



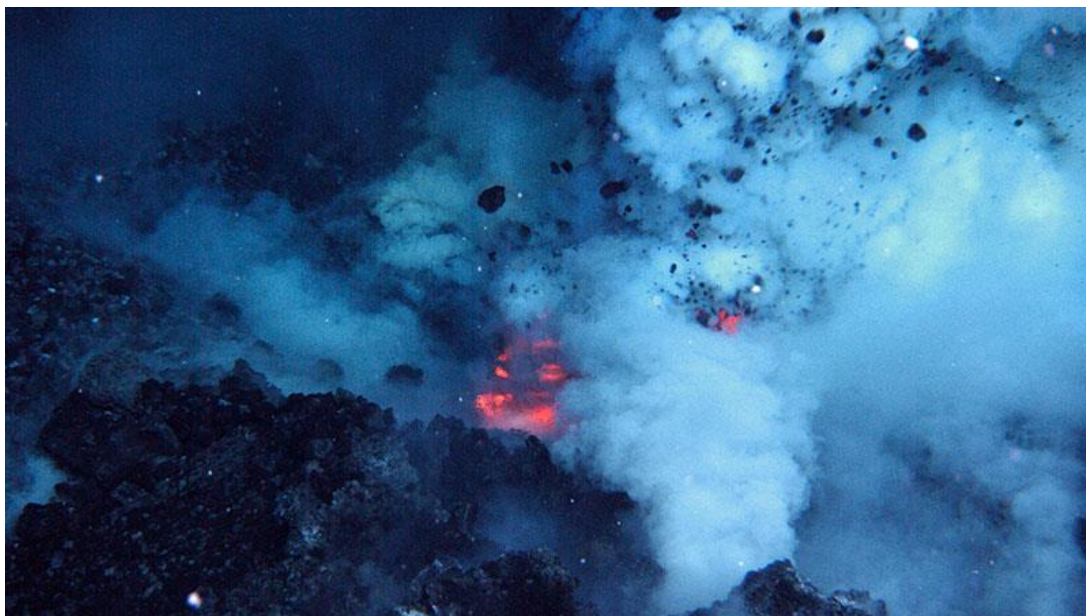
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ –
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΑΛΙΑΚΑΣ
ΑΕΜ 5576

ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ:
Zn-Pb-Cu ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗΣ (ΤΥΠΟΥ KUOKO)

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Μέλφος

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2021





ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΑΛΙΑΚΑΣ

ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ: Zn-Pb-
Cu ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗΣ (ΤΥΠΟΥ KUROKO)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλειος Μέλφος

© Δημήτριος Μπαλιάκας, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Δημήτριος Μπαλιάκας, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΙΑΓΩΝ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ: Zn-Pb-Cu ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗΣ (ΤΥΠΟΥ KUROKO)– *Πτυχιακή Εργασία*

© Dimitrios Baliakas, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2021

All rights reserved.

VOLCANO-SEDIMENTARY MASSIVE SULFIDE DEPOSITS; Zn-Pb-Cu-PYRITE (KUROKO TYPE) *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: Έκρηξη υποθαλάσσιου ηφαιστείου,
(<https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/volcanoehhttps://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/12fi/re/background/volcanology/volcanology.htmls.html>, 17/9/2021)



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	1
Abstract.....	2
Πρόλογος	3
1 Εισαγωγή	4
1.1 Ηφαιστειοιζηματογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων (VMS).....	4
1.2 Κατηγοριοποίηση κοιτασμάτων VMS	5
1.3 Οικονομική σημασία κοιτασμάτων VMS	7
2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά κοιτασμάτων τύπου Kuroko	10
2.1 Μορφολογία κοιτάσματος.....	10
2.2 Υπερκείμενα πετρώματα και πετρώματα ξενιστές	11
2.3 Ζώνωση.....	12
2.4 Εξαλλοίωση.....	14
2.4.1 Υδροθερμική αλλοίωση	14
2.4.2 Επιφανειακή αλλοίωση	17
2.5 Γεωφυσικά χαρακτηριστικά	18
3 Δημιουργία κοιτασμάτων Kuroko.....	20
3.1 Γεωτεκτονικό περιβάλλον	20
3.2 Τοπικό περιβάλλον	21
3.3 Μηχανισμοί δημιουργίας	24
3.4 Δημιουργία ορυκτολογικής ζώνωσης	26
4 Παραδείγματα.....	28
4.1 Παγκόσμια παραδείγματα	28
4.1.1 Kidd Creek	28
4.1.2 Furutobe-Ainai	31
4.1.3 Lahanos.....	33
4.2 Ελληνικά παραδείγματα.....	35
4.2.1 Μολάους	35
4.2.2 Σκρα.....	37
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	39



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τίτλος: Ηφαιστειοζηματογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων: Zn-Pb-Cu σιδηροπυρίτης (τύπου Kuroko)

Από: Δημήτριος Μπαλιάκας

Η πτυχιακή εργασία αποσκοπεί στην σύνοψη όλων των χαρακτηριστικών ενός ηφαιστειοζηματογενούς κοιτάσματος (VMS) τύπου Kuroko. Αρχικά, γίνεται διαχωρισμός των κοιτασμάτων Kuroko από τους άλλους τύπους κοιτασμάτων VMS. Έπειτα, γίνεται λόγος για τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων, όπως η μορφολογία, τα πετρώματα ξενιστές, η ζώνωση, οι υδροθερμικές εξαλλοιώσεις κ.ά. Στην συνέχεια αναφέρεται το γεωτεκτονικό περιβάλλον και οι τοπικές συνθήκες σχηματισμού των κοιτασμάτων αυτού του τύπου. Τέλος, παρατίθενται παραδείγματα κοιτασμάτων από την Ελλάδα και παγκοσμίως.



ABSTRACT

Title: Volcano-sedimentary massive sulfide deposits: Zn-Pb-Cu-pyrite (Kuroko type)

By Dimitrios Baliakas

This diploma thesis summarizes the main characteristics of the volcano-sedimentary Kuroko type deposits. In the beginning, Kuroko type deposits are distinguished from the other VMS deposits. Then, the geological characteristics of the deposit like the morphology, the host rocks, the zonation, the hydrothermal alteration etc. are described in details. The geotectonic environment and the local conditions of formation are also defined. Finally, Greek and global examples of the most significant Kuroko type deposits are briefly described.

Πρόλογος

Τα κοιτάσματα τύπου Kuroko παίρνουν το όνομα τους από τις Ιαπωνικές λέξεις «kuro» που σημαίνει μαύρο και «oko» που σημαίνει μετάλλευμα. Τα κοιτάσματα αυτού του τύπου έχουν υποστεί έντονη εκμετάλλευση, κυρίως στην Ιαπωνία αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο, από την αρχαιότητα λόγω του μεγέθους τους και της μεγάλης τους περιεκτικότητας σε χρυσό και άργυρο (Taylor et al., 1995) και, ως εκ τούτου, είναι η καλύτερα μελετημένη κατηγορία ηφαιστειοϊζηματογενών κοιτασμάτων. Επιπλέον, τα κοιτάσματα Kuroko είναι τα πρώτα ηφαιστειοϊζηματογενή κοιτάσματα που σχετίστηκαν με υποθαλάσσια ηφαιστειότητα (Ohashi, 1919).

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την περιγραφή και ανάλυση των VMS κοιτασμάτων τύπου Kuroko και συνεπώς έχει σκοπό:

- Την διαφοροποίηση των κοιτασμάτων τύπου Kuroko από τους υπόλοιπους τύπους κοιτασμάτων VMS
- Την περιγραφή των χημικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών των κοιτασμάτων Kuroko
- Την ανάλυση της εξαλλοίωσης των κοιτασμάτων και των προϊόντων της
- Την αναλυτική περιγραφή των τεκτονικών και χημικών μηχανισμών που συνέβαλλαν στην γένεση των κοιτασμάτων Kuroko
- Την περιγραφή παραδειγμάτων κοιτασμάτων Kuroko στην Ελλάδα και παγκοσμίως

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή του τομέα Ορυκτολογίας - Κοιτασματολογίας – Πετρολογίας, κύριο Μέλφο για την ανάθεση της παρούσας εργασίας καθώς και για τις συμβουλές και την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της διεκπεραίωσης της, καθώς και την αδερφή μου, Κωσταντίνα Μπαλιάκα, για την πολύτιμη βοήθεια της στην δημιουργία πολλών σχημάτων για την εργασία.

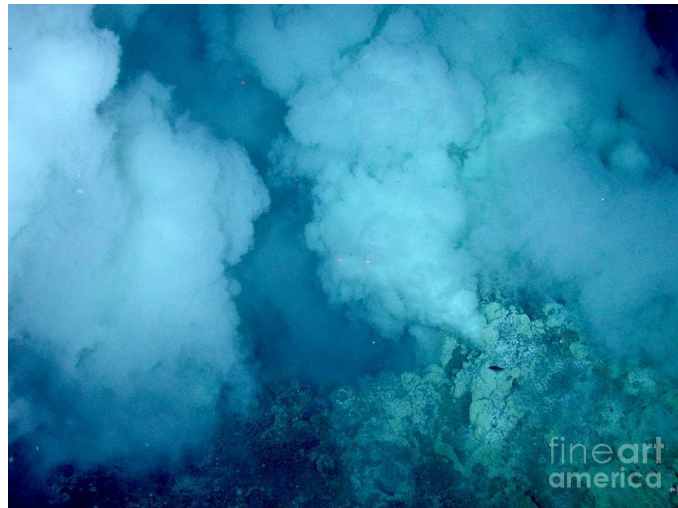
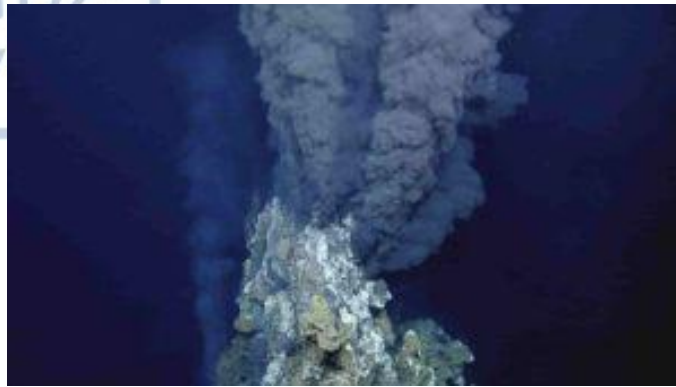
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ (VMS)

Τα ηφαιστειοιζηματογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων, γνωστά ευρέως ως VMS (Volcanogenic Massive Sulfides), πρόκειται για κοιτάσματα σουλφιδίων που σχετίζονται με υποθαλάσσια ηφαιστειακή δραστηριότητα και φιλοξενούνται εντός ηφαιστειακών ή ηφαιστειοιζηματογενών πετρωμάτων.

Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου κοιτασμάτων είναι ότι η δημιουργία τους λαμβάνει μέρος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, με έντονη παρουσία θαλασσινού νερού. Το θαλασσινό νερό διεισδύει στα ηφαιστειακά και πλουτωνικά πετρώματα, θερμαίνεται και ξεπλένει τα τριγύρω πετρώματα, αφαιρώντας μεταλλικά στοιχεία όπως Fe, Pb, Cu και Zn. Το υδροθερμικό υγρό αποβάλλεται μέσω γεωλογικών μορφών με μορφή καμινάδας στον θαλάσσιο πυθμένα, που ονομάζονται ατμίδες ή smokers (Σχ.1.1) και διαχωρίζονται σε μαύρες ατμίδες αν εκβάλλουν υλικό πλούσιο σε σουλφίδια και σε λευκές ατμίδες αν εκβάλλουν υλικό πλούσιο σε θειούχα ή ανθρακικά. Μετά την αποβολή από το στόμιο της ατμίδας, το υδροθερμικό διάλυμα έρχεται σε επαφή με το κρύο θαλασσινό νερό, κρυστώνοντας απότομα και χάνοντας την μεταφορική του ικανότητα και αποβάλλει τα μεταλλικά του στοιχεία, τα οποία αποτίθενται ιζηματογενώς με μορφή "μαύρου χιονιού".

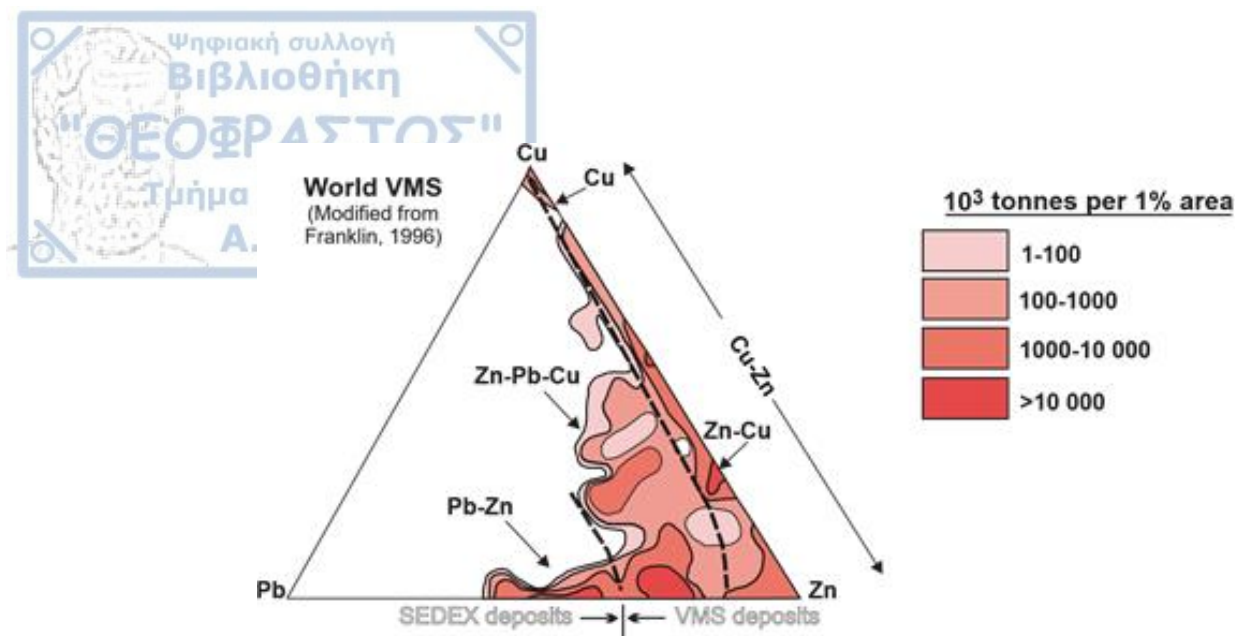
Τα κοιτάσματα αυτού του τύπου παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τα κοιτάσματα τύπου SEDEX (Sediment-hosted submarine exhalative deposits). Και οι δύο τύποι κοιτασμάτων σχηματίζονται υποθαλάσσια (συχνά εντός ιζηματογενών πετρωμάτων), προκαλούν, κατά τον σχηματισμό τους, υδροθερμική αλλοίωση στο πέτρωμα ξενιστή, παρουσιάζουν οριζόντια ορυκτολογική ζώνωση και αποτελούν σημαντικές πηγές Pb και Zn. Ωστόσο, σύμφωνα με Misra (2000), τα κοιτάσματα τύπου SEDEX δεν σχετίζονται άμεσα με ηφαιστειακή δραστηριότητα, η κρυστάλλωση των ορυκτών πραγματοποιείται πάντα στρωματόμορφα (και όχι στρωματέγκλειστα όπως πολλά VMS), έχουν υψηλότερα ποσοστά Pb:Zn και (Pb+Zn):Cu και συχνά δεν παρουσιάζουν κατακόρυφη ορυκτολογική ζώνωση Cu προς (Zn+Pb).



Σχήμα 1.1: Ενεργές μαύρες ατμίδες (πάνω). Φωτογραφία από <https://science.psu.edu/news/deep-sea-fish-use-hydrothermal-vents-incubate-eggs> (2/9/2021). Ενεργές λευκές ατμίδες (κάτω) Φωτογραφία από <https://fineartamerica.com/featured/hydrothermal-smoker-vent-science-source.html> (2/9/2021)

1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ VMS

Τα κοιτάσματα τύπου VMS αποτελούν έναν από τους καλύτερα μελετημένους τύπους κοιτασμάτων, συνεπώς έχουν δημιουργηθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης σε υποκατηγορίες. Ένα από τα πιο χρήσιμα, το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, προτάθηκε από τον Hutchinson (1973) και ταξινομεί τα κοιτάσματα σε 3 κατηγορίες, ανάλογα με το περιεχόμενο τους σε σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, γαληνίτη και σφαλερίτη. Το σύστημα αυτό τροποποιήθηκε και επεκτάθηκε από Franklin (1981), Singer και Cox (1986) και Large (1992) και ταξινομεί πλέον τα κοιτάσματα αναλογικά ως προς το μεταλλικό τους περιεχόμενο σε Cu, Pb και Zn (Σχ. 1.2).



Σχήμα 1.2: Σχήμα ταξινόμησης κοιτασμάτων VMS παγκοσμίως με βάση το ποσοστό και περιεχόμενο τους σε Cu, Zn και Pb. Από Franklin (1981) και τροποποιημένο από Large (1992) για να περιέχει την κατηγορία Zn-Pb-Cu.

Σύμφωνα με αυτό το σύστημα ταξινόμησης υπάρχουν 3 κατηγορίες κοιτασμάτων VMS:

- 1) Κοιτάσματα Zn-Cu, τύπου Besshi. Σχετίζονται με μικτό περιβάλλον ιζηματογένεσης και βασικής ηφαιστειότητας και συχνά με τα πρώιμα στάδια της διάνοιας του ωκεάνιου φλοιού. Συχνά κοιτάσματα αυτού του τύπου φιλοξενούνται εντός τουρβιδιτών ή άλλων ιζηματογενών πετρωμάτων και συχνά τα διαπερνούν βασαλτικά πατάκια (Taylor et. al 1995). Παραδείγματα τέτοιου τύπου κοιτασμάτων είναι το κοιτάσμα Besshi στην Ιαπωνία και το Windy Craggy στον Καναδά.
- 2) Κοιτάσματα Zn-Pb-Cu, τύπου Kuroko που αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Σχετίζονται με βασική έως όξινη ηφαιστειότητα σε οπισθοτόξες λεκάνες και ηπειρωτικά περιθώρια και με πιο προχωρημένο στάδιο διάνοιας του φλοιού. Το πέτρωμα ξενιστής για τα κοιτάσματα Kuroko ποικίλει (από βασάλτες έως και ρυόλιθους). Τα κοιτάσματα αυτής της κατηγορίας είναι κατά μέσο όρο τα μεγαλύτερα σε μέγεθος από τα κοιτάσματα των άλλων κατηγοριών, με χαρακτηριστικά παραδείγματα το Kidd Creek στον Καναδά και την περιφέρεια Mokuroko στην Ιαπωνία.
- 3) Κοιτάσματα Cu, τύπου Κύπρου. Πολύ συχνά αυτά τα κοιτάσματα περιλαμβάνουν και σημαντικές ποσότητες Zn. Σχετίζονται με βασική-υπερβασική ηφαιστειότητα πάνω ή κοντά σε μεσωκεάνιες ράχες και με προχωρημένο στάδιο στην δημιουργία της ωκεάνιας λεκάνης και λέπτυνσης του ωκεάνιου φλοιού. Χαρακτηρίζονται από την παρουσία τους εντός εκτεταμένων οφιολιθικών ακολουθιών, συνήθως εντός βασάλτη. Παραδείγματα κοιτασμάτων αυτής της κατηγορίας είναι το κοιτάσμα στην Σκουριώτισσα στην Κύπρο και το κοιτάσμα Betts Cove στον Καναδά.

Αλλά συστήματα ταξινομούν τα κοιτάσματα VMS σύμφωνα με το ποσοστό Au που περιέχουν (Poulsen και Hannington, 1995) σε πλούσια ή φτωχά σε χρυσό ή με την λιθολογία του πετρώματος ξενιστή εντός του οποίου φιλοξενείται το κοίτασμα και του γεωτεκτονικού περιβάλλοντος (Barrie και Hannington, 1999, Franklin et al. 2005), σύστημα πενταπλής ταξινόμησης που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια.

1.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ VMS

Τα κοιτάσματα VMS αποτελούν σημαντικές πρωτογενής πηγές Zn, Cu, Pb, Ag και Au και δευτερεύουσες πηγές Co, Sn, Se, Mn, Cd, In, Bi, Te, Ga, και Ge, ενώ μερικά κοιτάσματα περιέχουν ποσότητες As, Sb, and Hg (Galley et al., 2007). Ορυκτολογικά τα κοιτάσματα αποτελούνται κυρίως από σουλφίδια Fe καθώς και σουλφίδια Pb, Zn και Cu. Σε κάποιους τύπους κοιτασμάτων VMS επίσης παρατηρείται παρουσία ζεόλιθων όπως ανάλκιμο και σελαδονίτης.

Συναντώνται πάνω από 900 κοιτάσματα παγκοσμίως με γεωλογικά αποθέματα πάνω από 200000 t, εκ των οποίων 350 εντοπίζονται στον Καναδά. Είναι υπεύθυνα για το 22% της παγκόσμιας παραγωγής Zn, 9,7% της παγκόσμιας παραγωγής Pb, 8,7% της παγκόσμιας παραγωγής Ag, 6% της παγκόσμιας παραγωγής Cu και 2% της παγκόσμιας παραγωγής Au (Singer, 1995). Σύμφωνα με τον Mosier (1983), τα κοιτάσματα τύπου Kuroko που σχετίζονται αποκλειστικά με όξινη ηφαιστειότητα φαίνεται να αποτελούν τον σημαντικό τύπο από οικονομική άποψη, απαρτίζοντας το 83% του Pb, το 60% του Zn, το 44% του Cu, το 56% του Ag και το 58% του Au της συνολικής παραγωγής όλων των κοιτασμάτων VMS. Σε σειρά οικονομικής σημασίας τα ακολουθούν τα κοιτάσματα Kuroko μικτού μαγματισμού, τα κοιτάσματα τύπου Κύπρου και τέλος τα κοιτάσματα τύπου Besshi.

Μερικά από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα στον κόσμο είναι το υπεργιγάντιο Rio Tinto, στην Ιβηρική πυριτική ζώνη της Ισπανίας πάνω από 1500 Mt μεταλλεύματος και το κοντινό Neves Corvo στην Πορτογαλία που θεωρείται το πιο πλούσιο υπεργιγάντιο κοίτασμα VMS με 270 Mt μεταλλεύματος, 8,8 Mt καθαρών μετάλλων και συνολική αξία 26 δισεκατομμύρια δολάρια το 2006 (Galley et al., 2007). Άλλα σημαντικά κοιτάσματα είναι το πλούσιο σε μεταλλικό περιεχόμενο Brunswick no. 12 στον Καναδά με 128 Mt μεταλλεύματος και 16,4 Mt μετάλλου, το πλούσιο σε χρυσό La Ronde στον Καναδά με 90 Mt και 5,07 g/t Au και το πλούσιο σε άργυρο Gacup στην Κίνα με 124 Mt μεταλλεύματος και 157 g/t Ag. Στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετά μικρότερα κοιτάσματα όπως στους Μολάους με 2,65 Mt μεταλλεύματος και

400 g/t Cd και το κοίτασμα κοντά στο χωριό Σκρα με 4,7 Mt μεταλλεύματος και 7,7% Pb και Zn σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ (Skarpelis, 2020), ωστόσο η εκμετάλλευση τέτοιων κοιτασμάτων είναι μέχρι στιγμής σχεδόν ανύπαρκτη. Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων γίνεται είτε υπογείως είτε σε open-pit (Σχ.1.3), όταν το επιτρέπει η μορφολογία του κοιτάσματος και η τοπογραφία της περιοχής.

Υπάρχουν αρκετές περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με την αλόγιστη εκμετάλλευση κοιτασμάτων VMS καθώς τα κοιτάσματα VMS συχνά φιλοξενούνται εντός αρκετά υδροπερατών σχηματισμών, αποτελούνται κατά κύριο λόγο από σουλφίδια και περιέχουν σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων όπως Pb και Zn. Σε περίπτωση έλλειψης περιβαλλοντικών μέτρων προστασίας κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος ή αν υπάρξει εγκατάλειψη του μεταλλείου και των σωρών σκωριών, λαμβάνει μέρος οξείδωση των εκτεθειμένων σουλφιδίων και δημιουργία σουλφιδικών αλάτων, τα οποία συσσωρεύονται στην βάση του μεταλλείου και των σωρών και προκαλούν με την διάλυση τους όξινη απορροή (όπως στο Σχ. 1.4) και διαρροή βαρέων μετάλλων εντός του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής.



Σχήμα 1.3: Μεταλλείο τύπου open-pit στο κοίτασμα τύπου Kuroko Kidd Creek στον Καναδά. Φωτογραφία από <https://www.mining.com/goldcorp-finishes-strong-with-record-gold-production-for-2012-89393/> (2/9/2021).

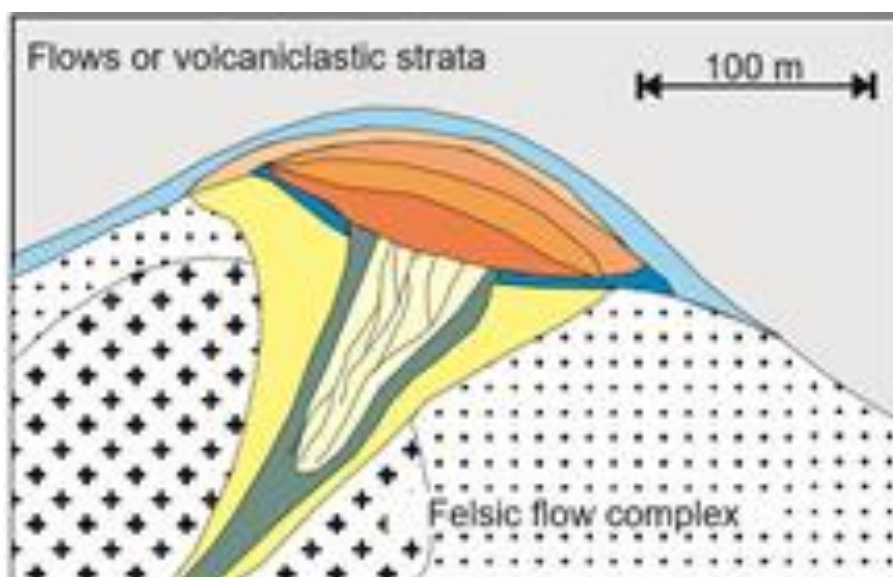


Σχήμα 1.4: Όξινη απορροή μετάλλων από εγκαταλελειμμένες σκωρίες στο Rio Tinto, Huelva στην Ισπανία. Παρά την εντυπωσιακή εικόνα, το νερό που προέρχεται από την όξινη απορροή είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για το τοπικό οικοσύστημα καθώς έχει μέσο pH 1,2 και είναι πλούσιο σε βαρέα μέταλλα. Φωτογραφία από <https://500px.com/photo/57918056/Rio-Tinto-by-Fran-Ojeda> (10/9/2021).

2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΤΥΠΟΥ KUROKO

2.1 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ

Τα κοιτάσματα τύπου Kuroko, σύμφωνα με Ohmoto (1996), αποτελούνται από δύο κύριους τύπους μεταλλοφορίας (Σχ. 2.1): 1) δομές συμπαγών σουλφιδίων που παρουσιάζει σημαντική, κατακόρυφη ορυκτολογική ζώνωση. Μπορεί να είναι στρωματόμορφος ή στρωματέγκλειστος. Περιλαμβάνει περίπου το 90% της μεταλλοφορίας, 2) ζώνη υδροθερμικής αλλοίωσης κάτω από την συμπαγή μεταλλοφορία, εντός των υποκείμενων ιζηματογενών ή ηφαιστειακών πετρωμάτων, που χαρακτηρίζεται από κρυστάλλωση σουλφιδίων και χαλαζία εντός stockwork φλεβιδίων και εκτεταμένη τυριτώση του πετρώματος ξενιστή. Παρουσιάζει συχνά οριζόντια ζώνωση και περιλαμβάνει κοντά στο 10% της μεταλλοφορίας. Πολλά κοιτάσματα παρουσιάζουν ζώνες ημισυμπαγούς μεταλλεύματος (Taylor et al., 1996)



Σχήμα 2.1: Μορφή τυπικού κοιτάσματος τύπου Kuroko. Με πορτοκαλί και μπλε χρώματα απεικονίζονται οι διαφορετικές ζώνες του φακού συμπαγών σουλφιδίων ενώ από κάτω, εντός όξινου ηφαιστειακού σχηματισμού, βρίσκεται η ζώνη αλλοίωσης. Από Franklin et al. (2005).

Τυπικά, στα οικονομικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα, η συμπαγής μεταλλοφορία έχει φακοειδής ή θολωτή μορφή με διαστάσεις 100-500 m και πάχος μερικές δεκάδες μέτρα, ενώ η ζώνη stockwork έχει κωνική μορφή που, στο ανώτερο σημείο, ακριβώς κάτω από τον δόμο συμπαγών σουλφιδίων, έχει διάμετρο περίπου 100 m και βάθος σπανίως ανώτερο των 100 m. Ωστόσο, λόγω ανωμαλιών κατά την δημιουργία ενός κοιτάσματος, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν κοιτάσματα με μη τυπική μορφή όπως, για παράδειγμα, το κοιτάσμα στο Bald

Mountain των ΗΠΑ, που έχει μορφή τύπου μπολ με διάμετρο 350 m, πάχος περίπου 250 m και πιθανώς δημιουργήθηκε εντός υποθαλάσσιου τεκτονικού βυθίσματος, με πολύ περιορισμένο χώρο ανάπτυξης (Busby et al., 2003). Επιπλέον πολλά κοιτάσματα, ειδικά τα πιο αρχαία, βρέθηκαν σε περιβάλλον έντονου τεκτονισμού με αποτέλεσμα να εμφανίζουν χαρακτηριστικά ρηγμάτωσης ή πτύχωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα έντονης επίδρασης της τεκτονικής σε ήδη σχηματισμένα κοιτάσματα είναι αυτό του κοιτάσματος Brunswick no. 12 στον Καναδά το οποίο έχει υποστεί έντονη πτύχωση και κατακερματισμό, με αποτέλεσμα την χημική μεταφορά σουλφιδίων και την δημιουργία τεκτονικών λατυποπαγών (de Roo και van Staal, 2003).

2.2 ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΞΕΝΙΣΤΕΣ

Τα κοιτάσματα τύπου Kuroko, καθώς σχηματίζονται σε συνδυαστικό περιβάλλον ιζηματογένεσης και ηφαιστειότητας με μικτό μαγματισμό, είναι πιθανό να φιλοξενούνται εντός μεγάλου εύρους πυριγενών και ιζηματογενών πετρωμάτων.

Τα υποκείμενα πετρώματα, συνήθως, πρόκειται για όξινα ηφαιστειακά ή πλουτωνικά πετρώματα, με πολλά κοιτάσματα να σχηματίζονται εντός ή κοντά σε κατακερματισμένους δακτινικούς και ρυολιθικούς δόμους (Ohmoto και Takahashi, 1983). Άλλα πιθανά πυριγενή πετρώματα που φιλοξενούν κοιτάσματα Kuroko είναι ηφαιστειακοί τόφφοι, πυροκλαστικά λατυποπαγή και βασάλτες MORB. Κοιτάσματα Kuroko εντοπίζονται συχνά και εντός ιζηματογενών πετρωμάτων βαθιάς θάλασσας, όπως ιλυόλιθους και κερατόλιθους, με συχνή την απουσία ασβεστιτικών πετρωμάτων, καθώς τα υποκείμενα πετρώματα (και πολλές φορές και τα ίδια τα κοιτάσματα) σχηματίζονται σε βάθος μεγαλύτερο των 3500 m (Guber και Merrill, 1983). Τα πετρώματα ξενιστές υπόκεινται μέτρια έως ισχυρή αλλοίωση λόγω της επίδρασης των υδροθερμικών υγρών που τα διαπερνούν.

Τα υπερκείμενα πετρώματα είναι στις περισσότερες περιπτώσεις ηφαιστειακές ακολουθίες που απαρτίζονται από 35-70% όξινα ηφαιστειακά πετρώματα, 20-50% βασάλτη και μόλις 10% ιζηματογενή πετρώματα (Franklin et al. 2005). Φυσικά υπάρχουν εξαιρέσεις ανάλογα με το τεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού του κοιτάσματος, όπως στο Rio Tinto της Ισπανίας όπου έχουμε ως υπερκείμενο πέτρωμα φλύσχη με μέλη που προέρχονται από όξινα ηφαιστειακά πετρώματα (Reyes et al. 2019). Είναι επίσης πιθανό να παρουσιάζουν υδροθερμική αλλοίωση αλλά γενικά σε μικρότερο βαθμό από το υποκείμενα πετρώματα.

2.3 ΖΩΝΩΣΗ

Ένα από τα κυριότερα γεωλογικά χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων Kuroko που τα διαφοροποιεί από τους υπόλοιπους τύπους κοιτασμάτων VMS, είναι η έντονη χημική και ορυκτολογική ζώνωση που παρουσιάζουν όπως φαίνεται στα σχήματα 2.1, 2.2 και 2.3. Το κοίτασμα τυπικά παρουσιάζει κατακόρυφη ζώνωση με τις εξής ζώνες από πάνω προς τα κάτω:

1) **Κάλυμμα κερατόλιθου-αιματίτη (tetsusekiei)**. Πολύ λεπτό μη-συνεχές κάλυμμα χαλαζία, αιματίτη, και ελάχιστου σιδηροπυρίτη τριγύρω από το κοίτασμα που σχηματίστηκε από συνδυασμό κλαστικών και χημικών διεργασιών στο τελικό στάδιο του σχηματισμού του κοιτάσματος (Καλογερόπουλος, 1985).

2) **Ζώνη βαρύτη**. Ζώνη που αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από συμπαγή βαρύτη με κρυστάλλους μικρού μεγέθους. Σηματοδοτεί το τέλος δραστηριότητας του υδροθερμικού δικτύου (Glasby et al. 2008).

3) **Ζώνη μαύρου συμπαγούς μεταλλεύματος (kuroko)**. Σημαντική σε μέγεθος ζώνη που αποτελείται ορυκτολογικά από σιδηροπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη και βαρύτη ως σύνδρομο με αναλογίες σφαλερίτη $\approx$ βαρύτη $>$ σιδηροπυρίτη $\approx$ γαληνίτη (Eldridge et al, 1983). Μπορεί επίσης να περιέχει μικρές ποσότητες χαλκοπυρίτη. Σε αυτή την ζώνη συγκεντρώνονται συνήθως η πλειονότητα των ορυκτών χρυσού και αργύρου του κοιτάσματος (Sato 1977)

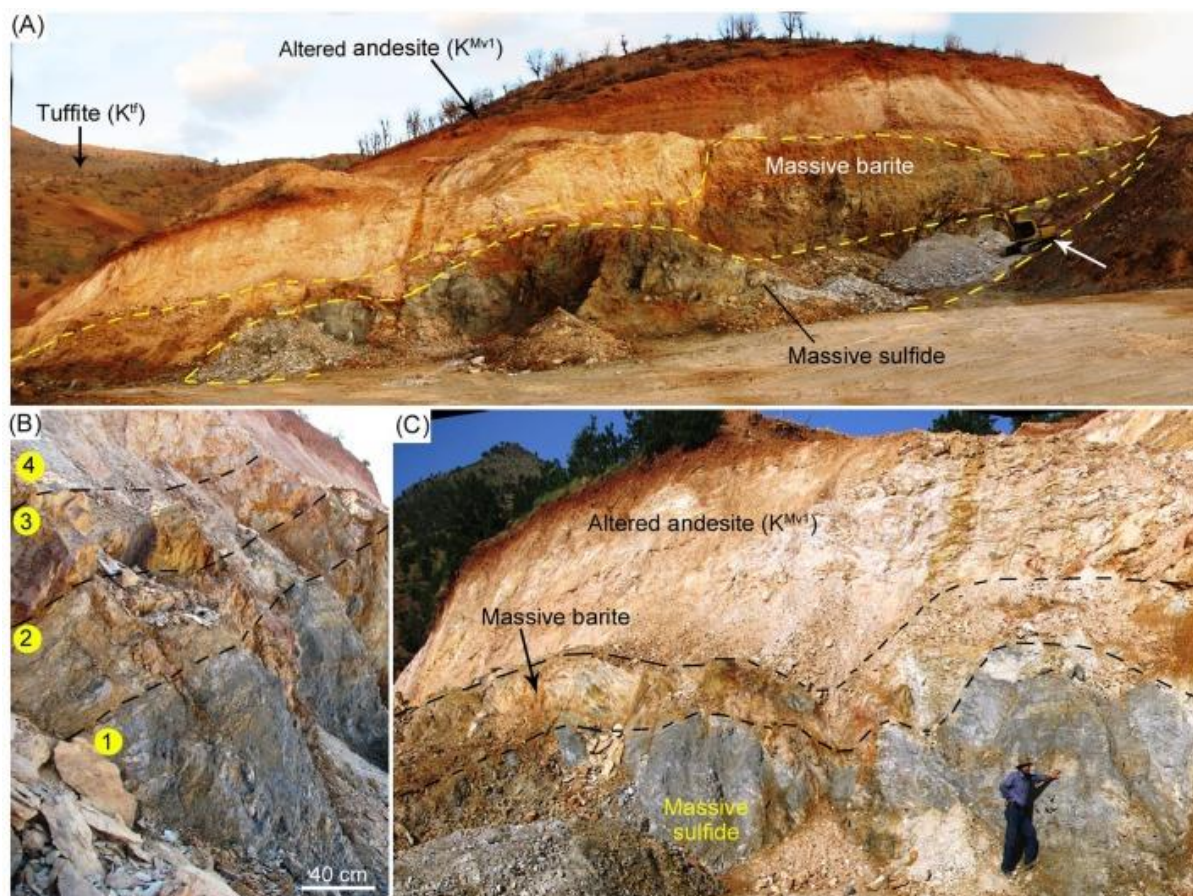
4) **Ζώνη κίτρινου συμπαγούς μεταλλεύματος (oko)**. Ζώνη συνήθως μικρότερη σε μέγεθος από την ζώνη μαύρου μεταλλεύματος, με χαρακτηριστικό κίτρινο χρώμα. Αποτελείται από σφαλερίτη, μαγνητοπυρίτη, λεπτομερείς κόκκους σιδηροπυρίτη με συνδετική ύλη χαλκοπυρίτη με αναλογίες χαλκοπυρίτη $\approx$ σιδηροπυρίτη $>$ σφαλερίτη (Eldridge et al, 1983). Πιθανή παρουσία τετραεδρίτη και γαληνίτη.

5) **Ζώνη πυριτικού μεταλλεύματος (ryukako)**. Συνήθως μικρή σε μέγεθος ζώνη στην βάση του που αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από σιδηροπυρίτη και χαλαζία.

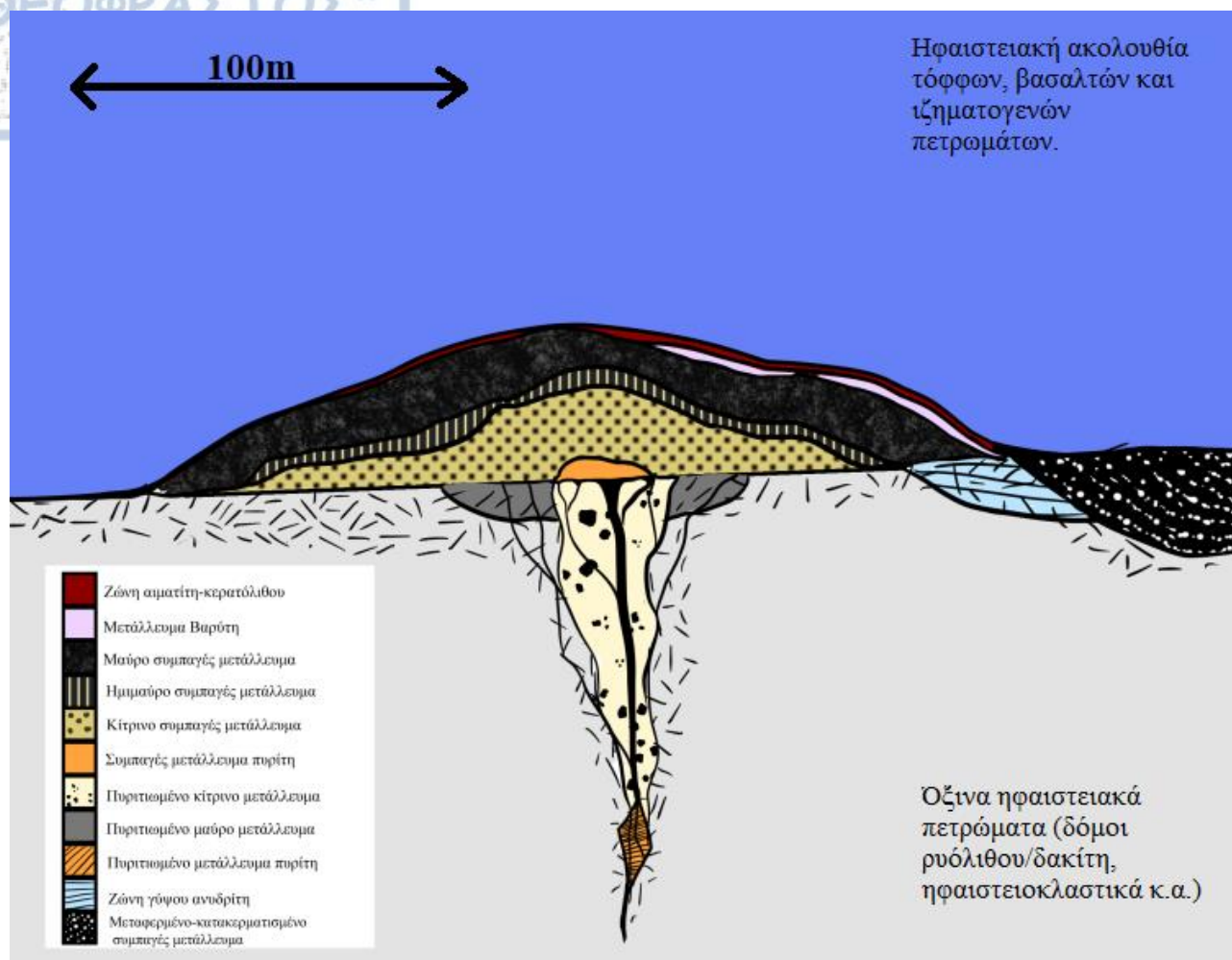
6) **Πυριτική ζώνη (keiko)**. Αντιπροσωπεύει την ζώνη τροφοδοσίας του υδροθερμικού υγρού που δημιούργησε το κοίτασμα. Αποτελείται από σύμπλεγμα φλεβιδίων stockwork εντός του πετρώματος ξενιστή, με έντονη παρουσία χαλαζία. Η μεταλλοφορία σε αυτήν την ζώνη εμφανίζεται σχεδόν αποκλειστικά εντός των φλεβιδίων του stockwork. Παρουσιάζει οριζόντια ζώνωση σουλφιδίων ανάλογη με αυτή που υπάρχει σε κατακόρυφο επίπεδο. Συνεπώς, περιφερειακά υπάρχει ζώνη σιδηροπυρίτη-σφαλερίτη-γαληνίτη, εσωτερικά υπάρχει ζώνη χαλκοπυρίτη-σιδηροπυρίτη και στον πυρήνα ζώνη σιδηροπυρίτη-χαλαζία (Ohmoto 1996).

Επίσης περιέχει σημαντικές ποσότητες ορυκτών που προήλθαν από υδροθερμική αλλοίωση όπως χλωρίτη και σερίκίτη.

7) **Ζώνη γύψου-ανυδρίτη (sekkoko).** Εντοπίζεται συνήθως δίπλα ή κάτω από τον φακό συμπαγών σουλφιδίων και αποτελείται κυρίως από γύψο και ανυδρίτη με μικρές ποσότητες σουλφιδίων.



Σχήμα 2.2: Φωτογραφίες του πλούσιου σε χρυσό κοιτάσματος Barika στο Ιράν. Στη Α παρατηρούνται από πάνω προς τα κάτω: το υπερκείμενο πέτρωμα (υδροθερμικά αλλοιωμένος ανδεσίτης), η ζώνη βαρύτη και τα συμπαγή σουλφίδια. Στο Β απεικονίζεται η ζώνωση του κοιτάσματος με το 1 να είναι η ζώνη μαύρου μεταλλεύματος, το 2 είναι ζώνη βαρύτη σουλφιδίων, το 3 είναι ζώνη βαρύτη με ιζηματογενή πυριτικά και το 4 είναι ο αλλοιωμένος ανδεσίτης. Στο C, όπως στο A, παρατηρούνται ο αλλοιωμένος ανδεσίτης, η ζώνη βαρύτη και τα συμπαγή σουλφίδια. Φαίνεται πολύ καθαρά η στρωματόμορφη κρυστάλλωση του κοιτάσματος. Από Tajeddin et. al 2019.



Σχήμα 2.3: Εξιδανικευμένη τομή μη διαταραγμένου κοιτάσματος τύπου Kuroko. Η ζώνη ημιμαύρου μεταλλεύματος αποτελεί μεταβατική ζώνη μεταξύ μαύρου και κίτρινου συμπαγούς μεταλλεύματος. Το μεταφερμένο-κατακερματισμένο συμπαγές μετάλλευμα πρόκειται για μετάλλευμα που έχει υποστεί ιζηματογενείς διεργασίες και έχει μεταφερθεί και αποθεθεί κοντά στο κοιτάσμα. Σχήμα τροποποιημένο από Eldridge et al.(1983).

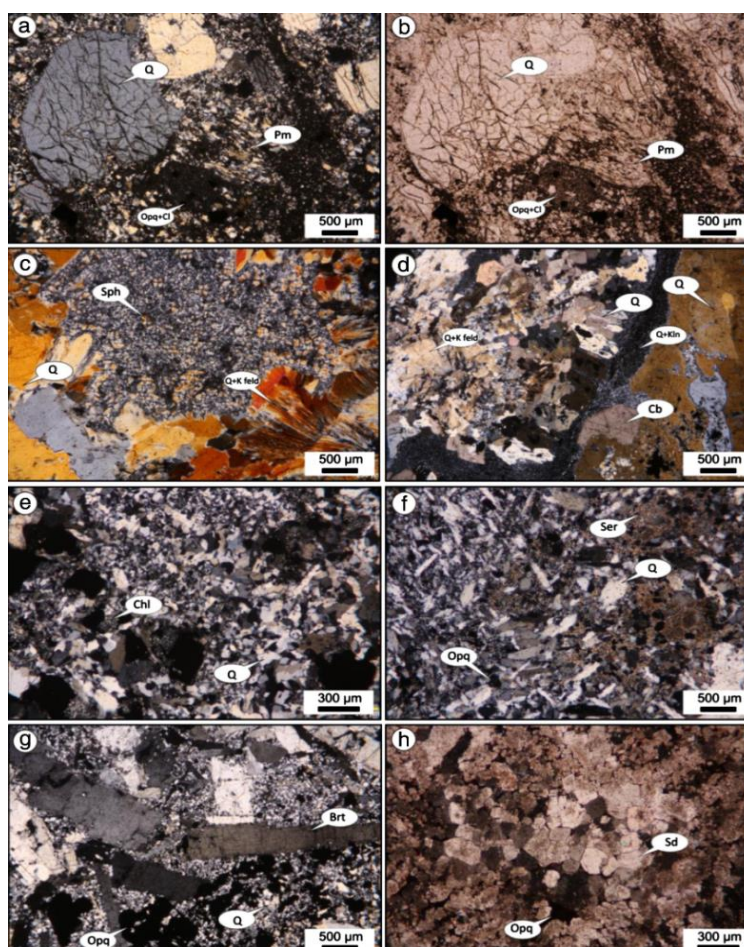
2.4 ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗ

2.4.1 ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗ ΑΛΛΟΙΩΣΗ

Τα κοιτάσματα τύπου Kuroko εμφανίζουν χαρακτηριστική αλλοίωση εντός του πετρώματος ξενιστή ή της συμπαγούς μεταλλοφορίας λόγω τις έντονης παρουσίας υδροθερμικών διαλυμάτων και θαλασσινού νερού. Η αλλοίωση γίνεται μέσω της αντικατάστασης της υάλου και των ορυκτών (χαλαζίας, πλαγιόκλαστο, ορθόκλαστο, βιοτίτης, μοσχοβίτης, διάφορα σουλφίδια κ.ά.) του πετρώματος που υπόκειται την αλλοίωση με ορυκτά εξαλλοίωσης (χαλαζίας ή χαλκηδόνιος/οπάλιος, σερικήτης, χλωρίτης, πλαγιόκλαστο επίδοτο,

καολινίτης, χαλκοπυρίτης κ.ά.) σε μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες από 150 μέχρι 400 °C (Shanks και Thurston, 2012). Τα ορυκτά εξαλλοίωσης είναι πλούσια σε Mg (χλωρίτης, σερικίτης), Cl (χλωρίτης) και K (πλαγιόκλαστο), χημικά στοιχεία που συνήθως δεν υπάρχουν σε σημαντικές ποσότητες στα υποκείμενα πετρώματα αλλά παρέχονται μέσω του θαλασσινού νερού το οποίο διεισδύει εντός του υδροθερμικού συστήματος .

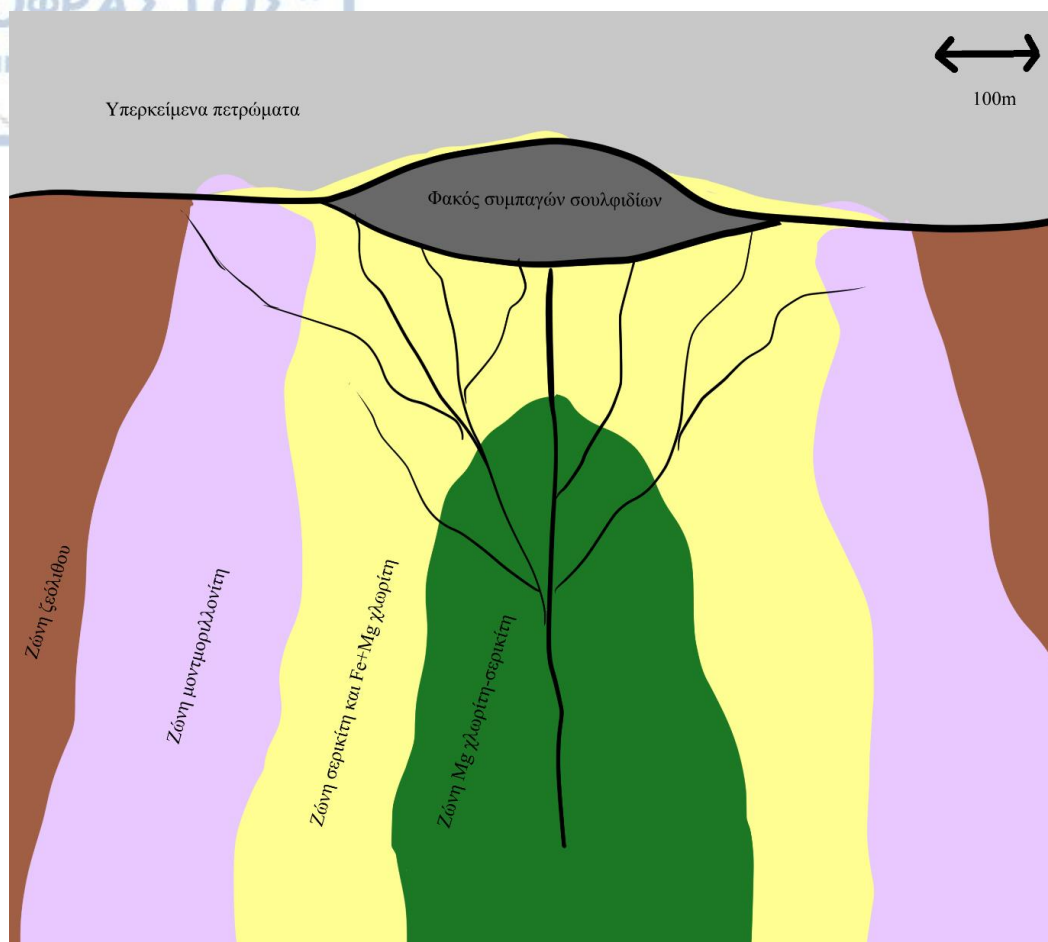
Η υφή της αλλοίωσης ποικίλει (Σχ. 2.4). Μπορεί να είναι από αποσπασματική, με σπάνια την ύπαρξη φαινοκρυστάλλων ορυκτών εξαλλοίωσης καθώς μερικά μόνο ορυκτά αντικαθίστανται, μέχρι πλήρης, ακριβώς δίπλα στην ζώνη τροφοδοσίας υδροθερμικών υγρών, όπου το πέτρωμα ξενιστής έχει πλήρως αντικατασταθεί από συμπαγή χαλαζία και φλέβες χλωρίτη και χαλκοπυρίτη.



Σχήμα 2.4: Φωτογραφίες τομών υποκείμενων πετρωμάτων (δακτυικοί τόφοι) από το κοίτασμα Murgul στην Τουρκία που έχουν υποστεί υδροθερμική αλλοίωση. a+b) θραύσματα τόφρου που έχουν αλλοιωθεί σε χαλαζία. Συνδετικό υλικό είναι λεπτόκοκκη και ημιδιαφανή ιλύς c) σφελουριτική υφή (Sph) σχηματισμένη από χαλαζία και πλαγιόκλαστο d) αλλοίωση χαλαζία-πλαγιόκλαστου-ανθρακικών με φλεβίδια χαλαζία και καολινίτη e) αλλοίωση χαλαζία-χλωρίτη f) αλλοίωση χαλαζία-σερικίτη g) πυριτώση με βαρύτη και ιλύ h) σιδηρίτης και ημιδιαφανής ιλύ εντός φλεβών στους έντονα αλλοιωμένους τόφρους. Από Abdioğlu et al. (2015).

Η υδροθερμική αλλοίωση μπορεί να διαφέρει από κοίτασμα σε κοίτασμα, καθώς οι συνθήκες (π.χ. η παρουσία θαλασσινού νερού εντός της πυριτικής ζώνης) ή η χημική σύσταση των κοιτασμάτων και των υποκείμενων πετρωμάτων διαφέρει. Ωστόσο τα κοιτάσματα συχνά παρουσιάζουν μια κοινή ζώνωση των ορυκτών αλλοίωσης στα υποκείμενα πετρώματα (Ohmoto 1996, Izawa et al. 1978, Inoue και Utada 1991). Συγκεκριμένα, από το κέντρο της πυριτικής ζώνης προς τα έξω (Σχ. 2.5), μπορεί να σχηματίζονται:

- 1) **ζώνη χλωρίτη-σερικήτη-χαλαζία**, σχετικά κοντά στην πυριτική ζώνη. Στο κέντρο τη ζώνης επικρατεί Mg χλωρίτης, φλέβες χαλκοπυρίτη και χαλαζίας ενώ σε μεγαλύτερη απόσταση επικρατεί σερικήτης με μικρότερες ποσότητες Mg+Fe χλωρίτη, χαλαζία και δευτερογενούς πλαγιόκλαστου. Λόγω των έντονης θερμοκρασίας που επικράτησε κατά την δημιουργία της, αυτή η ζώνη παρουσιάζει την πιο πλήρη κρυστάλλωση ορυκτών εξαλλοίωσης.
- 2) **ζώνη μοντμοριλλονίτη**. Κύρια ορυκτά είναι μοντμοριλλονίτης, χαλαζίας, καολινίτης και μικρή παρουσία ζεόλιθων (όπως αναλκίτη). Δημιουργείται υπό μέτριες συνθήκες θερμοκρασίας.
- 3) **ζώνη ζεόλιθου** που αρχίζει σε σχετικά μικρή απόσταση (>1 km) από το κοίτασμα. Κύρια ορυκτά είναι ζεόλιθοι (όπως κλινοπιλόλιθος, μορδενίτης, κ.ά.), χριστοβαλίτης και μοντμοριλλονίτης. Σχετίζεται πιο πολύ με την υποβρύχια ηφαιστειότητα παρά με την δημιουργία του κοιτάσματος. Καθώς κατά την δημιουργία της, δεν επικρατούν τόσο ισχυρές συνθήκες όσο και στις άλλες ζώνες, η υφή αυτής της ζώνης είναι αποσπασματική και συχνά είναι δύσκολη η ταυτοποίηση της.



Σχήμα 2.5: Εξιδανικευμένη τομή κοιτάσματος Kuroko με τις διάφορες ζώνες αλλοίωσης στα υποκείμενα πετρώματα. Τα υπερκείμενα πετρώματα επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό, με την κύρια αλλοίωση να είναι ήπια σερικιτίωση.

2.4.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΛΛΟΙΩΣΗ

Πριν συμπαγοποιηθούν, τα χαλαρά αποθεθειμένα σουλφίδια που αποτελούν τον πρόδρομο ενός κοιτάσματος Kuroko, επηρεάζονται από την απότομη πτώση της θερμοκρασίας και από το οξυγόνο στο θαλασσινό νερό (Koski et al., 2003). Τα ορυκτά που βρίσκονται στο όριο θαλασσινού νερού-φακού συμπαγών σουλφιδίων υπόκεινται οξείδωση. Αυτή η διαδικασία (αλμυρόλυση) ξεκινάει από την επιφάνεια του κοιτάσματος και σταδιακά, καθώς το θαλασσινό νερό βρίσκει δρόμο εντός του φακού, μπορεί να επηρεάσει όλο το κοίτασμα. Πιθανός παράγοντας στην οξείδωση του πρωτοκοιτάσματος μπορεί να είναι και η παρουσία χημικοσυνθετικών βακτηρίων ή άλλων μικροβίων και οργανισμών του πυθμένα της θάλασσας (Toner et al., 2009). Για να αποφευχθεί η πλήρης καταστροφή του κοιτάσματος, πρέπει να

πραγματοποιηθεί γρήγορα η ταφή του κάτω από ιζήματα. Τα συμπαγή κοιτάσματα είναι επίσης αρκετά ευαίσθητα σε επιφανειακές συνθήκες.

Τα κύρια προϊόντα της οξείδωσης, ανεξαρτήτως των μηχανισμών εκ των οποίων πραγματοποιείται, είναι οξείδια και υδροξείδια μετάλλων και θειικό οξύ. Λόγω της υδροπερατότητας των κοιτασμάτων και των υποκείμενων πετρωμάτων, γίνεται εύκολη η κίνηση διαλύματος θειικού οξέος με χαμηλό pH εντός ολόκληρου του κοιτάσματος με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της καταστροφής του.

2.5 ΓΕΩΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα κοιτάσματα τύπου Kuuroko παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στις γεωφυσικές τους ιδιότητες από τα πετρώματα ξενιστές τους. Συνεπώς αυτές οι διαφορές μπορεί να χρησιμοποιηθούν πολύ αποδοτικά για τον εντοπισμό πιθανών κοιτασμάτων.

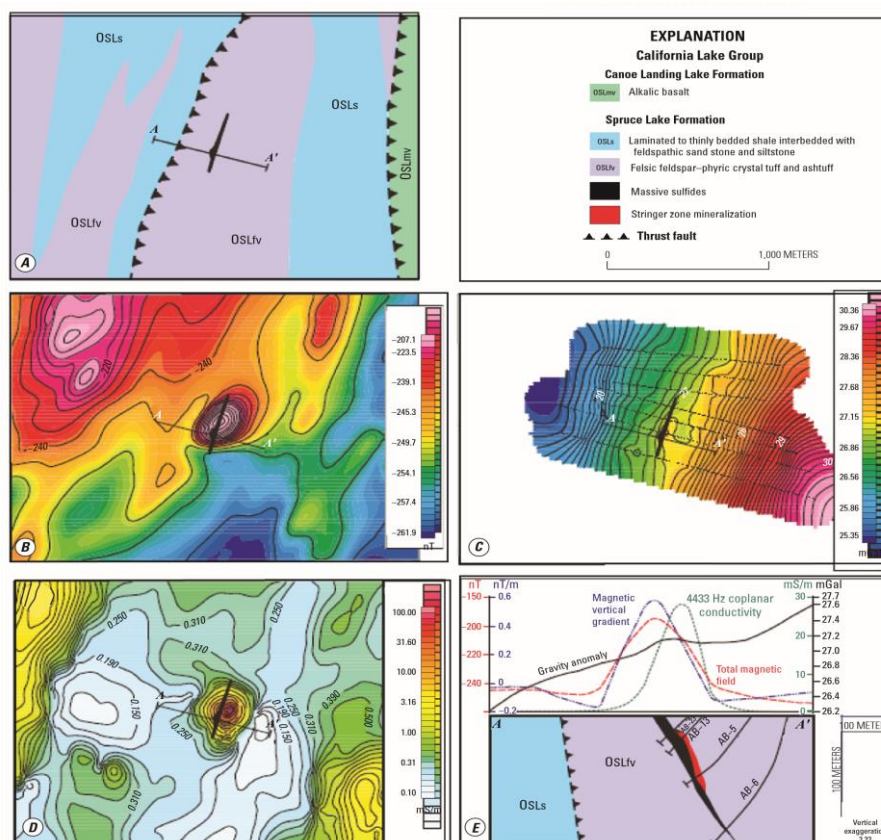
Μια από τις χαρακτηριστικότερες ιδιότητες αυτού του τύπου κοιτασμάτων, είναι η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα τους (Σχ. 2.6D). Συγκεκριμένα, τα κοιτάσματα τυπικά παρουσιάζουν αγωγιμότητα συγκρίσιμη με αυτή του γραφίτη (Ford et al., 2007) και μεγαλύτερη από 20 τάξεις μεγέθους σε σχέση με τα πετρώματα ξενιστές (Grant και West, 1965). Σημαντικό πρόβλημα των ηλεκτρικών μεθόδων εντοπισμού προκύπτει όταν τα υπερκείμενα πετρώματα περιέχουν σημαντικές ποσότητες νερού, που αυξάνει την ηλεκτραγωγιμότητα τους, κρύβοντας πρακτικά την ύπαρξη του κοιτάσματος.

Χρήσιμες συχνά αποδεικνύονται και μαγνητικές μέθοδοι (Σχ 2.6B). Αν και τα συνήθη σουλφίδια που αποτελούν το κοιτάσμα δεν έχουν πολύ υψηλότερο μαγνητικό αποτύπωμα σε σχέση με τα πετρώματα ξενιστές τους, συχνά υπάρχει παρουσία μαγνητίτη που προέκυψε πιθανώς λόγω επιφανειακής αλλοίωσης αιματίτη στο κάλυμμα κερατόλιθου-αιματίτη (Ohmoto, 2003) και παρουσιάζει σημαντική μαγνητική ανωμαλία. Έντονη υδροθερμική αλλοίωση, αντιθέτως, επηρεάζει ιδιαίτερα τα ορυκτά με μαγνητικές ιδιότητες και μπορεί να δώσει αρνητικές μαγνητικές ανωμαλίες.

Άλλη χρήσιμη για τον εντοπισμό ιδιότητα αποτελεί η βαρυτική υπογραφή του κοιτάσματος (Σχ. 2.6C). Καθώς τα κοιτάσματα Kuuroko αποτελούνται από ορυκτά με μεγάλη πυκνότητα όπως γαληνίτη και σιδηροπυρίτη ενώ τα πετρώματα ξενιστές συνήθως έχουν αρκετά μικρότερη πυκνότητα, συνεπώς θετικές βαρυτικές ανωμαλίες κατά την μέτρηση των τιμών του βαρυτικού πεδίου μπορεί να υποδεικνύουν την ύπαρξη κοιτάσματος (Shanks και Thurston, 2012). Μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με σεισμικές μεθόδους καθώς

φαίνεται ότι η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων είναι ανάλογη με την πυκνότητα σε πετρώματα όπου κύριο ορυκτό είναι ο πυρίτης και αντιστρόφως ανάλογη σε πετρώματα όπου επικρατούν άλλα σουλφίδια (Salisbury et al., 1996).

Τέλος κοιτάσματα Kuroko μπορεί να εντοπιστούν και με ραδιομετρικές μεθόδους, με μέτρηση στοιχείων όπως το K, το U και το Th. Το K είναι διαδεδομένο στοιχείο και μπορεί να συγκεντρωθεί ή να αποπλυθεί από πετρώματα μέσω υδροθερμικής αλλοίωσης ενώ το U και το Th δεν είναι και τόσο διαδεδομένα. Μέθοδοι φασματομετρίας με ακτίνες γ, συνεπώς, μπορούν να προσδιορίσουν την τοποθεσία ενός κοιτάσματος η συγκέντρωση ραδιενεργών στοιχείων στο κοίτασμα παρουσιάζει διαφορά με αυτήν των ξενιστών του, αν η συγκέντρωση του K έχει επηρεαστεί από υδροθερμική αλλοίωση και αν η κρυστάλλωση και η αλλοίωση έχει επηρεάσει εδαφικά στοιχεία (Thomas et al., 2000).

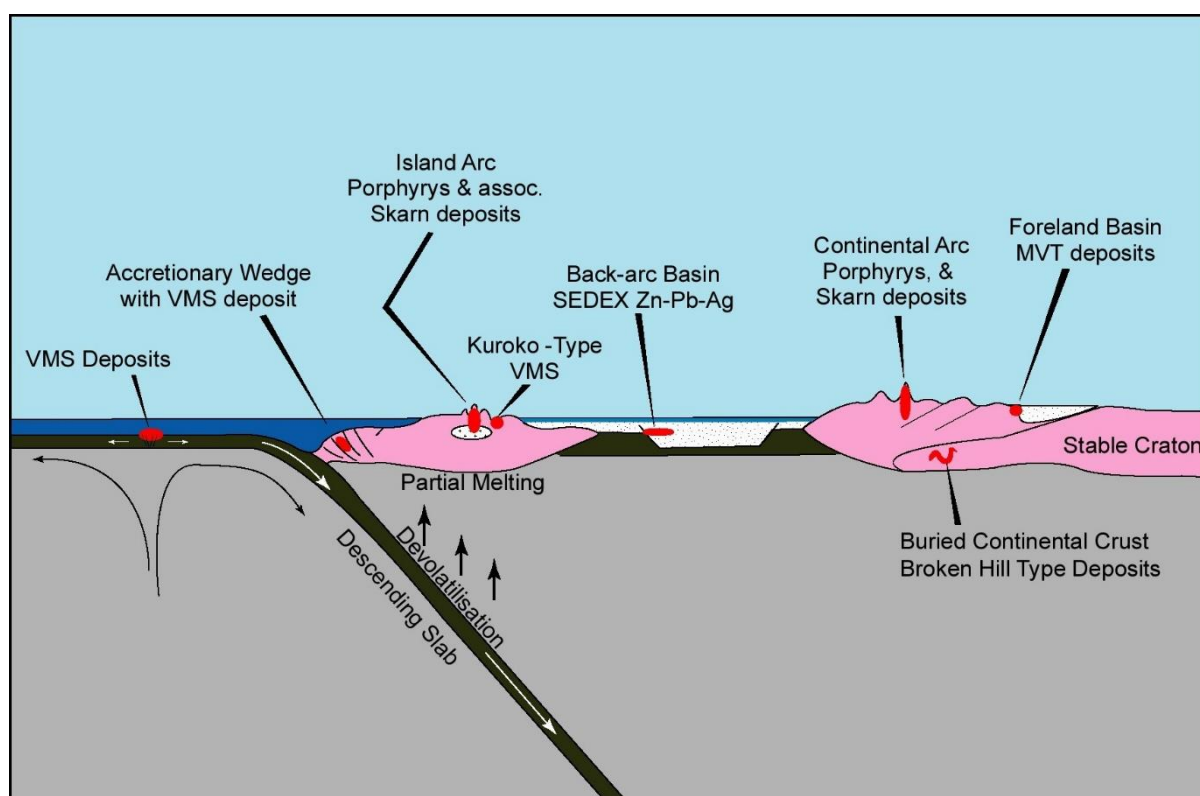


Σχήμα 2.6: Γεωλογικοί και γεωφυσικοί χάρτες του κοιτάσματος Armstrong B στο New Brunswick του Καναδά. Με μαύρο υποδεικνύεται το κοίτασμα σε κάθε χάρτη. A: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής. B: Χάρτης συνολικής μαγνητικής έντασης. C: Βαρυμετρικός χάρτης. D: Χάρτης ηλεκτραγωγιμότητας. E: Γράφημα συνολικού μαγνητικού πεδίου, οριζόντιας μαγνητικής διαβάθμισης, βαρυτικής ανωμαλίας και ηλεκτραγωγιμότητας σε προφίλ που διαπερνούν το κοίτασμα. Από Thomas et al. (2000).

3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ KUROKO

3.1 ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ο σχηματισμός των κοιτασμάτων τύπου Kuroko, παίρνοντας υπόψη τα ιζηματογενή και όξινα έως βασικά ηφαιστειακά πετρώματα με τα οποία άμεσα σχετίζονται τα κοιτάσματα, έλαβε χώρα σε υποβρύχιο περιβάλλον μικτού (κυρίως όξινου) ασβεσταλκαλικού μαγματισμού. Αυτά τα στοιχεία υποδεικνύουν τεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού πάνω σε ηπειρωτικό περιθώριο, σε νησιωτικό τόξο ή σε οπισθοτόξια λεκάνη (Σχ. 3.1). Τα συγκεκριμένα περιβάλλοντα χαρακτηρίζονται από εφελκυστικές τάσεις, συνεπώς, αφού συνήθως τα εφελκυστικά γεωλογικά γεγονότα δεν διαρκούν παραπάνω από 2-3 εκατομμύρια χρόνια, το περιθώριο για σχηματισμό κοιτασμάτων είναι σχετικά μικρό (Franklin et al. 2005).



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση του γεωτεκτονικού περιβάλλοντος σχηματισμού των κοιτασμάτων Kuroko. Σχήμα από McGloin et al. 2017.

Διακρίνονται δύο υποκατηγορίες κοιτασμάτων Kuroko ανάλογα με το τεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού τους. Αν το κοιτάσμα σχηματιστεί σε μεγάλη απόσταση από την στεριά, τότε τόσο στα υποκείμενα όσο και στα υπερκείμενα πετρώματα, επικρατούν όξινα ηφαιστειακά πετρώματα σε ποσοστό >50% με πολύ μικρή παρουσία ιζημάτων (10%). Τέτοια κοιτάσματα είναι τα κοιτάσματα Kuroko της Ιαπωνίας που σχηματίστηκαν σε τεκτονικό

περιβάλλον νησιωτικού τόξου κατά το Αν. Μειόκαινο. Αν το κοιτάσμα σχηματίστηκε κοντά στην ήπειρο, τότε δέχεται πολύ μεγαλύτερες ποσότητες πυριτικών, κλαστικών ιζημάτων με αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερη συμμετοχή ιζηματογενών πετρωμάτων. Τέτοια κοιτάσματα είναι τα κοιτάσματα στο Rio Tinto της Ισπανίας που σχηματίστηκαν σε τεκτονικό περιβάλλον ηπειρωτικού περιθωρίου κατά το Κ. Κρητιδικό.

Σε παγκόσμιο επίπεδο τα κοιτάσματα τύπου Kuroko εντοπίζονται σε κάθε ήπειρο πλην της Ανταρκτικής (Σχ. 3.2). Τα πιο πρόσφατα σχηματισμένα εντοπίζονται σε γεωλογικά ενεργές περιοχές όπως η Ιαπωνία, οι Φιλιππίνες και οι δυτική ακτή των Η.Π.Α και έχουν ηλικία από το Μ. Μεσοζωικό μέχρι το Τεταρτογενές. Πιο αρχαία κοιτάσματα εντοπίζονται επωθημένα πάνω σε κρατονικές ασπίδες όπως στον Ανατολικό Καναδά, την Αυστραλία και το ανατολικό Καζακστάν.



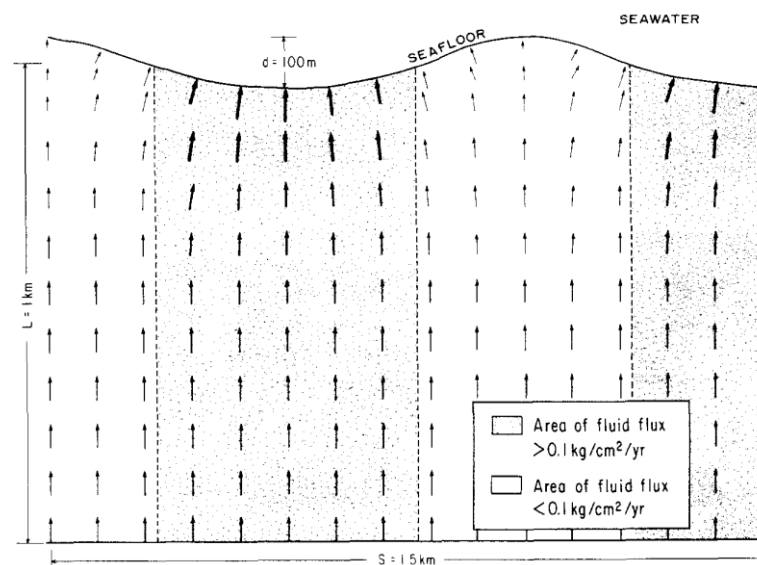
Σχήμα 3.2: Παγκόσμιος χάρτης κατανομής κοιτασμάτων Kuroko. Με κόκκινο κάποιες σημαντικές μεταλλευτικές επαρχίες. Δεδομένα από USGS, <https://mrdata.usgs.gov/general/map-global.html> (15/9/2021).

3.2 ΤΟΠΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

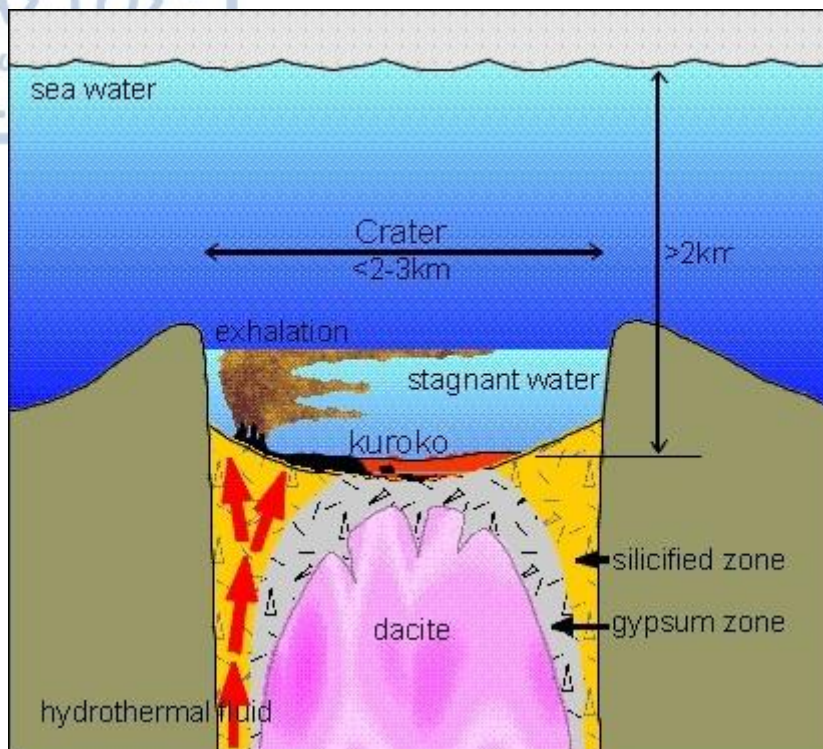
Για την δημιουργία ενός κοιτάσματος Kuroko πρέπει να πληρούνται συγκεκριμένες τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Αρχικά, τα κοιτάσματα σχετίζονται άμεσα με τον τεκτονισμό και την τοπογραφία της περιοχής. Το ανερχόμενο μαγματικό σώμα που προκαλεί την υποθαλάσσια ηφαιστειότητα, κατά την άνοδο του, προκαλεί την δημιουργία κανονικών ρηγμάτων και, αργότερα, ηφαιστειακών δομών κατάρρευσης όπως καλντέρες, κρατήρες και άλλα τεκτονικά βυθίσματα. Τα κοιτάσματα, πολύ συχνά, συσχετίζονται με τέτοιου τύπου δομές (Scott 1980).

Σύμφωνα με Ohmoto 1996, αυτό συμβαίνει επειδή τα υποθαλάσσια βυθίσματα και ιδιαίτερα οι υποθαλάσσιες καλντέρες αποτελούν ιδανικό περιβάλλον για τον σχηματισμό και την συντήρηση συμπαγών σουλφιδίων για υδρολογικούς, φυσικούς και χημικούς λόγους. Υδρολογικά, τα θαλάσσια βυθίσματα φαίνεται να λειτουργούν ως κέντρο συγκέντρωσης των υδροθερμικών υγρών με τα υγρά να κινούνται προς το τοπογραφικά χαμηλότερο σημείο (Σχ. 3.3). Επιπλέον, τα πετρώματα του ωκεάνιου πυθμένα κοντά σε καλντέρες είναι συνήθως κατακερματισμένα, παρέχοντας δίοδο στα υδροθερμικά υγρά και στο μάγμα που ανεβάζουν την υδροπερατότητα των πετρωμάτων και την θερμοβαθμίδα της περιοχής αντίστοιχα. Τέλος η ίδια η μορφή των υποβρύχιων βυθισμάτων παίζει ρόλο παγίδας (Σχ. 3.4) καθώς δεν επιτρέπει το εκβαλλόμενο υδροθερμικό διάλυμα να παρασυρθεί από βαθιά ρεύματα και επειδή τα υποβρύχια βυθίσματα αποτελούν ιδανικό τόπο συγκέντρωσης ιζημάτων που θα προστατέψουν το κοιτάσμα από οξείδωση.



Σχήμα 3.3: Σχήμα ροής υγρών εντός τυπικού θαλάσσιου πυθμένα. Από Ohmoto και Takahashi (1983), με υπολογισμούς από A. C. Lasaga.



Σχήμα 3.4: Τομή κοιτάσματος Kuroko κατά την δημιουργία του, εντός κρατήρα. Η μορφή του κρατήρα κρατά το νερό εντός του στάσιμο, επιτρέποντας την συγκέντρωση σουλφιδίων χωρίς την επιρροή υποθαλάσσιων ρευμάτων. Από <http://earthsci.org/mineral/energy/geomin/geomin.html> (18/9/2021).

Σημαντικό ρόλο παίζει και το ύψος της θαλάσσιας στήλης. Τα υδροθερμικά υγρά, για να δημιουργήσουν ένα κοιτάσμα Kuroko, πρέπει να είναι ικανά να μεταφέρουν αυξημένες ποσότητες μεταλλικών στοιχείων και μειωμένο θείο, όλα σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 1 ppm (Ohmoto 1996). Για να μεταφέρουν ορισμένα μεταλλικά στοιχεία όπως ο χαλκός, τα υδροθερμικά υγρά πρέπει να βρίσκονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ($>300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ωστόσο, σε περιβάλλον πίεσης κάτω των 200 bar τα υδροθερμικά διαλύματα εξατμίζονται και δεν καθίσταται δυνατή η μεταφορά αυτών των μετάλλων. Συνεπώς, για τον σχηματισμό κοιτασμάτων με Cu, απαιτείται βάθος μεγαλύτερο των 2000 m (1 bar αντιστοιχεί σε 10 μέτρα στήλης θαλασσινού νερού). Πιθανή είναι η δημιουργία κοιτασμάτων σε βάθος μικρότερο των 2000 m αν ο σχηματισμός λάβει μέρος εντός πισίνας άλμης (brine pool) καθώς η μεγάλη ποσότητα αλάτων αυξάνει το όριο βρασμού των διαλυμάτων.

Λόγω αυτών των πολύ συγκεκριμένων συνθηκών, τα κοιτάσματα τύπου Kuroko συνήθως σχηματίζονται σε ομάδες, με κάθε ομάδα να περιέχει αρκετά μεταλλοφόρα κοιτάσματα εντός μίας περιοχής 40 km σε διάμετρο. Συχνά, όταν εντοπίζονται πολλές τέτοιες ομάδες εντός μίας περιοχής 1000 km², απαρτίζουν μία μεταλλευτική επαρχία με

χαρακτηριστική την επαρχία Hokuroko στο νησί Honshu της Ιαπωνίας. Εξαιρέση αποτελούν τα μεγαλύτερα κοιτάσματα όπως το Kidd Creek, τα οποία βρίσκονται συνήθως σε απόσταση μεγαλύτερη των 10 km από άλλα κοιτάσματα (Solomon και Walshe, 1979).

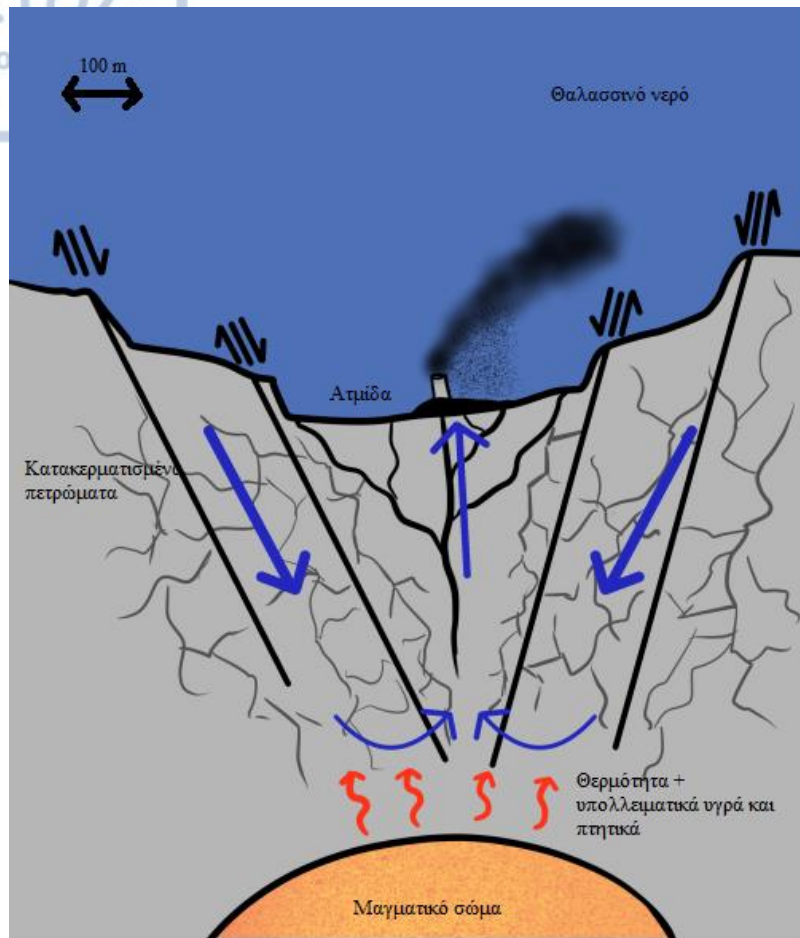
3.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ

Εφόσον σε μια περιοχή επικρατούν οι γεωτεκτονικές και τοπογραφικές συνθήκες που έχουν αναφερθεί, τότε μπορεί να ξεκινήσει η δημιουργία του κοιτάσματος.

Το μαγματικό σώμα έχοντας κατακερματίσει τα πετρώματα του βυθού, δημιουργεί την βάση για την δημιουργία του υδροθερμικού συστήματος. Το νερό που κυκλοφορεί εντός του υδροθερμικού συστήματος, μέσω πολλαπλών ερευνών σε υγρά εγκλείσματα εντός κρυστάλλων χαλαζία και σφαλερίτη, έχει βρεθεί ότι πρόκειται κυρίως για θαλασσινό νερό με μικρότερη συμβολή υπολειμματικού υγρού κλασματικής κρυστάλλωσης και σχετικών με το μάγμα πτητικών (Shanks και Thurston, 2012).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 το νερό που εισέρχεται στο σύστημα κατεβαίνει σε βάθος και θερμαίνεται. Το πλέον υπέρθερμο υγρό αλληλοεπιδρά με τα όξινα πετρώματα μέσα από τα οποία περνάει και αποσπάει μεταλλικά στοιχεία και άλατα (Ohmoto et. al 1983). Το εμπλουτισμένο υδροθερμικό υγρό συγκλίνει στην ζώνη τροφοδοσίας και ανέρχεται μέσω συστήματος φλεβιδίων stockwork αφήνοντας μέρος του πιο δυσκίνητου περιεχόμενου του στα τοιχώματα των φλεβιδίων. Τέλος, το διάλυμα εκβάλλεται από τον πυθμένα της θάλασσας με μεγάλη ταχύτητα μέσω δομών που ονομάζονται ατμίδες. Οι ατμίδες αποτελούνται από σουλφίδια και άλατα (κυρίως του βαρύτη και του θείου) και έχουν το σχήμα καμινάδας με το κέντρο να συνδέεται με το υδροθερμικό δίκτυο.

Βγαίνοντας από τις ατμίδες, το υδροθερμικό υγρό έρχεται σε επαφή με το κρύο θαλασσινό νερό και σταδιακά κρυνώνει. Αυτό προκαλεί την μείωση της μεταφορικής του ικανότητας, με αποτέλεσμα την κλασματική αποβολή με μορφή μαύρων νιφάδων των μεταλλικών στοιχείων που είχε συγκεντρώσει. Τα πιο δυσκίνητα στοιχεία όπως ο χαλκός αποβάλλονται πρώτα με μορφή σουλφιδίων ενώ αργότερα τα ακολουθούν τα λιγότερο δυσκίνητα και ούτω καθεξής μέχρι η σύσταση και η θερμοκρασία του πρώην υδροθερμικού υγρού να ταυτίζεται με αυτήν του θαλασσινού νερού (Janecky και Seyfried 1984). Αυτό το χόνι βυθίζεται και πάλι στον πάτο της θάλασσας και συσσωρεύεται ιζηματογενώς, δημιουργώντας μεγάλους σωρούς σουλφιδίων και αλάτων τριγύρω από την ατμίδα.



Σχήμα 3.5: Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας κοιτάσματος Kuroko. Με μπλε βέλη φαίνεται η πορεία των υδροθερμικών υγρών.

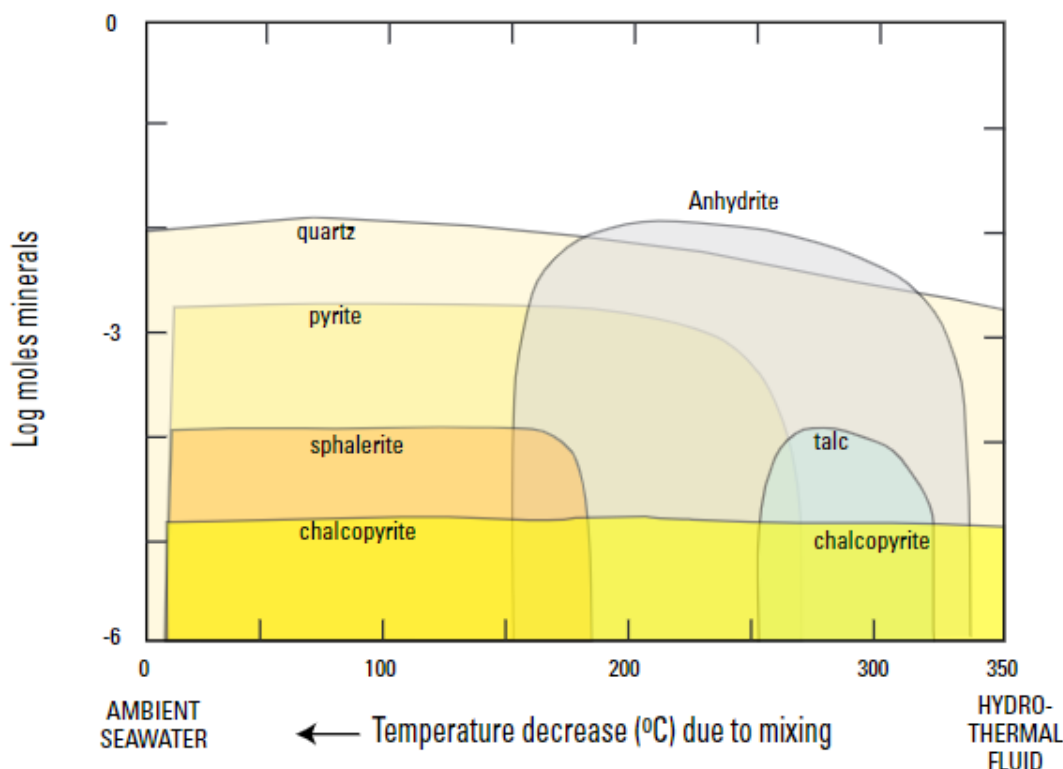
Η δραστηριότητα του υδροθερμικού συστήματος μπορεί να διαρκέσει από 400 μέχρι 200000 χρόνια (Schardt και Large, 2009). Το μέγεθος και η ποιότητα του κοιτάσματος εξαρτώνται από την θερμοκρασία (με τα πιο θερμά υγρά να είναι πιο πλούσια σε στοιχεία όπως χαλκός και σίδηρος), το περιεχόμενο των υδροθερμικών υγρών και την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

Με το τέλος της ηφαιστειακής δραστηριότητας, αυτοί οι σωροί καλύπτονται από λεπτόκοκκα ηφαιστειακά και ιζηματογενή ιζήματα. Τα ιζήματα αυτά προστατεύουν τον σωρό μετάλλων από οξείδωση. Ο σωρός των σουλφιδίων συμπαγοποιείται και, μαζί με την πρωτότερη ζώνη τροφοδοσίας, αποτελούν ένα κοιτάσμα Kuroko. Τέλος, το κοιτάσμα επωθείται τεκτονικά στην στεριά.

3.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΖΩΝΩΣΗΣ

Για την δημιουργία της χαρακτηριστικής ορυκτολογικής ζώνωσης των κοιτασμάτων Kuroko επικρατούν δύο θεωρίες.

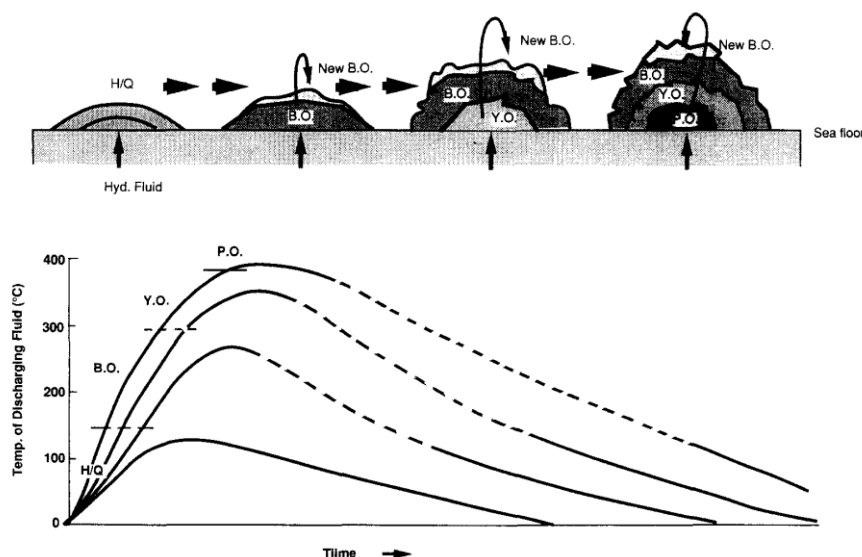
Η πρώτη θεωρία (Sato 1972, Solomon και Walshe 1979) προτείνει ότι πρώτα αποτέθηκαν οι πυριτική και η κίτρινη ζώνη και μετά η μαύρη (Σχ. 3.6). Σύμφωνα με αυτήν την θεωρία τα υδροθερμικά υγρά, κατά την δημιουργία της πυριτικής και της κίτρινης ζώνης, είχαν πολύ υψηλότερη θερμοκρασία κατά την εκβολή τους (περίπου 400 °C) με συνέπεια να έχουν υψηλή μεταφορική ικανότητα. Αυτά τα θερμά υδροθερμικά υγρά μετέφεραν μεγάλες ποσότητες Cu, Fe, Pb και Zn, ωστόσο παρατηρούμε μικρή παρουσία ορυκτών Pb και Zn στις ζώνες κάτω της μαύρης. Αυτό εξηγείται με το γεγονός ότι το υπέρθερμο λοφίο υδροθερμικών υγρών αποβάλλεται ταχέως από τις ατμίδες με αποτέλεσμα, ενώ προλαβαίνουν να κρυσταλλωθούν και να αποτεθούν σουλφίδια των δυσκίνητων στοιχείων που είναι ο Cu και ο Fe, σουλφίδια του Pb και του Zn ανεβαίνουν ψηλά και χάνονται.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα αντιδράσεων που δείχνει την σταθερότητα και κρυσταλλοποίηση διαφόρων ορυκτών με βάση την περιεκτικότητα του υδροθερμικού υγρού σε ορυκτά (κατακόρυφος άξονας) και την θερμοκρασία του υγρού (οριζόντιος άξονας). Τροποποιημένο από Janecky και Seyfried (1984).

Η δεύτερη θεωρία (Eldridge et al. 1983, Pisutha-Arnond και Ohmoto 1983) προτείνει ότι πρώτα κρυσταλλώθηκε και αποτέθηκε η μαύρη ζώνη, ενώ οι υπόλοιπες ζώνες προήλθαν μέσω

μερικής αντικατάστασης (Σχ.3.7). Τα αρχικά υδροθερμικά υγρά είχαν θερμοκρασία μεταξύ 200-300 °C, θερμοκρασία ιδανική για απόθεση σφαλερίτη, γαληνίτη, σιδηροπυρίτη και βαρύτη. Ωστόσο, κατά το θερμικό μέγιστο του κοιτάσματος τα υδροθερμικά υγρά, διαπερνώντας την ζώνη μαύρου μεταλλεύματος, αντικαθιστούν σταδιακά τον σφαλερίτη εντός της μαύρης ζώνης με χαλκοπυρίτη και σιδηροπυρίτη. Έπειτα, με την μείωση και πάλι της θερμοκρασίας, η συνθήκες ευνοούν και πάλι την κρυστάλλωση ορυκτών της μαύρης ζώνης.



Σχήμα 3.7: Μοντέλο (πάνω) δημιουργίας μεταλλοφορίας σύμφωνα με την δεύτερη θεωρία και γράφημα (κάτω) θερμικής ιστορίας του υδροθερμικού υγρού. B.O.= μαύρη ζώνη, Y.O.= κίτρινη ζώνη, P.O.= πυριτική ζώνη, H/Q= κάλυμμα αιματίτη-κερατόλιθου. Από Ohmoto 1996

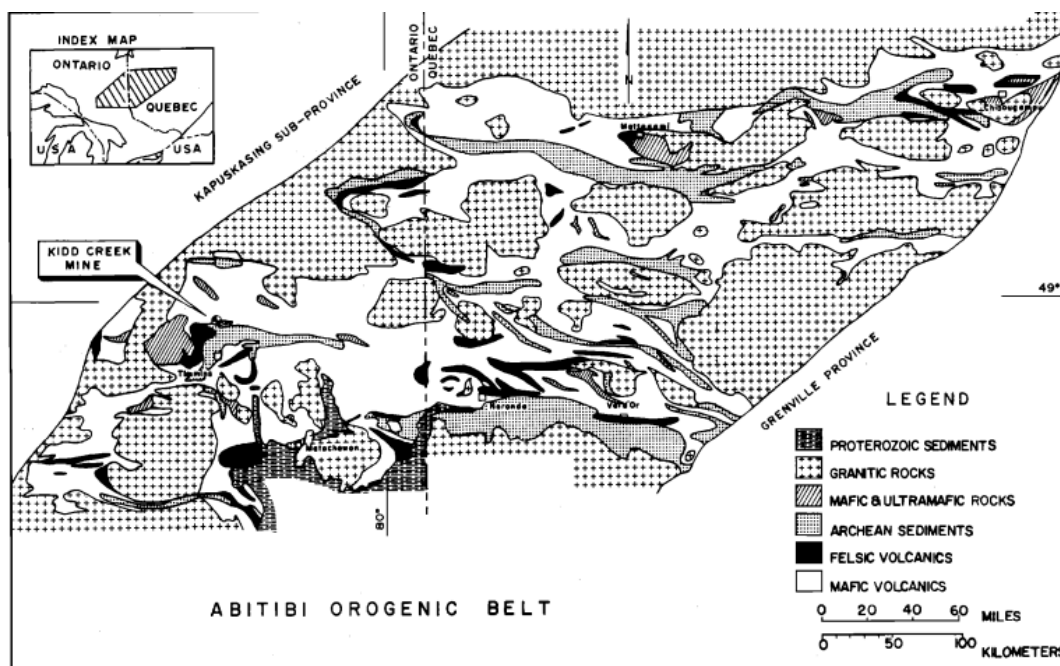
4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

4.1 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

4.1.1 KIDD CREEK

Το κοίτασμα Kidd Creek πρόκειται για ένα γιγάντιο κοίτασμα τύπου Kuuroko στο Οντάριο του Καναδά.

Το κοίτασμα εντοπίζεται εντός της ζώνης Abitibi (Σχ. 4.1), μια από της σημαντικότερες ζώνες πάνω στην Καναδική κρατονική ασπίδα. Η ζώνη αποτελείται από βασικά μέχρι όξινα ηφαιστειακά, κλαστικά και χημικά ιζηματογενή και ποικιλία πλουτωνικών πετρωμάτων με σύσταση από γρανίτη μέχρι περιδοτίτη. Τα ηφαιστειακά και τα ιζηματογενή έχουν παραμορφωθεί μέσω ισοκλινούς πτύχωσης προς την ανατολή (Walker et al. 1975). Επιφανειακά επικρατούν βασικά ηφαιστειακά και ιζηματογενή πετρώματα, με μόνο περίπου 3% της περιοχής να είναι τα πιο οικονομικά σημαντικά όξινα πετρώματα, τα οποία δεν εμφανίζονται μεμονωμένα αλλά σε εστίες.

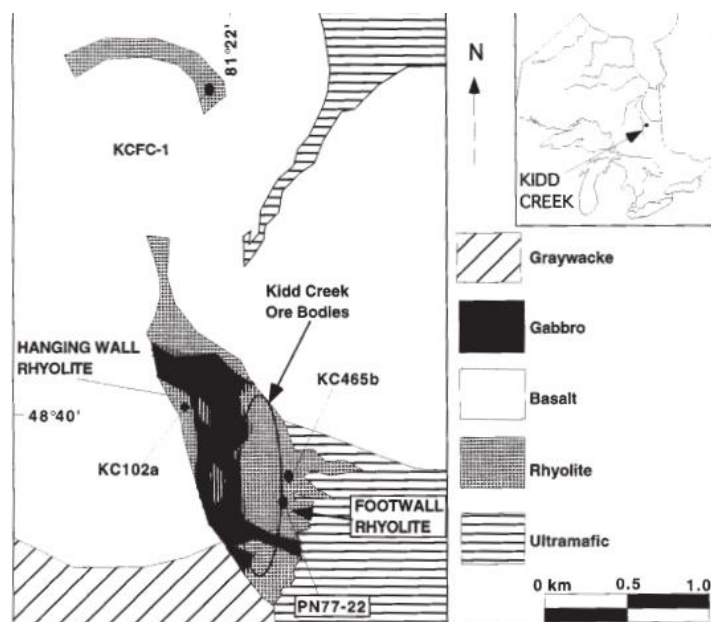


Σχήμα 4.1: Η ορογενετική ζώνη Abitibi. Στα δυτικά φαίνεται η θέση του κοιτάσματος Kidd Creek εντός όξινων ηφαιστειακών. Από Walker et al. (1975).

Το κοίτασμα Kidd Creek βρίσκεται συμφώνως εντός μιας ακολουθίας όξινων και βασικών ηφαιστειακών πετρωμάτων (Σχ. 4.2). Η ακολουθία έχει φορά B-N, έχει ανατραπεί και βυθίζεται με μεγάλη κλίση (70° - 80°). Η βάση της ακολουθίας είναι υπερβασικές ροές λάβας με ελάχιστο πάχος. Τα αμέσως υποκείμενα πετρώματα είναι ρυολιθικός δόμος και

ρυολιθικά λατυποπαγή που δημιουργήθηκαν από υδροθερμική επίδραση. Το κοίτασμα βρίσκεται ανάμεσα σε αυτά τα ρυολιθικά πετρώματα και έναν υπερκείμενο χαλαζιακό-πορφυριτικό ρυολιθικό δομό.

Το κοίτασμα καθαυτό αποτελείται από 3 στρωματογραφικά σύμφωνους φακούς με παράταξη B-N. Συνολικά αποτελείται από 25-30% σιδηροπυρίτη, 15% σφαλερίτη, 5% χαλκοπυρίτη, 0,5% γαληνίτη και >1% μαγνητοπυρίτη. Κάθε φακός διαχωρίζεται σε μία εμπλουτισμένη σε Zn ζώνη συμπαγούς ή ημισυμπαγούς μεταλλεύματος με σφαλερίτη-σιδηροπυρίτη, μια εμπλουτισμένη σε Cu ζώνη συμπαγούς ή ημισυμπαγούς μεταλλεύματος με χαλκοπυρίτη-σφαλερίτη-σιδηροπυρίτη-μαγνητοπυρίτη και μία πλούσια ζώνη φλεβιδίων με μαγνητοπυρίτη και χαλκοπυρίτη. Επιπλέον, κοντά στο κοίτασμα υπάρχουν οικονομικά σημαντικές ποσότητες σουλφιδίων σε θραύσματα εντός λατυποπαγών, αναμειγμένα με θραύσματα ρυόλιθου, κερατόλιθου και άλλων αργιλικών. Ο νότιος φακός έχει επιπλέον μία ζώνη εντός της πλούσια σε χαλκό συμπαγούς μεταλλοφορίας και της ζώνης φλεβιδίων όπου σημαντικές ποσότητες βορνίτη έχουν αντικαταστήσει εν μέρη τον χαλκοπυρίτη (Gibson et al. 2000). Το κοίτασμα έχει βρεθεί, μέσω χρονολόγησης U-Pb εντός ζirkονίων στους υπερκείμενους και υποκείμενους, ότι έχει ηλικία μεταξύ περίπου 2.717 -2.711 Ma, δηλαδή το κοίτασμα σχηματίστηκε σε χρονικό περιθώριο $6,2 \text{ Ma} \pm 2,3 \text{ Ma}$ (Bleeker et al. 1999).

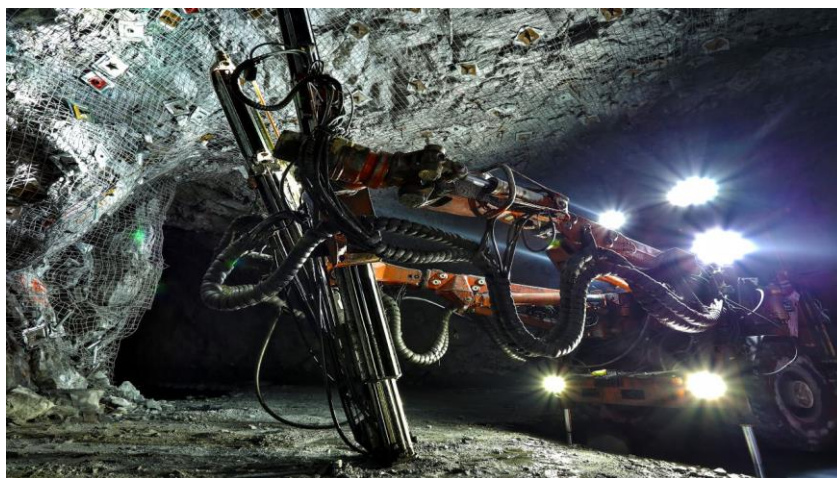


Σχήμα 4.2: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής του κοιτάσματος Kidd Creek, με τους 3 φακούς του κοιτάσματος να βρίσκονται εντός του οβάλ στο κέντρο του σχήματος. Από King et al. (1997).

Ο σχηματισμός του κοιτάσματος έλαβε μέρος σε 3 στάδια. Αρχικά, εντός τεκτονικού βυθίσματος ανάμεσα 2 παράλληλων ρηγμάτων, πάνω σε πεδίο υπερβασικών ηφαιστειακών πετρωμάτων, έλαβε μέρος ηφαιστειακή δραστηριότητα που απόθεσε τον υποκείμενο ρυόλιθο με διαστάσεις 2,5 km σε μήκος, 300 m σε ύψος και 500 m σε πλάτος (Gibson et al. 2000). Έπειτα, λόγω μείωσης της ηφαιστειακής δραστηριότητας, εντός σε αυτόν τον ρυόλιθο σχηματίστηκε υδροθερμικό σύστημα και πάνω του έλαβε μέρος η απόθεση των φακών συμπαγών σουλφιδίων του κοιτάσματος. Τέλος, η ένταση της ηφαιστειακής επέστρεψε κοντά στα πρωτότερα επίπεδα και το κοιτάσμα καλύφθηκε από τον υπερκείμενο βασάλτη, ο οποίος με την σειρά του καλύφθηκε από υπερβασικές ροές λάβας.

Ο υποκείμενος ρυόλιθος, εντός του οποίου εντοπίζεται η ζώνη stockwork φλεβιδίων, το κοιτάσμα και ο υπερκείμενος ρυόλιθος έχουν όλοι υποστεί σε κάποιον βαθμό υδροθερμική αλλοίωση. Σύμφωνα με Koorman et al. (1999) διακρίνονται 4 χαρακτηριστικές ζώνες αλλοίωσης: 1) ζώνη πυριτίωσης, η οποία είναι εξαιρετικά διαδεδομένη στα υποκείμενα και υπερκείμενα πετρώματα, 2) ζώνη χλωρίτη, κοντά στα φλεβίδια της ζώνης τροφοδοσίας, 3) ζώνη σερίκίτη, διαδεδομένη κυρίως στον υποκείμενο ρυόλιθο και 4) ζώνη τάλκη-ανθρακικών στα όρια της επίδραση των υδροθερμικών διαλυμάτων.

Το κοιτάσμα ανακαλύφθηκε το 1963 και από το 1966 έχει υποστεί συνεχής εκμετάλλευση από σειρά εταιριών. Το κοιτάσμα έχει επιβεβαιωμένα αποθέματα μεταλλοφορίας 149 Mt εκ των οποίων οι 12,6 Mt είναι διάφορα μέταλλα. Συγκεκριμένα το 2020 το κοιτάσμα παρήγαγε 62.500 t Zn, 34.000 t Cu και 2.125.000 oz Ag. Αρχικά, η εκμετάλλευση γινόταν με μορφή open-pit ωστόσο, λόγω της απότομης κλίσης του κοιτάσματος, συνεχίζεται υπογείως (Σχ. 4.3) σε βάθος μέχρι περίπου 3000 m, κάνοντας το Kidd Creek Mine το πιο βαθύ μεταλλωρυχείο βασικών μετάλλων στον κόσμο.



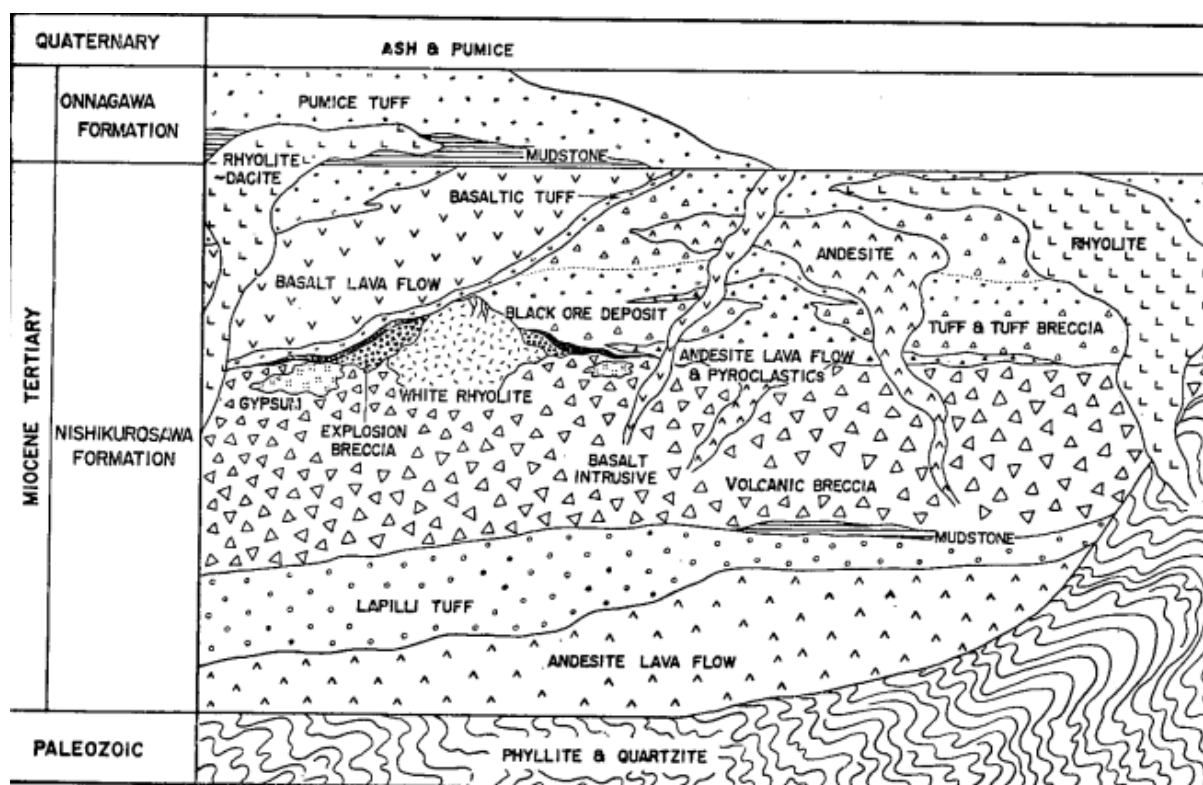
Σχήμα 4.3: Φωτογραφία υπόγειας στοάς στο μεταλλωρυχείο Kidd Creek. Από https://www.mining-technology.com/projects/kidd_creek/ (18/9/2021)

4.1.2 FUROTOBE-AINAI

Το σύστημα 9 κοιτασμάτων τύπου Kuroko, Furotobe-Ainai, αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας κοιτασμάτων.

Τα εξαντλημένα, πλέον, κοιτάσματα εντοπιζόταν κεντρικό νησί Honshu της Ιαπωνίας. Πιο συγκεκριμένα, τα κοιτάσματα είναι κομμάτι της Green Tuff Zone, που πήρε το όνομα της από τους χαρακτηριστικούς πράσινους τόφφους που επικρατούν στην περιοχή. Επιπλέον βρισκόταν εντός του ΒΑ κομματιού της λεκάνης Hokuroko, περιοχής με έντονη παρουσία κοιτασμάτων Kuroko. Όλα τα κοιτάσματα εντοπίζονται εντός περιοχής 0,19 km².

Η ακολουθία που φιλοξενεί τα κοιτάσματα (Σχ. 4.4) πρόκειται για μια σειρά ρυολιθικών και δακιτικών πετρωμάτων με ΒΔ-ΝΑ παράταξη. Η βάση της ακολουθίας είναι φυλλίτης και χαλαζίτης ενώ τα υποκείμενα του κοιτάσματος πετρώματα πρόκειται για πυροκλαστικά, τόφφους, δόμους λάβας και breccia, ρυολιθικής σύστασης. Τα υπερκείμενα πετρώματα αποτελούνται κυρίως από τόφφους με βασαλτική έως ρυολιθική σύσταση που συχνά διακόπτονται από βασαλτικές ροές και δακιτικά πατάρια (Ishii, 1964).

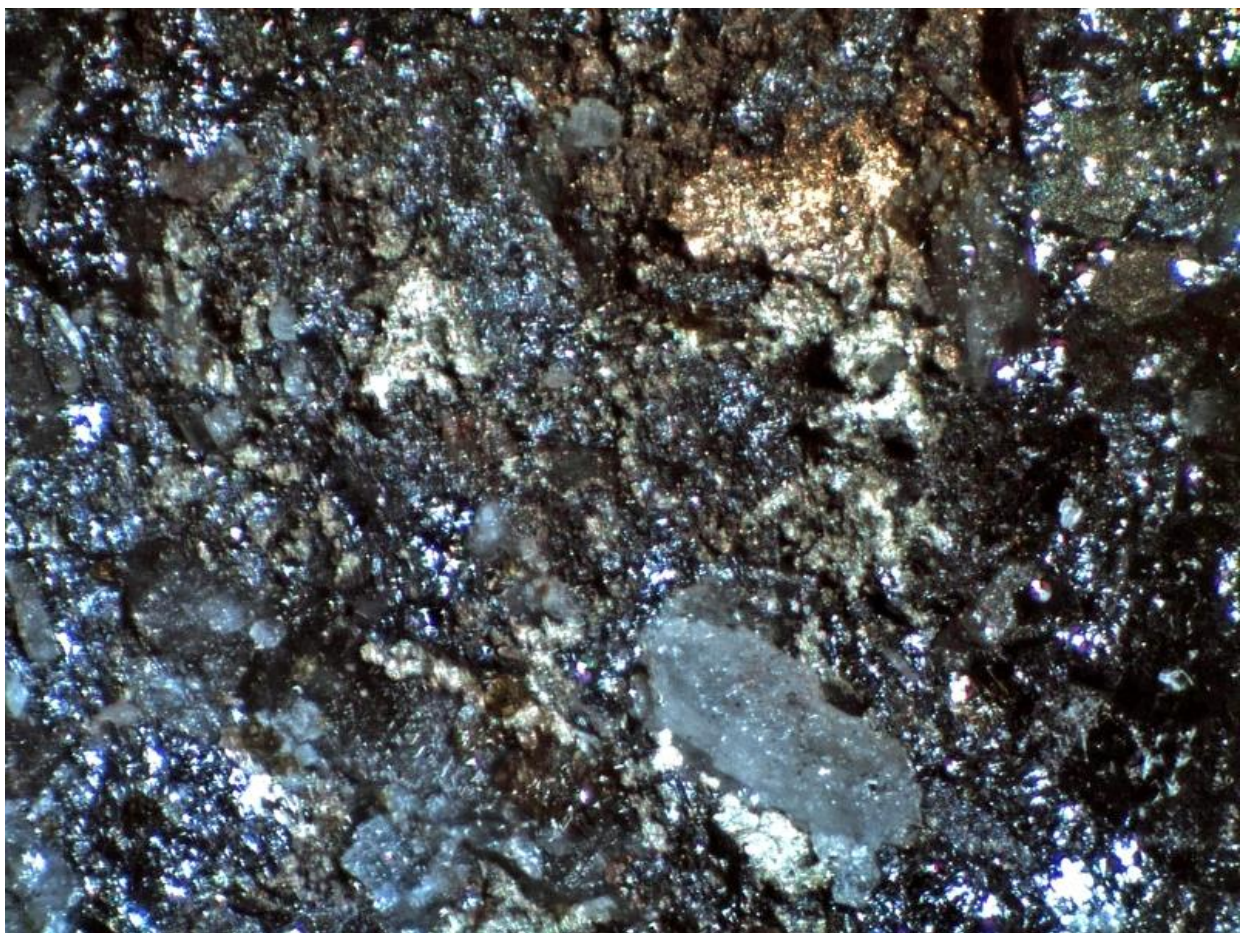


Σχήμα 4.4: Στρωματογραφική στήλη της περιοχής Ainaï. Από Ishikawa και Yanagizawa, 1971

Τα κοιτάσματα της περιοχής, γενικά, αποτελούνται από τα δύο τυπικά μέλη, την συμπαγή μεταλλοφορία και την ζώνη φλεβιδίων stockwork ωστόσο, σε κάποια κοιτάσματα, απουσιάζει η ζώνη υδροθερμικής αλλοίωσης ή ο φακός συμπαγών σουλφιδίων. Μορφολογικά, πολλά από

τα κοιτάσματα δεν έχουν την τυπική μορφή φακού, αλλά είναι πεπλατυσμένα ή έχουν σχήμα αυγού. Χαρακτηρίζονται από την τυπική ορυκτολογική ζώνωση με 7 ζώνες που παρουσιάζουν τα κοιτάσματα τύπου Kuroko (Κεφάλαιο 2.3). Ωστόσο, όπως και το κοιτάσμα Kidd Creek, συχνά εμφανίζεται και μια ζώνη βορνίτη (Σχ. 4.5) που φαίνεται να έχει αντικαταστήσει τον χαλκοπυρίτη του κοιτάσματος. Σχηματίστηκαν σε γεωτεκτονικό περιβάλλον νησιωτικού τόξου πάνω σε ηπειρωτικό περιθώριο, όπως και τα υπόλοιπα κοιτάσματα Kuroko της Ιαπωνίας, πιθανώς σχηματίστηκαν εντός καλντέρας ή κρατήρα. Τα κοιτάσματα έχουν ηλικία 15 Ma, τοποθετώντας τα χρονολογικά στο Μειόκαινο (Tanaka et al. 1974).

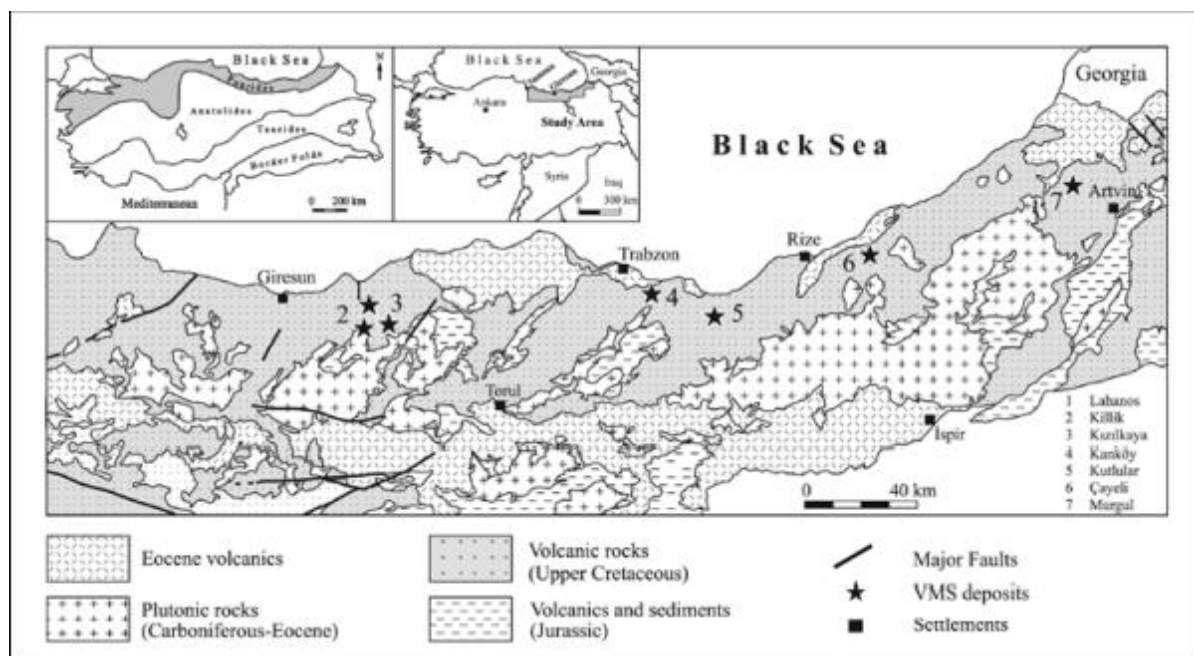
Τα περισσότερα μεταλλοφόρα σώματα της περιοχής ανακαλύφθηκαν τον 19^ο αιώνα, ωστόσο δεν υπήρξε σημαντική μεταλλευτική δραστηριότητα μέχρι το 1951 ενώ το τελευταίο κοιτάσμα εξαντλήθηκε το 1985. Η εξόρυξη γινόταν κατά κύριο λόγο υπογείως. Συνολικά υπήρξε εξόρυξη πάνω από 2 Mt μετάλλων με 1,58% Cu, 1,58% Pb, 4,03% Zn, 76g/t Ag, 1,6 g/t Au και 10,4% S από σιδηροπυρίτη.



Σχήμα 4.5: Μετάλλευμα βορνίτη-ορυκτών ασημιού από το μεταλλωρυχείο Furotobe. Από <https://www.mindat.org/gl/4364> (18/09/2021)

Το κοίτασμα Lahanos είναι ένα από τα πολλά κοιτάσματα τύπου Kuroko στην ΒΑ Τουρκία.

Εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα της τεκτονικής ζώνης των Ποντίδων (Σχ. 4.6). Η ζώνη έχει περάσει 3 περιόδους εκτεταμένης ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η πρώτη έλαβε χώρα στο Άνω με Μέσο Ιουρασικό λόγω έντονης ρηγμάτωσης με μαγματισμό θολειτικού χαρακτήρα. Η δεύτερη περίοδος, στο Άνω Κρητιδικό, πραγματοποιήθηκε σε υποθαλάσσιο περιβάλλον νησιωτικού τόξου με μαγματισμό υπαλκαλικού χαρακτήρα. Εντός αυτής της περιόδου σχηματίστηκε το κοίτασμα. Τέλος, κατά τα Μέσο Ηώκαινο, υπήρξε δραστηριότητα λόγω τοπικού εφελκυσμού, με ασβεσταλκαλικό μαγματισμό.

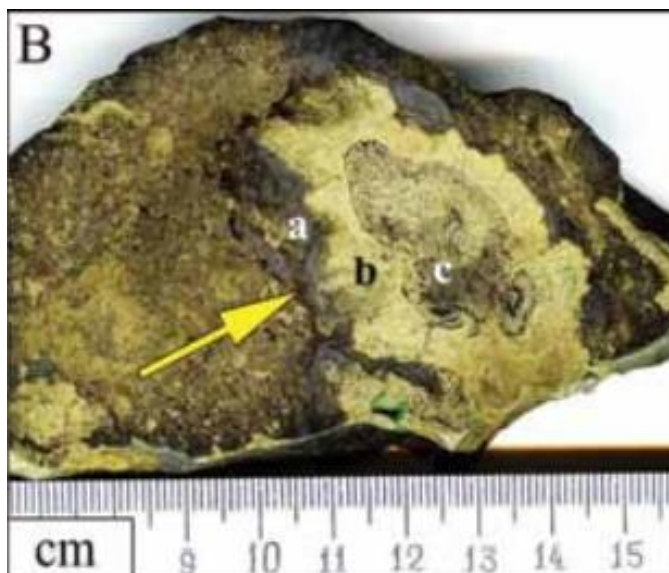


Σχήμα 4.6: Γεωλογικός χάρτης του ανατολικού τμήματος της τεκτονικής ζώνης των Ποντίδων. Στο νούμερο 3 βρίσκεται το κοίτασμα Lahanos. Από Revan et al. 2013.

Τα πετρώματα της περιοχής στην οποία εντοπίζεται το κοίτασμα πρόκειται για μικτά όξινα και βασικά ηφαιστειακά πετρώματα. Ο σχηματισμός βάσης της περιοχής αποτελείται από μεταμορφωμένα και πλουτωνικά πυριγενή πετρώματα. Τοποθετημένη πάνω στην βάση υπάρχει ακολουθία βασικών έως υπερβασικών ηφαιστειακών όπως βασαλτικές ροές λάβας, ανδεσίτης και διαβάσης, που σχηματίστηκαν την πρώτη περίοδο ηφαιστειακής δραστηριότητας κατά το Ανώτερο Ιουρασικό. Ασυμφώνως πάνω σε αυτή την ακολουθία έχει τοποθετηθεί σύμπλεγμα έντονα αλλοιωμένων όξινων ηφαιστειακών (δακτινοί τόφοι και

λάβρα) και, τοπικά, ιζηματογενών πετρωμάτων του Ύστατου Κρητιδικού (Çiftçi και Hagni, 2005). Εντός αυτών των πετρωμάτων εντοπίζεται το κοίτασμα.

Το κοίτασμα Lahanos αποτελείται από δύο φακούς συμπαγών σουλφιδίων και έχει μήκος 600 m και μέγιστο πάχος 30 m. Παρουσιάζει τυπική μορφολογία κοιτάσματος Kuroko, με φακούς συμπαγών σουλφιδίων πάνω από υδροθερμικά εξαλλοιωμένα, στείρα ζώνη φλεβιδίων. Ωστόσο, παρά την ύπαρξη ζώνης πυρίτη και ζώνης κίτρινου μεταλλεύματος, στο κοίτασμα υπάρχει πλήρης απουσία της ζώνης μαύρου μεταλλεύματος. Αντιθέτως, πάνω από την ζώνη κίτρινου μεταλλεύματος, υπάρχει ύπαρξη ημι-μαύρης ζώνης (Σχ. 4.7) με σύσταση χαλκοπυρίτη-σφαλερίτη με μικρότερη παρουσία τετραεδρίτη, γαληνίτη και σιδηροπυρίτη. Καλύπτοντας όλο το κοίτασμα, υπάρχει ζώνη κόκκινου κερατόλιθου η οποία είναι εμπλουτισμένη σε σουλφίδια από τις παρακάτω ζώνες (Revan et al. 2013).



Σχήμα 4.7: Θραύσμα ατμίδας εντός του κοιτάσματος. Παρατηρείται έντονη ορυκτολογική ζώνωση, αντίστοιχη με αυτή του κοιτάσματος με a: σουλφίδια Zn, Cu και Fe (σύσταση αντίστοιχη της ημι-μαύρης ζώνης), b: ζώνη πλούσια σε άλατα και Cu και c: άλατα του βαρίου και σιδηροπυρίτης. Από Revan et al. 2013.

Τα υποκείμενα πετρώματα έχουν υποστεί έντονη υδροθερμική εξαλλοίωση. Παρατηρούνται τέσσερις ορυκτολογικές ζώνες αλλοίωσης. Στο κέντρο της ζώνης τροφοδοσίας επικρατεί σερικίτης, κοντά στην πυριτική ζώνη επικρατεί Fe χλωρίτης, έπειτα μοντομοριλλονίτης και τέλος, σε απόσταση, καολινίτης.

Το κοίτασμα έχει υποστεί αποσπασματική εκμετάλλευση από το 1992 λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε Cu και Zn. Το κοίτασμα περιέχει 2,3 Mt μεταλλεύματος υψηλής ποιότητας με 3.6% Cu and 2.4% Zn με το κοίτασμα παράγει 15 Kt συμπυκνώματος Cu ετησίως. Η εκμετάλλευση λαμβάνει χώρα υπογείως.

4.2 ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

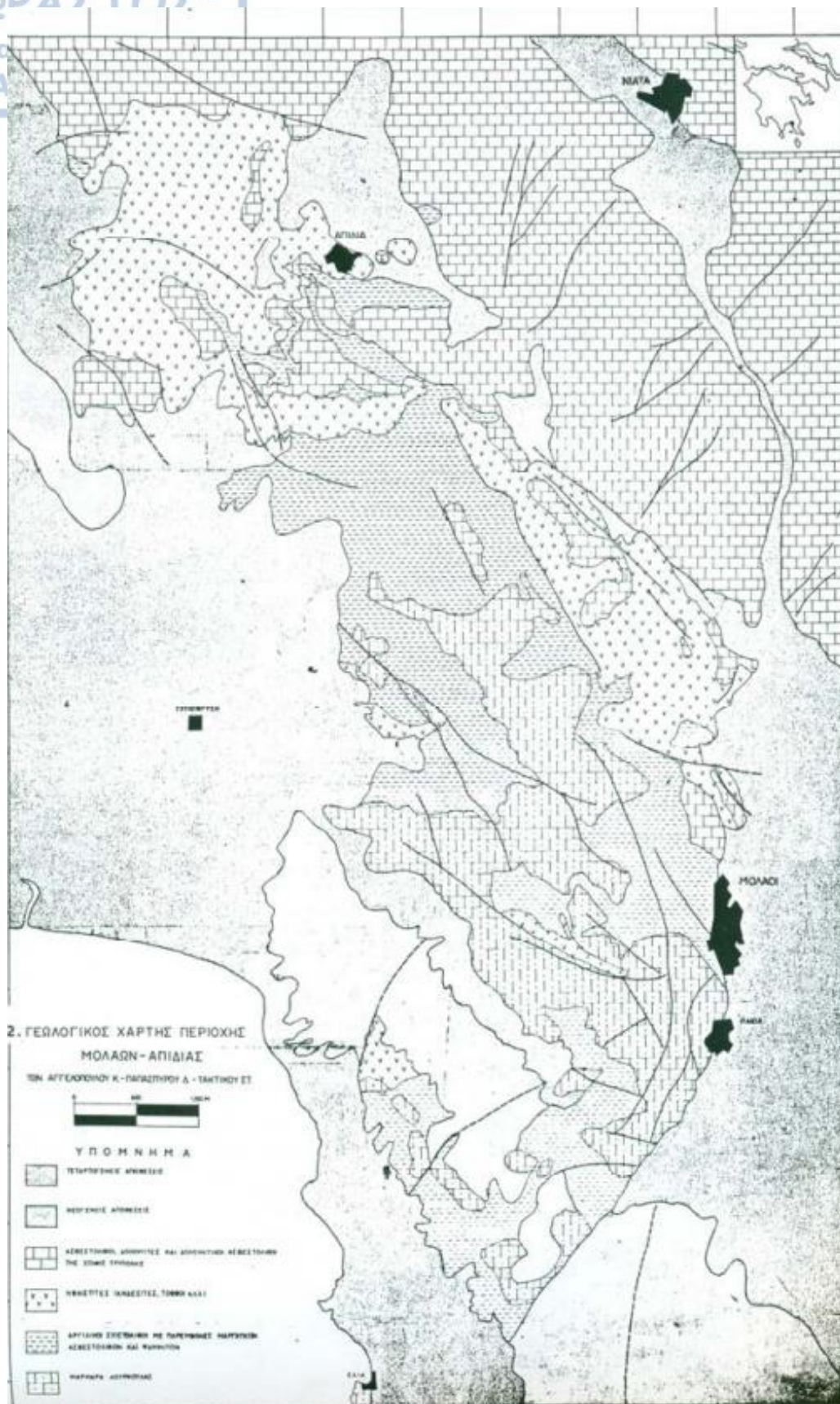
Το κοίτασμα Μολάους της νότιας Λακωνίας αποτελεί σημαντικό κοίτασμα Kuroko στον ελληνικό χώρο.

Το κοίτασμα εντοπίζεται εντός των στρωμάτων Τυρού, μία ενότητα που θεωρείται υπόβαθρο της σειράς Τρίπολης (Σχ. 4.8). Τα στρώματα Τυρού αποτελείται από κλαστικά ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα (μεταψαμμίτες, φυλλίτες, κροκαλοπαγή κ.ά.) του Ύστατου Παλαιοζωικού και από ηφαιστειοιζηματογενή σειρά βασικού χαρακτήρα. Το κοίτασμα φιλοξενείται εντός αυτής της σειράς και πιο συγκεκριμένα εντός ανδεσιτικών πυροκλαστικών πετρωμάτων. Η γένεση του κοιτάσματος έλαβε μέρος σε γεωτεκτονικό περιβάλλον συγκλινόντων ηπειρωτικών περιθωρίων, σε ζώνη καταβύθισης.

Η μορφολογία και ζώνωση των μεταλλοφόρων σωμάτων είναι τυπική. Χαρακτηριστική είναι η μειωμένη περιεκτικότητα σε Cu και ο εμπλουτισμός του κοιτάσματος σε Zn, γεγονός που ορυκτολογικά καταστεί τον σφαλερίτη σαν το κύριο ορυκτό του κοιτάσματος.

Το κοίτασμα, όπως και τα στρώματα Τυρού γενικά, έχει υποστεί ελαφριά μεταμόρφωση. Η μεταμόρφωση χαρακτηρίζεται από σερικιτίωση, πυριτίωση και ασβεστίωση/δολομιτίωση. Έλαβε μέρος κατά το Ολιγόκαινο-Μειόκαινο και είχε ως αποτέλεσμα την επικάλυψη της ζωνώδους μορφής της πρωτύτερης υδροθερμικής εξαλλοίωσης στα υποκείμενα του κοιτάσματος πετρώματα.

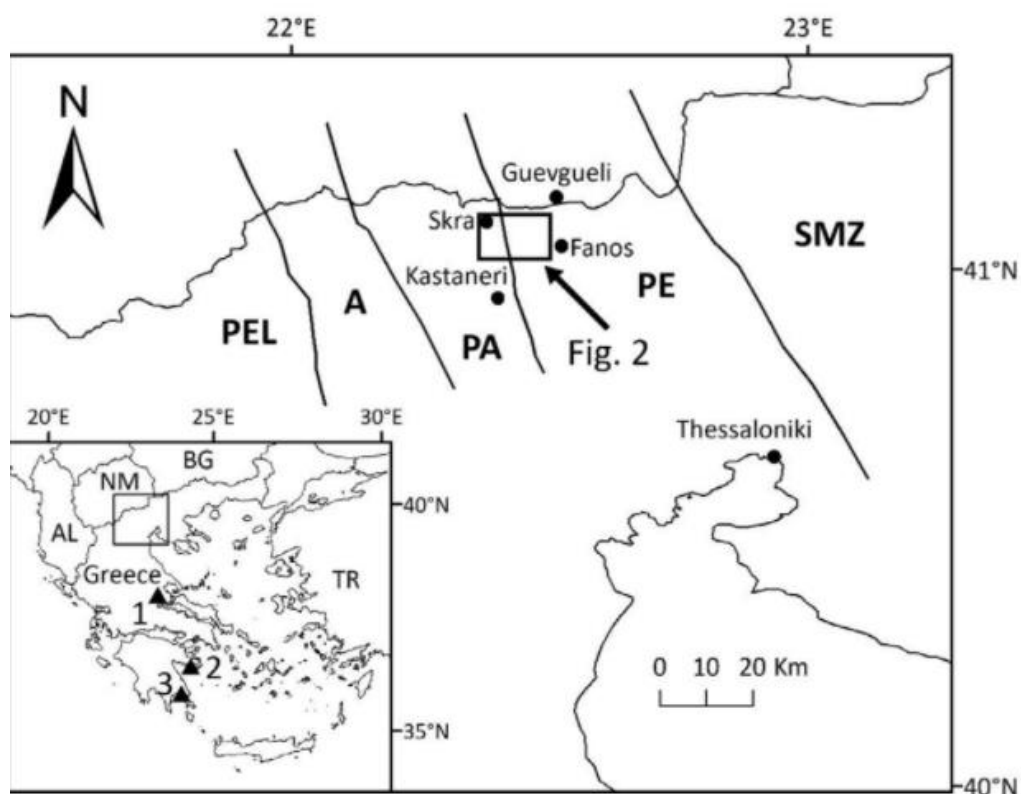
Το κοίτασμα δεν έχει υποστεί σημαντική εκμετάλλευση στο παρελθόν καθώς δεν θεωρούνταν οικονομικά εκμεταλλεύσιμο. Έχει υπολογιστεί ότι περιέχει 2,6 Mt μεταλλεύματος με περιεκτικότητα 6,9% Zn, 1,7% Pb, 39,6 g/t Ag και 400 g/t Cd, ενώ είναι πιθανή η παρουσία σπάνιων μετάλλων όπως το Ίνδιο και το Γερμάνιο (ΥΠΕΝ, 2021).



Σχήμα 4.8: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής των Μολάων. Σημειωμένες με μαύρο είναι οι τοποθεσίες των μεταλλοφόρων σωμάτων. Από https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/04/9-DMX-MOLAON-FINAL_24-5-11.pdf (18/9/2021)

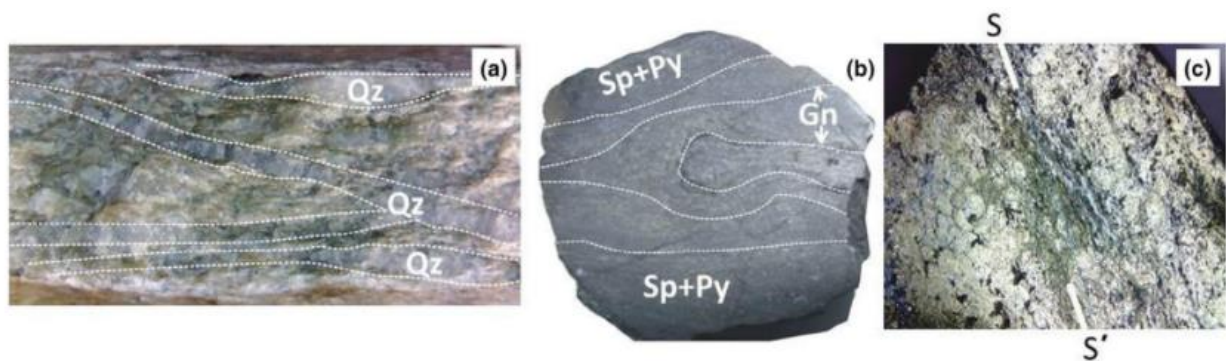
Το κοίτασμα τύπου Κυροκο κοντά στη λίμνη Σκρα της κεντρικής Μακεδονίας εντοπίζεται εντός της τεκτονικής ζώνης Αξιού και πιο συγκεκριμένα στην υποζώνη Πάικου (Σχ.4.9).

Η υποζώνη Πάικου πρόκειται για υπόλειμμα νησιωτικού τόξου που σχηματίστηκε σε αρχαίο ωκεανό (του οποίου υπολείμματα αποτελούν οι υποζώνες Αλμωπίας στα Δ και Παιονίας στα Α) , μεταξύ των τότε ηπείρων της Σερβομακεδονικής μάζας στα ΒΑ και της Πελαγονικής ζώνης στα ΝΔ. Η υποζώνη έχει ως πετρώματα βάσης μεταμορφωμένα σχιστολιθικά πετρώματα και μάρμαρα ενώ τοποθετημένα πάνω βρίσκονται μεταμορφωμένα βασικά έως όξινα ηφαιστειακά και ιζηματογενή πετρώματα του Κάτω με Μέσου Ιουρασικού. Το κοίτασμα εντοπίζεται με απότομη κλίση (60° - 80°) προς τα ανατολικά, εντός της σειράς Καστανερής, μια σειράς μεταμορφωμένων όξινων ηφαιστειακών, ηφαιστειοκλαστικών και ιζηματογενών πετρωμάτων του Άνω Ιουρασικού. Τα πετρώματα αυτά έχουν υποστεί έντονη τεκτονική παραμόρφωσης και, ως αποτέλεσμα, βρίσκονται συχνά μυλωνιτιομένα (Skarpelis 2020).



Σχήμα 4.9: Χάρτης τεκτονικών ζωνών του Ελλαδικού χώρου. SMZ: Σερβομακεδονική Μάζα, PE: υποζώνη Παιονίας, PA: υποζώνη Πάικου, A: υποζώνη Αλμωπίας, PEL: Πελαγονική ζώνη. Από Skarpelis 2020.

Τα συμπαγή σουλφίδια του κοιτάσματος έχουν μορφή επιμηκυμένων, στρωματόμορφων διακοπτόμενων φακών με πάχος 30-40 cm, στρωματογραφικά σύμφωνων με τα μεταμορφωμένα όξινα ηφαιστειακά στα οποία φιλοξενούνται. Στρωματογραφικά από κάτω βρίσκονται μεταλλοφόρα φλεβίδια τύπου stockwork. Το κοιτάσμα συμπαγών σουλφιδίων είναι ιδιαίτερα πλούσιο σε Zn και Pb και φτωχό σε Cu. Ορυκτολογικά (Σχ. 4.10), παρατηρείται κυρίως η ζώνη μαύρου μεταλλεύματος, με σπανιότερη την παρουσία ημι-μαύρου μεταλλεύματος. Σημαντική παρουσία ορυκτών του χαλκού έχουμε κυρίως εντός υποκείμενων φλεβιδίων. Κύρια ορυκτά αποτελούν ο σφαλερίτης, ο γαληνίτης και ο σιδηροπυρίτης με μικρότερη συμμετοχή χαλκοπυρίτη, βορνίτη, αρσеноπυρίτη και μαρκασίτη. Δεν διακρίνεται συγκεκριμένη υδροθερμική αλλοίωση καθώς πιθανώς η αλλοίωση καλύφθηκε από μετέπειτα μεταμορφωτικά επεισόδια.



Σχήμα 4.10: Υποδείγματα μεταλλοφόρων πετρωμάτων του κοιτάσματος. a: φλεβίδια χαλαζία εντός μετα-ρυόλιθου, b: πτυχωμένο μαύρο μέταλλευμα με στρωματόμορφες ζώνες γαληνίτη και σιδηροπυρίτη-σφαλερίτη, c: κατακερματισμένο, συμπαγές μέταλλευμα πλούσιο σε σιδηροπυρίτη. Από Skarpelis 2020.

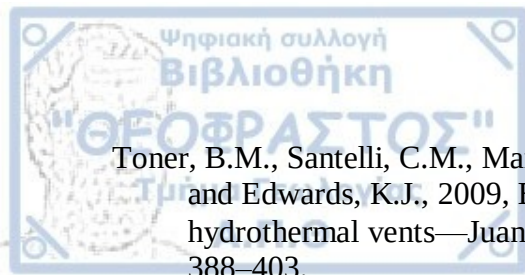
Το κοιτάσμα δεν έχει μέχρι στιγμής υποστεί οικονομική εκμετάλλευση. Έχει επιβεβαιωμένα αποθέματα 3,25 Mt με 3,85% Zn, 3,03% Pb, 0,32% Cu και 15 g/t Ag (Drougas et al. 1981).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barrie, C.T., and Hannington, M.D., 1999, Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host-rock composition, in Barrie, C.T., and Hannington, M.D., eds., Volcanic-associated massive sulfide deposits—Processes and examples in modern and ancient settings: Reviews in Economic Geology, v. 8, p. 1–11.
- Busby, C.J., Kessel, L., Schulz, K.J., Foose, M.P., and Slack, J.F., 2003, Volcanic setting of the Ordovician Bald Mountain massive sulfide deposit, northern Maine, in Goodfellow, W.D., McCutcheon, S.R., and Peter, J.M., eds., Massive sulfide deposits of the Bathurst mining camp, New Brunswick, and northern Maine: Economic Geology Monograph 11, p. 219–244.
- C.D. Taylor, R.A. Zierenberg, R.J. Goldfarb, J.E. Kilburn, R.R. Seal II, M.D. Kleinkopf Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits (Models 24a-b, 28a; Singer 1986a, b; Cox, 1986) Preliminary Compilation of Descriptive Geoenvironmental Mineral Deposit Models. U.S Geological Survey Open-File Report 90-831 (1995), pp. 137-144
- D.P. Cox, D.A. Singer, P.B. Barton Jr. Mineral deposit models D.P. Cox, D.A. Singer (Eds.), Mineral Deposit Models: U.S. Geological Survey Bulletin 1693 (1986), pp. 1-10
- de Roo, J.A., and van Staal, C.R., 2003, Sulfide remobilization and sulfide breccias in the Heath Steele and Brunswick deposits, Bathurst mining camp, New Brunswick, in Goodfellow, W.D., McCutcheon, S.R., and Peter, J.M., eds., Massive sulfide deposits of the Bathurst mining camp, New Brunswick, and northern Maine: Economic Geology Monograph 11, p. 479–496.
- E. Abdioğlu, M. Arslan, S. Kadir, İ. Temizel Alteration mineralogy, lithochemistry and stable isotope geochemistry of the Murgul (Artvin, NE Turkey) volcanic hosted massive sulfide deposit: implications for the alteration age and ore forming fluids Ore Geology Reviews, 66 (2015), pp. 219-242
- E. Çiftçi, R.D. Hagni Mineralogy of the Lahanos deposit a Kuroko-type volcanogenic massive sulfide deposit from the eastern Pontides (Giresun, NE Turkey) Geol. Bull. Turk., 48 (1) (2005), pp. 55-64
- Eldridge, C.S., Barton, P.B., Jr. and Ohmoto, H., 1983. Mineral textures and their bearing on formation of the Kuroko orebodies. Econ. Geol., Monogr. 5: 241-281.
- Ford, K., Keating, P., and Thomas, M.D., 2007, Overview of geophysical signatures associated with Canadian ore deposits, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral deposits of Canada—A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, p. 939–970.
- Franklin, J. M., Lydon, J. W., Sangster, D. F., Volcanic-associated massive sulfide deposits, Economic Geology 75th Anniversary Volume, 1981, 485—627.
- Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R., and Galley, A.G., 2005, Volcanogenic Massive Sulfide Deposits, in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., Economic Geology 100th Anniversary Volume: The Economic Geology Publishing Company, p. 523-560.
- Galley AG, Hannington M, and Jonasson I (2007) Volcanogenic massive sulphide deposits. In: Goodfellow WD (ed.) Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods, Special Publication, vol. 5, pp. 141–161. Quebec, QC: Mineral Deposits Division, Geological Association of Canada

- Glasby, G.P., Iizasa, K., Hannington, M., Kubota, H., and Notsu, K., 2008, Mineralogy and composition of Kuroko deposits from northeastern Honshu and their possible modern analogues from the Izu-Ogasawara (Bonin) Arc south of Japan—Implications for mode of formation: *Ore Geology Reviews*, v. 34, no. 4, p. 547–560.
- Grant, F.S., and West, G.F., 1965, *Interpretation theory in applied geophysics*: New York, McGraw-Hill Books Company, 584 p
- Guber, A.L. and Merrill, S.M., III, 1983. Paleobathymetric significance of the foraminifera from the Hokuroku district. *Econ. Geol., Monogr.* 5: 55-70.
- Hannington, M.D., Barrie, C.T., and Bleeker, W., 1999, The giant Kidd Creek volcanogenic massive sulfide deposit, western Abitibi Subprovince, Canada—Summary and synthesis, in Hannington, M.D., and Barrie, C.T., eds., *The Giant Kidd Creek volcanogenic massive sulfide deposit, western Abitibi subprovince, Canada: Economic Geology Monograph* 10, p. 661–672
- Hodgson, C. J., Lydon, J. W., The geological setting of volcanogenic massive sulfide deposits and active hydrothermal systems: Some implications for exploration, *Canadian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin*
- Huston, D.L., Taylor, B.E., Bleeker, W., Stewart, B., Cook, R., and Koopman, E.R., 1995, Isotope mapping around the Kidd Creek deposit, Ontario—Application to exploration and comparison with other geochemical indicators: *Exploration and Mining Geology*, v. 4, p. 175–185.
- Hutchinson, R.W., 1973. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Econ. Geol.*, 68: 1223-1246.
- Inoue A, Utada M (1991) Hydrothermal alteration in the Kamikita Kuroko mineralization area, northern Honshu, Japan. *Mining Geol Jpn* 41: 203–218
- Izawa E, Yoshida T, Saito R (1978) Geochemical characteristics of hydrothermal alteration around the Fukazawa Kuroko deposit, Akita, Japan *Min Geol J* 28:325–336
- Janecky, D.R., and Seyfried, W.E., Jr., 1984, Formation of massive sulfide deposits on oceanic ridge crests—Incremental reaction models for mixing between hydrothermal solutions and seawater: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, p. 2723–2738.
- K.C. Misra *Sediment-hosted massive zinc-lead sulfide (SMS) deposits Understanding Mineral Deposits*, Springer, Dordrecht (2000)
- Kalogeropoulou S (1985) Discriminant analysis for evaluating the use of lithogeochemistry along the Tetsusekiei Horizon as an exploration tool in search for Kuroko type ore deposits. *Min Deposita* 20:135–142
- King EM, Barrie CT, Valley JW (1997) Hydrothermal alteration of oxygen isotope ratios in quartz phenocrysts, Kidd Creek Mine, Ontario: magmatic values are preserved in zircon. *Geology* 25:1079–1082
- Koski, R.A., German, C.R., and Hein, J.R., 2003, Fate of hydrothermal products from mid-ocean ridge hydrothermal systems—Near-field to global perspectives, in Halbach, P.E., Tunnicliffe, V., and Hein, J.R., eds., *Energy and mass transfer in marine hydrothermal systems*: Berlin, Dahlem University Press, p. 317–335.
- Large, R.R., 1992, Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Features, styles, and genetic models: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 87, p. 471–510.
- Lydon, J. W., Volcanogenic massive sulfide deposits: part 2, genetic models, *Geoscience Canada*, 1988, 15: 43.
- McGloin, M.V., 2017. The significance of metaexhalites, seafloor alteration and retrograde processes for metamorphosed mineral deposits: examples of distinct alteration styles from the Aileron Province. *Northern Territory Geol. Surv. Ann. Geosc. Expl. Sem. (AGES)*, Darwin, March 28-29, 2017 Proc., 42-50.

- Milkereit, B., Eaton, D., Wu, J., Perron, G., Salisbury, M., Berr, E., and Morrison, G., 1996, Seismic imaging of massive sulfide deposits—Part II. Reflection seismic profiling: *Economic Geology*, v. 91, p. 829–834.
- Mosier, D.L., Singer, D.A. and Salem, B.B., 1983. Geologic and grade-tonnage information on volcanic-hosted copper-zinc-lead massive sulfide deposits. USGS Open File Rep., 83-89, 77 pp.
- Ohashi, R., 1919. On the origin of the Kuroko of the Kosaka mine. *Geol. Soc. Tokyo J.*, 26:107-132 (in Japanese).
- Ohmoto H. Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: The Kuroko perspective *Ore Geol. Rev.* 1996, 10, 135-177.
- Ohmoto, H. and Takahashi, T., 1983. Geologic setting of the Kuroko Deposits, Japan. Part III. Submarine calderas and Kuroko genesis. *Econ. Geol., Monogr.* 5: 39-54.
- Ohmoto, H., 2003, Nonredox transformations of magnetite-hematite in hydrothermal systems: *Economic Geology*, v. 98, p. 157–161.
- Ohmoto, H., Mizukami, M., Drummond, S.E., Eldridge, C.S., Pisutha-Arnond, V. and Lenagh, T.C., 1983. Chemical processes of Kuroko formation. *Econ. Geol., Monogr.* 5: 570-604.
- Pisutha-Arnond, V. and Ohmoto, H., 1983. Thermal history, and chemical and isotopic compositions of the ore-forming fluids responsible to the Kuroko massive sulfide deposits in the Hokuroku district of Japan. *Econ. Geol., Monogr.* 5: 523-558.
- Poulsen, H., and Hannington, M., 1995, Auriferous volcanogenic sulfide deposits, in Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., and Thorpe, R.I., eds., *Geology of Canadian mineral deposit types: Geological Survey of Canada, Geology of Canada no. 8; Geological Society of America, Decade of North American Geology v. P1*, p. 183–196
- REVAN, M. K., GENÇ, Y., MASLENNIKOV, V. V., ÜNLÜ, T., DELİBAŞ, O., & HAMZAÇEBİ, S. (2013). Bulletin of the Mineral Research and Exploration. Bulletin of MTA, 147, 73-89.
- Sato T. Kuroko deposits: their geology, geochemistry and origin *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 7 (1977), pp. 153-161
- Sato, T. 1972. Behaviors of ore-forming solutions in seawater. *Min. Geol.*, 22: 31-42.
- Schardt, C., and Large, R.R., 2009, New insights into the genesis of volcanic-hosted massive sulfide deposits on the seafloor from numerical modeling studies: *Ore Geology Reviews*, v. 35, p. 333–351.
- Shanks, W.C. Pat, III, and Thurston, Roland, eds., 2012, Volcanogenic massive sulfide occurrence model: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070—C, 345 p.
- Singer, D.A., 1995, World-class base and precious metal deposits—A quantitative analysis: *Economic Geology*, v. 90, p. 88–104.
- Skarpelis, N. Setting, sulfur isotope variations, and metamorphism of Jurassic massive Zn-Pb-Ag sulfide mineralization associated with arc-type volcanism (Skra, Vardar zone, Northern Greece). *Resource Geology*. 2020; 70: 311– 335.
- Solomon, M. and Walshe, J.L., 1979. The formation of massive sulfide deposits on the seafloor. *Econ. Geol.*, 74: 797-813.
- Tajeddin, H.A., Rastad, E., Yaghoobpour, A., Maghfouri, S., Peter, J.M., Goldfarb, R., Mohajjel, M., 2019. The Barika Gold-bearing Kuroko-type Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Deposit, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Ore Geology Reviews*, 113: 103081; DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.103081.
- Thomas, M.D., Walker, J.A., Keating, P., Shives, R., Kiss, F., and Goodfellow, W.D., 2000, Geophysical atlas of massive sulphide signatures, Bathurst mining camp, New Brunswick: Geological Survey of Canada Open File 3887, 105 p.



Toner, B.M., Santelli, C.M., Marcus, M.A., Wirth, R., Chan, C.S., McCollum, T., Bach, W., and Edwards, K.J., 2009, Biogenic iron oxyhydroxide formation at mid-ocean ridge hydrothermal vents—Juan de Fuca Ridge: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 73, p. 388–403.

Walker, R.R., Matulich, A., Amos, A.C., Watkins, J.J. and Mannard, G.W., 1975. The geology of the Kidd Creek mine. *Econ. Geol.*, 70: 80-89.

Y. Ishikawa, Y. Yanagizawa On the mode of occurrence of graded ore in the Daikoku Deposit, Aina Mine *Mining Geology*, 21 (106) (1971), pp. 138-149

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/04/9-DMX-MOLAON-FINAL_24-5-11.pdf (18/09/2021)