8,1 g/t Au και 145 g/t Ag, συνολικής ποσότητας 3,5 Moz και 62,7 Moz Ag (1 Moz = 31,10 kg). Η εξόρυξη γίνεται με υπόγειες στοές, ενώ το κοίτασμα εκτείνεται σε βάθος έως 790 μέτρων υπό την επιφάνεια της θάλασσας. Το μεταλλείο έχει εκσυγχρονιστεί, και εισήλθε σε φάση νέας παραγωγής το 2018. Ο σχεδιασμός είναι να λειτουργήσει έως το 2033, εκτός αν ανακαλυφθούν και άλλα αποθέματα (Μέλφος και Βουδούρης, 2022) (Σχ. 2.8).

2.3 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ Cu-Au

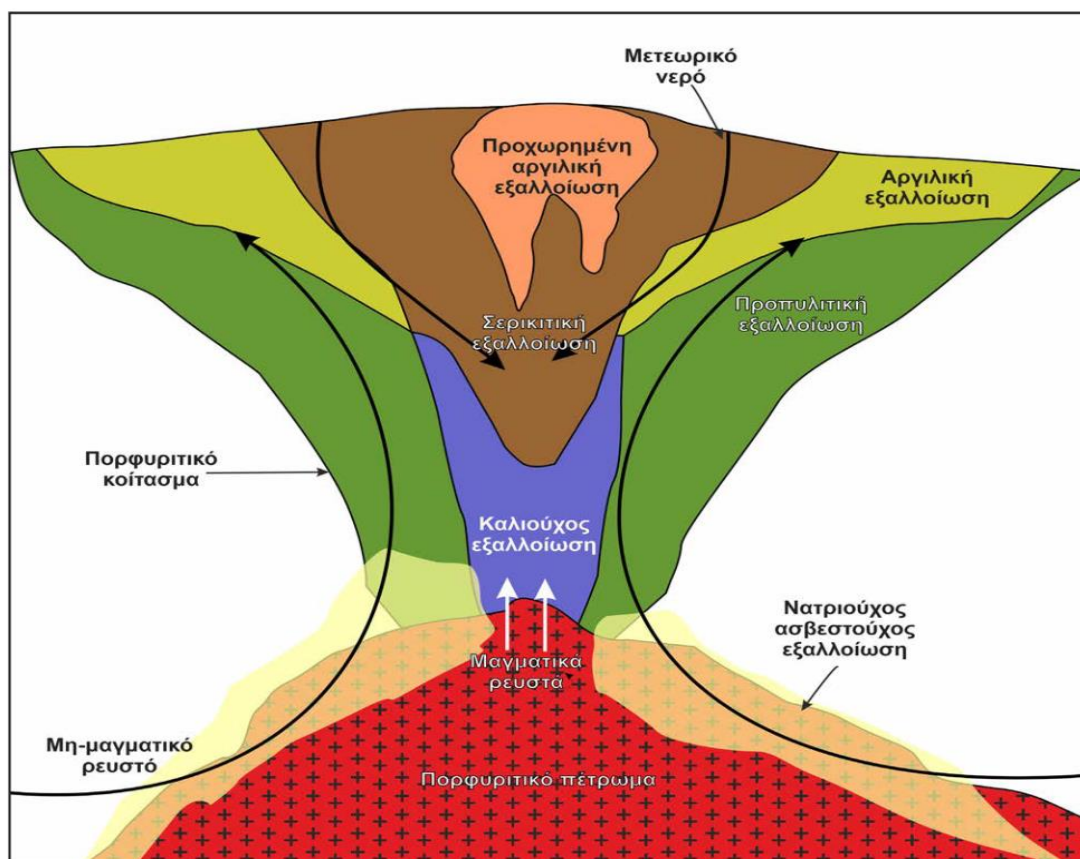
Τα πορφυριτικού τύπου κοιτάσματα ανήκουν στην κατηγορία των πολυμεταλλικών μεικτών θειούχων κοιτασμάτων. Αποτελούν πηγές χαλκού, χρυσού και μολυβδαινίου. Όσον αφορά την κοιτασματολογικές τους ιδιαιτερότητες, διακρίνονται τόσο από τα επιθερμικά κοιτάσματα χαλκού τα οποία οφείλουν την ύπαρξη τους στην κυκλοφορία θερμών μεταλλοφόρων ρευστών (υδροθερμικά ρευστά) που περνούν διαμέσου βαθιών ρηγμάτων προς την επιφάνεια όπου και κρυσταλλώνονται πάνω τόσο από τα πορφυριτικά συστήματα, όσο και από τα κατεξοχήν συμπαγή θειούχα κοιτάσματα ψευδαργύρου και μολύβδου (π.χ. σφαλερίτης, γαληνίτης, σιδηροπυρίτης στην Χαλκιδική και στο Λαύριο) (Σχ. 2.9).



Σχ. 2.9. Γεωτεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού των κοιτασμάτων πορφυριτικού και επιθερμικού τύπου σε συνθήκες υποβύθισης ωκεάνιου φλοιού κάτω από ηπειρωτικό (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

Το κοίτασμα των πορφυριτών λαμβάνει χώρα σε ηφαιστίτες ή πλουτωνίτες όχι μεγάλου βάθους που παρουσιάζουν συμπαγή μορφή σωρού ή είναι ενσωματωμένοι στα

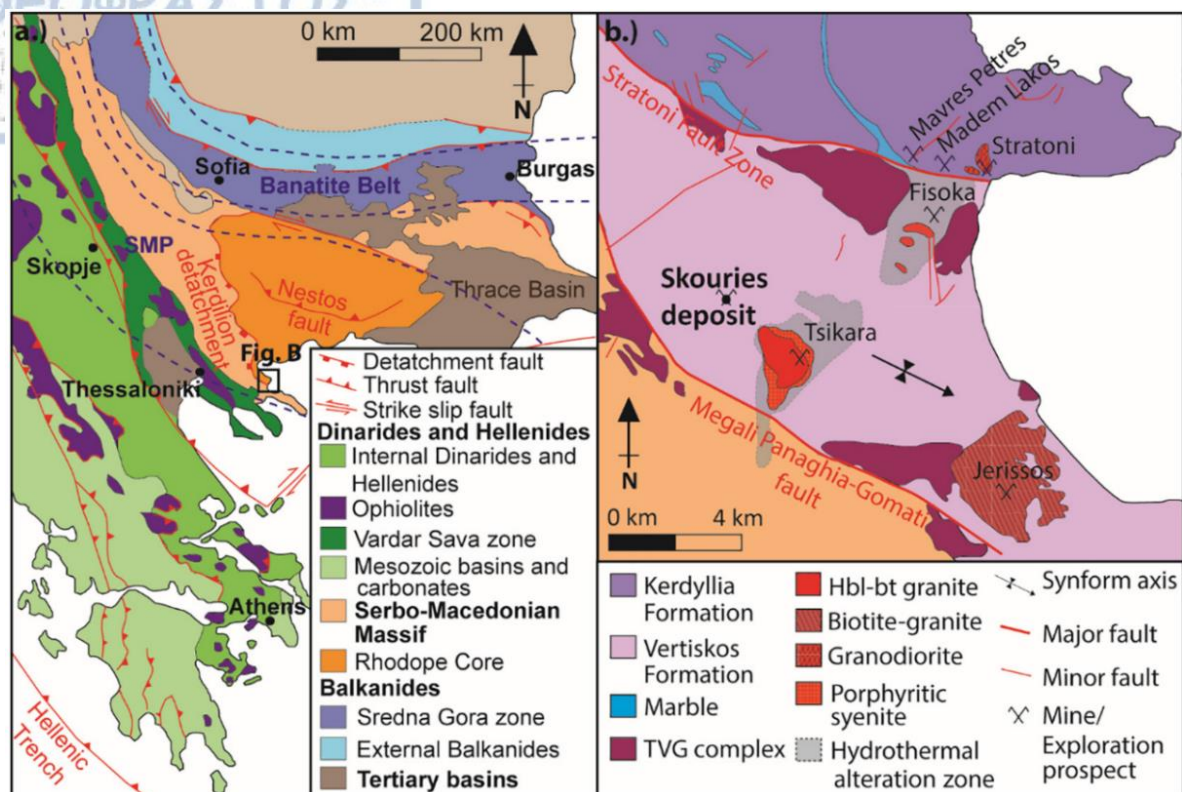
περιβάλλοντα τους πετρώματα. Τα μεταλλικά ορυκτά, κυρίως τα θειούχα όπως ο χαλκοπυρίτης ή ο μολυβδαινίτης, αναπτύσσονται συνήθως υπό μορφή διασπορών ή φλεβών στον πυρήνα των πορφυριτικών μεταλλοφοριών (Σχ. 2.10).



Σχ. 2.10. Κατανομή των υδροθερμικών εξαλλοιώσεων σε κοιτάσματα πορφυριτικού τύπου (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

2.3.1 Πορφυριτικό κοίτασμα Σκουριών

Το πορφυριτικό κοίτασμα Au-Cu στις Σκουριές, που βρίσκεται 8 χλμ. νότια του ρήγματος Στρατωνίου και περίπου 1 χλμ. βόρεια του ρήγματος στο Γομάτι, φιλοξενείται σε βιοτιτικούς γνεύσιους και σχιστόλιθους που ερμηνεύονται ως τμήμα της ενότητας Κερδυλλίων (Σχ. 2.11). Αποτελεί μέρος της μεταλλευτικής περιοχής Κασσάνδρας στη Σερβομακεδονική μεταλλογενετική επαρχία (Kroll et al., 2002). Το κοίτασμα σχετίζεται με μια διείσδυση που αποτελείται από πολλαπλές φάσεις πορφυριτικού χαλαζιακού μονζονίτη που διεισδύουν με κλίση προς τα νότια (Σχ. 2.12). Οι εξορύξεις και οι γεωτρήσεις ορίζουν ένα διεισδυτικό σώμα διαμέτρου 200 m, με απότομη κλίση, που υπερβαίνει τα 900 m σε βάθος και με πορφυριτικούς δόμους που προβάλλουν προς τα έξω από το κέντρο της διείσδυσης. Οι επαφές του διεισδυτικού υλικού είναι απότομες και ασύμφωνες με τη μεταμορφική φολίδωση και είναι τοπικά σπασμένες.



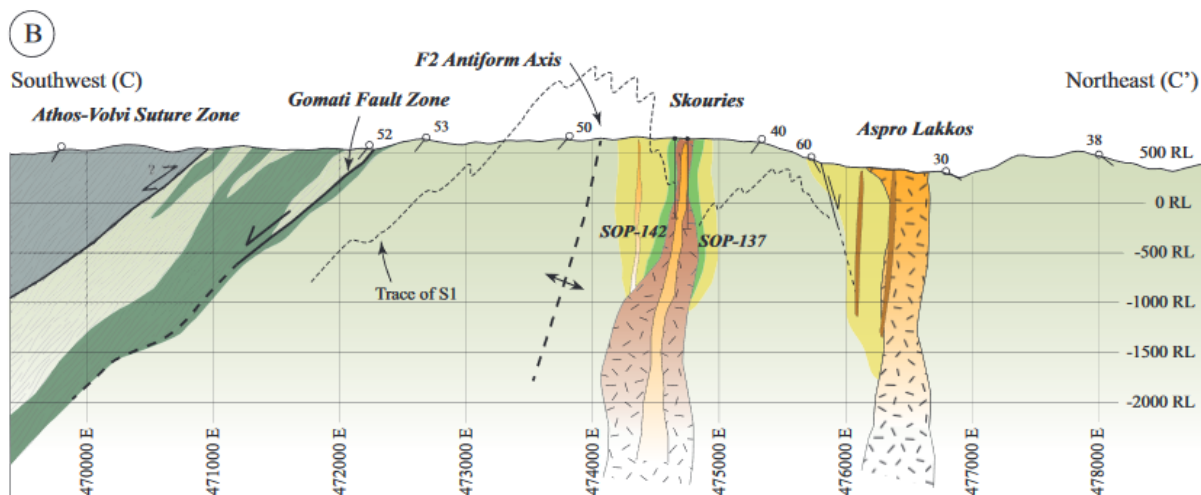
Σχ. 2.11. α. Περιφερειακός χάρτης που παρουσιάζει το γεωτεκτονικό περιβάλλον στο οποίο ανήκει η Ελλάδα, β. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής της ΒΑ Χαλκιδικής στην οποία ανήκει και το κοίτασμα των Σκουριών (McFall et al. 2018).

Το κοίτασμα αυτό λοιπόν είναι ένα πολύπλοκο γεωλογικό σύστημα που χαρακτηρίζεται από πολλαπλές διεισδύσεις και σύνολα υδροθερμικών φλεβών. Αυτές οι φλέβες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορα στάδια. Τα σύνολα φλεβών "πρώιμου σταδίου" αποτελούνται κυρίως από φλέβες χαλαζία-μαγνητίτη με φλέβες σιδηροπυρίτη-χαλκοπυρίτη και συνδέονται με έντονη καλιούχο αλλοίωση σε μια διείσδυση μονζονίτη-ξενιστή (Σχ. 2.13).

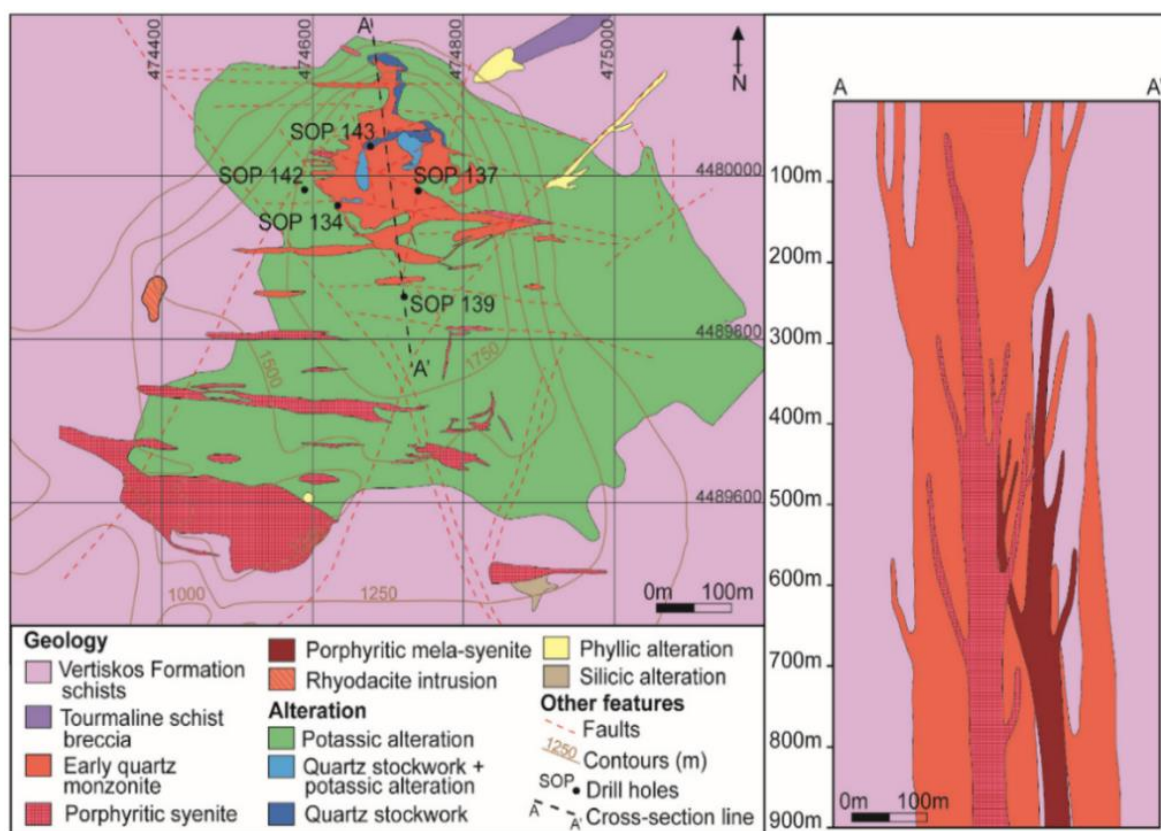
Η πρωτογενής κοίτασμα Cu και Au εμφανίζεται κατά τη διάρκεια των φλεβικών συνόλων του "κύριου σταδίου", που συνδέονται με διεισδύσεις συνητή. Τρία εξέχοντα σύνολα φλεβών, τα M-3, M-4 και M-5, φιλοξενούν την πλειονότητα του κοιτάσματος, με χαλαζία με ποικίλους συνδυασμούς χαλκοπυρίτη (Σχ. 2.14). Κατά μήκος αυτών των κύριων φλεβικών συνόλων παρατηρείται καλιούχος αλλοίωση. Ακολουθούν τέλος τα φλεβικά σύνολα "ύστερου σταδίου".

Αυτό που κάνει τις Σκουριές να ξεχωρίζουν είναι ο εμπλουτισμός τους σε στοιχεία της ομάδας του λευκόχρυσου (PGE), ιδίως ο υψηλός λόγος Pd προς Pt. Τα ορυκτά Pd βρίσκονται σε συνδυασμό με τα ορυκτά της καλιούχου αλλοίωσης μέσα στα κύρια σύνολα φλεβών του κοιτάσματος. Τα ορυκτά αυτά φιλοξενούνται σε μικρούς σφαιρικούς σχηματισμούς κοντά

στο όριο μεταξύ θειούχων και πυριτικών ορυκτών, καθώς και σε εγκλείσματα εντός υδροθερμικών κρυστάλλων χαλαζία και θειούχων. Σημειώνεται επίσης η παρουσία μιας ποικιλίας άλλων ορυκτών πολύτιμων μετάλλων και ημιμετάλλων. Απαντώνται κυρίως σε υδροθερμικούς κρυστάλλους χαλαζία και μεταλλικά ορυκτά, συχνά σε συνδυασμό με ορυκτά της ομάδας του λευκόχρυσου (McFall et al. 2018).



Σχ. 2.12. Γεωλογική τομή του κοιτάσματος των Σκουριών και τις γύρω από αυτό περιοχής (McFall et al. 2018).

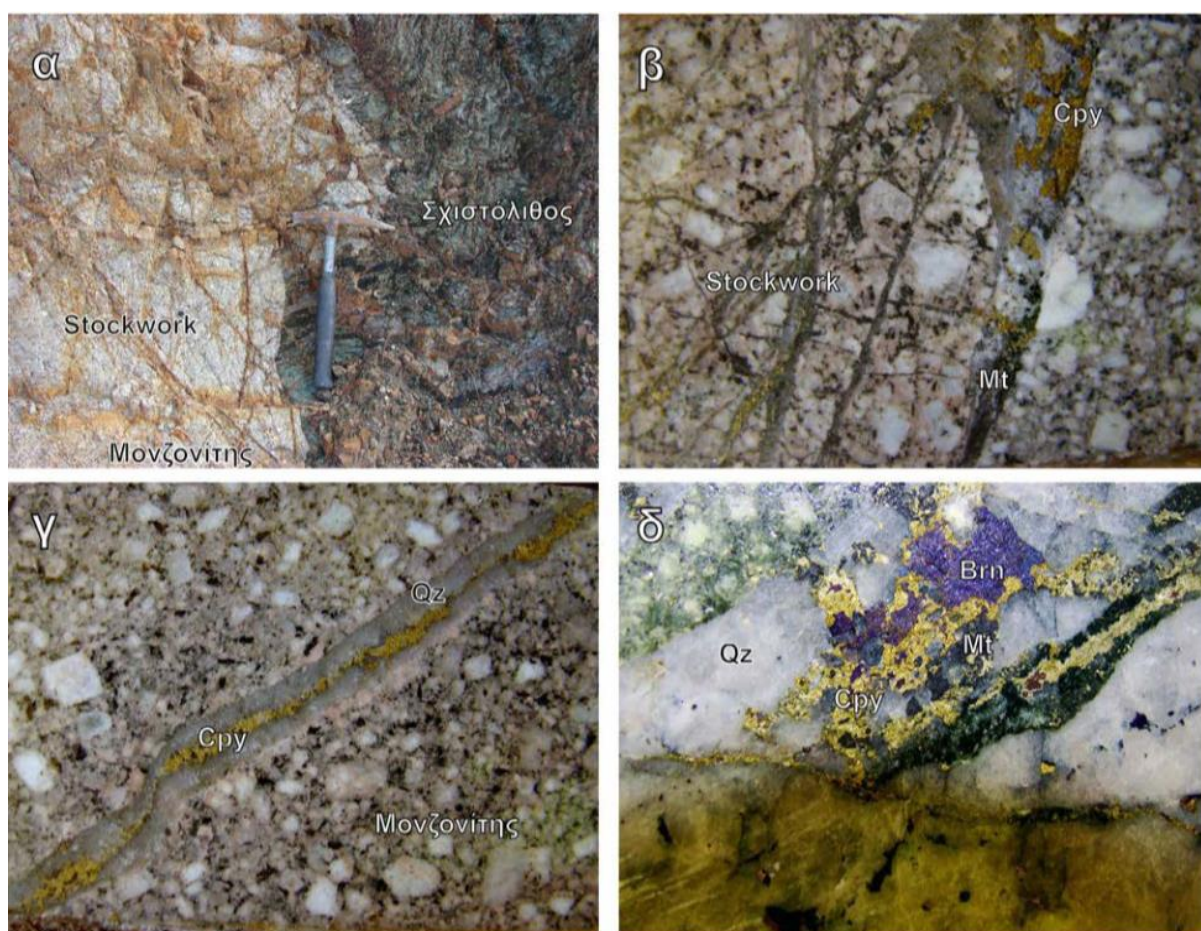


Σχ. 2.13. Χάρτης (αριστερά) και τομή (δεξιά) που απεικονίζουν με ακρίβεια τις γεωλογικές και γεωχημικές διεργασίες που έλαβαν χώρα στο κοιτάσμα (McFall et al 2018).

Vein stage	Vein Type	Associated Igneous Phases	Description	Associated Alteration	Associated mineralisation
E-1	Biotite-magnetite	Early monzonite	Wavy biotite-magnetite veinlets, 1-2 mm thick, aligned	Orthoclase, biotite, magnetite	
E-2	Quartz	Early monzonite	Wavy quartz veinlets 2 - 10 mm thick, regular anhedral quartz crystals.	Orthoclase, biotite, magnetite	Minor chalcocopyrite
E-3	Quartz-magnetite +/- chalcocopyrite	Early monzonite	Wavy, structurally aligned stockwork of 8 - 20 mm thick quartz veins with magnetite along the margins and disseminated in the centre, sometimes with minor chalcocopyrite.	Magnetite, biotite	
E-4	Sulphide - chalcocopyrite/pyrite	Early monzonite	Wavy sulphide veinlet 1-3 mm thick	Magnetite, biotite	Chalcocopyrite-pyrite
M - 1A	Biotite-magnetite	Syn-min syenite	Wavy biotite-magnetite veinlets, 2-5 mm thick	Orthoclase, biotite, magnetite	
M - 1B	Hydrothermal orthoclase	Syn-min syenite	Irregular hydrothermal orthoclase veinlets 5 mm to 10 cm thick		
M - 2	Quartz	Syn-min syenite	Wavy quartz veinlets 2-4 mm thick, regular anhedral quartz crystals.	Orthoclase, often altered to sericite	
M - 3	Quartz-biotite-orthoclase-chalcocopyrite +/- magnetite	Syn-min syenite	Curvilinear quartz veins 8-40 mm wide with euhedral potassium feldspar and secondary biotite selvage. Often with massive sulphides in the centre of the vein, intergrown with quartz crystals. Large euhedral quartz crystals.	Secondary biotite, potassium feldspar	Chalcocopyrite (bornite, pyrite)
M - 4	Quartz-magnetite-bornite-chalcocopyrite	Syn-min syenite	Straight veins 1-5 cm wide with small anhedral quartz crystals containing trails of sulphides and magnetite parallel to vein edges. Often form stockworks.	Potassium feldspar, magnetite, secondary biotite, sericite	Bornite, chalcocopyrite
M - 5	Quartz-chalcocopyrite-bornite veins	Syn-min syenite	Straight quartz veins 1-3 cm wide, containing sulphides in a central suture, with small, regular, subhedral crystals.	Potassium feldspar in selvage, biotite and chlorite	Chalcocopyrite, bornite, pyrite
L-1	Gypsum	Syn-min syenite	Wavy gypsum veinlets 4-8 mm thick	Phyllic alteration, disseminated hematite	
L-2	Sulphide	Syn-min syenite	Wavy pyrite veinlet 2-10 mm thick	Sericite, pyrophyllite	Pyrite
L-3	Quartz-calcite	Syn-min syenite	Straight quartz veins 8-15 mm with calcite-sericite in a central suture, cloudy white quartz.	Sericite, clay	
L-4	Quartz-barite-sulphide	Syn-min syenite	Large quartz-barite veins (5-15 cm) with large euhedral 'comb' morphology quartz crystals interlocking with barite. Contain large irregular masses of sulphides. Occasionally contains apatite.	Calcite, dolomite, sericite, clay	Pyrite, sphalerite, galena

Σχ. 2.14. Περιγραφή των κύριων σταδίων των φλεβών στο κοίτασμα των Σκουριών από τις καταγραφές πυρήνων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια μελετών (McFall et al 2018).

Ανακεφαλαιώνοντας, το κοίτασμα συνδέεται με την καλιούχο εξαλλοίωση που χαρακτηρίζεται από πυκνό δίκτυο φλεβών και φλεβιδίων με μαγνητίτη-βιοτίτη-χαλαζία και με χαλκοπυρίτη-βορνίτη-χρυσό-χαλαζία. Κοίτασμα σιδηροπυρίτη-χαλκοπυρίτη εντοπίστηκε επίσης σε χαλαζιακές φλέβες με σερικιτική εξαλλοίωση. Η ορυκτολογική σύσταση των μεταλλικών ορυκτών αποτελείται κυρίως από σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, βορνίτη και μαγνητίτη, με λίγο γαληνίτη και τετραεδρίτη και ίχνη μολυβδαινίτη. Ο χρυσός βρίσκεται, κυρίως, σε αυτοφυή μορφή μέσα στον χαλκοπυρίτη. Επίσης παρατηρήθηκαν σε μικροσκοπικά εγκλείσματα τα σπάνια ορυκτά σοπχεϊτης, μερενσκυίτης και κοτουλσκίτης, καθώς και άλλες ορυκτές φάσεις των στοιχείων Pd, Ag, Sb, As, Bi, Te (Μέλφος και Βουδούρης, 2022) (Σχ. 2.15).



ν

Σχ. 2.15. Φωτογραφίες από το κοίτασμα στις Σκουριές. α. Δίκτυο φλεβιδίων με οξειδωμένη μεταλλοφορία σε πορφυριτικό μονζονίτη που διεισδύει στους σχιστόλιθους του Βερτίσκου, β. Δίκτυο χαλαζιακών φλεβιδίων με μεταλλοφορία μαγνητίτη και χαλκοπυρίτη στην καλιούχο εξαλλοίωση του πορφυριτικού μονζονίτη, γ. Χαλαζιακή φλέβα με χαλκοπυρίτη στην καλιούχο εξαλλοίωση του πορφυριτικού μονζονίτη. Διακρίνεται ο υδροθερμικός βιοτίτης, δ. Μαγνητίτης, χαλκοπυρίτης και βορνίτης σε χαλαζιακή φλέβα (Μέλφος και Βουδούρης, 2022).

Ο σχηματισμός αυτής της εξαιρετικά σπάνιας παραγένεσης στις Σκουριές οφείλεται στην παρουσία βισμούθιου και τελλουρίου στα μαγματικά τήγματα που δεσμεύουν το Pd και την Pt. Στη συνέχεια, τα PGM αποδεσμεύονται από τα υδροθερμικά ρευστά, σε υψηλές θερμοκρασίες ($>490^{\circ}\text{C}$) υπό συνθήκες βρασμού. Με αυτό τον τρόπο σχηματίζονται τα μεταλλικά ορυκτά με την περίπλοκη χημική σύσταση με πιο χαρακτηριστικό τον μερενσκύιτη (Economou-Eliopoulos and Eliopoulos 2000, 2005, McFall et al 2018).



Σχ. 2.16. Αεροφωτογραφία του υπό ανάπτυξη μεταλλείου στην περιοχή των Σκουριών Χαλκιδικής (hellas-gold.com).

Τέλος, όσον αφορά την οικονομική τους αξία, οι Σκουριές διαθέτουν μετρημένους και υποδειγμένους πόρους 289 εκατομμυρίων τόνων με $0,58\text{ g/t Au}$ και $0,43\%\text{ Cu}$ για $5,4\text{ Moz Au}$ και $1,2\text{ Mt Cu}$. Οι ποτασσικές αλλοιώσεις και η μεταλλοφορία χαλκού, συμπεριλαμβανομένης της φλέβας, επεκτείνονται στο περιβάλλον πέτρωμα της γύρω περιοχής, ενώ περίπου τα δύο τρίτα των μετρημένων και υποδεικνυόμενων αποθεμάτων μεταλλεύματος φιλοξενούνται εκτός του πορφυριτικού πετρώματος (Eldorado Gold Corp, 2017) (Σχ. 2.16).

3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

Η ΒΑ Χαλκιδική έχει μια εκτεταμένη ιστορία, η οποία χαρακτηρίστηκε από τη μεταλλευτική δραστηριότητα των κατοίκων της. Σε όλη την περιοχή υπάρχουν εκατοντάδες πηγάδια και εκατοντάδες χιλιάδες κυβικά μέτρα μεταλλουργικών απορριμμάτων που ανάγονται στα αρχαία χρόνια, γνωστών ως "σκουριές", τα οποία προέρχονται από την επεξεργασία των μεταλλευμάτων και αποτελούν απόδειξη αυτής της διαχρονικής μεταλλευτικής δραστηριότητας (metalleiachalkidikis.gr).

Η έναρξη της δραστηριότητας αυτής στην περιοχή, όπως προκύπτει από ιστορικές πηγές και από επιστημονικές αναλύσεις των παλαιών "σκουριών", εντοπίζεται κάπου στον 6ο αιώνα π.Χ. Η ακμή της μεταλλευτικής δραστηριότητας εμφανίζεται στην περίοδο διακυβέρνησης του Φιλίππου Β', με τα μεταλλεία να γίνονται κυρίαρχη πηγή χρηματοδότησης για το Μακεδονικό Βασίλειο και για τις εκστρατείες του Μεγάλου Αλεξάνδρου. Η δυνατότητα να χρησιμοποιούν χρυσά νομίσματα, και όχι μόνο αργυρά, συνέβαλε στην επέκταση και την υπεροχή του Μακεδονικού Βασιλείου επί των υπολοίπων βασιλείων και πόλεων-κρατών της εποχής.

Κατά τους ρωμαϊκούς χρόνους η μεταλλευτική δραστηριότητα συνεχίστηκε κανονικά, ενώ κατά την βυζαντινή περίοδο η μεταλλευτική δραστηριότητα ξεκινά εκ νέου και η περιοχή των Σιδηροκαυσίων αναδεικνύεται ως κομβικό μεταλλευτικό κέντρο. Το όνομα "Σιδηροκαύσια" μάλιστα, αναφέρεται για πρώτη φορά γύρω στον 9ο αιώνα (Dimosaristoteli.gr).

Γύρω στα 1400 η περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής θα βιώσει μια ακόμα περίοδο ακμής χάρη στην ύπαρξη των μεταλλείων της. Παράλληλα θα εξελιχθούν και πάλι σε σημαντικό μεταλλευτικό κέντρο. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι διέθεταν ισχυρές οχυρώσεις και εξαιρετική οργάνωση σε σχέση πάντα με την εποχή τους. Σε διοικητικό και πληθυσμιακό κέντρο της χερσονήσου αναδεικνύονται τα Σιδηροκαύσια. Επιπλέον τίθενται σε λειτουργία εκατοντάδες καμίνια μέσω των οποίων πραγματοποιείται η επεξεργασία μολύβδου και ψευδαργύρου.

Από τον 16ο αιώνα και έπειτα η περιοχή διανύει επανειλημμένες περιόδους άνθισης αλλά και παρακμής. Σημείο καμψής για την περιοχή αποτελεί το 1705, όπου τα χωριά γνωστά ως Μαντεμοχώρια (ονομασία η οποία χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα) απέκτησαν το προνόμιο της αυτοδιαχείρισης. Παράλληλα με ειδικό φερμάνι αποκτούν τα δικαιώματα εκμετάλλευσης των μεταλλείων αργύρου. Έτσι δημιουργείται ο Μεταλλευτικός Συνεταιρισμός, την διοίκηση του οποίου ασκούν οι εκπρόσωποι των δώδεκα μεγαλύτερων χωριών της περιοχής. Μοναδική τους υποχρέωση έναντι της Υψηλής Πύλης αποτελεί η

καταβολή ετήσιου φόρου (550 λίβρες αργύρου). Ο φόρος αυτός ουσιαστικά ήταν το αντάλλαγμα για τα ξεχωριστά προνόμια που απολάμβανε η περιοχή (Dimosaristoteli.gr).

Καταγράφεται μάλιστα πως όταν κάποτε μειωνόταν η παραγωγή στα μεταλλεία, οι κάτοικοι αγόραζαν ασημένια νομίσματα από κουρσάρους, ανταλλάσσοντας τα υφάσματα ή ακόμα και ζώα. Στη έλιωναν τα νομίσματα ώστε να καταβάλουν το ασήμι στους Τούρκους διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο τα προνόμια που είχαν. Αυτά τα προνόμια περιλάμβαναν την απουσία Οθωμανών με εξαίρεση τον λεγόμενο Μαδέμ Αγά, 1 αξιωματικό του οθωμανικού στρατού και 20 απλούς στρατιώτες. Μέσα από τους 4 άρχοντες που εξέλεγαν κάθε χρόνο οι αντιπρόσωποι των 12 χωριών, ασκούταν η τοπική εξουσία.

Η περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής δεν γνώρισε ιδιαίτερη καταπίεση κατά την τουρκοκρατία, καθώς οι ελάχιστοι Τούρκοι τσιφλικάδες ζούσαν στον νότο και οι λίγες στρατιωτικές και διοικητικές βάσεις υπήρχαν στο κέντρο της Χαλκιδικής. Όπως είναι αναμενόμενο, αυτή η κατάσταση συνέβαλε στη διατήρηση ακμαίου θρησκευτικού και εθνικού πνεύματος του πληθυσμού, το οποίο και θα διαδραμάτιζε σημαντικό ρόλο στην επανάσταση του 1821.

Τα Μαδεμοχώρια, παρότι μετείχαν στην Επανάσταση υπό την μορφή νομικού προσώπου "πλήρωσαν" βαρύ τίμημα. Πέρα από τις καταστροφές που προξένησαν, οι Οθωμανοί, κατήργησαν και το προνόμιο του αυτοδιοίκητου. Το περιβόητο "Κοινόν του Μαδεμίου" έπαψε να υφίσταται, ενώ τα δικαιώματά τους, όσον αφορά την μεταλλευτική τους δραστηριότητα, εκχωρήθηκαν στην Γάλλο - Οθωμανική Α.Ε. το 1893. Εκείνη την χρονιά εμφανίστηκε η ονομασία "Μεταλλεία Κασσάνδρας", η οποία έκτοτε επικράτησε μέχρι τις μέρες μας (Dimosaristoteli.gr).

Πάνω από 6000 εργαζόμενοι απασχολούνταν στα 600 περίπου καμίνια που διέθετε η περιοχή. Περίπου 72 χιλιάδες τόνοι μεταλλεύματος εξορύσσονταν και επεξεργάζονταν ως το 1900. Ενώ στα 1901 άρχισε η εκμετάλλευση του κοιτάσματος στο Μαντέμ Λάκκο. Το 1927, η Ανώνυμη Ελληνική Εταιρεία Χημικών Προϊόντων & Λιπασμάτων (ΑΕΕΧΠ&Λ) διαδέχεται την Γαλλο-Οθωμανική Α.Ε. Η εταιρεία αυτή αντιλαμβάνεται εγκαίρως την ανάγκη για εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων με στόχο την γεωργική ανάπτυξη της χώρας. Έτσι για την απόκτηση θείου (πρώτη ύλη στην βιομηχανία γεωργικών λιπασμάτων), η εταιρεία εξαγόρασε μεταλλεία σε όλη την ελληνική επικράτεια. Στις Μαύρες Πέτρες (Στρατώνι), εκμεταλλεύτηκε τα μεικτά θειούχα κοιτάσματα και τα κοιτάσματα σιδηροπυρίτη. Παράλληλα το Στρατώνι χρησίμευε και ως λιμάνι φόρτωσης μεταλλεύματος.

Μετά τον Β' ΠΠ ο μεταλλευτικός τομέας ανακτά νέα δυναμική, η πλειοψηφία των μετοχών της ΑΕΕΧΠ&Λ μεταβιβάζεται στην ιδιοκτησία του Μποδοσάκη- Αθανασιάδη.

Την δεκαετία του 1980 το Ελληνικό Κράτος αποφασίζει την δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού, μέσω της METBA (Μεταλλουργική Βιομηχανία Αιγαίου), στην Ολυμπιάδα. Η απόφαση δεν θα εφαρμοστεί τελικά στην πράξη εξαιτίας διαφόρων κωλυμάτων και κάποιων συγκυριών.

Το 1992 τελειώνει και τυπικά η εποχή της ΑΕΕΧΠ&Λ όταν, όντας ακόμη σε λειτουργία, τίθεται σε καθεστώς ειδικής εκκαθάρισης από την Εθνική Τράπεζα της Ελλάδας.

Τον Δεκέμβριο του 1995, τα δικαιώματα εκμετάλλευσης των Μεταλλείων Κασσάνδρας και οι μεταλλευτικές εγκαταστάσεις μεταβιβάζονται στην TVX Hellas, που αποτελεί θυγατρική της καναδικής εταιρείας TVX Gold. Κύρια στόχευση αυτής της εταιρείας αποτελεί η δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού στην Ολυμπιάδα. Την ίδια στιγμή η εταιρεία αποκτά τις ανάλογες άδειες για να προχωρήσει σε εκμετάλλευση του κοιτάσματος στις "Μαύρες Πέτρες".

Το εγχείρημα αυτό στην Ολυμπιάδα τελικά δεν υλοποιείται και η αρνητική απόφαση του Συμβουλίου της Επικρατείας οδηγεί σε διακοπή εργασιών στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών. Η περιοχή και η εταιρία βρίσκονται σε άσχημη οικονομική κατάσταση, ενώ εκατοντάδες εργαζόμενοι μένουν άνεργοι. Τα τοπικά χωριά υφίστανται οικονομική και πληθυσμιακή ύφεση. Για την αποφυγή κοινωνικών ταραχών, η τότε κυβέρνηση εκπονεί ειδικό κοινωνικό πρόγραμμα που στηρίζει τους πρώην εργαζομένους στα Μεταλλεία Κασσάνδρας.

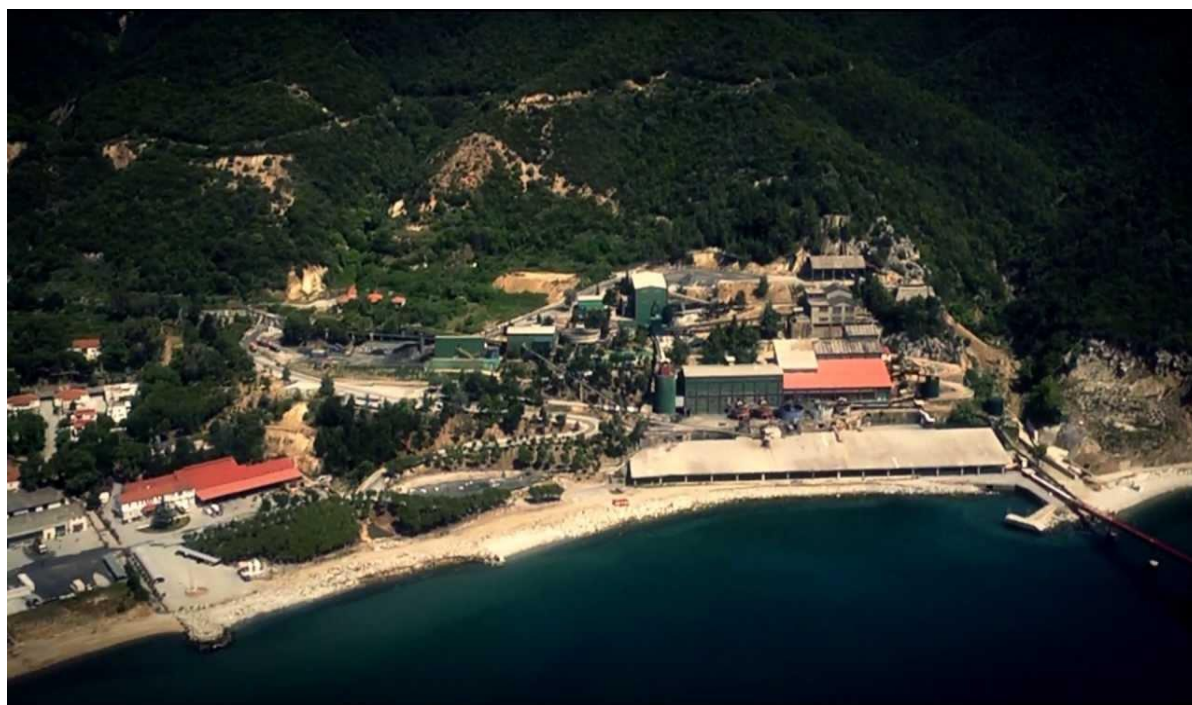
Τον Ιανουάριο του 2004, τα μεταλλευτικά δικαιώματα και οι μεταλλευτικές εγκαταστάσεις των Μεταλλείων Κασσάνδρας περνούν στην Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. με σχετικό νόμο που εγκρίνεται από το Ελληνικό Κοινοβούλιο. Επίσης, τον Οκτώβριο του 2005 τίθεται και πάλι σε λειτουργία το μεταλλείο στις Μαύρες Πέτρες.

Τον Ιανουάριο του 2006 κατατίθεται ενιαίο επιχειρηματικό σχέδιο για την ταυτόχρονη ανάπτυξη και εκμετάλλευση του κοιτάσματος στην Ολυμπιάδα αλλά και του κοιτάσματος των Σκουριών. Στο ίδιο σχέδιο περιλαμβάνεται και η έναρξη μεταλλευτικής δραστηριότητας στο Μαντέμ Λάκκο. Η Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. περνά στην κυριότητα της Eldorado Gold Corporation τον Φεβρουάριο του 2012.

Κομβικό σημείο για τα Μεταλλεία Κασσάνδρας και για τους κατοίκους της ΒΑ Χαλκιδικής είναι η 17η Απριλίου του 2013. Τότε είναι που το ΣτΕ επισφράγισε τη νομιμότητα όλων των κοινωνικών, των οικονομικών καθώς και των περιβαλλοντικών παραμέτρων της εξορυκτικής επένδυσης (metalleiachalkidikis.gr).

Τα τρία σημαντικότερα μεταλλεία σήμερα είναι το μεταλλείο στο Στρατώνι (Μαύρες Πέτρες), το μεταλλείο της Ολυμπιάδας και το υπό ανάπτυξη μεταλλείο στις Σκουριές.

Το Στρατώνι αμέσως μετατράπηκε σε κόμβο των δραστηριοτήτων της εταιρείας. Ενώ, στις αρχές της δεκαετίας του 1970 η ΑΕΕΧΠ&Λ κατασκευάζει στην παραλία του Στρατωνίου εργοστάσιο εμπλουτισμού και εκκινεί η παραγωγή και η επεξεργασία των μικτών θειούχων συμπτυκνωμάτων. Σήμερα, το έργο του Στρατωνίου, αυτό βρίσκεται υπό καθεστώς συντήρησης από το 2021 ενώ παράλληλα διεξάγονται ερευνητικές γεωτρήσεις για την εύρεση καινούργιων και οικονομικά βιώσιμων αποθεμάτων. Επίσης, αναβαθμίζονται οι αποθηκευτικές εγκαταστάσεις και ο λιμένας Στρατωνίου (Σχ. 3.1).

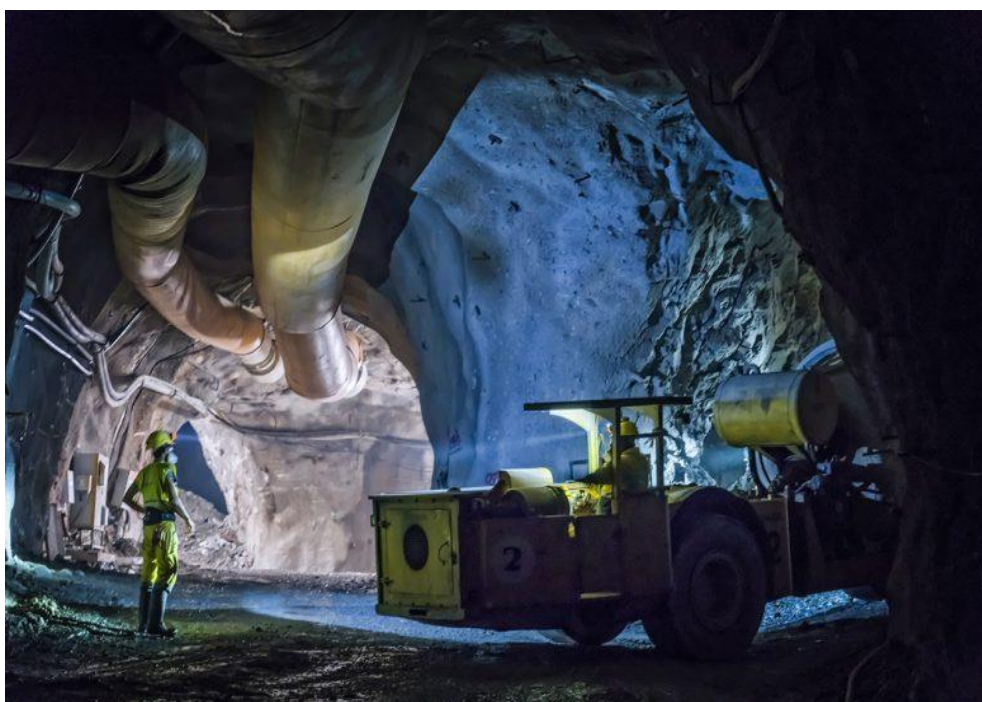


Σχ. 3.1. Αεροφωτογραφία του εργοταξίου του μεταλλείου των Μαύρων Πετρών (Στρατωνίου) (Hellas-gold.com)

Η μεταλλευτική δραστηριότητα στο κοίτασμα μεικτών θειούχων της Ολυμπιάδας ξεκινά το 1972. Το 1976 κατασκευάζεται το νέο εργοστάσιο εμπλουτισμού. Έκτοτε τα προϊόντα της εκεί μεταλλευτικής δραστηριότητας μεταφέρονται επεξεργασμένα προς φόρτωση στο Στρατώνι. Όπως έχει προαναφερθεί, το μεταλλείο της Ολυμπιάδας, σήμερα, υπολογίζεται ότι περιέχει 13,4 Mt μεταλλεύματος με μέσο όρο 4,8% Pb, 6,3% Zn, 8,1 g/t Au, 145 g/t Ag, 3,5 Moz Au και 62,7 Moz Ag (1 Moz = 31,10 kg). Η εξόρυξη γίνεται με υπόγειες στοές, ενώ το κοίτασμα εκτείνεται σε βάθος έως 790 μέτρων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το μεταλλείο έχει εκσυγχρονιστεί, και εισήλθε σε φάση νέας παραγωγής το 2018. Ο σχεδιασμός είναι να λειτουργήσει έως το 2033, εκτός αν ανακαλυφθούν και άλλα αποθέματα (Hellas-gold.com) (Σχ. 3.2).

Ενώ για το έργο των Σκουριών, προβλέπεται ο συνδυασμός επιφανειακής και υπόγειας εκμετάλλευσης, επί της βάσης των αρχών της ταυτόχρονης αποκατάστασης και της

ελάχιστης, κατά το δυνατόν κατάληψης επιφάνειας. Επιπλέον προβλέπεται να αξιοποιηθούν οι καλύτερες δυνατές τεχνολογίες που διατίθενται, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η συνολική διάρκεια του έργου αναμένεται να διαρκέσει περίπου είκοσι χρόνια, ενώ ακόμα υπολογίζεται ότι σε πλήρη λειτουργία το μεταλλείο θα παράγει περίπου 140 χιλιάδες ουγκιές χρυσού καθώς ακόμα 67 εκ. λίβρες χαλκού ετησίως (Hellas-gold.com) (Σχ. 3.3).



Σχ. 3.2. Εργασίες σε υπόγεια στοά στο μεταλλείο Ολυμπιάδας (Hellas-gold.com)



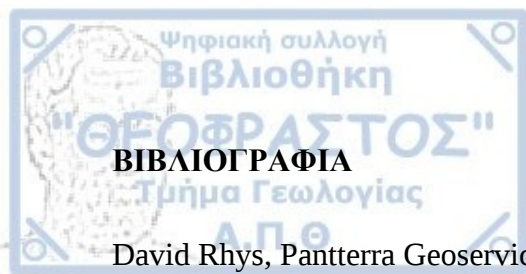
Σχ. 3.3. Αεροφωτογραφία του υπό ανάπτυξη μεταλλείου στην περιοχή των Σκουριών (eldoradogold.com)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βορειοανατολική Χαλκιδική αποτελεί μια περιοχή με μεγάλη σημασία λόγω των κοιτασμάτων που περιέχει. Τα χαρακτηριστικά αυτών των κοιτασμάτων αναδεικνύουν την σπουδαιότητά τους σε πολλούς τομείς. Καταρχάς, από ορυκτολογικής άποψης, τα μεταλλεία της περιοχής χαρακτηρίζονται από μοναδικό πλούτο σε χαλκό, χρυσό, μόλυβδο, ασήμι, πλατίνα και άλλα μέταλλα. Αυτό συνεισφέρει σημαντικά στην εθνική οικονομία αφού η εξαγωγή και η επεξεργασία αυτών των μετάλλων αποτελούν πηγή εσόδων.

Επιπλέον, η εξόρυξη αυτών των μεταλλευμάτων δημιουργεί πληθώρα θέσεων εργασίας, ενισχύοντας έτσι την απασχόληση και την οικονομική ανάπτυξη σε τοπικό επίπεδο. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραβλέπουμε τις περιβαλλοντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την εξορυκτική δραστηριότητα. Η υπόγεια εξόρυξη μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένης της ρύπανσης του υδάτινου περιβάλλοντος και της αποψίλωσης του τοπίου. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη περιβαλλοντικά μέτρα και προστατευτικές δράσεις προκειμένου να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της οικονομικής ανάπτυξης και της περιβαλλοντικής προστασίας.

Εν κατακλείδι, το μέλλον των κοιτασμάτων της ΒΑ Χαλκιδικής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της παγκόσμιας ζήτησης για μέταλλα και της τιμής τους στις διεθνείς αγορές. Είναι, όμως, αναγκαία η διατήρηση της βιώσιμης διαχείρισης των κοιτασμάτων για να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη αειφόρο ανάπτυξη αυτής της πολύτιμης περιοχής.



David Rhys, Pantterra Geoservices Inc., (2013).

De Wet, A.P., Miller, J.A., Bickle, M.J., Chapman, H.J. (1989). Geology and geochronology of the Arnea, Sithonia and Ouranoupolis intrusions, Chalkidiki peninsula, northern Greece. *Tectonophysics* 161:65-79.

Dimosaristoteli.gr

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*, Springer, Berlin, Heidelberg, 935-938.

Economou-Eliopoulos, M., Eliopoulos, D.G. (2000). Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance. *Ore Geol. Rev.* 16, 59-70.

Eldoradogold.com

Eldorado Gold Corporation, 2017a, Resources and reserves,

www.eldorado-gold.com/assets/resources-and-reserves.

-2017b, Eldorado Gold provides an update on 2017 exploration programs, www.eldoradogold.com/news-and-media/news-releases/press-release-details/2017/Eldorado-Gold-Provides-an-Update-on-2017-Exploration-Programs/default.aspx.

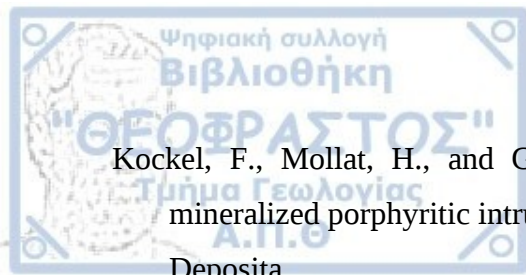
George L, Cook NJ, Ciobanu CL, Wade BP (2015) Trace and minor element in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *American Mineralogist*, 100(2-3), 548-569.

Gilg, A.G. (1993). Geochronology (K-Ar), fluid inclusion and stable isotope (C, O, H) studies of skarn, porphyry copper, and carbonate-hosted Pb-Zn (Ag-Au) replacement deposits in the Kassandra mining district (Eastern Chalkidiki, Greece). Unpublished Doctoral dissertation, Zürich, Switzerland, ETH Zürich. 152 p.

Haines, H.S., 1998, A structural synthesis for sector Vb of the Madem Lakkos polymetallic sulfide deposit—northeast Greece: M.Sc. thesis, London, United Kingdom, University of London, 81 p

Hellas-gold.com

Kalogeropoulou, S.I., Kiliadis, 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, 1210-1234.



Kockel, F., Mollat, H., and Gundlach, H., 1975, Hydrothermally altered and (copper-) mineralized porphyritic intrusions in the Serbo-Macedonian massif (Greece): Mineralium Deposita.

Kroll, T., Müller, D., Seifert, T., Herzig, P.M., and Schneider, A., 2002, Petrology and geochemistry of the shoshonite-hosted Skouries porphyry Cu-Au deposit, Chalkidiki, Greece: Mineralium Deposita, v. 37, p. 137–144.

Kydonakis K, Brun JP, Poujol M, Monié P, Chatzitheodoridis, E, (2016) Inferences on the Mesozoic evolution in the North Aegean from the isotopic record of the Chaldiki block.

McFall K.A., Jonathan Naden, Stephen Roberts, Tim Baker, John Spratt, Iain McDonald, (2018), Platinum-group minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit

McFall, K.A., Roberts, S., Naden, J., Wilkinson, C., Wilkinson, J., Boyce, A., 2017.

Hydrothermal transport of PGEs in porphyry systems – a fluid history of the Skouries Cu–Au (PGE) porphyry deposit.

Metalleiachalkidkis.gr

Melfos M, Voudouris P (2017) Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metal exploration.

Nicolaou, M.N., 1960, L'intrusion granitique dans la région de Straton-Olympiade et sa relation avec la métallogénèse: Annales Géologiques des Pays Helléniques, v. 11, p. 214–265.

-1964, The mineralogy and micrography of the sulphide ores of Kassandra mines, Greece: Annales Géologiques des Pays Helléniques, v. 16, p. 111–139.

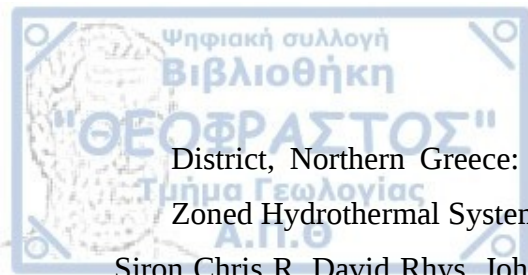
Orykta.gr

Oryktosploutos.net

C.R, John F.H. Thompson, Tim Baker, Richard Friedman, Pavlos Tsitsanis, Sally Russell, Scott Randall and Jim Mortensen, (2016), Magmatic and Metallogenic Framework of Au-Cu Porphyry and Polymetallic Carbonate- Hosted Replacement Deposits of the Kassandra Mining District, Northern Greece.

Siron C.R., Structural framework of Au-rich porphyry and carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining district, northern Greece*Cox, C., & Kynicky, J. (2018).

Siron C.R., John F.H. Thompson, Tim Baker, Robert Darling and Gregory Dipple, (2019), Origin of Au-Rich Carbonate-Hosted Replacement Deposits of the Kassandra Mining



District, Northern Greece: Evidence for Late Oligocene, Structurally Controlled, and Zoned Hydrothermal Systems.

Siron Chris R, David Rhys, John F.H. Thompson, Tim Baker, Theodore Veligrakis, Alfredo Camacho, and Lazaros Dalampiras, (2018), Structural Controls on Porphyry Au-Cu and Au-Rich Polymetallic Carbonate-Hosted Replacement Deposits of the Kassandra Mining District, Northern Greece.

Vasilios Melfos, Panagiotis Voudouris, (2017), Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration.

Μέλφος Β., Βουδούρης Π. (2022). Κοιτάσματα της Ελλάδας, Κάλλιπος.

Μουντράκης Δ. (2020), Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας, University Studio Press.

Νεστόροβ Ν. (2013), Γεωλογική Μοντελοποίηση και Γεωστατιστική– Κοιτασματολογική μελέτη του κοιτάσματος μεικτών θειούχων του Μαντέμ Λάκκου Χαλκιδικής, τομέας ορυκτολογίας- πετρολογίας- κοιτασματολογίας, ΑΠΘ.

Σακελλαρίου, Δ. Θ. (1993). Γεωλογική δομή της Σερβομακεδονικής μάζας στην ΒΑ Χαλκιδική. Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 28(1), 179-193.