



ΓΕΩΡΓΙΑ ΡΕΑ Α. ΒΡΑΤΣΙΣΤΑ

ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΕΛΦΟΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2021





ΓΕΩΡΓΙΑ ΡΕΑ Α. ΒΡΑΤΣΙΣΤΑ

ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

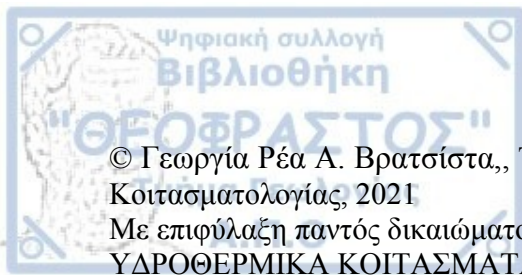
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Καθηγητής: Βασίλης Μέλφος

© Γεωργία Ρέα Α. Βρατσίστα, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

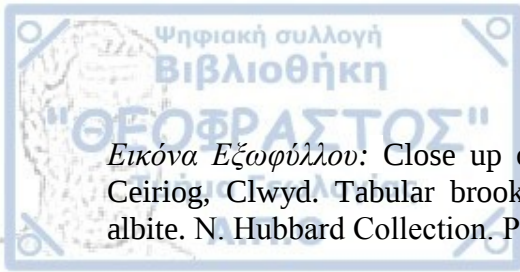


© Γεωργία Ρέα Α. Βρατσίστα,, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ – *Διπλωματική Εργασία*

© Georgia Rea A. Vratsista, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2021
All rights reserved.
HYDROTHERMAL DEPOSITS – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



Εικόνα Εξωφύλλου: Close up of alpine vein assemblage from Hendre Quarry, near Glyn Ceiriog, Clwyd. Tabular brookite crystal (2.5 mm across), with bipyramidal anatase, on albite. N. Hubbard Collection. Photo © M.P. Cooper.



Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
1. Πορφυριτικά κοιτάσματα	9
1.1 Γεωγραφική κατανομή.....	10
2. Κοιτάσματα skarn	12
2.1 Fe (Cu, Ag, Au) και Cu (Au, Ag, Mo, W) κοιτάσματα skarn	13
2.2 Σημαντικότερα κοιτάσματα skarn με οικονομικό όφελος	14
3. Κοιτάσματα επιθερμικού τύπου.....	15
3.1 Φλέβες	16
4. Ηφαιστειογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων.....	18
5. Υδροθερμικές αποθέσεις ορυκτών τύπου Mississippi	21
6. Κοιτάσματα χρυσού	24
6.1 Οικονομική εκμετάλλευση χρυσού	25
7. Υδροθερμική διέξοδος.....	27
7.1 Μαύρες και λευκές καμινάδες	28
8. Υδροθερμικά κοιτάσματα στην Ελλάδα	30
8.1 Σκουριές Χαλκιδική.....	30
8.2 Θράκη πορφυριτικός Μολυβδαινίτης	31
8.3 Λαύριο.....	32
8.4 Το νησί της Λέσβου.....	33
8.5 Το επιθερμικό κοιτάσμα στο Πέραμα	34
Συμπεράσματα.....	36
Βιβλιογραφία	37

Τα κοιτάσματα μεταλλευμάτων είναι πολλών και διαφορετικών τύπων, ενώ εμφανίζονται σε όλα τα γεωλογικά περιβάλλοντα. Οι κύριοι τύποι σημαντικών αποθέσεων μεταλλευμάτων μπορούν να χωριστούν σε: μεταλλικές εναποθέσεις, μη μεταλλικές εναποθέσεις και αποθέσεις ορυκτών καυσίμων. Για την χρήση ενός μεταλλεύματος είναι απαραίτητη αρχικά η γεωλογική έρευνα με τελικό στόχο την οικονομικά ωφέλιμη εξόρυξη.

Τα υδροθερμικά κοιτάσματα οφείλουν τη δημιουργία τους στη δράση υδροθερμικών συστημάτων και συνήθως έχουν άμεση σύνδεση με το μάγμα. Μεταλλικά στοιχεία και ενώσεις τα οποία περιέχονται μέσα στο μάγμα, συγκεντρώνονται σε ρευστά θερμά διαλύματα, τα οποία στη συνέχεια διεισδύουν μέσα από τις διάφορες ασυνέχειες του στερεοποιημένου μάγματος ή των γειτονικών πετρωμάτων, και αποθέτουν τελικά το φορτίο τους δημιουργώντας έτσι τα υδροθερμικά κοιτάσματα. Οι πρώτες προτάσεις πιθανής υποθαλάσσιας υδροθερμικής δραστηριότητας χρονολογούνται από τα τέλη της δεκαετίας του 1950 όταν αρκετοί ερευνητές και επιστήμονες συζητούσαν τη σημασία των ηφαιστειακών εκπομπών ως παράγοντας στην ευρεία εμφάνιση οξιδίων μαγγανίου και άλλων ιζημάτων οξειδίου του σιδηρομαγγανίου στον πυθμένα.

Όπως τονίζει ο Shanks (2001), η αναγνώριση της άφθονης και ευρείας υδροθερμικής δραστηριότητας και της σχέσης της με τη μοναδικότητα των μορφών ζωής στον πυθμένα του ωκεανού, είναι μία από τις σπουδαίες επιστημονικές ανακαλύψεις του τελευταίου μισού του εικοστού αιώνα. Οι μελέτες των υδροθερμικών διαδικασιών του θαλάσσιου πυθμένα έχουν οδηγήσει στην κατανόηση της μεταφοράς των ρευστών και την ψύξη του ωκεανού φλοιού, τη χημική και ισοτοπική ισορροπία της μάζας των ωκεανών, την προέλευση συμπαγών αποθεμάτων μεταλλεύματος σουλφιδίων, την προέλευση των πρασινωπών πετρών και των σερπεντινιτών και την πιθανή σημασία της βιόσφαιρας του υποθαλάσσιου πυθμένα.

Τα κοιτάσματα στο υδροθερμικό στάδιο και λόγω της εξέλιξης των υδροθερμικών συστημάτων που συνδέονται με μάγματα, χωρίζονται σε διαφορετικούς τύπους: 1. Skarn 2. Πορφυριτικού τύπου 3. Συμπαγής από αντικατάσταση σε ανθρακικά 4. Επιθερμικού τύπου 5. Υποθαλάσσιας υδροθερμικής δραστηριότητας 6. Φλεβικού μαγνησίτη σε υπερβασικά πετρώματα.

Abstract

Ore deposits are classified in different types and occur in all geological environments. They are divided into: metal deposits, non-metal deposits and fossil fuel deposits. For the extraction of an ore, detailed geological research is initially necessary with the ultimate goal of economically profitable mining.

Hydrothermal deposits owe their formation to the action of hydrothermal systems and fluids and more recently are directly related to magmas. Metals and metal compounds exsolved from the magma are concentrated in hot fluids, which then penetrate through the various discontinuities of the solidified magma or the neighboring rocks, and finally deposit their charge, thus creating hydrothermal deposits. The first suggestions of potential submarine hydrothermal activity date back to the late 1950s when several researchers and scientists discussed the importance of volcanic emissions as a factor in the widespread occurrence of manganese nodules and other iron manganese oxide sediments at the sea bottom.

As Shanks (2001) points out, recognition of abundant and extensive hydrothermal activity and its relationship to the uniqueness of life forms on the ocean floor, is one of the great scientific discoveries of the last half of the twentieth century. Studies of seabed hydrothermal processes have led to an understanding of fluid transport and oceanic crusting, the chemical and isotopic equilibrium of ocean mass, the origin of massive reserves of ores and sulfides, potential importance of the submarine biosphere.

The deposits in the hydrothermal stage and due to the operation of hydrothermal systems associated with magmas, are classified into different types: 1. Skarn 2. Porphyry type 3. Massive from carbonate replacement 4. Epithermal type 5. Underwater hydrothermal activity 6. Vein type magnesite.

1. Πορφυριτικά κοιτάσματα

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι η πιο σημαντική πηγή Cu και Mo στον κόσμο και αποτελούν σημαντικές πηγές Au, Ag και Sn. Σημαντικά μέταλλα παραπροϊόντων περιλαμβάνουν Re, W, In, Pt, Pd και Se. Αντιπροσωπεύουν περίπου το 50 έως 60% της παγκόσμιας παραγωγής Cu και περισσότερο από το 95% της παγκόσμιας παραγωγής Mo. Στον Καναδά, όπως αναφέρει ο Sinclair, (2007), αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 40% της παραγωγής Cu, σχεδόν όλη την παραγωγή Mo, και περίπου το 10% της παραγωγής Au. Τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι μεγάλα, χαμηλού έως μεσαίας περιεκτικότητας κοιτάσματα. Διακρίνονται από άλλα κοιτάσματα που σχετίζονται με γρανίτη όπως τύπου skarn και mantos από το μεγάλο τους μέγεθος και τη δομή τους.

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα περιέχουν συνήθως εκατοντάδες εκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος, αν και κυμαίνονται σε μέγεθος από δεκάδες εκατομμύρια έως δισεκατομμύρια τόνους, οι περιεκτικότητες για τα διάφορα μέταλλα διαφέρουν σημαντικά, αλλά γενικά ο μέσος όρος είναι μικρότερος από 1%. Στα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu, για παράδειγμα, οι περιεκτικότητες Cu κυμαίνονται από 0,2% έως περισσότερο από 1% Cu. Σε κοιτάσματα πορφυριτικού Mo, οι περιεκτικότητες σε Mo κυμαίνονται από 0,07% έως σχεδόν 0,3% Mo. Στα κοιτάσματα πορφυριτικού Au και Cu-Au, οι περιεκτικότητες Au κυμαίνονται από 0,2 έως 2 g / τόνο Au. Τα συσχετιζόμενα πυριγενή πετρώματα ποικίλλουν στη σύσταση από διορίτη-γρανοδιορίτη έως γρανίτη. Μια στενή χρονική και γενετική σχέση μεταξύ της μαγματικής δραστηριότητας και της υδροθερμικής μεταλλογένεσης σε πορφυριτικά κοιτάσματα υποδηλώνεται από την παρουσία ενδομεταλλικών διεισδύσεων που τοποθετήθηκαν μεταξύ ή κατά τη διάρκεια περιόδων της μεταλλοφορίας. Τα κοιτάσματα αυτά κυμαίνονται από τον Αρχαιοζωϊκό αιώνα έως πρόσφατα, αν και οι περισσότερες οικονομικές μεταλλοφορίες είναι Ιουρασικές ή νεότερες.

Τα κοιτάσματα πορφυριτικού τύπου είναι μεγάλα, χαμηλής έως μέσης ποιότητας κοιτάσματα, στα οποία πρωτογενή μεταλλικά ορυκτά ελέγχονται δομικά και είναι γενετικά σχετιζόμενα με όξινες έως ενδιάμεσες πορφυριτικές διεισδύσεις (Kirkham, 1972). Το μεγάλο μέγεθος και η δομή (π.χ. φλέβες, σείτ φλεβών, αποθέματα, ρήγματα, «ζώνες κατάκλασης», και λατυποπαγή) χρησιμεύουν για να διακρίνουν τα πορφυριτικά κοιτάσματα από μια ποικιλία κοιτασμάτων που μπορεί να σχετίζονται περιφερειακά, συμπεριλαμβανομένων των skarn, mantos υψηλής θερμοκρασίας, περιφερειακές μεσοθερμικές φλέβες και επιθερμικές αποθέσεις πολύτιμων μετάλλων.

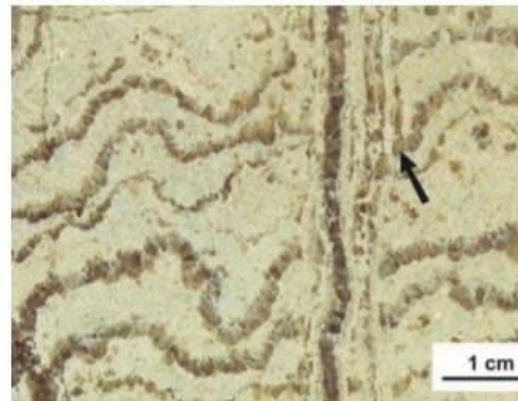
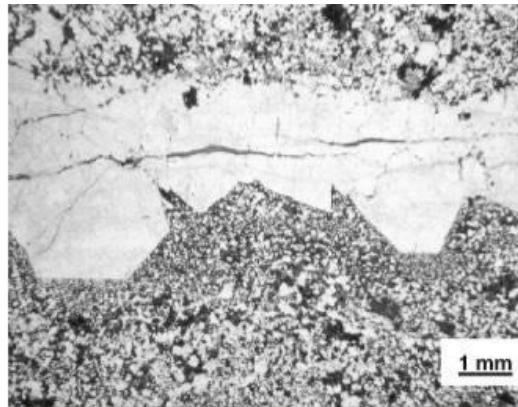
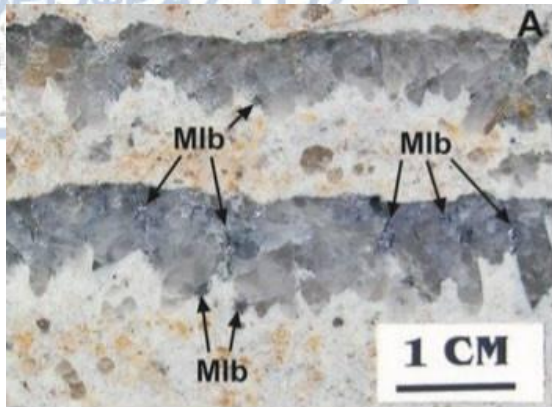
Τα δευτερογενή ορυκτά μπορούν να αναπτυχθούν σε υπερ-εμπλουτισμένες ζώνες σε πορφυριτικά κοιτάσματα Cu με διάβρωση πρωτογενών σουλφιδίων. Τέτοιες ζώνες έχουν συνήθως σημαντικά υψηλότερες περιεκτικότητες Cu, ενισχύοντας έτσι τις δυνατότητες οικονομικής εκμετάλλευσης. Η περιεκτικότητα των πορφυριτικών κοιτασμάτων σε μέταλλα είναι διαφορετική. Οι ακόλουθοι τύποι πορφυριτικών κοιτασμάτων καθορίστηκαν από τους Kirkham and Sinclair, (1995), σύμφωνα με τα μέταλλα που είναι πιο ουσιώδη για την οικονομική σημασία της απόθεσης: 1.Cu ($\pm$ Au, Mo, Ag, Re, PGE), 2.Cu-Mo ($\pm$ Au, Ag), 3.Cu-Mo-Au ($\pm$ Ag), 3.Cu-Au ($\pm$ Ag, PGE), 4.Au ($\pm$ Ag, Cu, Mo), 5.Mo ($\pm$ W, Sn), 6.W-Mo ($\pm$ Bi, Sn), 7.Sn ($\pm$ W, Mo, Ag, Bi, Cu, Zn, In), 8.Sn-Ag ($\pm$ W, Cu, Zn, Mo, Bi), 9.Ag ($\pm$ Au, Zn, Pb).

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα εμφανίζονται σε μια ποικιλία τεκτονικών δομών. Οι εναποθέσεις πορφυριτικού χαλκού εμφανίζονται συνήθως στις ριζικές ζώνες των ανδεσιτικών ηφαιστείων σε καταβυθιζόμενες, ηπειρωτικές και νησιωτικές περιοχές τόξου. Στη νότια Αριζόνα, τα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu συνδέονται με γρανιτικά πετρώματα τοποθετημένα σε ηπειρωτικό περιβάλλον, εντός ή κατά μήκος των περιθωρίων καλντέρας που τώρα διαβρώνονται σε μεγάλο βαθμό (Lipman and Sawyer, 1985).

Οι πορφυριτικά κοιτάσματα Mo τύπου Climax σχετίζονται συνήθως με γρανίτες που έχουν τοποθετηθεί σε ηπειρωτικές ρυθμίσεις, ιδιαίτερα ρήγματα ή εκτεταμένα περιβάλλοντα. Οι καταθέσεις Climax και Henderson, για παράδειγμα, σχετίζονται γενετικά με μικρά κοιτάσματα που συνδέονται στο βάθος σε ένα περιφερειακό βαθύλιθο που τοποθετήθηκε κατά τη διάρκεια της ενεργού επέκτασης στο ρήγμα Rio Grande (Bookstrom, 1981).

1.1 Γεωγραφική κατανομή

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα εμφανίζονται σε ολόκληρο τον κόσμο σε μια σειρά εκτεταμένων, σχετικά στενών, γραμμικών μεταλλογενετικών περιοχών. Συνδέονται κυρίως με μεσοζωικές έως καινοζωικές ορογενετικές ζώνες στη Βόρειο-δυτική και τη Νότια Αμερική, γύρω από το δυτικό περιθώριο της λεκάνης του Ειρηνικού, και στον ορογενετική ζώνη της Τηθύος στην Ανατολική Ευρώπη και τη νότια Ασία. Ωστόσο, εμφανίζονται επίσης σημαντικές αποθέσεις εντός των παλαιοζωικών ορογενών στην Κεντρική Ασία και την Βόρειο-ανατολική Αμερική και, σε μικρότερο βαθμό, εντός των προκαμβρίων terranes (Sinclair, 2007).



Εικόνα 1.1: Παραδείγματα συνδυασμού γρανίτη σε στρώσεις μέσα σε πορφυριτικά κοιτάσματα (Sinclair, 2007).

2. Κοιτάσματα skarn

Το skarn είναι σκληροί, χοντρόκοκκοι μεταμορφικοί βράχοι που σχηματίζονται από μια διαδικασία που ονομάζεται μετασώματωση. Το skarn τείνει να είναι πλούσιο σε ανόργανα άλατα ασβεστίου-μαγνησίου-σιδήρου-μαγγανίου-αργιλίου, τα οποία αναφέρονται επίσης ως ανόργανο ασβέστιο-πυριτικό άλας. Αυτά τα μέταλλα σχηματίζονται ως αποτέλεσμα αλλοίωσης που συμβαίνει όταν τα υδροθερμικά ρευστά αλληλεπιδρούν με ένα πρωτόλιθο είτε πυριτικής είτε ιζηματικής προέλευσης. Σε πολλές περιπτώσεις, το skarn συνδέεται με την διείσδυση ενός γρανιτικού πλουτωνίτη που βρίσκεται μέσα και γύρω από ζώνες διάτμησης που εισβάλλουν σε ένα ανθρακικό στρώμα αποτελούμενο από δολομίτη ή ασβεστόλιθο. Το Skarn μπορεί να σχηματιστεί από περιφερειακό ή να επικοινωνήσει με μεταμορφισμό και ως εκ τούτου να σχηματιστεί σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Τα υδροθερμικά ρευστά που σχετίζονται με τις μετασωματικές διεργασίες μπορούν να προέρχονται είτε από μαγνητικά, μεταμορφικά, μετεωρικά, θαλάσσια, ή ακόμα και από μίξη αυτών. Το προκύπτον skarn μπορεί να αποτελείται από μια ποικιλία διαφορετικών ορυκτών τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αρχική σύσταση τόσο του υδροθερμικού ρευστού όσο και της αρχικής σύστασης του πρωτόλιθου (Ciobanu και Cook, 2004).

Εάν ένα skarn έχει αξιοσέβαστο ποσό μεταλλεύματος που μπορεί να εξορύσσεται για κέρδος, μπορεί επομένως να χαρακτηριστεί ως κοιτάσμα skarn. Οι εναποθέσεις Skarn είναι οικονομικά πολύτιμες ως πηγές μετάλλων όπως ο κασσίτερος, το βολφράμιο, το μαγγάνιο, ο χαλκός, ο χρυσός, ο ψευδάργυρος, ο μόλυβδος, το νικέλιο, το μολυβδαίνιο και ο σίδηρος. Ένα skarn σχηματίζεται από μια ποικιλία μετασωματικών διαδικασιών κατά τη διάρκεια του μεταμορφισμού μεταξύ δύο γειτονικών λιθολογικών μονάδων. Το Skarn μπορεί να σχηματιστεί σχεδόν σε οποιονδήποτε τύπο λιθολογίας, όπως σχιστόλιθος, γρανίτης και βασάλτης, αλλά η πλειονότητα των skarn βρίσκεται στη λιθολογία που περιέχει ασβεστόλιθο ή δολομίτη. Είναι συνηθισμένο να υπάρχουν skarn κοντά σε πλουτονίτες, κατά μήκος ρωγμών και μεγάλων διατμητικών ζωνών, σε ρηχά γεωθερμικά συστήματα και στον πυθμένα της θάλασσας. Η ορυκτολογία του skarn σχετίζεται πολύ με το πρωτόλιθο (Einaudi, 1982).

Τα ορυκτά Skarn είναι κυρίως γρανάτες και πυροξένος με μεγάλη ποικιλία πυριτικού ασβεστίου και σχετικών ορυκτών. Τα τυπικά ορυκτά skarn περιλαμβάνουν ορυκτά όπως ο πυρόξενος, ο γρανάτης, ο βεζουβιανίτης, ο βολλαστονίτης, ο ακτινόλθος, ο μαγνητίτης ή αιματίτης και το επίδοτο. Επειδή τα skarn σχηματίζονται από πλούσια σε στοιχεία, πυριτικά υδατικά ρευστά, μια ποικιλία ασυνήθιστων ορυκτών τύπων βρίσκεται στο περιβάλλον του

skarn, όπως: ο τουρμαλίνης, το τοπάζιο, η βήρυλλος, το κορούνδιο, ο φθορίτης, ο απατίτης, ο βαρύτης, ο τανταλίτης, ο αγγλεσίτης και άλλα (Atkinson και Einaudi, 1978).

Τα κοιτάσματα skarn μπορούν να υποδιαιρεθούν ανάλογα με συγκεκριμένα κριτήρια. Ένας τρόπος ταξινόμησης είναι με βάση το πρωτόλιθο. Εάν ο πρωτόλιθος έχει ιζηματογενή προέλευση, μπορεί να αναφέρεται ως εξω-σκαρν ενώ αν ο πρωτόλιθος είναι πυριγενές, μπορεί να ονομαστεί ενδο-σκαρν. Περαιτέρω ταξινόμηση μπορεί να γίνει με βάση το πρωτόλιθο παρατηρώντας την κυρίαρχη σύσταση και την προκύπτουσα διάταξη τροποποίησης. Εάν το skarn περιέχει ανόργανα άλατα όπως ο ολιβίνης, ο σερπεντίνης, ο φλογοπίτης, ο κλινιοπυρόξενος το μαγνήσιο, ο ορθοπυρόξενος, ο σπινέλιος, ο παραγίτης και ανόργανα συστατικά από την ομάδα του χουμίτη, είναι χαρακτηριστικά ενός δολομιτικού πρωτόλιθου και μπορεί να χαρακτηριστεί ως skarn μαγνησίου. Η άλλη κατηγορία, που ονομάζεται ασβεστολιθικά skarn, είναι τα προϊόντα αντικατάστασης ενός ασβεστολιθικού πρωτόλιθου με κυρίαρχα ορυκτά που περιέχουν τον γρανάτη, τον κλινοπυρόξeno και τον βολλαστονίτη (Meinert, 1992).

Τα πετρώματα τα οποία περιέχουν γρανάτη ή πυρόξeno ως κύριες φάσεις, είναι λεπτόκοκκα, δεν έχουν σίδηρο και μοιάζουν με skarn, γενικά έχουν τον όρο σκαρνοειδές. Τα κοιτάσματα Skarn έχουν τυπικά ορυκτά, αλλά περιέχουν επίσης ορυκτά μεταλλεύματος σε αφθονία που είναι οικονομικής σημασίας. Οι καταθέσεις Skarn ταξινομούνται επομένως από το κυρίαρχο οικονομικό τους στοιχείο, όπως η απόθεση Skarn χαλκού (Cu) ή η απόθεση Skarn μολυβδαινίου (Mo).

2.1 Fe (Cu, Ag, Au) και Cu (Au, Ag, Mo, W) κοιτάσματα skarn

Η τεκτονική για Ca-Fe skarn τείνει να είναι τα ωκεάνια νησιωτικά τόξα. Τα πετρώματα-ξενιστές τείνουν να είναι ο γάββρος και ο συηνίτης που σχετίζονται με την διείσδυση ασβεστόλιθου. Η τεκτονική ρύθμιση για τα skarn Fe-Mg τείνει να είναι τα ηπειρωτικά περιθώρια. Τα πετρώματα-ξενιστές τείνουν να είναι ο γρανοδιορίτης προς γρανίτη που σχετίζονται με διεισδυτικούς δολομίτες και δολομιτικά ιζηματογενή πετρώματα. Ο μαγνητίτης είναι το κύριο μέταλλευμα σε αυτούς τους τύπους εναποθέσεων skarn με περιεκτικότητα από 40 έως 60%. Ο χαλκοπυρίτης, ο βορνίτης και ο σιδηροπυρίτης είναι τα δευτερεύοντα μεταλλεύματα (Atkinson and Einaudi, 1978).

Η τεκτονική ρύθμιση για τις αποθέσεις Cu τείνει να είναι οι αδακιτικοί τύποι πλουτωνιτών που εισβάλλουν σε παλαιότερα στρώματα ανθρακικού ηπειρωτικού περιθωρίου. Τα πετρώματα του ξενιστή τείνουν να είναι ο διορίτης, ο χαλαζίας και ο



γρανδορίτης. Ο σιδηροπυρίτης, ο χαλκοπυρίτης και ο μαγνητίτης βρίσκονται συνήθως σε υψηλότερες ποσότητες (Einaudi, 1982).

2.2 Σημαντικότερα κοιτάσματα skarn με οικονομικό όφελος

- Σιδερένια-skarn: Ντάσκασαν ορυχείο, Αζερμπαϊτζάν
- Χαλκό-skarn: Bingham Canyon Mine, Utah, Η.Π.Α.
- Βολφράμιο-skarn: Ορυχείο Sangdong, Νότια Κορέα
- Gold-bearing skarn: Hedley Mascot Mine, British Columbia, Καναδάς
- Skarn από ψευδάργυρο: Santa Eulalia, Τσιουάουα, Μεξικό
- Νικέλιο-skarn: Avelbury Mine, Zeehan, Tasmania (Αυστραλία)
- Skarn-μολυβδαινίου: Ορυχείο Yangchiachangtze, Κίνα

3. Κοιτάσματα επιθερμικού τύπου

Τα επιθερμικά κοιτάσματα είναι ορυκτά κοιτάσματα που σχηματίζονται από ζεστό νερό σε ρηχά βάθη και σε χαμηλή θερμοκρασία ($150^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$). Αυτές οι εναποθέσεις δεν σχηματίζονται ποτέ από καθαρό νερό, επειδή το καθαρό νερό είναι ένας κακός διαλύτης των περισσότερων μεταλλευμάτων. Αντίθετα, σχηματίζονται από ζεστές άλμες, καθιστώντας καταλληλότερη την αναφορά τους ως προϊόντα υδροθερμικών διαλυμάτων. Οι άλμες, και ιδιαίτερα οι άλμες νατρίου-χλωριούχου ασβεστίου, είναι αποτελεσματικοί διαλύτες πολλών μεταλλευμάτων σουλφιδίου και οξειδίου, και μπορούν ακόμη και να διαλύσουν και να μεταφέρουν φυσικά μέταλλα όπως χρυσό και άργυρο (Sherlock, 2005).

Το νερό σε ένα υδροθερμικό διάλυμα μπορεί να προέρχεται από πολλές διαφορετικές πηγές. Μπορεί να απελευθερωθεί από ένα κρυσταλλικό μάγμα. Μπορεί να αποβληθεί από μια μάζα πετρώματος που υφίσταται μεταμόρφωση. Ή μπορεί να έρχεται στην επιφάνεια της Γης ως βρόχινο νερό ή θαλασσινό νερό και στη συνέχεια να πέφτει σε μεγάλα βάθη μέσω καταγμάτων και πορωδών πετρωμάτων, όπου θα θερμανθεί, θα αντιδράσει με παρακείμενα πετρώματα και θα γίνει υδροθερμικό διάλυμα. Ανεξάρτητα από την προέλευση και την αρχική σύσταση του νερού, οι τελικές συνθέσεις όλων των υδροθερμικών διαλυμάτων τείνουν να συγκλίνουν, λόγω αντιδράσεων μεταξύ διαλυμάτων και πετρωμάτων που συναντούν (Sinclair και Thorpe, 1996).

Τα υδροθερμικά διαλύματα είναι άλμη χλωριούχου νατρίου-ασβεστίου με προσθήκες αλάτων μαγνησίου και καλίου, καθώς και μικρές ποσότητες πολλών άλλων χημικών στοιχείων. Τα διαλύματα κυμαίνονται σε συγκέντρωση από λίγα τοις εκατό έως και 50 τοις εκατό διαλυμένα στερεά κατά βάρος. Τα υπάρχοντα υδροθερμικά διαλύματα μπορούν να μελετηθούν σε θερμές πηγές, σε υπόγειες δεξαμενές άλμης, όπως αυτές στην Αυτοκρατορική Κοιλάδα της Καλιφόρνιας, στη χερσόνησο Cheleken, στην ανατολική άκρη της Κασπίας Θάλασσας, στο Τουρκμενιστάν, σε άλμη πετρελαίου και σε υποβρύχιες πηγές κατά μήκος των μεσοωκεάνιων ραχών στα μέσα του ωκεανού. Τα ορυκτά υδροθερμικά διαλύματα μπορούν να μελετηθούν σε εγκλείσματα ρευστών, τα οποία είναι μικροσκοπικά δείγματα διαλύματος παγιδευμένα σε κρυσταλλικές ατέλειες από ένα αναπτυσσόμενο ορυκτό.

Επειδή τα υδροθερμικά διαλύματα σχηματίζονται ως αποτέλεσμα πολλών διεργασιών, είναι αρκετά κοινά στο φλοιό της Γης. Τα υδροθερμικά κοιτάσματα ορυκτών, από την άλλη πλευρά, δεν είναι ούτε κοινά ούτε πολύ μεγάλα σε σύγκριση με άλλα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Είναι προφανές από αυτό ότι τα περισσότερα διαλύματα τελικά

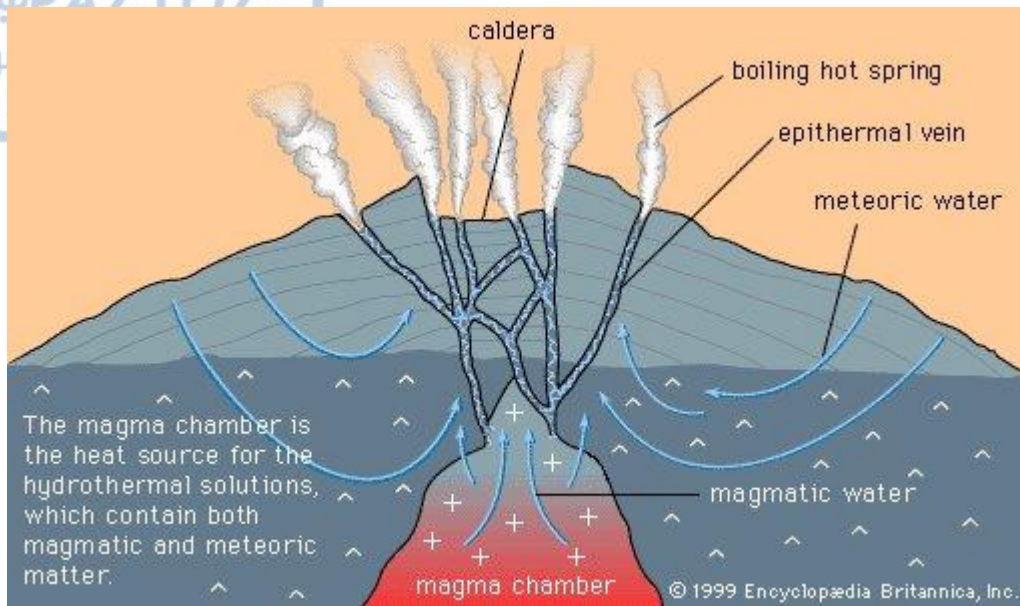
αναμιγνύονται με την υπόλοιπη υδρόσφαιρα και αφήνουν λίγα εμφανή ίχνη της προηγούμενης παρουσίας τους. Αυτά τα διαλύματα που σχηματίζουν κοιτάσματα ορυκτών, (και έτσι αφήνουν προφανή στοιχεία για την προηγούμενη παρουσία τους), το κάνουν επειδή κάποια διαδικασία, τους προκαλεί να εναποθέσουν τα διαλυμένα φορτία τους σε περιορισμένο χώρο ή σε μικρό όγκο πορώδους πετρώματος (Dubé et al, 2007).

3.1 Φλέβες

Η απλούστερη υδροθερμική εναπόθεση είναι η φλέβα, η οποία σχηματίζεται όταν ένα υδροθερμικό διάλυμα ρέει μέσω μιας ανοικτής ρωγμής και καταθέτει το διαλυμένο φορτίο του. Πολλές φλέβες εμφανίζονται κοντά στα σώματα των διεισδυτικών πυριγενών πετρωμάτων, διότι τα πυριγενή πετρώματα χρησιμεύουν ως πηγές θερμότητας που δημιουργούν ροές σε υδροθερμικά διαλύματα.

Η καθίζηση των ορυκτών προκαλείται συνήθως από την ψύξη του υδροθερμικού διαλύματος, με βρασμό ή από χημικές αντιδράσεις μεταξύ του διαλύματος και των πετρωμάτων που ευθυγραμμίζουν τη σχισμή. Μερικές διάσημες εναποθέσεις είναι οι φλέβες από κασσίτερο-χαλκό-μόλυβδο-ψευδάργυρο στην Κορνουάλη της Αγγλίας. Οι φλέβες χρυσού χαλαζία Kalgoorlie, Δυτική Αυστραλία και λίμνη Kirkland, Οντάριο, Καναδάς, οι φλέβες από άργυρο και κασσίτερο της Llallagua και του Ποτόσι της Βολιβίας και οι φλέβες αργύρου-νικελίου-ουρανίου του Erzgebirge της Γερμανίας, οι οποίες περιγράφηκαν για πρώτη φορά από τον Georgius Agricola στο βιβλίο του De re metallica (1556) (Sinclair και Thorpe, 1996).

Οι υδροθερμικές εναποθέσεις που σχηματίζονται σε ρηχά βάθη κάτω από ένα σύστημα θερμής πηγής βρασμού αναφέρονται συνήθως ως επιθερμικές, ένας όρος που διατηρείται από ένα παλιό σύστημα ταξινόμησης των υδροθερμικών αποθέσεων με βάση την υποτιθέμενη θερμοκρασία και το βάθος της εναπόθεσης. Οι επιθερμικές φλέβες τείνουν να μην έχουν μεγάλη κάθετη συνέχεια, αλλά πολλές είναι εξαιρετικά πλούσιες και αξίζουν τον όρο bonanza. Πολλές από τις περίφημες αποθέσεις αργύρου και χρυσού των δυτικών Ηνωμένων Πολιτειών, όπως το Comstock στη Νεβάδα και το Cripple Creek στο Κολοράντο, είναι επιθερμικά bonanza (Sherlock, 2005).



Εικόνα 3.1. Η σχέση μεταξύ θερμών πηγών και επιθερμικών φλεβών (Britannica, 1999).

4. Ηφαιστειογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων

Όπου υπάρχει ηφαιστειακή δραστηριότητα κάτω από τη θάλασσα, υπάρχει το ενδεχόμενο να διεισδύσει το θαλασσινό νερό στα ηφαιστειακά πετρώματα, να θερμανθεί από ένα θάλαμο μάγματος και να αντιδράσει με τους εγκλωβισμένους βράχους και να συγκεντρώσει γεωχημικά σπάνιων μετάλλων σχηματίζοντας έτσι ένα υδροθερμικό διάλυμα. Όταν ένα τέτοιο διάλυμα σχηματίζει μια θερμή πηγή στον πυθμένα της θάλασσας, μπορεί ξαφνικά να κρυώσει και να αποθέσει γρήγορα το διαλυμένο φορτίο του. Ορυκτά κοιτάσματα που σχηματίζονται από αυτήν τη διαδικασία, τα οποία ονομάζονται ηφαιστειακά τεράστια θειούχα σουλφίδια (VMS), είναι γνωστά σε αρχαία βράχια θαλάσσιου πυθμένα όλων των γεωλογικών εποχών (Sinclair και Thorpe, 1996).

Επιπλέον, ανακαλύφθηκαν σήμερα κοιτάσματα ως αποτέλεσμα της δραστηριότητας των υποβρυχίων θερμών πηγών σε πολλά σημεία κατά μήκος της ωκεάνιας κορυφογραμμής (η πιο ηφαιστειακά ενεργή ζώνη στη Γη) και σε λεκάνες οπίσθιου τόξου που σχετίζονται με ζώνες υποβύθισης (Kouzmanov et al. 2010).

Οι αποθέσεις VMS αποτελούν μερικές από τις πλουσιότερες εναποθέσεις χαλκού, μολύβδου και ψευδαργύρου. Μερικά από τα πιο διάσημα, βρέθηκαν στην Ιαπωνία και ονομάζονται Kuroko, κοιτάσματα μεταλλεύματος που περιέχουν έως και 20% συνδυασμένο χαλκό, μολύβδο και ψευδάργυρο κατά βάρος, καθώς και σημαντικές ποσότητες χρυσού και αργύρου. Άλλες διάσημες αποθέσεις VMS είναι οι ιστορικές αποθέσεις χαλκού της Κύπρου και στον Καναδά, η απόθεση Kidd Creek στο Οντάριο και οι αποθέσεις Noranda του Κεμπέκ (Pokrovski et al. 2013).

Αυτές οι εναποθέσεις ονομάζονται επίσης μερικές φορές ηφαιστειακά κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων (VHMS). Η πυκνότητα είναι γενικά 4500 kg / m³. Πρόκειται κυρίως για στρωματοειδείς συσσωρεύσεις θειούχων ορυκτών που κατακρημνίζονται από υδροθερμικά ρευστά πάνω ή κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας σε ένα ευρύ φάσμα αρχαίων και σύγχρονων γεωλογικών τοποθεσιών. Στους σύγχρονους ωκεανούς είναι συνώνυμα με θειούχα λοφία που ονομάζονται μαύρες καμινάδες.

Εμφανίζονται σε περιβάλλοντα που κυριαρχούνται από ηφαιστειακά πετρώματα (π.χ. ηφαιστειακά ιζηματογενή), και οι εναποθέσεις συμπίπτουν με το σχηματισμό των εν λόγω ηφαιστειακών πετρωμάτων. Ως τάξη, αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πηγή μεταλλευμάτων χαλκού, ψευδαργύρου, μολύβδου, χρυσού και αργύρου στον κόσμο, με το κοβάλτιο, τον

κασσίτερο, το βάριο, το θείο, το σελήνιο, το μαγγάνιο, το κάδμιο, το ίνδιο, το βισμούθιο, το τελλούριο, το γάλλιο και το γερμάνιο ως/ή υποπροϊόντα (Kun-Feng, 2019).

Οι εταιρείες εξερεύνησης ορυκτών διερευνούν για συμπαγές αποθέσεις θειούχου πυθμένα του θαλάσσιου πυθμένα. Ωστόσο, η περισσότερη εξερεύνηση επικεντρώνεται στην αναζήτηση χερσαίων ισοδυνάμων αυτών των αποθέσεων.

Η στενή σχέση με ηφαιστειακά πετρώματα και εκρηκτικά κέντρα διαχωρίζει τις εναποθέσεις VMS από παρόμοιους τύπους αποθέματος μεταλλεύματος που μοιράζονται παρόμοιες διαδικασίες πηγής, μεταφοράς και παγίδευσης. Τα ηφαιστειακά τεράστια κοιτάσματα σουλφιδίου είναι διακριτικά στο ότι οι εναποθέσεις μεταλλεύματος σχηματίζονται σε στενή χρονική σχέση με τον υποβρύχιο ηφαιστειακό σχηματισμό και σχηματίζονται από υδροθερμική κυκλοφορία και εκπνοή σουλφιδίων που είναι ανεξάρτητα από ιζηματογενείς διεργασίες, οι οποίες διαχωρίζουν τις εναποθέσεις VMS από τις αποθέσεις ιζηματικών εκπνοών (SEDEX) (Michalski & Bleacher, 2013).

Υπάρχει μια υποκατηγορία αποθέσεων VMS, οι αποθέσεις συμπαγούς σουλφιδίου που φιλοξενούνται στα ηφαιστειακά ιζήματα (VSHMS), οι οποίες μοιράζονται χαρακτηριστικά και είναι υβριδικά μεταξύ των αποθέσεων VMS και SEDEX. Αξιοσημείωτα παραδείγματα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν οι αποθέσεις του Bathurst Mining Camp, New Brunswick, Canada, οι αποθέσεις της Ιβηρικής ζώνης σιδηροπυρίτη, Πορτογαλία και Ισπανία, και η απόθεση Wolverine, Yukon, Canada.

Η πηγή μετάλλου και θείου σε εναποθέσεις VMS είναι ένας συνδυασμός ασυμβίβαστων στοιχείων που εκπλένονται από τον ηφαιστειακό σωρό στην ζώνη υδροθερμικής αλλοίωσης υποθαλάσσιου πυθμένα με υδροθερμική κυκλοφορία. Η υδροθερμική κυκλοφορία θεωρείται γενικά ότι οδηγείται μέσω θερμότητας στον φλοιό που συχνά σχετίζεται με βαθιές διεισδύσεις γάββρου (Sinclair και Thorpe, 1996).

Η μεταφορά μετάλλων πραγματοποιείται μέσω μεταφοράς υδροθερμικών ρευστών, με τη θερμότητα για αυτό να παρέχεται από το θάλαμο μάγματος που βρίσκεται κάτω από το ηφαιστειακό οικοδόμημα. Το δροσερό νερό του ωκεανού εισέρχεται στην υδροθερμική ζώνη και θερμαίνεται από τον ηφαιστειακό βράχο και στη συνέχεια αποβάλλεται στον ωκεανό, η διαδικασία εμπλουτισμού του υδροθερμικού ρευστού σε ιόντα θείου και μετάλλου (Michalski & Bleacher, 2013).

Τα υλικά μεταλλεύματος παγιδεύονται εντός ενός πεδίου φουμαρόλης ή μιας μαύρης καμινάδας όταν εκδιώκονται στον ωκεανό, ψύχονται και καθιζάνουν θειούχα ορυκτά ως στρωματοειδή σουλφιδικό μετάλλευμα. Ορισμένες εναποθέσεις δείχνουν ένδειξη σχηματισμού μέσω εναπόθεσης σουλφιδίου μέσω αντικατάστασης αλλοιωμένων ηφαιστειογενών πετρωμάτων και μπορεί επίσης να σχηματιστούν με διείσδυση πλούσιων σε θείο άλμης σε μη στερεοποιημένα ιζήματα.

Οι εναποθέσεις VMS έχουν μεγάλη ποικιλία μορφολογιών, με τις τυπικές εναποθέσεις σε σχήμα ανάχωμα και σε σχήμα μπολ. Οι σχηματισμοί σε σχήμα μπολ σχηματίζονται λόγω εξαερισμού υδροθερμικών διαλυμάτων σε υποβρύχιες καταστολές, σε πολλές περιπτώσεις, αυτός ο τύπος εναπόθεσης μπορεί να συγχέεται με ιζηματογενείς αποθέσεις. Οι αποθέσεις σε σχήμα ανάχωμα σχηματίζονται με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των σύγχρονων τεράστιων κοιτασμάτων σουλφιδίων, μέσω της παραγωγής ενός υδροθερμικού αναχώματος που σχηματίζεται από διαδοχικές καπνοδόχους μαύρης καμινάδας. Τα κοιτάσματα που έχουν σχηματιστεί σε περιβάλλοντα όπου κυριαρχούν ιζηματογενή πετρώματα ή πολύ διαπερατά ηφαιστειακά πετρώματα μπορούν να δείξουν μια μορφολογία που μιμείται τη γεωμετρία των γύρω πετρωμάτων (Bookstrom, 1981).

Οι περισσότερες εναποθέσεις VMS εμφανίζουν μεταλλική ζώνωση, που προκαλείται από τα μεταβαλλόμενα φυσικά και χημικά περιβάλλοντα του κυκλοφορούντος υδροθερμικού ρευστού. Τα περισσότερα κοιτάσματα VMS δείχνουν μια κατακόρυφη ζώνωση του χρυσού, με τα άνω τμήματα γενικά πιο εμπλουτισμένα σε χρυσό και άργυρο.

Η ορυκτολογία των κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων VMS αποτελείται από πάνω από 90% θειούχο σίδηρο, κυρίως με τη μορφή σιδηροπυρίτη, με το χαλκοπυρίτη, το σφαλερίτη και το γαληνίτη να είναι επίσης κύρια συστατικά. Ο μαγνητίτης υπάρχει σε μικρές ποσότητες. Καθώς η περιεκτικότητα σε μαγνητίτη αυξάνεται, τα μεταλλεύματα μετατρέπονται σε τεράστια κοιτάσματα οξειδίου. Το άγονο (το μη οικονομικό απόβλητο υλικό) είναι κυρίως χαλαζίας και σιδηροπυρίτης ή μαγνητοπυρίτης. Λόγω της υψηλής πυκνότητας των κοιτασμάτων, ορισμένοι έχουν σημαντικές ανωμαλίες βαρύτητας (Neves-Corvo, Πορτογαλία) που είναι χρήσιμες στην εξερεύνηση (Michalski & Bleacher, 2013).

5. Υδροθερμικές αποθέσεις ορυκτών τύπου Mississippi

Οι κεντρικές πεδιάδες της Βόρειας Αμερικής, που εκτείνονται από τα Απαλάτσια Όρη στα ανατολικά, μέχρι τα Βραχώδη Όρη στα δυτικά, είναι υποκείμενες από σχεδόν επίπεδα ιζηματογενή πετρώματα που είχαν τοποθετηθεί σε ένα τώρα καλυμμένο υπόγειο από πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα. Το κάλυμμα των ιζηματογενών πετρωμάτων, τα οποία έχουν αλλάξει λίγο από την εναπόθεσή τους, περιέχει πολλά στρώματα ασβεστόλιθου, και εντός των ασβεστόλιθων κοντά στον πυθμένα του σωρού, βρίσκεται μια ξεχωριστή κατηγορία απόθεσης ορυκτών. Επειδή οι κεντρικές πεδιάδες συμπίπτουν στενά με τη λεκάνη αποχέτευσης του ποταμού Μισισσιπή, αυτή η κατηγορία αποθέσεων έχει ως ονομαζόμενο τύπο τον όρο κοιλάδα Μισισσιπή (MVT) (Britannica, 1999).

Οι εναποθέσεις MVT είναι πάντα σε ασβεστόλιθους και γενικά βρίσκονται κοντά στις άκρες των ιζηματογενών λεκανών ή γύρω από τις άκρες των νησιών ή των υψηλών σημείων στον πυθμένα κατά την απόθεση του ασβεστόλιθου. Τα υδροθερμικά διαλύματα που εισήγαγαν τα ορυκτά μεταλλεύματος (κυρίως το γαληνίτη και το σφαλερίτη) προφανώς ρέουν μέσω των ψαμμιτών και των συσσωματωμάτων που συνήθως υπόκεινται στους ασβεστόλιθους. Όπου συναντήσουν ένα εμπόδιο στη ροή, όπως ένα άκρο λεκάνης, τα διαλύματα μετακινούνται και αντιδρούν με τον ασβεστόλιθο, αποθέτοντας μεταλλεύματα.

Οι εναποθέσεις φιλοξενούνται σε ασβεστόλιθο ή δολομίτη που αποτέθηκε σε ρηχές θαλάσσιες πλατφόρμες σε ένα τεκτονικά σταθερό περιβάλλον ενδοπλάκας. Όπως είναι αναμενόμενο σε ένα τέτοιο περιβάλλον, οι ηφαιστειακοί βράχοι, οι πτυχές και οι περιφερειακές μεταμορφώσεις απουσιάζουν κατά το γενικό κανόνα. Οι αποθέσεις MVT βρίσκονται συνήθως πολύ κοντά στους εβαπορίτες ή / και κάτω από τις ασυμφωνίες (Sass-Gustkiewicz et al. 1982).

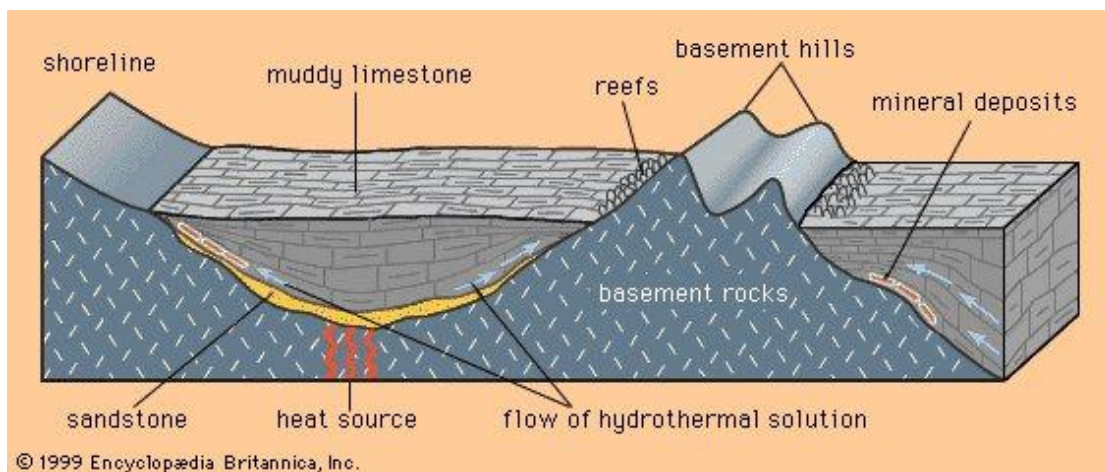
Οι αποθέσεις είναι ασύμφωνες με τα στρώματα σε κλίμακα απόθεσης και περιορίζονται σε συγκεκριμένους στρωματογραφικούς ορίζοντες. Οι δομές που φιλοξενούν μέταλλευμα είναι συνήθως ζώνες δολομίτη. Αυτές οι δομές μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο κατακόρυφες, να διασχίζουν στρώματα σε υψηλές γωνίες ή μπορεί να έχουν φακοειδές σχήμα που εκτείνεται προς την ίδια κατεύθυνση με τη στρώση (Sass-Gustkiewicz et al. 1982).

Μεταξύ των πολλών διάσημων αποθέσεων MVT είναι οι μεγάλες αποθέσεις ψευδαργύρου του Pine Point στα βορειοδυτικά εδάφη του Καναδά, η περιοχή ψευδαργύρου Tri-State με επίκεντρο το Joplin, Missouri, ΗΠΑ, η Viburnum trend του νοτιοανατολικού Μιζούρι, οι αποθέσεις στο Cumberland της Αγγλίας και στην Trepča της Σερβίας και τα κοιτάσματα μολύβδου-ψευδαργύρου στις πεδιάδες της κεντρικής Ιρλανδίας.

Μια τελική κατηγορία υδροθερμικής εναπόθεσης ονομάζεται στρωματόμορφη επειδή τα μεταλλεύματα περιορίζονται πάντα σε συγκεκριμένα στρώματα και κατανέμονται με τρόπο που μοιάζει με σωματίδια σε ιζηματογενή πετρώματα. Επειδή το στρώμα των αποθέσεων μοιάζει τόσο πολύ με ιζηματογενή πετρώματα, η διαμάχη περιβάλλει την προέλευσή τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις σε έρευνα, όπως οι εναποθέσεις χαλκού του Λευκού Πεύκου του Μίσιγκαν, οι ιστορικές αποθέσεις του Kupferschiefer της Γερμανίας και της Πολωνίας και οι σημαντικές εναποθέσεις χαλκού στη Ζάμπια, έδειξε ότι η προέλευση είναι παρόμοια με αυτή των αποθέσεων MVT δηλαδή, ένα υδροθερμικό διάλυμα κινείται μέσω ενός πορώδους υδροφορέα στη βάση ενός σωρού ιζηματογενών στρωμάτων και, σε ορισμένα σημεία, εναποθέτει μεταλλεύματα στους υπερκείμενους σχιστόλιθους. Η κύρια διαφορά μεταξύ των στρωματόμορφων αποθέσεων και των εναποθέσεων MVT είναι ότι, στην περίπτωση των στρωματόμορφων αποθέσεων, τα πετρώματα-ξενιστές είναι γενικά σχιστόλιθοι (λεπτόκοκκοι, κλαστικοί ιζηματογενείς βράχοι) που περιέχουν σημαντικές ποσότητες οργανικής ύλης και λεπτόκοκκο σιδηροπυρίτη (Hagdorn και Simon, 2005).

Αρκετές από τις μεγαλύτερες και πιο διάσημες αποθέσεις μολύβδου-ψευδαργύρου στον κόσμο είναι στρωματόμορφες. Είναι επίσης από τα πιο αμφιλεγόμενα στην προέλευση, επειδή δεν υπάρχουν προφανείς υδροφορείς που βρίσκονται κάτω από τα ορυκτά στρώματα. Τρία παραδείγματα είναι στην Αυστραλία: Broken Hill στη Νέα Νότια Ουαλία, Mount Isa στο Queensland και McArthur River στη Βόρεια Επικράτεια. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η περίφημη καναδική απόθεση μολύβδου-ψευδαργύρου στο Sullivan της British Columbia. Στο Broken Hill, ο μεταμορφισμός έχει σχεδόν αποκρύψει πλήρως το αρχικό γεωλογικό περιβάλλον, αλλά στις άλλες τρεις περιπτώσεις, στοιχεία δείχνουν ότι τα υδροθερμικά ρευστά κινούνται προς τα πάνω κατά μήκος ενός ρήγματος από βαθύτερα, μέσα σε μια ιζηματογενή λεκάνη και στη συνέχεια αντιδρούν με σχιστόλιθο ενώ ήταν ακόμα λάσπη στο πυθμένα. Οι λεπτομέρειες των πραγματικών διαδικασιών παραμένουν αμφιλεγόμενες (Britannica, 1999).

Τα υπόγεια ύδατα είναι εκείνο το μέρος των υπογείων υδάτων που βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή το νερό στη ζώνη κορεσμού. Η διαφορά μεταξύ των υπόγειων και των υδροθερμικών διαλυμάτων είναι ότι τα υπόγεια ύδατα διατηρούν πολλά από τα αρχικά χημικά χαρακτηριστικά τους και παραμένουν εντός ενός χιλιομέτρου ή λιγότερο της επιφάνειας. Τέτοια νερά δημιουργούν δύο σημαντικές κατηγορίες αποθέσεων (Hagdorn και Simon, 2005).



Εικόνα 5: Η σχέση μεταξύ των κοιτασμάτων τύπου Mississippi Valley, των άκρων των ιζηματογενών λεκανών και της ροής υδροθερμικών διαλυμάτων. Britannica, (1999).

6. Κοιτάσματα χρυσού

Ο χρυσός μπορεί να εμφανιστεί ως αποθέσεις που ονομάζονται φλέβες σε ραγισμένα πετρώματα. Μπορεί επίσης να διασκορπιστεί μέσα στον φλοιό της Γης. Τα περισσότερα κοιτάσματα φλεβών σχηματίζονται όταν τα θερμαινόμενα ρευστά που φέρουν χρυσό κυκλοφορούν μέσω των πετρωμάτων, μαζεύοντας χρυσό και συγκεντρώνοντάς τον σε νέες θέσεις στο φλοιό. Οι χημικές διαφορές στα ρευστά και τα πετρώματα, καθώς και οι φυσικές διαφορές στα πετρώματα, δημιουργούν πολλούς διαφορετικούς τύπους αποθέσεων φλεβών (Cameron, Hattori, 1987).

Πάνω από εκατομμύρια χρόνια, χρυσές νιφάδες και ψήγματα που έχουν φθαρεί, παρασύρονται από τις φλέβες σε υδάτινα σώματα. Ο βαρύς χρυσός εγκαθίσταται σε ρέματα, λίμνες και κοίτες ποταμών, και στον πυθμένα της θάλασσας, σχηματίζοντας κοιτάσματα. Τα υπερθερμαινόμενα νερά αναδύονται από "καμινάδες" στον βυθό. Αυτό συμβαίνει όταν η τεκτονική δραστηριότητα αναγκάζει την εξάπλωση του ωκεάνιου φλοιού (Augustin, Gaboury, και Crevier, 2017). Ορυκτά πλούσια σε μέταλλα, συμπεριλαμβανομένων μικρών ποσοτήτων χρυσού, εναποτίθενται, καθώς το θερμαινόμενο νερό που περιέχει το χρυσό αναμιγνύεται με το κρύο θαλασσινό νερό.

Το «χρυσό» νερό που θερμαίνεται από λιωμένο μάγμα, στο ρηχό φλοιό της Γης, σχηματίζει μια ποικιλία από κοιτάσματα χρυσού. Υδροθερμικά-ζεστά νερά-ρευστά πλούσια σε θείο σχηματίζουν μεταλλεύματα χρυσού σε πετρώματα ενεργών ηφαιστειών. Οι αποθέσεις του Summitville στο Κολοράντο, είναι ένα παράδειγμα.

Ορυκτά χρυσού σχηματίζονται σε καυτά πετρώματα μέσα και γύρω από τα ηφαίστεια. Υδροθερμικά ρευστά με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και χρυσό σχηματίζονται όταν οι καυτοί βράχοι θερμαίνουν το υπόγειο νερό. Ένα παράδειγμα αυτών των ρευστών με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο είναι οι θερμές πηγές όπως αυτές του Yellowstone National Park. Τα μεταλλεύματα του Round Mountain στη Νεβάδα, είναι τυπικά κοιτάσματα χαμηλής περιεκτικότητας θείου (Cameron, Hattori, 1987). Οι χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ καυτών ρευστών και ιζηματογενών πετρωμάτων σχηματίζουν εναποθέσεις μικροσκοπικών, ακόμη και αόρατων, σωματιδίων χρυσού. Το ορυχείο Meikle της Νεβάδας περιέχει τέτοιο "αόρατο" χρυσό. Καθώς ανεβαίνουν τα βουνά, στο φλοιό της Γης δημιουργούνται ρωγμές. Τα υδροθερμικά ρευστά ρέουν σε αυτούς τους χώρους και σχηματίζουν φλέβες χαλαζία που φέρουν χρυσό. Αυτά τα ρευστά δημιουργούνται από θερμούς, βαθιά θαμμένους μεταμορφικούς βράχους. Τα Mother Lode και άλλες αποθέσεις της χρυσής ζώνης της Σιέρα

Νεβάδα στην Καλιφόρνια είναι παραδείγματα. Αρχαίες αποθέσεις χρυσού βρίσκονται σε ζώνες greenstone: ηφαιστειακές ζώνες άνω των 2,3 δισεκατομμυρίων ετών. Αν και τα κοιτάσματα χρυσού συνεχίζουν να σχηματίζονται σε ενεργές ηφαιστειακές περιοχές, οι ζώνες από πράσινες πέτρες και οι αποθέσεις χρυσού τους δεν σχηματίζονται πλέον στη Γη σήμερα. Στα παραδείγματα περιλαμβάνονται τμήματα του Καναδά, της Ζιμπάμπουε και της Αυστραλίας (Lubben et al. 2012).

6.1 Οικονομική εκμετάλλευση χρυσού

Οι εναποθέσεις χρυσού σχηματίζονται στην επιφάνεια της Γης όταν η δράση του καιρού εκθέτει τον χρυσό από άλλες, παλαιότερες αποθέσεις. Πολλές αποθέσεις είναι πρόσφατης γεωλογικής εποχής, αλλά μερικές είναι δισεκατομμύρια ετών. Στο μεγαλύτερο μέρος του φλοιού της Γης, οι συγκεντρώσεις χρυσού είναι πολύ χαμηλές. Κατά μέσο όρο, ένας τόνος πετρωμάτων από το φλοιό περιέχει 0,005 γραμμάρια χρυσού σε σύγκριση με 58.000 γραμμάρια σιδήρου.

Κάθε χρόνο, η παγκόσμια εξόρυξη χρυσού προσθέτει περίπου 2.500-3.000 τόνους στο συνολικό επίγειο απόθεμα χρυσού. Ενώ η παραγωγή χρυσού έχει δείξει ανοδική τάση τα τελευταία χρόνια, αυτό είναι πιθανό να μειωθεί τα επόμενα (Groves et al. 1998). Η ακριβής εκτίμηση της ποσότητας χρυσού που βρίσκεται ακόμα στο έδαφος δεν είναι εύκολη υπόθεση και αυτή η εκτίμηση μπορεί να αλλάξει σε απόκριση με διάφορους παράγοντες, όπως:

- η τιμή του χρυσού
- το κόστος εξόρυξης (το οποίο καθορίζει εάν οι αποθέσεις χρυσού είναι οικονομικές ή όχι)
- η εξερεύνηση ορυχείων και οι νέες ανακαλύψεις
- η προηγούμενη κάλυψη και οι δυνατότητες γεωλογικής έρευνας

Οι μεταλλευτικές εταιρείες εκτιμούν πόση ποσότητα χρυσού παραμένει σε κάθε έργο εξόρυξης που λειτουργούν. Αυτή μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: τα αποθέματα (χρυσός που είναι οικονομικός για την εξόρυξη στην ισχύουσα τιμή του χρυσού) και τους πόρους (χρυσός που θα μπορούσε ενδεχομένως να είναι οικονομικά ωφέλιμος για εξόρυξη, υπό τον όρο περαιτέρω διερεύνησης ή σε διαφορετικό επίπεδο τιμών).

Ο χρυσός έχει βρεθεί σε κάθε ήπειρο εκτός από την Ανταρκτική. Εκτιμάται ότι παγκοσμίως, η συνολική ποσότητα χρυσού που έχει εξορυχθεί ποτέ είναι 152.000 τόνοι. Οι ωκεανοί είναι η μεγαλύτερη μεμονωμένη αποθήκη χρυσού στην επιφάνεια της Γης, που

περιέχει περίπου οκτώ φορές τη συνολική ποσότητα χρυσού που έχει εξορυχθεί μέχρι σήμερα. Ωστόσο, το τρέχον κόστος της εξόρυξης είναι περισσότερο από ό, τι αξίζει ο χρυσός (John, Garside και Wallace, 1999).

Από τα τεράστια κοιτάσματα στο Witwatersand της Νότιας Αφρικής έχουν εξορυχθεί πάνω από το 40% της συνολικής παραγωγής χρυσού στον κόσμο. Η προέλευση αυτών των αρχαίων μεταλλευμάτων, αρκετά δισεκατομμύρια χρόνια, είναι αμφιλεγόμενη. Ορισμένοι γεωλόγοι πιστεύουν ότι αυτές οι αποθέσεις σχηματίστηκαν όταν ρέματα έθεσαν τον χρυσό σε μια αρχαία λίμνη πριν από τρία δισεκατομμύρια χρόνια περίπου. Με την πάροδο του χρόνου, τα ιζήματα χρυσού στερεοποιήθηκαν. Άλλοι πιστεύουν ότι μετά τη δημιουργία μιας αρχικής απόθεσης προσχωματικών κοιτασμάτων, ο χρυσός επαναποτέθηκε από υδροθερμικά ρευστά, όπως αυτά σε μια καυτή πηγή (Agangi et al. 2016).

Ο χρυσός εξορύσσεται από τις περισσότερες χώρες της Γης. Αν και το ορυκτό εμφανίζεται σε πολλούς διαφορετικούς τύπους αποθέσεων πετρώματος και μεταλλεύματος, οι ίδιες οι εναποθέσεις είναι εκπληκτικά παρόμοιες. Για παράδειγμα, ο περισσότερος χρυσός εμφανίζεται σε φυσική μορφή, δηλαδή, καθαρός ή σχεδόν καθαρός και ο περισσότερος χρυσός δεν είναι εμφανώς κρυσταλλικός.

7. Υδροθερμική διέξοδος

Μια υδροθερμική διέξοδος είναι μια ρωγμή στον πυθμένα από την οποία απορρίπτεται το γεωθερμικά θερμαινόμενο νερό. Οι υδροθερμικές καμινάδες βρίσκονται συνήθως κοντά σε ηφαιστειακά ενεργά μέρη, περιοχές όπου οι τεκτονικές πλάκες απομακρύνονται σε κέντρα εξάπλωσης, λεκάνες και ωκεανούς. Οι υδροθερμικές εναποθέσεις είναι πετρώματα και εναποθέσεις μεταλλεύματος που σχηματίζονται από τη δράση των υδροθερμικών αεραγωγών.

Οι υδροθερμικές καμινάδες υπάρχουν επειδή η γη είναι γεωλογικά ενεργή και έχει μεγάλες ποσότητες νερού στην επιφάνειά της και εντός του φλοιού της. Κάτω από τη θάλασσα, οι υδροθερμικές καμινάδες μπορεί να σχηματίζουν χαρακτηριστικά που ονομάζονται μαύρες καμινάδες ή λευκές καμινάδες (Ardyna et al. 2019). Σε σχέση με την πλειονότητα των βαθέων υδάτων, οι περιοχές γύρω από τα υποβρύχια υδροθερμικά ανοίγματα είναι βιολογικά πιο παραγωγικές, συχνά φιλοξενούν πολύπλοκες κοινότητες που τροφοδοτούνται από τις χημικές ουσίες που διαλύονται στα ρευστά. Τα χημειοσυνθετικά βακτήρια και τα αρχαία (archaea) αποτελούν τη βάση της τροφικής αλυσίδας, υποστηρίζοντας διαφορετικούς οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των γιγαντιαίων σκουληκιών σωλήνων, των μαλακίων, των πεταλίδων και των γαρίδων (Kelley et al. 2005). Ενεργά υδροθερμικά ανοίγματα πιστεύεται ότι υπάρχουν στο φεγγάρι του Δία Europa και στο φεγγάρι του Κρόνου Enceladus, και θεωρείται ότι οι αρχαίοι υδροθερμικοί εξαεριστήρες υπήρχαν κάποτε στον Άρη (Brazelton et al. 2006).

Οι υδροθερμικές καμινάδες στον βαθύ ωκεανό σχηματίζονται συνήθως κατά μήκος των ωκεάνιων ραχών, όπως του Ανατολικού Ειρηνικού και του Μέσου Ατλαντικού. Αυτές είναι τοποθεσίες όπου δύο τεκτονικές πλάκες αποκλίνουν και σχηματίζεται νέα κρούστα. Το νερό που αναβλύζει από υδροθερμικές καμινάδες στον θαλάσσιο πυθμένα αποτελείται κυρίως από θαλασσινό νερό που εισέρχεται στο υδροθερμικό σύστημα κοντά στο ηφαιστειακό οικοδόμημα μέσω ρηγμάτων και πορωδών ιζημάτων ή ηφαιστειακών στρωμάτων, καθώς και λίγο μαγματικό νερό που απελευθερώνεται από το ανερχόμενο μάγμα. Στα χερσαία υδροθερμικά συστήματα, η πλειονότητα του νερού που κυκλοφορεί εντός των συστημάτων φουμαρόλης και των θερμοπιδάκων είναι μετεωρικό νερό και υπόγεια ύδατα που έχουν διεισδύσει στο θερμικό σύστημα από την επιφάνεια, αλλά συνήθως περιέχουν επίσης μέρος του μεταμορφικού νερού, του μαγματικού νερού και άλμης που απελευθερώνεται από το μάγμα. Το ποσοστό ποικίλλει από τοποθεσία σε τοποθεσία (Ardyna et al. 2019).

Η ζωή παραδοσιακά θεωρείται ότι οδηγείται από την ενέργεια του ήλιου, αλλά οι οργανισμοί βαθέων υδάτων δεν έχουν πρόσβαση στο φως του ήλιου, οπότε οι βιολογικές κοινότητες γύρω από τις υδροθερμικές καμινάδες πρέπει να εξαρτώνται από θρεπτικά συστατικά που βρίσκονται στις χημικές εναποθέσεις και τα υδροθερμικά ρευστά στα οποία ζουν (Kelley et al. 2005).

Οι υδροθερμικές καμινάδες αναγνωρίζονται ως ένας τύπος χημειοσυνθετικών οικοσυστημάτων (CBE) όπου η πρωτογενής παραγωγικότητα τροφοδοτείται από χημικές ενώσεις ως πηγές ενέργειας αντί του φωτός (chemoautotrophy). Οι υδροθερμικές κοινότητες αεραγωγών είναι σε θέση να διατηρήσουν τεράστιες ποσότητες ζωής επειδή οι οργανισμοί αυτοί εξαρτώνται από τα χημειοσυνθετικά βακτήρια για τροφή. Το νερό από τον υδροθερμικό αεραγωγό είναι πλούσιο σε διαλυμένα μέταλλα και υποστηρίζει μεγάλο πληθυσμό χημειοαυτοτροφικών βακτηρίων. Αυτά τα βακτήρια χρησιμοποιούν ενώσεις θείου, ιδιαίτερα υδρόθειο, μια χημική ουσία εξαιρετικά τοξική για τους περισσότερους γνωστούς οργανισμούς, για την παραγωγή οργανικού υλικού μέσω της διαδικασίας χημειοσύνθεσης (Brazelton et al. 2006).

7.1 Μαύρες και λευκές καμινάδες

Ορισμένες υδροθερμικές καμινάδες σχηματίζουν περίπου κυλινδρικές δομές καμινάδας. Αυτές σχηματίζονται από μέταλλα που διαλύονται στο ρευστό. Όταν το υπερθερμαινόμενο νερό έρχεται σε επαφή με το σχεδόν παγωμένο θαλασσινό νερό, τα ορυκτά καταβυθίζονται για να σχηματίσουν σωματίδια που προσθέτουν στο ύψος των στοιβών. Ορισμένες από αυτές τις δομές καμινάδας μπορούν να φτάσουν σε ύψος 60 μ. Ένα παράδειγμα μίας τόσο ψηλής ές καμινάδας είναι το "Godzilla", μια δομή στον πυθμένα του Ειρηνικού Ωκεανού κοντά στο Όρεγκον, η οποία φθάνει τα 40 μ (Tao et al, 2012).

Μία μαύρη καμινάδα βαθιάς θάλασσας είναι ένας τύπος υδροθερμικού αεραγωγού που βρίσκεται στον πυθμένα της θάλασσας, συνήθως στη ζώνη του λουτρού (με μεγαλύτερη συχνότητα σε βάθη από 2500 m έως 3000 m), αλλά και σε μικρότερα βάθη καθώς και βαθύτερα στην ζώνη της αβύσσου. Εμφανίζονται ως μαύρες δομές τύπου καμινάδας που εκπέμπουν ένα σύννεφο από μαύρο υλικό. Οι μαύρες καμινάδες εκπέμπουν συνήθως σωματίδια με υψηλά επίπεδα ανόργανων ουσιών που περιέχουν θείο ή σουλφίδια. Οι μαύρες καμινάδες σχηματίζονται σε χωράφια πλάτους εκατοντάδων μέτρων όταν υπερθερμαίνεται νερό κάτω από τον φλοιό της Γης μέσω του πυθμένα του ωκεανού (το νερό μπορεί να φτάσει

θερμοκρασίες πάνω από 400°C). Αυτό το νερό είναι πλούσιο σε διαλυμένα μέταλλα από τον φλοιό, κυρίως σουλφίδια. Όταν έρχεται σε επαφή με κρύο νερό του ωκεανού, πολλά ορυκτά καθιζάνουν, σχηματίζοντας μια μαύρη, δομή καμινάδας γύρω από κάθε αεραγωγό. Τα εναποτιθέμενα μεταλλικά σουλφίδια μπορούν να γίνουν τεράστιες εναποθέσεις μεταλλεύματος σουλφιδίου στο χρόνο. Μερικές μαύρες καμινάδες στο τμήμα των Αζορών της Ατλαντικής μεσοωκεάνιας ράχης είναι εξαιρετικά πλούσιες σε μέταλλο, με συγκεντρώσεις σιδήρου 24.000 μM (Tamsitt et al, 2017).

Οι μαύρες καμινάδες ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά το 1979 στον Ανατολικό Ειρηνικό από επιστήμονες από το Scripps Institution of Oceanography κατά τη διάρκεια του προγράμματος RISE. Παρατηρήθηκαν χρησιμοποιώντας το όχημα βαθιάς βύθισης ALVIN από το Ωκεανογραφικό Ίδρυμα Woods Hole. Τώρα, οι μαύροι καπνιστές είναι γνωστό ότι υπάρχουν στον Ωκεανό του Ατλαντικού και του Ειρηνικού, σε μέσο βάθος 2100 μέτρων. Οι πιο βόρειοι μαύροι καπνιστές είναι ένα σύμπλεγμα πέντε που ονομάζεται Loki Castle, που ανακαλύφθηκε το 2008 από επιστήμονες από το Πανεπιστήμιο του Μπέργκεν, στη μεσο-Ατλαντική ράχη μεταξύ της Γροιλανδίας και της Νορβηγίας. Αυτές οι μαύρες καμινάδες έχουν ενδιαφέρον καθώς βρίσκονται σε μια πιο σταθερή περιοχή του φλοιού της Γης, όπου οι τεκτονικές δυνάμεις είναι λιγότερες και κατά συνέπεια τα πεδία των υδροθερμικών αεραγωγών είναι λιγότερο συνηθισμένα. Οι βαθύτερες γνωστές μαύρες καμινάδες στον κόσμο βρίσκονται στο Cayman Trough, 5.000 μέτρα (3.1 μίλια) κάτω από την επιφάνεια του ωκεανού.

Στις λευκές καμινάδες σχηματίζονται ελαφρύτερα ορυκτά, όπως εκείνα που περιέχουν βάριο, ασβέστιο και πυρίτιο. Αυτές οι καμινάδες τείνουν επίσης να έχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες επειδή είναι γενικά απομακρυσμένες από την πηγή θερμότητας τους.

Οι ασπρόμαυρες καμινάδες μπορεί να συνυπάρχουν στο ίδιο υδροθερμικό πεδίο, αλλά γενικά αντιπροσωπεύουν εγγύς (κοντά) και απομακρυσμένες καμινάδες στην κύρια ζώνη ανόδου, αντίστοιχα (Tao et al, 2012). Ωστόσο, οι λευκές καμινάδες αντιστοιχούν κυρίως στα στάδια εξασθένισης τέτοιων υδροθερμικών πεδίων, καθώς οι μαγνητικές πηγές θερμότητας γίνονται σταδιακά πιο απομακρυσμένες από την πηγή (λόγω της κρυστάλλωσης του μάγματος) και τα υδροθερμικά ρευστά κυριαρχούνται από το θαλασσινό νερό αντί για το μαγματικό νερό. Τα μεταλλικά ρευστά από αυτόν τον τύπο καμινάδας είναι πλούσια σε ασβέστιο και σχηματίζουν κυρίαρχα πλούσια σε θειικά άλατα (δηλ. βαρύτη και ανυδρίτη) και ανθρακικά άλατα (Tamsitt et al, 2017).

8. Υδροθερμικά κοιτάσματα στην Ελλάδα

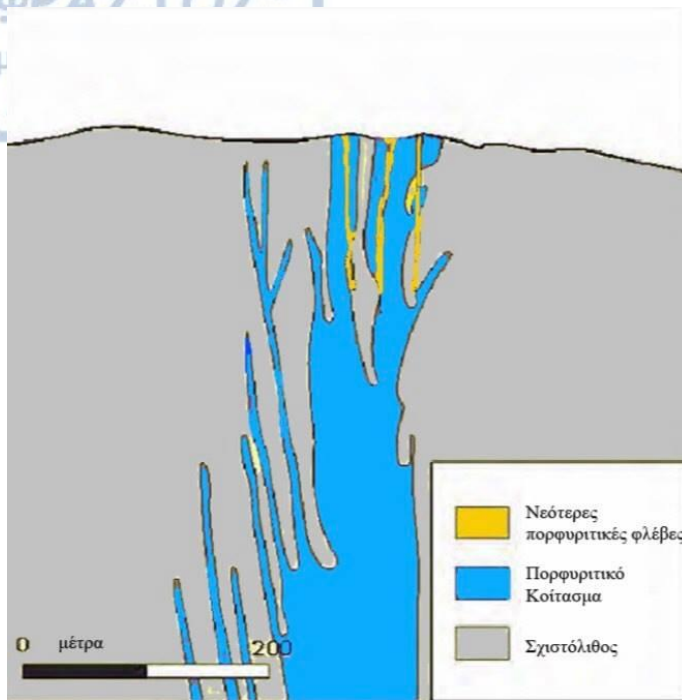
8.1 Σκουριές Χαλκιδική

Η περιοχή Σκουριές, η οποία βρίσκεται στη Χαλκιδική, φιλοξενεί ένα πορφυριτικό κοιτάσμα Cu-Au. Σε απόσταση περίπου 3 χλμ. από το χωριό Μεγάλη Παναγία ένα σώμα μάγματος διείσδυσε στους αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους και γνεύσιους της ενότητας του Βερτίσκου (Κιούσης, 2012). Ευρήματα της περιοχής αποκαλύπτουν ότι εκμετάλλευση αυτού του κοιτάσματος συνέβαινε και στα αρχαία χρόνια και πιο συγκεκριμένα τον 5^ο με 2^ο αιώνα π.Χ. Σύμφωνα με τους Kockel et al., (1977), όπως αναφέρει ο Κιούσης, (2012), το κοιτάσμα αυτό έχει αναπτυχθεί εντός της Σερβομακεδονικής μάζας η οποία περιλαμβάνει την ενότητα Κερδυλλίων και την ενότητα του Βερτίσκου.

Ο Frei, (1992), τονίζει ότι η ηλικία της πορφυριτικής διείσδυσης μετά από ραδιοχρονολογήσεις υπολογίστηκε περίπου 19 ± 1 εκ. έτη (Μειόκαινο). Οι διαδοχικές φάσεις διείσδυσης διακρίνονται ορυκτολογικά σε τέσσερις οι οποίες με βάση χρονολογίας είναι: ροζ μονζονιτικός πορφύρης, κύριος πορφύρης, ενδιάμεσος πορφύρης και πορφύρης τελικού σταδίου (Κιούσης, 2012). Η μεταλλοφορία είναι ένα πλέγμα φλεβιδίων το οποίο αποτελείται από πολλά φλεβίδια και φλέβες. Κύρια ορυκτά είναι ο σιδηροπυρίτης, ο βορνίτης, ο χαλκοπυρίτης, ο μαγνητίτης και σε πιο μικρές ποσότητες ο γαληνίτης και ο τετραεδρίτης. Επιπλέον έχει βρεθεί χρυσός μέσα σε εγκλείσματα χαλκοπυρίτη και βορνίτη.

Το κοιτάσμα των Σκουριών έχει υψηλή περιεκτικότητα σε Cu και Au λόγω το ότι τα υδροθερμικά ρευστά είναι μαγματικής προέλευσης. Σύμφωνα με το Λούκο (2012), ο μεταλλοφόρος πορφύρης των Σκουριών εμφανίζεται στην επιφάνεια με διάμετρο η οποία είναι περίπου 200 m. Η κεντρική ζώνη περιλαμβάνει δύο περιοχές με υψηλή συγκέντρωση. Η μία βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια και η δεύτερη στα 350 m κάτω από την επιφάνεια.

Ο Wellmer (1998), όπως υποστηρίζει ο Κιούσης, (2012), αναφέρει ότι για τα συμπυκνώματα μετάλλων όπως είναι ο χαλκός η οικονομική τους αξία υπολογίζεται με βάση την περιεκτικότητα σε διάφορα μέταλλα, τα συνολικά ποσοστά ανάκτησης τους και τις αξίες αυτών ως καθαρά μέταλλα. Έπειτα από αυτά γίνεται αφαίρεση του κόστους μεταφοράς και επεξεργασίας (Κιούσης, 2012).



Σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης του πορφύρη στις “Σκουριές” Χαλκιδικής (Λούκος, 2012).

8.2 Θράκη πορφυριτικός Μολυβδαινίτης

Κατά την περίοδο Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου, δημιουργήθηκε ένα ηπειρωτικό μαγματικό τόξο στο οποίο ανήκει σήμερα η περιοχή της νοτιοανατολικής Ροδόπης και το οποίο απλώνεται από τη Σερβία έως την δυτική Ανατόλια. Σήμερα στην περιοχή της Θράκης υπάρχουν εμφανίσεις πορφυριτικού μολυβδαινίτη και συγκεκριμένα σε τρεις περιοχές, τη Μελίταινα, την Παγώνη ράχη και την Μαρώνεια. Σημαντικό κομμάτι αποτελεί το χημικό στοιχείο Ρήνιο, ένα στοιχείο αρκετά σπάνιο το οποίο συνδέεται σχεδόν αποκλειστικά με το ορυκτό μολυβδαινίτη σε αποθέσεις πορφυριτικού τύπου. Οι Μέλφος κ.ά (2001), πραγματοποίησαν αναλυτικές μεθόδους και αναφέρουν ότι στην περιοχή της Μελίταινας το πέτρωμα ξενιστής του μεταλλεύματος είναι ένας υπό ηφαιστειακός δακίτης, στην περιοχή Παγώνη ράχη είναι ένας Ολιγοκαινικός ανδεσίτης και στην περιοχή Μαρώνεια το μέταλλευμα συνδέεται με μικρογρανίτη.

Στις περιοχές αυτές ο μολυβδαινίτης εμφανίζεται σε διάσπαρτη μορφή ή ως υλικό πληρώσεις διακλάσεων και ρωγμών του πετρώματος, ενώ τα περιβάλλοντα πετρώματα του μεταλλεύματος εμφανίζουν έντονες υδροθερμικές εξαλλοιώσεις. Ακόμη, και στις τρεις

εμφανίσεις του μεταλλεύματος, η περιεκτικότητα σε Ρήνιο είναι αρκετά υψηλή και αποτελεί μία από τις υψηλότερες οι οποίες έχουν καταγραφεί έως και σήμερα στην διεθνή βιβλιογραφία. Τέλος ενδιαφέρον είναι το γεγονός της σχέσης των πολυτύπων του μολυβδαινίτη με τις περιεκτικότητες που παρουσιάζει το Ρήνιο (Μέλφος, Βουδούρης, Αρίκας και Βαβελίδης, 2001).

8.3 Λαύριο

Η διάσημη περιοχή του Λαυρίου (Pb-Zn-Ag) της νοτιοανατολικής Αττικής, είναι μια από τις παλαιότερες περιοχές εξόρυξης στον κόσμο, με το πρώτο άνοιγμα πριν από σχεδόν 3.000 χρόνια. Οι αρχαίοι Έλληνες ξεκίνησαν την υπόγεια εξόρυξη γύρω στον 7ο αιώνα π.Χ. και συνεχίστηκε μέχρι τον 1ο αιώνα π.Χ. Όπως αναφέρει ο Conofagos, (1980), (σύμφωνα με τους Bonsallet al. 2011), 1,4 εκατομμύρια τόνοι (Mt) σε 20% Pb και 3.500 t Ag σε 400 g / t εξήχθησαν κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. Η σύγχρονη εξόρυξη της περιοχής διεξήχθη από την Ελληνική Εταιρεία Μεταλλικών Έργων Λαυρίου (1873–1917) και το Compagnie Française des Mines du Laurium. Αυτές οι εταιρείες αφαίρεσαν περίπου 0,9 Mt στο 3% Pb και 4.200 t Ag σε 140 g / t.

Η περιοχή του Λαυρίου βρίσκεται στην Αττικοκυκλαδίτικη ζώνη, η οποία εκτείνεται από το νότιο τμήμα της Ελλάδας, μέσω των Κυκλάδων, και σε δυτικά τμήματα της Τουρκίας. Διάφοροι τύποι θειούχου μεταλλοφορίας βασικών και πολύτιμων μετάλλων εμφανίζονται σε αυτήν τη ζώνη, συμπεριλαμβανομένης της επιθερμικής φλέβας, skarn και κοιτάσματα αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων. Χαμηλής και υψηλής περιεκτικότητας θειούχα επιθερμικά κοιτάσματα χρυσού, καθώς και βασική φλεβική μεταλλοφορία συμβαίνει στις Κυκλάδες στις, για παράδειγμα, στην Κύθνο, στην Αντίπαρο, στη Μήλο, στην Τήνο, στην Άνδρο και στη Μύκονο, ενώ ο τύπος skarn υπάρχει στα νησιά Σέριφος, Σαντορίνη και Τήνος.

Στην περιοχή του Λαυρίου υπάρχουν μεταλλοφορίες Pb-Zn-Ag λόγω αντικατάστασης σε ανθρακικά. Έχουν στενή σχέση με το γρανοδιόριτη του Μειοκαίνου και όξινες απλιτικές φλέβες. Αυτός ο γρανοδιόριτης είναι συνδεδεμένος με αποθέσεις μολυβδαινίτη και επιδοτικού skarn. Τα μεταλλεύματα τα οποία είναι κυρίως στρωματόμορφα, έχουν ως πετρώματα ξενιστές το μάρμαρο, σχιστόλιθους και κυανοσχιστόλιθους. Στην περιοχή υπάρχει μια μεταλλική παραγένεση η οποία αποτελείται από σουλφίδια βασικών μετάλλων, σουλφοαλάτων Ag, Sn, Pb, Bi, As και Sb, φθορίτη, Ca ορυκτά και Βαρύτη (Bonsall et al. 2011).

Παρεμβολές γρανίτη συμβαίνουν στην περιοχή του Λαυρίου, η μεγαλύτερη από τα οποία είναι το απόθεμα γρανιτών της Πλάκας ($\sim 0,5 \text{ km}^2$), που εμφανίζεται κοντά στο κέντρο της περιοχής όπου εισβάλλει στις σχισμές Kaesariani και το Άνω Μάρμαρο. Συντίθεται κυρίως από χαλαζία, αλκαλιούχο άστριο, πλαγιόκλαστο (ανδεσίνη-ολιγοκλάστο), βιοτίτη, κερροσθελβη, τιτανίτη, απατίτη, ζιργκόνιο και μαγνητίτη.

Υπάρχουν τουλάχιστον πέντε τύποι μεταλλοφορίας σουλφιδίων στην περιοχή του Λαυρίου. Μεταλλοφορία πορφυρικού τύπου, σε στυλ breccia μεταλλοφορία (και μεταλλοφορία skarn. Η μεταλλοφορία Pb-Zn-Ag εμφανίζεται σε σχιστόλιθο και μάρμαρα και στην επαφή μεταξύ μαρμάρου και γρανοδιορίτη (Bonsall et al. 2011).

8.4 Το νησί της Λέσβου

Η Λέσβος είναι ένα από τα μεγαλύτερα ελληνικά νησιά και μάλιστα το τρίτο σε μέγεθος νησί της Ελλάδος. Βρίσκεται απέναντι από τις ακτές της Τουρκίας στο βορειοανατολικό Αιγαίο. Εκτός από την φυσική ομορφιά του, το νησί έχει και μεγάλο γεωλογικό ενδιαφέρον και διαθέτει αρκετά μνημεία. Χαρακτηριστικό του νησιού είναι η ύπαρξη πολλών ηφαιστειακών πετρωμάτων καθώς και του ενεργού γεωθερμικού πεδίου. Τα ηφαιστειακά πετρώματα είναι μειοκαινικής ηλικίας ενώ το υποκείμενο υπόβαθρο είναι παλαιοζωικής ηλικίας. Οι κύριοι σχηματισμοί από τους οποίους δομείται το νησί είναι αλπικοί και προαλπικοί μεταμορφωμένοι σχηματισμοί. Τα ηφαιστειακά πετρώματα είναι τεταρτογενούς και νεογενούς περιόδου, ενώ είναι κυρίως βασικού, ενδιάμεσου και όξινου χαρακτήρα. Η γεωλογία της Λέσβου είναι ιδανική για την δράση υδροθερμικών ρευστών, καθώς αποτελείται από μεγάλες καλδέρες με ένα αρκετά πυκνό δίκτυο ρηγμάτων, το οποίο επιτρέπει την άνοδο τους. Έτσι είναι πιο εύκολη η αλληλεπίδραση τους με τα περιβάλλοντα πετρώματα και τελικά η υδροθερμική εξαλλοίωση και ο σχηματισμός πολύτιμων και βασικών μετάλλων (Βαμβουκάκης, 2009).

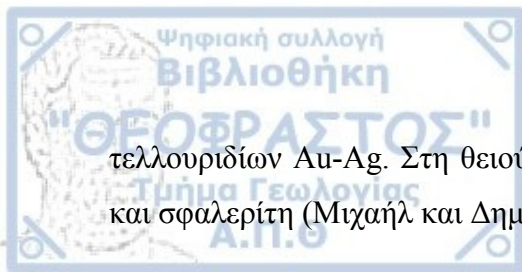
Κατά την περίοδο του ανώτερου Μειοκαίνου, στο βορειοανατολικό Αιγαίο συνέβησαν τεκτονικές δραστηριότητες και κυρίως εφελκυσμός, ο οποίος οδήγησε σε μεγάλου εύρους ρήγματα. Η συγκεκριμένη περιοχή έχει έντονη επιρροή και από το μεγάλο ρήγμα μετασχηματισμού της Βόρειας Ανατολίας. Στη Λέσβο κάποια κανονικά ρήγματα είναι ακόμη και σήμερα ενεργά και οδηγούν τα θερμά ρέστα προς την επιφάνεια από μεγάλα βάθη. Αυτά τα κανονικά ρήγματα δημιουργήθηκαν κατά την περίοδο του νεοκαίνου και αποτελούν τα σημαντικότερα του νησιού.

8.5 Το επιθερμικό κοίτασμα στο Πέραμα

Στην περιοχή Πετρωτό έχουν παρατηρηθεί πολλές επιθερμικές ζώνες. Τα κοιτάσματα σε αυτή την περιοχή συγκαταλέγονται στα υψηλής θεϊκότητας επιθερμικά συστήματα λόγω της ορυκτολογικής τους σύστασης. Το Πετρωτό είναι ανάμεσα στα όρια του Έβρου και της Ροδόπης, 20χλμ. από την πόλη Αλεξανδρούπολη. Οι λεκάνες της περιοχής οι οποίες υπήρξαν στο Αιγαίο κατά τη διάρκεια του Ηωκαίνου – Μειοκαίνου, δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονικών δραστηριοτήτων από τη σύγκρουση της Αφρικανικής και Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας. Η Αφρικανική πλάκα βυθίστηκε κάτω από την Ευρασιατική και δημιούργησε μεγάλη ηφαιστειακή δραστηριότητα στα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.

Το επιθερμικό κοίτασμα του Περάματος βρίσκεται νότιο-ανατολικά του βυθίσματος των Πετρωτών και εξελίσσεται στους μεταμορφωμένους σχηματισμούς της ενότητας Μάκρης. Οι κυριότερες δομές στο Πέραμα είναι επικλαστικά πετρώματα, ηφαιστειοκλαστικοί ψαμμίτες, κλαστικοί ασβεστόλιθοι, κισσηρώδεις λαπιλλικοί τόφφοι, υαλοκλαστίτες και κρυσταλλοκλαστικοί τόφφοι. Σε αυτή την περιοχή διακρίνονται δύο είδη υδροθερμικών εξαλλοιώσεων. Αρχικά η πυριτική εξαλλοίωση, η οποία χωρίζεται σε κρυσταλλική και οπαλιούχα. Το SiO_2 στην κρυσταλλική εξαλλοίωση εμφανίζεται ως λευτοκρυσταλλικός, αδροκρυσταλλικός η ζωνώδης χαλαζίας. Αυτός ο τύπος εξαλλοίωσης αναπτύσσεται στο Λόφο Περάματος και διασχίζεται από χαλαζιακές φλέβες. Στην περιοχή Βράχο Περάματος αναπτύσσεται η οπαλιούχα εξαλλοίωση σχηματίζοντας ένα κάλυμμα μορφής sinter. Γύρω από το κάλυμμα υπάρχουν μικρές φλέβες με αργιλικά ορυκτά και αλουνίτη. Η αργιλική εξαλλοίωση χαρακτηρίζεται από χαλαζία, καολίνη και σερίκίτη, ενώ βρίσκεται στο Λόφο Περάματος και αναπτύσσεται κάτω από πυριτικές ζώνες (Voudouris et al. 2003).

Η βασική τεκτονική ρύθμιση είναι η επαφή των μεταμορφωμένων πετρωμάτων με τους Τριτογενείς ηφαιστίτες. Το επιθερμικό αυτό κοίτασμα έχει έκταση 700 μ και πλάτος 300 μ. ενώ τα αποθέματα υπολογίζονται σε 11.2 εκ. τόνους. Η περιεκτικότητα σε Au είναι 3,8 gr/t και σε Ag 8,5 gr/t με cut off Au 1.3 gr/t. Η εμφάνιση του χρυσού γίνεται ως μικροί διάσπαρτοι κόκκοι μέσα στο φλεβικό χαλαζία ή είναι συνδεδεμένος με το οξειδωμένο μέρος της μεταλλοφορίας. Οι φλέβες του χαλαζία οι οποίες φιλοξενούν το χρυσό έχουν πάχος 10-20 εκ. έως και 2 μ και είναι σχεδόν παράλληλες με την ΒΔ επιθερμική ζώνη. Ο χρυσός μπορεί να βρεθεί επίσης με υτομικροσκοπική μορφή στον σιδηροπυρίτη και με τη μορφή



τελλουριδίων Au-Ag. Στη θειούχα μεταλλοφορία συμμετέχουν επίσης εναργίτης, σταννίτης και σφαλερίτη (Μιχαήλ και Δημήτρουλα, 2004).

Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, γίνεται αντιληπτή η σημασία των κοιτασμάτων και συγκεκριμένα των υδροθερμικών κοιτασμάτων και πως μέσα από αυτά ο άνθρωπος μπορεί να εκμεταλλευτεί πλήθος χρήσιμων στοιχείων. Από την αρχαιότητα, οι πολιτισμοί προσπαθούσαν να εκμεταλλευτούν μέταλλα και ορυκτά με σκοπό να κατασκευάσουν όπλα, σκεύη μαγειρικής και άλλα χρήσιμα αντικείμενα. Σήμερα η κοινωνία όχι απλώς διευκολύνει τη λειτουργία της, αλλά δεν μπορεί να υπάρξει χωρίς κάποια μεταλλεύματα και κοιτάσματα όπως οι ορυκτοί πόροι.

Οι γεωλόγοι αναζητούν συνεχώς περισσότερες αποθέσεις μεταλλεύματος για να καλύψουν τη συνεχή ζήτηση. Επειδή η συνεχής βιομηχανική ανάπτυξη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους ορυκτούς πόρους, το έργο τους είναι ζωτικής σημασίας για τη σύγχρονη κοινωνία. Αυτό γίνεται πιο δύσκολο με την πάροδο του χρόνου, καθώς στο παρελθόν έχουν ήδη αξιοποιηθεί τα πιο «εύκολα» προσβάσιμα κοιτάσματα μεταλλεύματος κοντά στην επιφάνεια της Γης.

Για αυτό το λόγο, έχουν αναπτυχθεί πιο πολύπλοκες τεχνικές για τον εντοπισμό νέων αποθεμάτων. Ωστόσο, οι καλύτερες και αποδοτικότερες τεχνικές επεξεργασίας σημαίνουν ότι είναι πλέον δυνατόν να γίνει εκμετάλλευση των αποθέσεων μεταλλεύματος που προηγουμένως δεν θεωρούνταν οικονομικές. Είναι σημαντικό να συνεχιστούν οι έρευνες πάνω στα γεωλογικά κοιτάσματα και κυρίως στα υδροθερμικά κοιτάσματα, και στο μέλλον να γίνουν πιο συγκεκριμένες μελέτες με στόχο την πλήρη κατανόηση και την όσο πιο δυνατόν κερδοφόρα εκμετάλλευσή τους.

Βιβλιογραφία

- Agangi, A., Hofmann, A., Eickmann, B., Marin-Carbonne, J. and Reddy, SM. ((2016). An atmospheric source of S in Mesoarchaeon structurally-controlled gold mineralisation of the Barberton Greenstone Belt. *Precambrian Res.* 285:10–20. doi: 10.1016/j.precamres.
- Ardyna, M., Lacour, L., Sergi, S. et al. ((2019). Hydrothermal vents trigger massive phytoplankton blooms in the Southern Ocean. *Nat Commun* 10, 2451. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09973-6>
- Atkinson, W. and Einaudi, M. T., (1978). Skarn formation and mineralization in the contact aureole at Carr Fork, Bingham, Utah. *Economic Geology*
- Augustin, J., Gaboury, D., Crevier, M. ((2017). Structural and gold mineralizing evolution of the world-class orogenic Mana District, Burkina Faso: Multiple mineralizing events during 150 million years. *Ore Geol Rev.* 91:981–1012. doi: 10.1016/j.oregeorev.
- Bonsall T.A., Spry, P.G., Voudouris P.C., Tombros S.F., St. Seymour, K., and Melfos V. ((2011). The geochemistry of carbonate-replacement Pb-Zn-Ag mineralization in the Lavrion district, Attica, Greece: Fluid Inclusion, stable isotope, and rare earth element studies: *Economic Geology*, June-July 2011, v. 106, p. 619-651, DOI:10.2113/econgeo.106.4.619.
- Bookstrom, A.A. ((1981). Tectonic setting and generation of Rocky Mountain porphyry molybdenum deposits, in Dickinson, W.D., and Payne, W.D., eds., *Relations of Tectonics to Ore Deposits in the Southern Cordillera: Arizona Geological Society Digest*, v. 14, p. 251-226.
- Brazelton, W. J., Schrenk, M. O., Kelley, D. S. & Baross, J. A. ((2006). Methane and sulfur metabolizing microbial communities dominate in the Lost City hydrothermal vent ecosystem. *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 6257–6270 (2006).
- Britannica, (1999). Mississippi Valley type. <https://www.britannica.com/science/mineral-deposit/Mississippi-Valley-type>
- Cameron, E.M., Hattori, K. ((1987). Archean gold mineralization and oxidized hydrothermal fluids. *Econ Geol.* 82:1177–1191. doi: 10.2113/gsecongeo.82.5.1177
- Ciobanu, C.L. and Cook, N.J., (2004). Skarn textures and a case study: The Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania: *Ore Geology Reviews*
- Dubé, B., Gosselin, P., Mercier-Langevin, P., Hannington, M., and Galley, A. ((2007). Gold-rich volcanogenic massive sulphide 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
- Einaudi, M.T. ((1982). Description of skarns associated with porphyry copper plutons. Adv. Geol. Porphyry Copper Deposits: Southwest
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., (1998). Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geology Reviews 13
- Hagdorn, H. and Simon, T. ((2005). Der Muschelkalk in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. Newsl Stratigr
- John, DA., Garside, L.J., and Wallace, A.R., (1999). Magmatic and tectonic setting of late Cenozoic epithermal gold-silver deposits in northern Nevada, with an emphasis on the Pah Rah and Virginia ranges and the northern Nevada rift: Geological Society of Nevada, Special Publication
- Kelley, D. S. et al. ((2005). A serpentinite-hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field. Science 307
- Kirkham, R.V. ((1972). Porphyry deposits, in Blackadar, R.G., ed., Report of Activities Part B, November 1971 to March 1972: Geological Survey of Canada, Paper 72-1b, p. 62-64.
- Kirkham, R.V., and Sinclair, W.D. ((1995). Porphyry copper, gold, molybdenum, tungsten, tin, silver, 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, p. 421-446.
- Kouzmanov, K., Pettke, T., Heinrich, C.A. (2010). Direct analysis of ore-precipitating fluids: Combined IR microscopy and LA-ICP-MS study of fluid inclusions in opaque ore minerals. Economic Geology
- Kun-Feng, Q. (2019). The giant Zaozigou Au-Sb deposit in West Qinling, China: magmatic- or metamorphic-hydrothermal origin?
- Lipman, P.W. and Sawyer, D.A. ((1985). Mesozoic ash-flow caldera fragments in southeastern Arizona and their relation to porphyry copper deposits: Geology, v. 13, p. 652-656.
- Lubben, JD., Cline, JS., Barker, SLL. ((2012). Ore fluid properties and sources from quartz-associated gold at the Betze-Post Carlin-type gold deposit, Nevada, United States. Econ Geol 107
- Meinert, L. D. ((1992). Skarn and skarn deposit. Geosci. Canada

- Michalski, J. R. & Bleacher, J. E (2013). Supervolcanoes within an ancient volcanic province in Arabia Terra, Mars. *Nature*.
- Pokrovski, G., Borisova, A., Bychkov, A. ((2013). Speciation and transport of metals and metalloids in geological vapors. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* reduction in the origin of MVT deposits II. Carbonate-sulfide relationships. *Geofluids* (in press)
- Sass-Gustkiewicz, M., Dzulynski, S., Ridge, J.D. ((1982). The Emplacement of zinc-lead sulfide ores in the Upper Silesian District—a contribution to the understanding of Mississippi Valley-type deposits. *Econ Geol*
- Shanks, W. C. III (2001). *Stable Isotopes in Seafloor Hydrothermal Systems: Vent fluids, hydrothermal deposits, hydrothermal alteration, and microbial processes*. U. S. Geological Survey 973 Denver Federal Center Denver, Colorado 80225.
- Sherlock, R.L. ((2005). The relationship between the McLaughlin gold-mercury deposit and active hydrothermal systems in the Geysers-Clear Lake area, Northern Coast Ranges, California: *Ore Geology Review*
- Sinclair, W. D. ((2007). *Porphyry Deposits*. Geological Survey of Canada. Ottawa, Ontario.
- Sinclair, W.D. and Thorpe, R.I. ((1996). Epithermal gold deposits, in Eckstrand, *Geology of Canadian Mineral Deposit Types: Geological Survey of Canada, Geology Canada*
- Tamsitt, V. et al. ((2017). Spiraling pathways of global deep waters to the surface of the Southern Ocean. *Nat. Commun.* 8
- Tao, C. et al. ((2012). First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge. *Geology* 40
- Voudouris, P., Melfos, V., Vavelidis, M., Arikas, K, (2003). Genetic relation between the Tertiary Porphyry Cu ($\pm$ Mo) and the epithermal Au ($\pm$ Ag) deposits in the Rhodope metallogenic province, Thrace region, North em Greece. In : *Mineral Exploration and sustainable Development*. Eds
- Βαμβουκάκης, Κ. ((2009). *Επιθερμική μεταλλοφορία Au-Ag στη νήσο Λέσβο*. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Κιούσης, Γ. ((2012). *Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ), Έρευνα των πηγών ευγενών και άλλων μετάλλων σε κοιτάσματα πορφυρικού τύπου Cu-Au-Pd-Pt: βιώσιμη ανάπτυξη*.
- Λούκος, Ι. ((2012). Διερεύνηση της δυνατότητας εμπλουτισμού χαλκούχου κοιτάσματος της περιοχής “Σκουριές” Χαλκιδικής. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα*.
- Μέλφος, Β., Βουδούρης, Π., Αρίκας, Κ., & Βαβελίδης, Μ. ((2001). Rhenium - rich molybdenites in Thracian porphyry Mo $\pm$ Cu occurrences, NE - Greece. *Bulletin of the*



Geological Society of Greece, 34(3), 1015-1022.
doi:<https://doi.org/10.12681/bgsg.17139>

Μιχαήλ, Κ. και Δημήτρουλα, Μ. ((2004). Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις και μεταλλοφορίες των επιθερμικών συστημάτων της περιοχής Πετρωτών (Δ. Θράκη, Ελλάς). Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXV.