



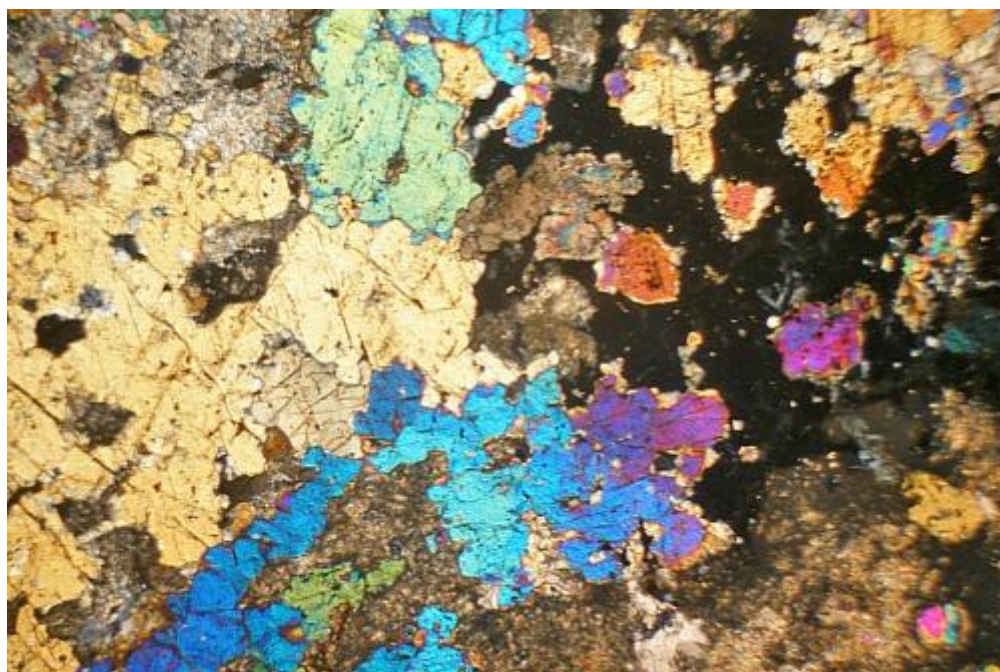
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΚΑΨΑΛΗΣ
ΑΕΜ 5698

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021





ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΚΑΨΑΛΗΣ

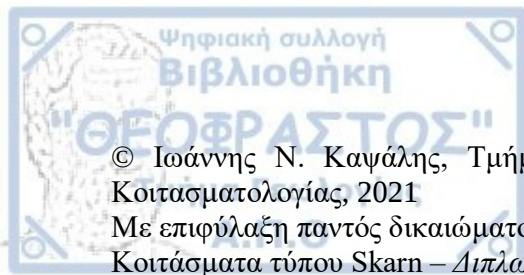
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλειος Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Ιωάννης Ν. Καψάλης, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



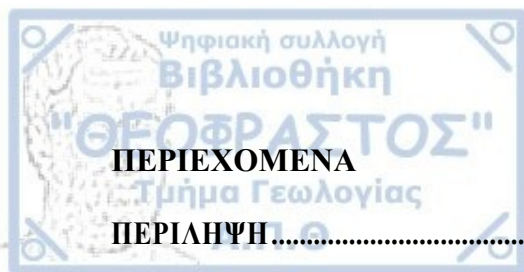
© Ιωάννης Ν. Καψάλης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Κοιτάσματα τύπου Skarn – *Διπλωματική Εργασία*

© Ioannis N. Kapsalis, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2021
All rights reserved.
Skarn Type 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.

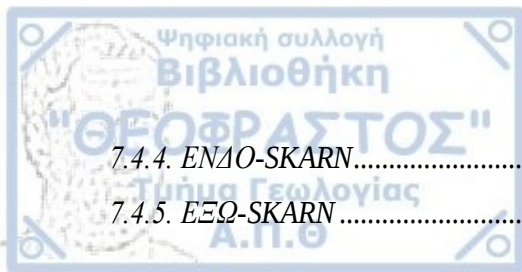
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Βεζουβιανίτης και γρανάτης, Skarn Delnabo, Scotland (www.geosec.biz).



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΜΕΤΑΛΛΑ	6
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2.2. ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ – ΑΜΕΤΑΛΛΑ ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	6
3. ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑ – ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ – ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΑ	8
4. ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	11
4.1. ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ.....	11
4.2. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	12
4.3. ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	12
4.4. ΘΑΠΤΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	13
5. ΘΕΡΜΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	14
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
5.2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	14
6. ΘΕΡΜΙΚΑ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ	18
6.1. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΓΙΛΟΠΗΛΙΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ: ΚΕΡΑΤΙΤΕΣ	18
6.2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΜΙΓΩΝ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	19
6.3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΗ ΑΜΙΓΩΝ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	20
7. SKARN ΕΠΑΦΗΣ.....	22
7.1. ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ	24
7.2. ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗ.....	26
7.3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ SKARN.....	29
7.4. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ SKARN	32
7.4.1. ΜΑΓΝΗΣΙΟΥΧΑ SKARN.....	32
7.4.2. ΑΣΒΕΣΤΙΟΥΧΑ SKARN	33
7.4.3. ΚΟΝΤΙΝΑ (PROXIMAL) ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΑ (DISTAL) SKARN	34



7.4.4. <i>ΕΝΔΟ-SKARN</i>	35
7.4.5. <i>ΕΞΩ-SKARN</i>	36
8. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ SKARN	38
8.1. <i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i>	38
8.2. <i>ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΥΠΟΥ SKARN</i>	38
8.3. <i>ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ SKARN</i>	39
8.4. <i>ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΑΠΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN</i>	45
9. ΓΝΩΣΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ SKARN	46
9.1. <i>ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ</i>	46
9.2. <i>ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</i>	49
10. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κοιτάσματα τύπου Skarn

Ιωάννης Καψάλης

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαπραγματεύεται τα κοιτάσματα που σχετίζονται με το skarn. Αρχικά, πραγματοποιείται μια ανάλυση του όρου «Μέταλλο» από χημικής πλευράς και αναφέρονται οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των διαφόρων μετάλλων. Έπειτα, παρουσιάζονται τα είδη μεταμόρφωσης με επίκεντρο την μεταμόρφωση επαφής, με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της και το αποτέλεσμα της επίδρασής της, τόσο από πλευράς ορυκτολογίας, όσο και γεωχημείας. Επιπλέον, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις έννοιες μετασώματωση και υδροθερμικά διαλύματα με την συνεισφορά τους κατά τον σχηματισμό των κοιτασμάτων τύπου skarn, λόγω της αντίδρασης των ρευστών που προέρχονται από το μάγμα με τα περιβάλλοντα πετρώματα. Εν συνεχεία, τα skarn ταξινομούνται ανάλογα με τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά σε υποκατηγορίες. Τα κοιτάσματα τύπου skarn χωρίζονται επίσης με βάση την σύστασή τους, δηλαδή ανάλογα με το κύριο χημικό στοιχείο το οποίο βρίσκεται σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα. Τέλος, αφού τονιστεί η σημασία των κοιτασμάτων τύπου skarn αναλύονται τέσσερα κοιτάσματα, δύο από το εξωτερικό και δύο από την Ελλάδα.



ABSTRACT

Skarn type deposits

Ioannis Kapsalis

The present diploma thesis refers to the skarn type deposits. Initially, an analysis of the term “Metal”, from a chemical point of view, is carried out and the physical and chemical properties of various metals are mentioned. The types of metamorphism are presented, focusing on contact metamorphism and the specification of its characteristics and also the result of its effect, from mineralogical and geochemical point of view. Additionally, particular emphasis is placed on the concepts of metasomatism and hydrothermal solutions and their contribution on the formation of skarn related deposits, due to the reaction of magma-derived fluids with the surrounding rocks. Then, the skarn deposits are classified according to their morphological characteristics into subcategories. Skarn deposits are also divided according to their composition, i.e. based on the main chemical element. Finally, after emphasizing the importance of skarn deposits, four deposits are described, two from abroad and two from Greece.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή διπλωματική εργασία με θέμα «Κοιτάσματα τύπου skarn» εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-2021, στον Τομέα Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, ύστερα από ανάθεση της από τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα κ. Βασίλειο Μέλφο.

Ειδικότερα, γίνεται μια προσπάθεια ερμηνείας του φαινομένου skarn, με αναλυτική περιγραφή του τρόπου δημιουργίας του, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του και της μεταλλοφορίας που περιέχεται σε αυτό. Τονίζεται, επίσης, η σημασία της εν λόγω μεταλλοφορίας στην παγκόσμια αγορά και η συνεισφορά του συγκεκριμένου τύπου κοιτάσματος στις ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας, όπου ο άνθρωπος έχει την δυνατότητα να εκμεταλλευτεί προς όφελος του, στην προσπάθεια, της διαρκούς και διαχρονικής, εξέλιξής του.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Βασίλειο Μέλφο για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την βοήθειά του κατά την διάρκεια εκπόνησής της, με ιδιαίτερες παρεμβάσεις και υποδείξεις πάνω στο έργο μου, βασισμένες πάντοτε στις γνώσεις και την επιστημονική του εμπειρία.

Οφείλω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στους γονείς μου, Νικόλαο και Μαρία, για την υπομονή και επιμονή προς το πρόσωπό μου, καθώς και για την οικονομική στήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ευχαριστώ την αδελφή μου Χριστίνα-Αναστασία για την συνεχή υποστήριξη.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αν κάποιος σκεφτεί ότι το ανθρώπινο είδος είναι άμεσα συνδεδεμένο έως και εξαρτώμενο από τα ορυκτά, θα αντιληφθεί την μεγάλη σημασία του ορυκτού πλούτου στον αγώνα του ανθρώπου για επιβίωση και εξέλιξη, καθ' όλη την διάρκεια της μακρόχρονης ιστορίας του. Τρανό παράδειγμα επιβίωσης και εξέλιξης του ανθρώπου με την βοήθεια του ορυκτού πλούτου είναι η εκμεταλλευτική δραστηριότητα του Φιλίππου Β' του Μακεδόνα, στα πλούσια σε χρυσό και άργυρο, εδάφη της Βορείου Ελλάδος. Η παραπάνω κίνηση του Φιλίππου Β' είχε ως αποτέλεσμα την ισχυροποίηση της κρατικής οικονομίας, γεγονός που συνετέλεσε θεμέλιο λίθο στην μετέπειτα επεκτατική πολιτική του Μέγα Αλέξανδρου (Ross et al. 2017).

Ο ορυκτός πλούτος είναι αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας του ανθρώπου. Λίγοι είναι όμως αυτοί που το γνωρίζουν. Λιγοστοί θεωρούνται αυτοί που κατανοούν ότι οι καθημερινές τους ανάγκες και συνήθειες αλληλοεπιδρούν με τα ορυκτά. Μειονότητα είναι αυτοί που γνωρίζουν την συνύπαρξη τους με τον ορυκτό πλούτο. Τα ορυκτά υπάρχουν σε πολλά σημεία της ζωής του ανθρώπου. Από τα ρούχα, τα προσωπικά υλικά περιποίησης έως τα τεχνολογικά επιτεύγματα που έχουν προστεθεί στην ζωή του ανθρώπου (κινητό τηλέφωνο, τηλεόραση κ.ά.) (Γεωργιάδης 2003, Τσιραμπίδης 2005). Επομένως, ένα μεγάλο κομμάτι της παγκόσμιας οικονομίας είναι βασισμένο πάνω στα ορυκτά. Από την εξόρυξη τους, την επεξεργασία τους και την πώληση τους καθώς αποτελούν την πρώτη ύλη για την κατασκευή αντικειμένων πρώτης ανάγκης, και όχι μόνο, για τον άνθρωπο.

Λόγω της συνεχούς εξέλιξης του ανθρώπου, οι ανάγκες του αυξάνονται με εκθετικό ρυθμό. Η πολιτεία, για να καλύψει όλες αυτές τις ανάγκες της, επενδύει όλο και περισσότερο στην ερευνα ορυκτών τα οποία θα εκμεταλλευτούν και θα λάβουν χρήσιμα στοιχεία από αυτά. Τα χρήσιμα αυτά στοιχεία όπως είναι τα μέταλλα αποτελούν την πρώτη ύλη για την βελτίωση της καθημερινής ζωής του ανθρώπου. Η μεταλλευτική έρευνα θεωρείται βασικός πυλώνας οικονομίας και ανάπτυξης καθώς απασχολεί στον τομέα εργασίας της πολλές ειδικότητες επαγγελματιών και επιστημόνων. Στηρίζει την επιστημονική κοινότητα με συνεχή έρευνα και έμμεσα, βοηθά στην παραγωγή νέων επιστημόνων για την κάλυψη των αναγκών της. Επίσης, η μεταλλευτική έρευνα στηρίζει τις τοπικές, και κατά πλειοψηφία επαρχιακές, οικονομίες διότι μια εκμεταλλευτική δραστηριότητα σπανίως θα πραγματοποιηθεί σχετικά κοντά σε ένα μεγάλο αστικό κέντρο. Με άλλα λόγια, μια κοιτασματολογική μελέτη, και έπειτα εκμετάλλευση, είναι μια αφορμή για πνευματική

διεύρυνση και εξειδίκευση, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται το βιοτικό επίπεδο της κοινωνίας, αρκεί όμως να μην δημιουργούνται θέματα περιβαλλοντικής και γενικότερα κοινωνικής σύγκρουσης (Τσιραμπίδης 2005) .

Η φιλοδοξία για μόνιμη και συλλογική εξέλιξη δεν πρέπει να αντιφάσκει με την περιβαλλοντική συνείδηση. Η περιβαλλοντική συνείδηση δεν έρχεται σε σύγκρουση με την επιχειρηματικότητα. Άλλωστε σήμερα σε όλα τα ανεπτυγμένα, τουλάχιστον, κράτη υπάρχει μακροσκελής νομοθεσία για την περιβαλλοντική προστασία την οποία κάθε μεταλλευτική εταιρεία υποχρεούται να τηρήσει κατά γράμμα. Η ασεβής, προς το περιβάλλον, μεταλλευτική δραστηριότητα μπορεί να βάλει σε κίνδυνο τόσο την ίδια την επιχείρηση όσο και ανθρώπινες ζωές που συνδέονται ή όχι με αυτήν την δραστηριότητα. Για να αποφευχθούν τέτοιες καταστάσεις επιβάλλεται η τήρηση όλων των όρων περιβαλλοντικής προστασίας που έχουν ως κύριο γνώμονα την πρόβλεψη, πρόληψη και αποκατάσταση του ευρύτερου χώρου εκμετάλλευσης (Τσιραμπίδης 2005).

Μέχρι αυτό το σημείο έχει τονιστεί στο έπακρο η σημασία του ορυκτού πλούτου. Η σημασία της εκμετάλλευσης, της μεταποίησης καθώς και της εμπορίας του. Υπάρχουν πολλών ειδών κοιτάσματα στον κόσμο. Χωρίζονται και ταξινομούνται με διάφορους τρόπους και σε πολλές κατηγορίες. Στην παρούσα πτυχιακή διπλωματική εργασία θα αναλυθούν εκτενέστερα τα κοιτάσματα που δημιουργούνται κατά το σχηματισμό skarn, τα λεγόμενα κοιτάσματα τύπου skarn. Θα γίνει αναφορά στην ορυκτολογική και γεωχημική τους ταυτότητα, ενώ θα πραγματοποιηθεί και μια προσπάθεια ερμηνείας του τρόπου γένεσης αυτού του τύπου κοιτάσματος. Πριν την ανάλυση του κοιτάσματος θα παρουσιαστούν οι ανάγκες της παγκόσμιας αγοράς σε μέταλλα και θα αντιληφθούμε το κατά πόσο συνεισφέρει ο συγκεκριμένος τύπος κοιτάσματος στην μείωση αυτών των αναγκών.

2. ΜΕΤΑΛΛΑ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει τονιστεί, η ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού την δεδομένη, τουλάχιστον, χρονική περίοδο είναι εξαρτώμενη από τα μέταλλα. Πάνω στα μέταλλα έχει χτιστεί μια παγκόσμια αγορά. Υπάρχουν χώρες παραγωγοί, χώρες προμηθευτές και χώρες αγοραστές. Κάθε χώρα μεταπωλεί το πλεόνασμα της και κυνηγάει να καλύψει το φυσικό της έλλειμμα σε μέταλλα.

Η παγκόσμια ζήτηση των μετάλλων καθώς και οι τιμές τους επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από την αύξηση των αναπτυσσόμενων κρατών. Τα αναπτυσσόμενα κράτη τα οποία άρχιζαν σταδιακά να ισχυροποιούν τις οικονομίες τους ασκούσαν άμεσα πίεση στην παγκόσμια ζήτηση μετάλλων και ιδιαίτερα στον τομέα έρευνας και εφοδιασμού πρώτων υλών (ΣΕΒ 2013).

2.2. ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ – ΑΜΕΤΑΛΛΑ ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η μελέτη των μεταλλικών στοιχείων έχει ως αφετηρία των Περιοδικό Πίνακα. Κάθε χημικό στοιχείο έχει τον δικό του μοναδικό ατομικό αριθμό. Ο σύγχρονος Περιοδικός Πίνακας αποτελεί την συγκέντρωση όλων των γνωστών χημικών στοιχείων βασισμένο στον ατομικό τους αριθμό. Η συγκέντρωση αυτή έχει σκοπό την περαιτέρω έρευνα των χημικών στοιχείων καθώς και την ομαδοποίηση στοιχείων με παρόμοιες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Ο Περιοδικός Πίνακας αποτελείται από ομάδες (κάθετες στήλες) και από περιόδους (οριζόντιες στήλες). Στην ίδια ομάδα του Περιοδικού Πίνακα τοποθετούνται στοιχεία με παρόμοια ηλεκτρονιακή δομή και γι' αυτόν τον λόγο έχουν και σχεδόν ίδιες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Επομένως, κατά μήκος μιας περιόδου του Περιοδικού Πίνακα μεταβάλλονται οι ιδιότητες των στοιχείων, καθώς αλλάζει η ηλεκτρονιακή δόμηση τους. Μια σημαντική ιδιότητα των χημικών στοιχείων που μεταβάλλεται κατά μήκος μιας περιόδου του Περιοδικού Πίνακα είναι αυτή του μεταλλικού τους χαρακτήρα. Ο μεταλλικός χαρακτήρας είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον ατομικό αριθμό. Άρα, καθώς ο ατομικός αριθμός αυξάνεται κατά μήκος μίας περιόδου πηγαίνοντας σταδιακά προς τα δεξιά, ο μεταλλικός χαρακτήρας στην εν λόγω κίνηση θα μειώνεται (Misra 2018). Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται ο Περιοδικός Πίνακας.

1

H

hydrogen

[1.0078, 1.0082]

2

He

helium

4.0026

3

Li

lithium

[6.938, 6.987]

4

Be

beryllium

9.0122

11

Na

sodium

22.990

12

Mg

magnesium

[24.304, 24.307]

19

K

potassium

39.098

20

Ca

calcium

40.078(4)

21

Sc

scandium

44.956

22

Ti

titanium

47.867

23

V

vanadium

50.942

24

Cr

chromium

51.996

25

Mn

manganese

54.938

26

Fe

iron

55.845(2)

27

Co

cobalt

58.933

28

Ni

nickel

58.693

29

Cu

copper

63.546(3)

30

Zn

zinc

65.38(2)

31

Ga

gallium

69.723

32

Ge

germanium

72.630(2)

33

As

arsenic

74.921(6)

34

Se

selenium

78.971(8)

35

Br

bromine

79.904(1)

36

Kr

krypton

83.798(2)

37

Rb

rubidium

85.468

38

Sr

strontium

87.62

39

Y

yttrium

88.906

40

Zr

zirconium

91.224(2)

41

Nb

niobium

92.906

42

Mo

molybdenum

95.94

43

Tc

technetium

98.906

44

Ru

ruthenium

101.07(2)

45

Rh

rhodium

102.91

46

Pd

palladium

106.42

47

Ag

silver

107.87

48

Cd

cadmium

112.41

49

In

indium

114.82

50

Sn

tin

118.71

51

Sb

antimony

121.76

52

Te

tellurium

127.6

53

I

iodine

126.905

54

Xe

xenon

131.29

55

Cs

caesium

132.91

56

Ba

barium

137.33

57-71

Lanthanoids

72

Hf

hafnium

178.49(2)

73

Ta

tantalum

180.95

74

W

tungsten

183.84

75

Re

rhenium

186.21

76

Os

osmium

190.23(2)

77

Ir

iridium

192.22

78

Pt

platinum

195.08

79

Au

gold

196.97

80

Hg

mercury

200.59

81

Tl

thallium

204.38

82

Pb

lead

207.2

83

Bi

bismuth

208.98

84

Po

polonium

[209]

85

At

astatine

[210]

86

Rn

radon

[222]

87

Fr

francium

[223]

88

Ra

radium

[226]

89-103

actinoids

104

Rf

rutherfordium

[261]

105

Db

dubnium

[262]

106

Sg

seaborgium

[266]

107

Bh

bohrium

[264]

108

Hs

hassium

[277]

109

Mt

meitnerium

[268]

110

Ds

darmstadtium

[271]

111

Rg

roentgenium

[272]

112

Cn

copernicium

[285]

113

Nh

nihonium

[284]

114

Fl

flerovium

[289]

115

Mc

moscovium

[288]

116

Lv

livermorium

[293]

117

Ts

tennessine

[294]

118

Og

oganesson

[294]

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

fluorine

18.998

18

Ne

neon

20.180

13

Al

aluminium

26.981

14

Si

silicon

28.085

15

P

phosphorus

30.974

16

S

sulfur

[32.06, 32.07]

17

Cl

chlorine

[35.446, 35.453]

18

Ar

argon

39.948

13

B

boron

[10.81, 10.82]

14

C

carbon

[12.01, 12.02]

15

N

nitrogen

[14.006, 14.008]

16

O

oxygen

[15.999, 16.000]

17

F

flu

Σχ. 1. Περιοδικός Πίνακας των χημικών στοιχείων (International Union of Pure and Applied Chemistry)

Τα χημικά στοιχεία στον Περιοδικό Πίνακα διακρίνονται σε μέταλλα και αμέταλλα. Τα μέταλλα λόγω της ηλεκτρονιακής τους δομής έχουν στην ικανότητα να αποβάλλουν ηλεκτρόνια από την εξωτερική τους στιβάδα και να μετατρέπονται σε κατιόντα (θετικά φορτισμένα ιόντα). Αντίθετα, λόγω της αντίστοιχης ηλεκτρονιακής δόμησης των αμεταλλών στοιχείων είναι πρακτικά αδύνατο να αποβάλλουν ηλεκτρόνια, και γι' αυτό λόγο έχουν την ικανότητα να προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια και να μετατρέπονται σε ανιόντα (αρνητικά φορτισμένα ιόντα). Κατά την σταδιακή μετάβαση από μεταλλικό σε αμέταλλο χαρακτήρα συναντώνται κάποια χημικά στοιχεία που έχουν τόσο μεταλλικές, όσο και αμεταλλικές ιδιότητες. Τα στοιχεία αυτά, τα χαρακτηρίζουμε ως μεταλλοειδή ή ημιμέταλλα και είναι τα B, Si, Ge, As, Sb, Te, Po, At. Τα χημικά στοιχεία B, Si, As, Te, At αποτελούν το νοητό σύνορο ανάμεσα στον καθαρά μεταλλικό και τον καθαρά αμέταλλο χαρακτήρα των στοιχείων (Misra 2018).

3. ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑ – ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ – ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΑ

Η ενότητα αυτή έχει σκοπό να εξηγήσει μέσα από την ανάλυση βασικών εννοιών της κοιτασματολογικής έρευνας, τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνονται τα στοιχεία ενδιαφέροντος από το κοίτασμα. Θα πραγματοποιηθεί μια περαιτέρω ερμηνεία των εννοιών κοίτασμα, μετάλλευμα, συμπύκνωμα και εμπλουτισμός έτσι ώστε να καταστεί σαφής όλη η διαδικασία λήψης των χρήσιμων στοιχείων από ένα πέτρωμα καθώς και η σύνδεση του όρου μέταλλο και μετάλλευμα.

Αρχικά, με τον όρο κοίτασμα αναφέρεται η γεωλογική δομή – σχηματισμό στο οποίο με βάση την ορυκτολογική του σύσταση και τις εκάστοτε οικονομικές και πολιτικές συνθήκες που επικρατούν στον τόπο έρευνας, φέρουν δυνατότητα εκμετάλλευσης με οικονομικό όφελος. Από την άλλη πλευρά το μετάλλευμα είναι το υλικό που λαμβάνεται κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος το οποίο περιέχει μέταλλα, ενώσεις μετάλλων και άλλα χρήσιμα στοιχεία για την βιομηχανία και γενικά για τα προϊόντα εμπορίου. Κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης, μαζί με το χρήσιμο υλικό γίνεται αναγκαστική εξόρυξη και μη χρήσιμου υλικού (στείρο), υλικό που δεν επιφέρει κάποιου είδους κερδοφορία. Στην συνέχεια αφού το κοίτασμα εξορυχθεί, το μετάλλευμα μεταφέρεται σε ειδικούς χώρους όπου πραγματοποιούνται όλες οι μέθοδοι εμπλουτισμού, δηλαδή όλες οι μέθοδοι φυσικής και χημικής επεξεργασίας για τον διαχωρισμό του χρήσιμου υλικού από το στείρο. Το χρήσιμο υλικό που προκύπτει ύστερα από τις διαδικασίες εμπλουτισμού, έχει μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον και ονομάζεται συμπύκνωμα. Αντίθετα, το μη χρήσιμο υλικό το οποίο απορρίπτεται απευθείας εξαιτίας της χαμηλής οικονομικής του αξίας ονομάζεται απόρριμμα και εναποτίθεται στις περιοχές απόθεσης μεταλλευτικών αποβλήτων (Bourgeois 2007, Σαμαρά 2018).

Πριν το υλικό φτάσει στην διαδικασία του εμπλουτισμού περνάει κάποια ακόμα στάδια επεξεργασίας για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια ο διαχωρισμός του χρήσιμου από του στείρου υλικού. Αυτά τα στάδια επεξεργασίας είναι: α) Μηχανική Προπαρασκευή β) Θραύση γ) Λειοτρίβηση και δ) Ταξινόμηση. Οι μέθοδοι εμπλουτισμού είναι α) επίπλευση, β) μαγνητικός διαχωρισμός, γ) βαρυτομετρικός διαχωρισμός και δ) ηλεκτροστατικός διαχωρισμός. Ο εμπλουτισμός είναι ένα σύνολο διεργασιών που στόχο έχουν την αύξηση της εμπορευματικής αξίας του μεταλλεύματος. Αυτό επιτυγχάνεται ύστερα από την απομάκρυνση του στείρου υλικού. Με την απομάκρυνση του στείρου υλικού αυτομάτως αυξάνεται η αξία του συμπυκνώματος, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε χρήσιμο υλικό (Τσώλη 2017). Στον πίνακα 1 δίνονται μερικά παραδείγματα μεταλλεύματος.

Πίν. 1. Τα βασικά μεταλλεύματα της παγκόσμιας αγοράς (<http://www.oryktosploutos.net>, Σαμαρά 2018).

<i>Μεταλλεύμα Μέταλλο</i>	<i>Χημική Ένωση</i>	<i>Κύριο Ορυκτό</i>
<u>Χρωμίτης</u> Χρόμιο, Cr	FeCr ₂ O ₄	Χρωμίτης
<u>Νικελιούχα μεταλλεύματα</u> Νικέλιο, Ni	(Fe,Ni) ₉ S ₈ , (Fe _{1-x} Ni)S, (Fe,Ni)O(OH) nH ₂ O, (Ni,Mg) ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Πεντλανδίτης, Πυρροτίτης, Λατερίτης (λειμωνιτικός), Λατερίτης (γαρνιεριτικός)
<u>Βωξίτης</u> Αργίλιο, Al	Al ₂ O ₃	Μπαμίτης, διάσπορο, γινίτης
<u>Μεταλλεύματα χαλκού</u> Χαλκός, Cu	Cu ₂ S, CuFeS ₂ , Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	Χαλκοσίνης, Χαλκοπυρίτης, Μαλαχίτης
<u>Σιδηρομεταλλεύματα</u> Σίδηρος, Fe	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄	Αιματίτης, Μαγνητίτης
<u>Μαγγανιούχα μεταλλεύματα</u> Μαγγάνιο, Mn	MnO ₂	Πυρολουσίτης
<u>Τιτανιούχα μεταλλεύματα</u> Τιτάνιο, Ti <u>Μεταλλεύματα μολύβδου</u> Μόλυβδος, Pb	TiO ₂ , FeO·TiO ₂ , PbS, PbCO ₃ , PbSO ₄	Ρουτίλιο, Ιλμενίτης, Γαληνίτης, Κερουσίτης, Αγγλεσίτης
<u>Μικτά θειούχα</u> <u>Μεταλλεύματα</u> (ψευδαργύρου, μολύβδου, σιδήρου) Zn-Pb-Fe (συνήθως μαζί με Au και Ag)	PbS, ZnS, FeS ₂	Γαληνίτης, Σφαλερίτης, Σιδηροπυρίτης
<u>Μεταλλεύματα Υδραργύρου</u> Υδράργυρος, Hg	HgS	Κινναβαρίτης
<u>Μεταλλεύματα</u> <u>Μολυβδαινίου</u> Μολυβδαίνιο, Mo	MoS ₂	Μολυβδαινίτης
<u>Μεταλλεύματα Κασσίτερου</u> Κασσίτερος, Sn	SnO ₂	Κασσιτερίτης

Επομένως, η εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος δεν είναι απλά μια διαδικασία με την οποία εξορύσσονται τα κομμάτια του πετρώματος που περιέχουν τα χρήσιμα ορυκτά και μόνο. Για να φτάσει το σημείο της πώλησης του υλικού και αντίστοιχα το επιθυμητό κέρδος διεξάγονται πολλές λεπτομερείς διαδικασίες επεξεργασίας και μεταποίησης. Σε αρχικό στάδιο, και ύστερα από τον εντοπισμό και την περιγραφή όλων των χαρακτηριστικών του κοιτάσματος, ξεκινά η εκμετάλλευση του. Στον πίνακα 1, τα χρήσιμα μέταλλα περιέχονται μέσα σε ορυκτά και αποτελούν την χημική τους ταυτότητα. Τα ορυκτά συναντώνται σε κοιτάσματα, τα οποία φέρουν την ικανότητα εκμετάλλευσης με βάση την προϋπόθεση που προαναφέρθηκε. Ο στόχος όλης της εκμεταλλευτικής δραστηριότητας είναι να παραχθεί από το μέταλλευμα, το συμπύκνωμα και από το συμπύκνωμα να ληφθεί το χρήσιμο μέταλλο οικονομικού ενδιαφέροντος. Άρα, για παράδειγμα από ένα μέταλλευμα μολυβδαινίου, θα απομονωθεί το ορυκτό μολυβδαινίτης, για να ληφθεί το χημικό στοιχείο του μολυβδαινίου Mo.

Σκοπός του κεφαλαίου ήταν η ομαλή ένταξη στον χώρο της κοιτασματολογίας με γενικές αναφορές στον ορυκτό πλούτο, στις ανάγκες διαφορετικών κοινωνιών και το πως αυτό επηρεάζει την ζήτηση και εν συνεχεία τις τιμές στην παγκόσμια αγορά. Έγινε αναφορά στα μεταλλικά στοιχεία από την πλευρά της χημικής τους συμπεριφοράς και των διαφόρων ιδιοτήτων τους. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε περιγραφή από το στάδιο της εξόρυξης και του υλικού που λαμβάνεται σε εκείνο το σημείο, και πως στο τελικό στάδιο, ύστερα από διεργασίες επεξεργασίας, γίνεται λήψη του χρήσιμου υλικού που έχει οικονομικό ενδιαφέρον.

4. ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Για την σωστή ανάλυση και ερμηνεία των κοιτασμάτων τύπου skarn θα πρέπει να προηγηθεί μια λεπτομερέστερη περιγραφή διάφορων γεωλογικών διεργασιών που παίζουν κομβικό ρόλο στην διαμόρφωση της τελικής μορφής των skarn και ειδικότερα στα οικονομικού ενδιαφέροντος κοιτάσματα τύπου skarn. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή στα είδη μεταμόρφωσης, τα χαρακτηριστικά, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών. Τα είδη μεταμόρφωσης χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο μεταμορφώνουν τα ήδη υπάρχοντα πετρώματα και είναι οι εξής:

4.1. ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ

Η μεταμόρφωση επαφής σχετίζεται άμεσα με θερμοκρασιακές διαφορές στο εσωτερικό του φλοιού της γης. Ειδικότερα, η μεταμόρφωση επαφής καλείται και ως θερμομεταμόρφωση επαφής. Η θερμομεταμόρφωση επαφής συνδέεται με μεταμορφώσεις στις οποίες ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την μορφή και σύσταση των ψυχρών πετρωμάτων είναι η υψηλή θερμοκρασία. Η επίδραση της πίεσης και των παραμορφωτικών τάσεων θεωρούνται αμελητέες. Επομένως, η θερμομεταμόρφωση επαφής είναι μια μεταμόρφωση LP/HT (Θεοδωρίκας 2017).

Η πηγή γένεσης της υψηλής θερμοκρασίας είναι η άνοδος μαγματικού υλικού. Η θερμομεταμόρφωση επαφής συνδέεται άμεσα με μαγματικές διεισδύσεις. Το μαγματικό υλικό που ανέρχεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του φλοιού της γης και επηρεάζει τα περιβάλλοντα πετρώματα έχει θερμοκρασίες της τάξεως περίπου 1000 °C. Η θερμομεταμόρφωση μεταξύ μαγματικού υλικού και προϋπάρχοντος ψυχρού πετρώματος συμβαίνει μεταξύ των θερμοκρασιών 550 °C με 800 °C. Η μεταμόρφωση κοντά στην επαφή των δύο όγκων είναι υψηλότερου βαθμού, ενώ ο βαθμός μειώνεται σταδιακά πηγαίνοντας από το σημείο επαφής προς το εντελώς αδιατάρακτο πέτρωμα. Οι παραμορφωτικές τάσεις και η λιθοστατική πίεση χαρακτηρίζονται αμελητέες και γι' αυτό τον λόγο δεν εμφανίζονται μορφές σχιστότητας (Θεοδωρίκας 2017).

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι στην επίδραση της ρευστής φάσης οφείλονται οι γεωλογικές διεργασίες της μετασώματωσης, ανακρυστάλλωσης και της νέο – ορυκτογένεσης. Η θερμομεταμόρφωση επαφής αλλάζει χαρακτηρισμό σε υδροθερμική μεταμόρφωση με την σε υψηλό βαθμό επίδραση των ρευστών συστατικών που προέρχονται κατά κύριο λόγο από το αναδύμενο μαγματικό υλικό (Θεοδωρίκας 2017).

4.2. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

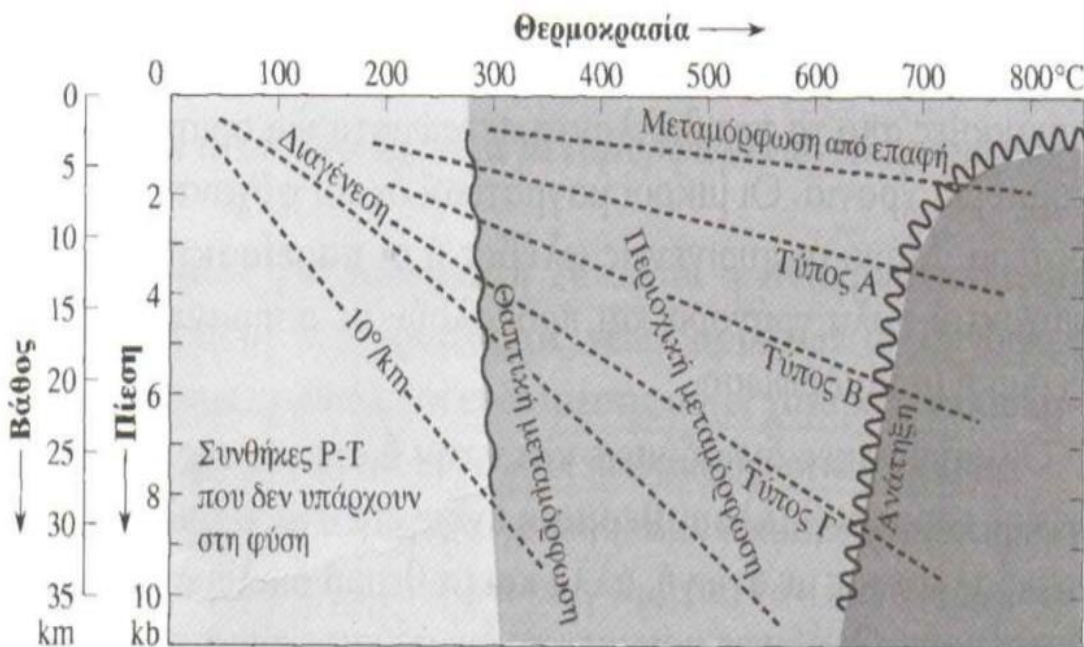
Ως δυναμική μεταμόρφωση ορίζεται το αποτέλεσμα της δράσης τεκτονικών δυνάμεων. Επομένως, συνεπάγεται πως σε ένα τέτοιο περιβάλλον επικρατούν ισχυρές παραμορφωτικές τάσεις, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας και της λιθοστατικής πίεσης κυμαίνεται σε πιο χαμηλά επίπεδα. Ως αποτέλεσμα της επίδρασης ισχυρών παραμορφωτικών τάσεων που ασκείται στο παροξυσμικό στάδιο του τεκτονικού γεγονότος είναι ο θρυμματισμός. Ο θρυμματισμός προκύπτει όταν η τιμή της παραμορφωτικής τάσης υπερβεί την οριακή αντοχή του πετρώματος (Θεοδωρίκας 2017).

4.3. ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η περιοχική μεταμόρφωση σε αντίθεση με τα άλλα δύο είδη μεταμόρφωσης που έχουν αναλυθεί παραπάνω, μεταμόρφωση επαφής και δυναμική μεταμόρφωση, είναι αποτέλεσμα όλων των μεταμορφικών παραγόντων που επιδρούν και ευθύνονται για ένα μεταμορφικό γεγονός. Ειδικότερα, στην περιοχική μεταμόρφωση επηρεάζουν τα ήδη υπάρχοντα πετρώματα του φλοιού της γης τόσο η θερμοκρασία όσο και οι επιδράσεις της λιθοστατικής πίεσης και των παραμορφωτικές τάσεων. Έχει οριστεί και ο συμβολικός χαρακτηρισμός δυναμοθερμική μεταμόρφωση αλλά παραλείπεται καθώς σε ένα τέτοιου είδους μεταμορφικό συμβάν πολλά από τα κύρια και δευτερεύοντα στοιχεία του δεν είναι εμφανή. Η περιοχική μεταμορφική διεργασία συμβαίνει σε μεγάλη έκταση και συνδέεται με ορογενετική διαδικασία στον φλοιό της γης. Η επίδραση της περιοχικής μεταμόρφωσης δεν περιορίζεται μόνο στον ηπειρωτικό φλοιό. Η μεταμόρφωση που δέχονται τα πετρώματα στο γεωτεκτονικό περιβάλλον μιας μεσοωκεάνιας ράχης εντάσσεται και αυτή στην περιοχική μεταμόρφωση (Θεοδωρίκας 2017).

4.4. ΘΑΠΤΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η θαπτική μεταμόρφωση, όπως προϋποθέτει και η ονομασία της, σχετίζεται με διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε περιβάλλον ιζηματογενούς λεκάνης. Η θαπτική μεταμόρφωση είναι η μεταμόρφωση που επιδρά στα προϋπάρχοντα ιζήματα ύστερα από απόθεση μεταγενέστερων και υπερκείμενων ιζημάτων. Οι διεργασίες της θαπτικής μεταμόρφωσης συγχέονται και με την διαδικασία της διαγένεσης. Τέλος, χαρακτηριστικά ορυκτά που δημιουργούνται σε ένα τέτοιο περιβάλλον μεταμόρφωσης είναι οι ζεόλιθοι (Θεοδωρίκας 2017). Στο σχήμα 2 διακρίνεται μια συνολική εικόνα των ειδών μεταμόρφωσης σε συνάρτηση της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) και της πίεσης P (kbar).



Σχ. 2. Είδη μεταμόρφωσης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία, την πίεση και το βάθος. Διακρίνονται εύκολα τα όρια επίδρασης του κάθε είδους μεταμόρφωσης. Είναι ευδιάκριτες οι οριακές τιμές των διαδικασιών της διαγένεσης και της ανάτηξης (Winkler 1979, Θεοδωρίκας 2017).

5. ΘΕΡΜΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα τέσσερα είδη μεταμόρφωσης που αναφέρθηκαν, το κύριο είδος που σχετίζεται με την δημιουργία του φαινομένου skarn είναι η μεταμόρφωση επαφής ή αλλιώς θερμομεταμόρφωση επαφής. Η ενότητα που ακολουθεί επικεντρώνεται λεπτομερώς στην ανάλυση της. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της και πως μέσα από όλες αυτές τις περίπλοκες γεωλογικές και γεωχημικές διαδικασίες προκύπτουν τα κοιτάσματα τύπου skarn.

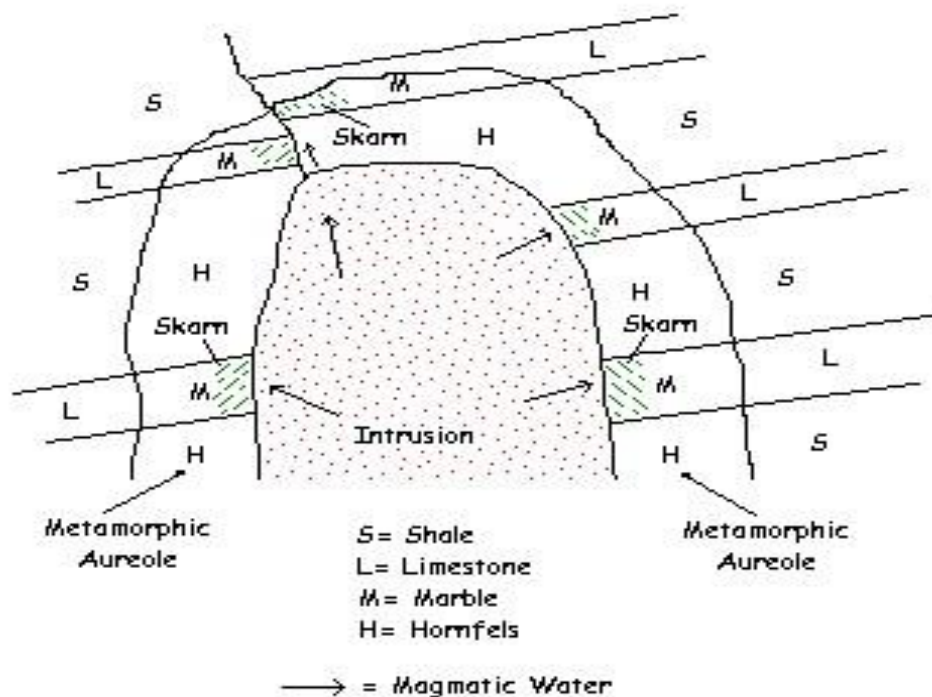
5.2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ

Η θερμομεταμόρφωση επαφής συντελείται στην διάρκεια κατά την οποία στα προϋπάρχοντα ψυχρά πετρώματα, λόγω διαφόρων τεκτονικών φαινομένων, παρατηρείται άνοδος και διείσδυση μαγματικού υλικού. Οι παράμετροι εκείνοι που ευθύνονται εξ' ολοκλήρου για την μεταμόρφωση που προκαλείται στους γειτονικούς προϋπάρχοντες σχηματισμούς είναι η θερμοκρασία και τα ρευστά τα οποία υπάρχουν στο μαγματικό υλικό (Μαρούση 2018).

Το μαγματικό υλικό το οποίο ανέρχεται έχει σύσταση κυρίως όξινη έως ενδιάμεση και χαρακτηρίζεται, ύστερα από την ψύξη του και την κρυστάλλωση του, ως ένας πλουτωνικός όγκος. Καθώς έχουμε την διαδικασία της διείσδυσης μάγματος, η επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας και των ρευστών συστατικών του μάγματος δεν επηρεάζουν ολόκληρο το προϋπάρχον πέτρωμα αλλά συγκεκριμένες περιοχές, όπου οι διαστάσεις τους καθορίζονται από ειδικές παραμέτρους. Η μεταμόρφωση συμβαίνει στην επαφή του πλουτωνίτη και των ψυχρών πετρωμάτων, ύστερα από την αποβολή μεγάλων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας που προέρχονται από τον μαγματικό θάλαμο που έχει προκύψει.

Τα πετρώματα που βρίσκονται πιο κοντά στον μαγματικό όγκο επηρεάζονται περισσότερο και ανάλογα με την θερμοκρασία του, επηρεάζονται σε αντίστοιχο βαθμό και τα πετρώματα που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από αυτόν. Αντιλαμβανόμαστε, σαφώς, πως το εύρος της μεταμόρφωσης σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του μάγματος.

Σε αυτό το σημείο παρατίθεται το σχήμα 3 που αναπαριστά σε εξαιρετικό βαθμό το φαινόμενο της διείσδυσης και της θερμομεταμόρφωσης επαφής.



Σχ. 3. Αναπαράσταση δημιουργίας skarn και κερατιτών εξαιτίας μαγματικής ανόδου. Η επαφή του πλουτωνίτη με τα Μάρμαρα σχηματίζει skarn, ενώ η επαφή του με τους πηλίτες, κερατίτες (Evans 1997, Μαρούση 2018).

Η περιοχή μεταμόρφωσης λόγω της επίδρασης του πλουτωνίτη έχει χαρακτηριστική μορφή ζώνης όπως να διακρίνεται στο σχήμα 3. Η ζώνη αυτή ονομάζεται ζώνη ή άλω μεταμόρφωσης και περιβάλλει το ανερχόμενο μάγμα. Το μέγιστο πλάτος το οποίο μπορεί το μαγματικό υλικό να επηρεάσει τα περιβάλλοντα πετρώματα λόγω των υψηλών θερμοκρασιακών διαφορών ανέρχεται στα 3 km. Η άλως μεταμόρφωση εξαρτάται κυρίως από παράγοντες που σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά της διείσδυσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά διαμορφώνουν και το πλάτος της άλω επαφής (Θεοδωρίκας 2017).

Αναλυτικότερα, οι παράγοντες διακρίνονται παρακάτω ως εξής:

I) Ο όγκος και η φύση του μάγματος.

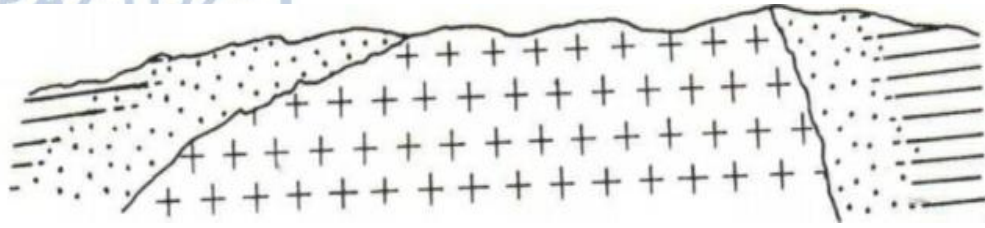
Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του μάγματος που διεισδύει τόσο με πιο αργό ρυθμό γίνεται η ψύξη του. Άρα, ο όγκος της διείσδυσης ελέγχει και τον χρόνο της θερμικής μεταμόρφωσης. Η φύση του μάγματος αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία του και κατά συνέπεια τις θερμοκρασιακές τιμές της μεταμόρφωσης. Η κρυστάλλωση του μάγματος αποβάλλει ρεύματα θερμότητας με την διαδικασία της αγωγής και την βοήθεια θερμών ρευστών συστατικών τα οποία αποβάλλονται και αυτά με την σειρά τους από το μάγμα και διεισδύουν στα γύρω ψύχρα πετρώματα με αποτέλεσμα την μεταμόρφωση τους.

II) Το βάθος διείσδυσης και η φύση των προϋπαρχόντων πετρωμάτων.

Σε μικρό βάθος τα πετρώματα είναι επηρεασμένα από τις επιφανειακές διαδικασίες της αποσάθρωσης και της διάβρωσης. Επομένως, δεν θεωρούνται εξ ολοκλήρου συμπαγή και άρρηκτα. Τα επιφανειακά πέτρωμα είναι πιο εκτεθειμένα στα θερμικά ρευστά του μάγματος λόγω των τυχών ρωγμών και διακλάσεων που τυχαίνει να έχουν στην επιφάνειά τους. Ειδικά σε πετρώματα με μεγάλο πορώδες πρωτογενές ή δευτερογενές η άλω επαφή έχει μεγάλο πάχος. Αντίθετα, στα συμπαγή πετρώματα τα οποία συναντώνται και σε μεγάλο βάθος επηρεάζονται ελάχιστα από τα θερμά διαλύματα του μάγματος. Συνεπάγεται, ότι το βάθος της διείσδυσης είναι σημαντικός παράγοντας για το μέγεθος της άλω επαφής. Οι τιμές της θερμοκρασίας εξαρτώνται και από το είδος των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Κατά την μεταμόρφωση των ένυδρων και ανθρακικών ορυκτών χάνεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας και αυτό εν συνεχεία επηρεάζει το πάχος της άλω μεταμόρφωσης, μειώνοντας την. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και στην επαφή με έναν υδατοπερατό σχηματισμό. Το νερό που περιέχεται μειώνει την θερμοκρασία και ως συνέπεια αυτού, μειώνεται το μέγεθος της μεταμορφικής διαδικασία

III) Κλίση επαφής μεταξύ προϋπάρχοντα σχηματισμού και μαγματικής διείσδυσης.

Οι μικρές κλίσεις της επιφάνειας επαφής σχηματίζουν μεγάλου πάχους άλω μεταμόρφωση, ενώ αντίστροφα οι μεγάλες κλίσεις, μικρό πάχος (Θεοδωρίκας 2017). Στο σχήμα 4 υπάρχει το σκαρίφημα το οποίο απεικονίζει τις κλίσεις επαφής.



Σχ. 4. Σχηματική απεικόνιση της κλίσης επαφής στην μαγματική διείσδυση. Μικρή κλίση, μεγάλο πάχος άλω μεταμόρφωσης και αντίστροφα, μεγάλη κλίση, μικρό πάχος άλω μεταμόρφωσης (Δημητριάδης 1988).

Κατά την διάρκεια της θερμομεταμόρφωσης λαμβάνουν χώρα ποικίλες διεργασίες. Στην άλω μεταμόρφωση παρατηρείται το φαινόμενο της καταστροφής, λόγω υψηλής θερμοκρασίας, των παλαιών ορυκτών και της δημιουργίας νέων πιο ανθεκτικών τα οποία αντιπροσωπεύουν το στίγμα της μεταμόρφωσης.

Η ανακρυστάλλωση και η ορυκτογένεση γίνεται σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας (LP/HT) και χωρίς την δράση παραμορφωτικών τάσεων. Η ορυκτογένεση διαφέρει ανάλογα με το σημείο και την απόσταση από το μαγματικό όγκο. Στο σημείο της επαφής των δύο όγκων δημιουργούνται ορυκτά υψηλής μεταμόρφωσης, ενώ σε ένα σημείο της άλω μεταμόρφωσης απομακρυσμένο από την επαφή της διείσδυσης έχουμε νεοσχηματισθέντα ορυκτά χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης (Μαρούση 2018). Η επίδραση του διεισδύοντος υλικού αποτυπώνεται ως ορυκτολογική μεταβολή, αλλά και ως ιστολογική. Ενδεικτικά, οι ιστοί που προκύπτουν με το πέρασ της θερμικής επίδρασης είναι ο γρανοβλαστικός, ο πορφυροβλαστικός και ο ποικιλοβλαστικός (Θεοδωρίκας 2017).

Στο σχήμα 3 σημειώθηκε ότι η δημιουργία skarn συνδέεται καθαρά με την άνοδο μαγματικού υλικού, το οποίο έρχεται σε επαφή με πετρώματα τα οποία έχουν ανθρακική χημική σύσταση. Τέτοια πετρώματα είναι οι ασβεστόλιθοι (CaCO_3), δολομίτες (MgCO_3) και μάρμαρα (CaCO_3). Στην περίπτωση που το μαγματικό υλικό έρθει σε επαφή με ένα κλαστικό ιζηματογενές πέτρωμα π.χ. πηλίτης, δεν σχηματίζεται η ορυκτολογική παραγένεση του skarn αλλά δημιουργείται ένας άλλος σχηματισμός ο κερατίτης. Παρακάτω θα ακολουθήσει περιγραφή των κατηγοριών της θερμικής μεταμόρφωσης ανάλογα με το είδος του πετρώματος που περιβάλλει τον μαγματικό όγκο.

6. ΘΕΡΜΙΚΑ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ

6.1. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΓΙΛΟΠΗΛΙΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ: ΚΕΡΑΤΙΤΕΣ

Αποτέλεσμα της θερμικής μεταμόρφωσης αργιλοπηλιτικών πετρωμάτων είναι ο σχηματισμός των κερατιτών. Ειδικότερα, στο εσωτερικό της άλω επαφής και πλησιέστερα στην επαφή του γρανιτικού όγκου με το προϋπάρχον αργιλικό πέτρωμα η θερμική μεταμόρφωση σχηματίζει τους κερατίτες.

Από μορφολογικής άποψης ο κερατίτης σύμφωνα με τον τρόπο σχηματισμού του χαρακτηρίζεται ως μεταμορφωμένο πέτρωμα.. Ο ιστός των κερατιτών είναι γρανοβλαστικός. Η ορυκτολογική παραγένεση των κερατιτών περιλαμβάνει τα ακόλουθα ορυκτά: χαλαζίας, βιοτίτης, μοσχοβίτης, κορδιερίτης, σιλλιμανίτης, ανδαλουσίτης, K- Άστριοι, υπερσθενής, γρανάτης, ανθοφυλλίτης, σπινέλλιος, κορούνδιο, κ.ά..

Ξεκινώντας από την ζώνη επαφής του μαγματικού όγκου με τα αργιλικά πετρώματα συναντάται η κλασσική ακολουθία πετρωμάτων: Μαγματικό πέτρωμα → κερατίτης → κηλιδωτός κερατίτης (τοπικές συγκεντρώσεις γραφίτη με την μορφή κηλίδας) → αργιλικό πέτρωμα.

Αντίστοιχες ορυκτολογικές παραγενέσεις που συναντώνται πηγαίνοντας από σημεία με υψηλή θερμοκρασιακή επίδραση σε σημεία έως και ανεπηρέαστα είναι οι εξής (Θεοδωρίκας 2017):

- 1) Σιλλιμανίτης + Κορδιερίτης + Βιοτίτης + K- Άστριος + Χαλαζίας
- 2) Ανδαλουσίτης + Κορδιερίτης + Βιοτίτης + Μοσχοβίτης + Χαλαζίας
- 3) Πυροφυλλίτης + Χλωρίτης + Μοσχοβίτης + Χαλαζίας

- Σε περίπτωση που το προϋπάρχον πέτρωμα στο οποίο επιδρά η μεταμόρφωση είναι πλούσιο σε Al_2O_3 δεν έχουμε καμία εμφάνιση χαλαζία καθώς δεν υπάρχει πηγή SiO_2 .
- Σε υψηλότερου βαθμού θερμική μεταμόρφωση ευνοείται η δημιουργία κορούνδιου και όχι ανδαλουσίτη, σιλλιμανίτη.



- Σε περίπτωση ύπαρξης Ca στους περιβάλλοντες πηλίτες (ασβεστιούχοι πηλίτες) έχουμε την δημιουργία πλαγιόκλαστων και ορθοπυρόξενων. Ονομάζονται πυροξενικοί κερατίτες και η τυπική τους παραγένεση είναι :

Υπερσθενής + Κορδιερίτης + Ορθόκλαστο + Βιοτίτης
(Πυρόξενος)

6.2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΜΙΓΩΝ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα πετρώματα τα οποία χαρακτηρίζονται ως αμιγή ανθρακικά είναι αυτά που υπολείπονται πυριτικές προσμίξεις και είναι δηλαδή εξ' ολοκλήρου ανθρακικά. Κατά την διάρκεια της θερμομεταμόρφωσης επαφής λαμβάνει χώρα η παρακάτω ισοχημική αντίδραση:



Από το την αντίδραση παρατηρούμε ότι το μαγνησιούχο ανθρακικό μέλος διασπάται σε περίκλαστο (MgO) και CO₂.

- Η θερμοκρασία διάσπασης του δολομίτη είναι T~700 °C για P_f = 1 kbar και X_{CO2} = 0,2.
- Για X_{CO2} = 0,75 η θερμοκρασία διάσπασης αγγίζει περίπου τους 800 °C.

Η ισοχημική θερμική μεταμόρφωση των αμιγών ανθρακικών πετρωμάτων δηλαδή των δολομιτών, δολομιτικών ασβεστόλιθων και μαρμάρων πραγματοποιείται στην διαδικασία αποδολομιτοποίησης τους με τον σχηματισμό περίκλαστου και πιθανόν βρουσίτη Mg(OH)₂ εν συνεχεία. Αυτό συμβαίνει καθώς το ασβεστιούχο μέλος διασπάται κάτω από προϋποθέσεις (Δημητριάδης 1988).

6.3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΗ ΑΜΙΓΩΝ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα μη αμιγή πετρώματα είναι αυτά τα οποία στην σύσταση τους συμμετέχει το Si, δηλαδή είναι πλούσια σε πυριτικές προσμίξεις. Τα πετρώματα αυτά χαρακτηρίζονται και ως χαλαζιομιγή ανθρακικά. Τέτοια πετρώματα είναι κυρίως ιζηματογενή πετρώματα, ενώ είναι πλούσια σε χαλαζία, ασβεστίτη και δολομίτη. Σε αυτήν την κατηγορία θερμικής μεταμόρφωσης παρατηρούνται πολλές παραγενέσεις, οι οποίες θεωρούνται αποτέλεσμα της διαφορετικής έντασης της θερμικής δραστηριότητας.

Στο εξωτερικό μέρος της άλω μεταμόρφωσης, ο σχηματισμός τάλκη σηματοδοτεί την έναρξη της θερμικής μεταμόρφωσης των μη αμιγών πετρωμάτων. Οι παραγενέσεις που μπορούν να υπάρξουν είναι οι εξής:

Ασβεστίτης + Δολομίτης + Τάλκης
Ασβεστίτης + Χαλαζίας + Τάλκης
Ασβεστίτης + Τάλκης

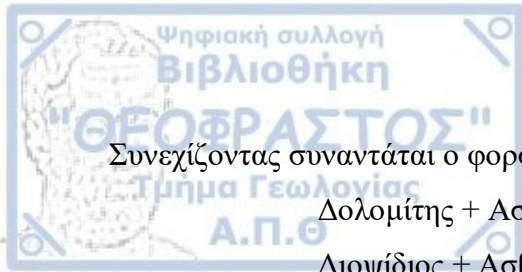
Πηγαίνοντας πιο εσωτερικά συναντάται ο τρεμολίτης με τις παρακάτω πιθανές παραγενέσεις:

Ασβεστίτης + Τρεμολίτης + Χαλαζίας
Τρεμολίτης + Δολομίτης + Τάλκης
Τρεμολίτης + Τάλκης + Ασβεστίτης
Τρεμολίτης + Τάλκης + Χαλαζίας
Ασβεστίτης + Τρεμολίτης + Δολομίτης
Ασβεστίτης + Τρεμολίτης

Η επόμενη ορυκτολογική ένδειξη μεταμόρφωσης είναι η δημιουργία διοψιδίου και βρίσκεται με τα εξής ορυκτά:

Δολομίτης + Διοψίδιος
Χαλαζίας + Διοψίδιος
Τρεμολίτης + Χαλαζίας + Διοψίδιος
Χαλαζίας + Ασβεστίτης + Διοψίδιος
Τρεμολίτης + Ασβεστίτης + Διοψίδιος
Τρεμολίτης + Δολομίτης + Διοψίδιος
Ασβεστίτης + Δολομίτης + Διοψίδιος

(Δημητριάδης 1988)



Συνεχίζοντας συναντάται ο φορστερίτης με τις παραγενέσεις:

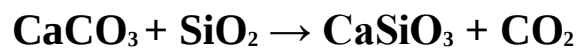
Δολομίτης + Ασβεστίτης + Φορστερίτης

Διοψίδιος + Ασβεστίτης + Φορστερίτης

Ασβεστίτης + Φορστερίτης + Τρεμολίτης

Στην επαφή με το μαγματικό υλικό, εκεί που δηλαδή επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, και με την προϋπόθεση ότι το μάγμα έχει γρανιτική σύσταση, δίνεται η ευκαιρία για τον σχηματισμό του βολλαστονίτη.

Η αντίδραση σχηματισμού του βολλαστονίτη είναι η εξής:



Ασβεστίτης Χαλαζίας Βολλαστονίτης

Ο βολλαστονίτης συναντάται στις εξής παραγενέσεις:

Ασβεστίτης + Βολλαστονίτης + Διοψίδιος

Ασβεστίτης + Βολλαστονίτης + Χαλαζίας

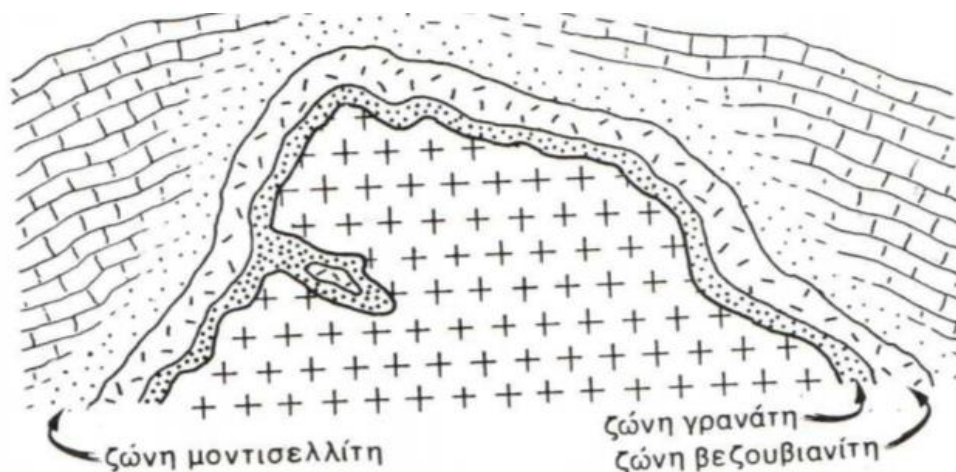
Διοψίδιος + Βολλαστονίτης + Χαλαζίας

(Δημητριάδης 1988)

7. SKARN ΕΠΑΦΗΣ

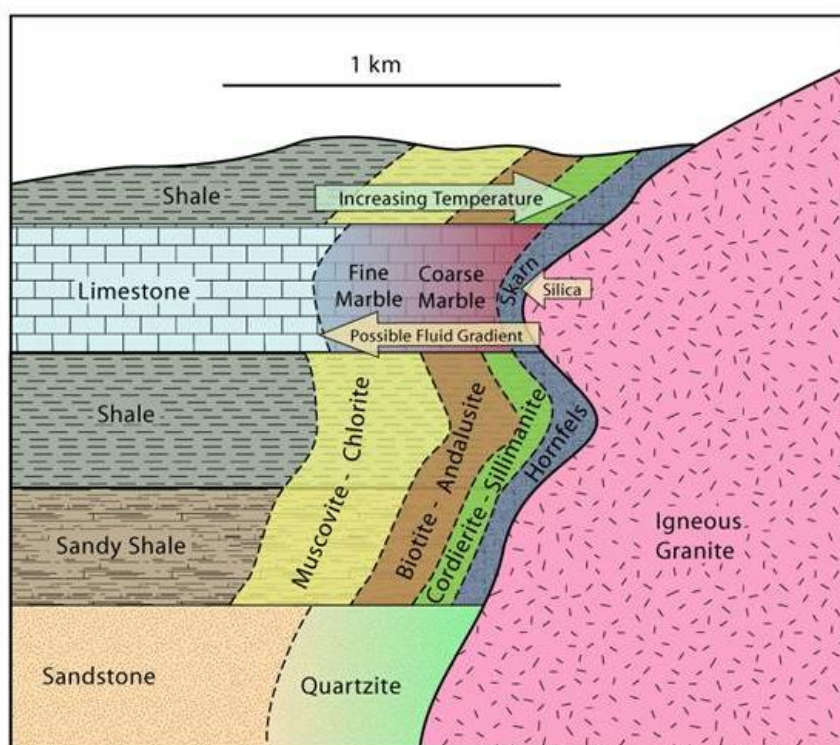
Στις δύο προηγούμενες ενότητες αναφέρθηκε η θερμική μεταμόρφωση με την άνοδο του πυριγενούς υλικού και του προϋπάρχοντος ανθρακικού πετρώματος. Ειδικότερα, στην θερμομεταμόρφωση των αμιγών ανθρακικών πετρωμάτων τονίζεται η διενέργεια ισοχημικής αντίδρασης κατά την διάρκεια της μεταμόρφωσης.

Από την άλλη πλευρά, η ανισοχημική αντίδραση των αμιγών ανθρακικών πετρωμάτων είναι υπεύθυνη για την δημιουργία ζωνών μετασωματικών πετρωμάτων που χαρακτηρίζονται ως skarn επαφής. Βασικές προϋποθέσεις για τον σχηματισμό skarn είναι η σύσταση του μάγματος να κυμαίνεται από γρανιτική έως διοριτική, ο σχηματισμός που προϋπήρχε της ανόδου του πυριγενούς υλικού να χαρακτηρίζεται ανθρακικός, και τέλος σε συνδυασμό με την αποβολή από το μάγμα μεγάλων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας που επιδρά, να υπάρχει ελεύθερη μετακίνηση ρευστών (διαδικασία μετασωμάτωσης). Με την ελεύθερη μετακίνηση ρευστών ευνοείται η ανταλλαγή συστατικών που καθορίζουν την ορυκτολογική και χημική σύσταση των νεών σχηματισμών. Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις δημιουργείται skarn επαφής με την χαρακτηριστική ζωνώδη μορφή (ζώνη γρανάτη, μοντισελλίτη, βεζουβιανίτη). Οι εν λόγω ζώνες που δημιουργούνται αντιπροσωπεύουν τόσο τον διαφορετικό βαθμό μεταμόρφωσης όσο και την αλλαγή της χημικής σύστασης. Τέλος, να σημειωθεί ότι οι ζώνες έλαβαν την ονομασία τους από το ορυκτό που βρίσκεται σε μεγαλύτερο ποσοστό όπως φαίνεται στο σχήμα 5 (Δημητριάδης 1988).



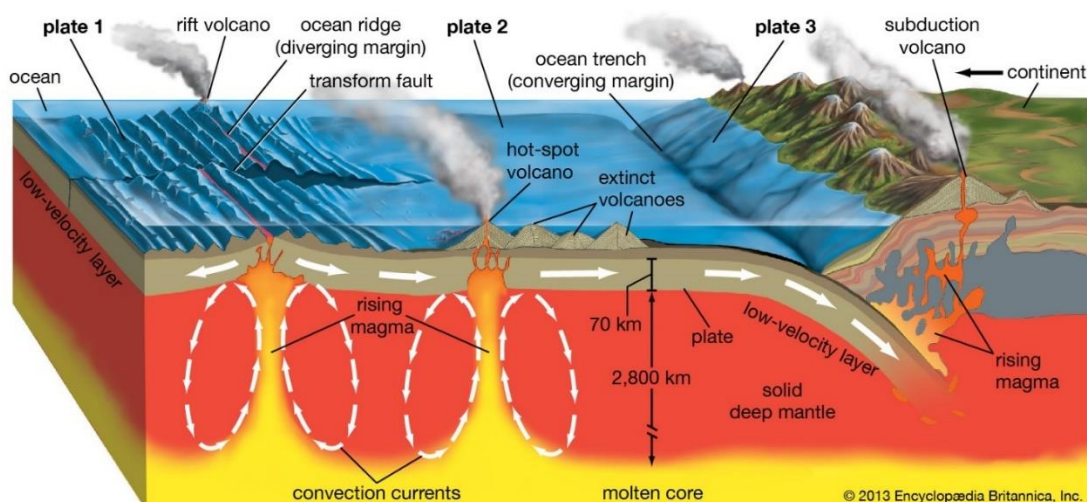
Σχ. 5. Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου skarn. Διακρίνονται η χαρακτηριστική ζωνώδη δομή με την ζώνη του γρανάτη, την ζώνη του βεζουβιανίτη και την εξωτερική ζώνη του μοντισελλίτη (Δημητριάδης 1988).

Τα ορυκτά που χαρακτηρίζουν τα skarn είναι: γρανάτης (κυρίως γροσσουλάριος, ανδραδίτης), διοψίδιος, βολλαστονίτης, σκαπόλιθος, μοντισελλίτης, φλογοπίτης, τρεμολίτης, ανορθίτης, φορστερίτης, τιτανίτης, μελίλιθος, επίδοτο, κλινοζοϊσίτης, ζοϊσίτης, αιματίτης, ασβεστίτης καθώς και ορυκτά που συμμετέχουν ως επουσιώδη στην δομή των skarn (Δημητριάδης 1988). Επίσης, στα πετρογενετικά ορυκτά συμμετέχουν ο κασσιτερίτης, ο στανίτης, ο βιθερίτης, ο βαρύτης, η βήρυλλος, και ο φθορίτης (Παπασπύρου 2016). Παρατηρούμε ότι η ορυκτολογική σύσταση του φαινομένου skarn αντιπροσωπεύεται από πληθώρα ορυκτών με διαφορετικό χημισμό. Καθώς η ψύξη του μάγματος τείνει να ολοκληρωθεί, η υδροθερμική δραστηριότητα με τοπική μίξη είναι απολύτως ενεργή. Κατά την διάρκεια αυτή παρατηρείται η δημιουργία ορυκτών σουλφιδίων και οξειδίων. Τα ορυκτά που σχηματίζονται αντιπροσωπεύουν τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας και αλατότητας. Τα ορυκτά στο στάδιο αυτά είναι αμφίβολος, βιοτίτης, επίδοτο και χλωρίτης (Παπασπύρου 2016). Οι ορυκτολογικές παραγενέσεις των skarn συνάδουν απόλυτα με τις συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης, πίεση ρευστών και σύστασης πετρώματος ξενιστή κατά την ανάπτυξη skarn (Meinert 1992). Στο σχήμα 6 δίνεται η εικόνα της διείσδυσης σε ήδη υπάρχοντα πετρώματα.



Σχ. 6. Μεταμόρφωση επαφής. Παρατηρείται ο μαγματικός γρανιτικός όγκος και οι διαφορετικοί τύποι σχηματισμών μαζί με τα ορυκτά που δημιουργούνται, ανάλογα τις συνθήκες και το είδους του σχηματισμού που προϋπάρχει (<https://geologyglasgow.org.uk/local-rocks/metamorphic-rocks/>).

Τα skarn είναι σχηματισμός οποίος είναι αποτέλεσμα πολύπλοκων γεωλογικών και γεωχημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται στην λιθόσφαιρα της γης. Η γένεση του ιδιαίτερου τύπου σχηματισμού θεωρείται άρρηκτα συνδεδεμένη με την λειτουργία υδροθερμικών συστημάτων. Τα υδροθερμικά συστήματα δημιουργούνται με την γένεση μάγματος ύστερα από κάποιο γεωτεκτονικό γεγονός. Ειδικότερα, το skarn είναι ένα μετασωματικό πέτρωμα το οποίο σχηματίζεται σε επαφή μεταξύ ενός μαγματικού όγκου και ενός ανθρακικού πετρώματος. Σύμφωνα με τον Goldschmidt (1911) τα skarn μπορούν να δημιουργηθούν με πολλές μορφές. Ειδικότερα, τα skarn μπορούν να εμφανιστούν ως επίπεδα σώματα κατά μήκος της επαφής (skarn επαφής) αλλά και ως φλέβες μέσα στο ανθρακικό και/ή πυριτικό πέτρωμα (Zharikov et al. 2007) . Στο σχήμα 7 γίνεται αναπαράσταση του γεωτεκτονικού κύκλου που έχει μεγάλη σημασία για την δημιουργία κοιτασμάτων τύπου skarn.

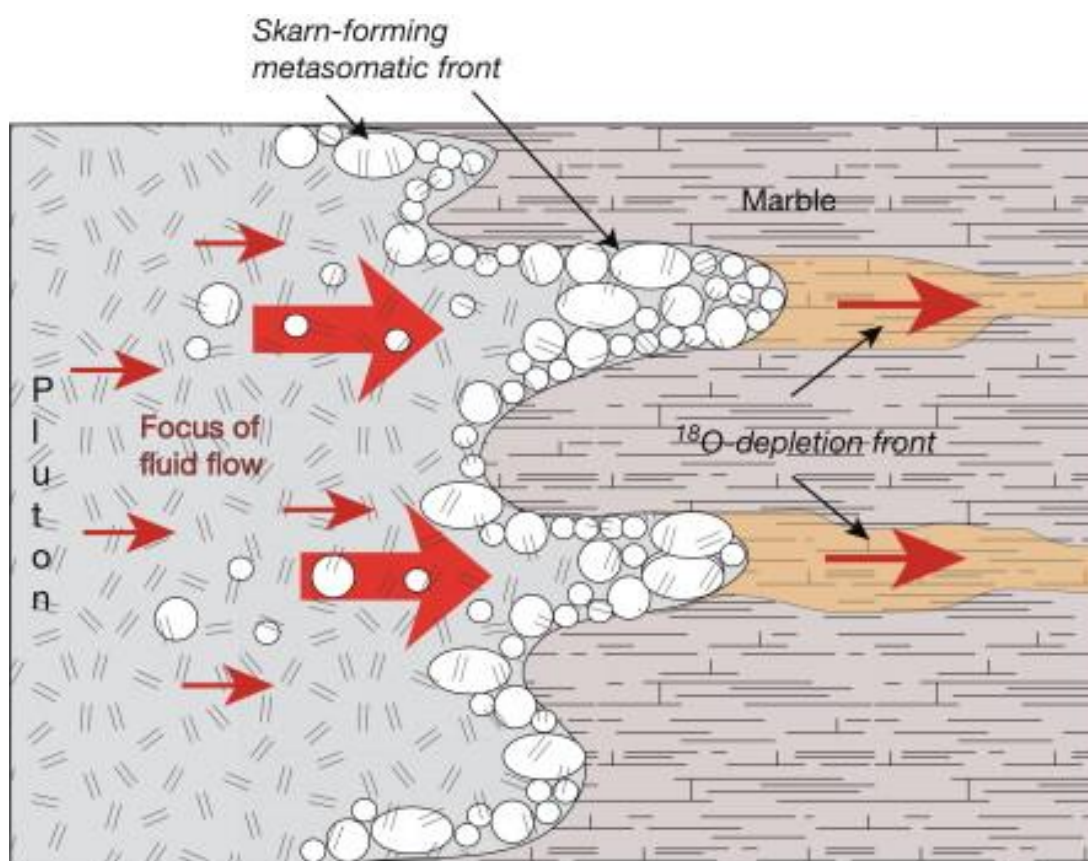


Σχ. 7. Τρισδιάστατη απεικόνιση του γεωτεκτονικού κύκλου. Υδροθερμικό στάδιο (<https://www.britannica.com/science/volcano>).

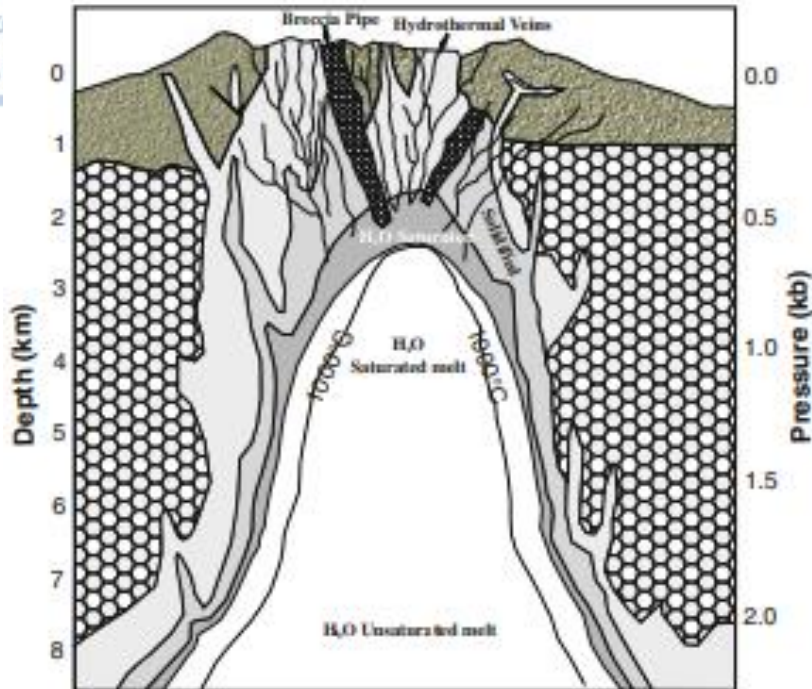
7.1. ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ

Τα υδροθερμικά διαλύματα έχουν τεράστια σημασία κατά την δημιουργία του φαινομένου skarn. Με την δράση τους διευκολύνονται όλες οι απαραίτητες γεωλογικές και γεωχημικές διεργασίες που έχουν ως αποτέλεσμα το skarn. Τα υδροθερμικά διαλύματα είναι φυσικώς θερμαινόμενα υδατικά ρευστά, τα οποία περιέχουν πληθώρα χημικών στοιχείων, ενώσεων και αερίων. Τα υδροθερμικά διαλύματα προέρχονται από την ψύξη του μαγματικού όγκου σε βάθος, ενώ λαμβάνουν την θερμοκρασία τους λόγω των υψηλών θερμοκρασιακών τιμών που επικρατούν εξαιτίας του μάγματος. Τα υδροθερμικά διαλύματα ανέρχονται υπό τις

συνθήκες χαμηλού ιξώδους και αρνητικής πυκνότητας (Sharma and Srivastava 2014). Η ροή των υδροθερμικών διαλυμάτων εξαρτάται από την ύπαρξη θραυσσιγενών δομών όπως είναι οι διακλάσεις και τα ρήγματα καθώς επίσης και από τα κενά των πόρων του πετρώματος (διαπερατότητα) τα οποία αυξάνουν κατά την επίδραση του μάγματος (Meinert et al. 2005). Η κυκλοφορία των ρευστών γίνεται μέσω των παραπάνω επιφανειών ασυνέχειας όπως διακρίνεται στο σχήμα 9 και έτσι σχηματίζονται πολυάριθμες φλέβες με τυπικά σχηματιζόμενα ορυκτά γρανάτης, βολλαστονίτης, πυρόξενος και ασβεστίτης. Η αλατότητα των υδροθερμικών ρευστών προσδιορίζεται μεταξύ των τιμών 10-45% κ.β. NaCl (Παπασπύρου 2016). Καθ' όλη την διάρκεια της αλληλεπίδρασης των υδροθερμικών ρευστών με το πέτρωμα υπάρχει αντίδραση μεταξύ τους. Τα υδροθερμικά διαλύματα μέσα από την συνεχή κυκλοφορία τους, προκαλούν τις διεργασίες της μετασωμάτωσης όπως διακρίνεται στο σχήμα 8. Τα ανερχόμενα υδροθερμικά διαλύματα δεν είναι πάντοτε εξαρτώμενα από τον μαγματικό όγκο που έχει διεισδύσει (Sharma and Srivastava 2014).



Σχ. 8. Απεικόνιση της δημιουργίας skarn με την δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων τα οποία προέρχονται από τον πλουτωνίτη και εισχωρούν εντός του μαρμάρου (Meinert et al. 2005, ShanksIII 2014).



Σχ. 9. Μοντέλο αναπαραγωγής της εξελικτικής διαδικασίας ψύξης ενός μαγματικού-υδροθερμικού γεγονότος σε συνάρτηση με το βάθος και την πίεση (Βάθος σε Km, πίεση σε Kb). Διακρίνεται η χαρακτηριστική ακανόνιστη μορφή φλεβών που δημιουργούν κατά την άνοδο τους τα υδροθερμικά διαλύματα (Burnham 1979, Sharma and Srivastava 2014).

7.2. ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗ

Η μετασώματωση χαρακτηρίζεται ως μια αλλοχημική μεταμορφική διεργασία. Η μετασωματική διεργασία πραγματοποιείται με την βοήθεια θερμών υδατικών διαλυμάτων. Τα θερμά υδατικά διαλύματα με την κυκλοφορία τους αλληλοεπιδρούν με την επιφάνεια των πετρωμάτων και με το πέρασ του χρόνου, τα διαβρώνουν. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή αλλοίωση της χημικής σύστασης του πετρώματος με την αντικατάσταση μερικών χημικών στοιχείων. Η αντικατάσταση γίνεται μεταξύ χημικών στοιχείων που συμμετέχουν στην σύσταση του πετρώματος και χημικών στοιχείων που μεταφέρονται με τα υδατοθερμικά διαλύματα. Η μεταβολή της αρχικής πετρογενετικής σύστασης είναι μη αντιστρεπτή. Την στερεά φυσική του κατάσταση διατηρεί το πέτρωμα καθ' όλη την διάρκεια των μετασωματικών διεργασιών, ενώ ο ιστός του χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο ως γρανοβλαστικός (Zharikov et al. 2007) .

Η μετασωμάτωση διαχωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες σύμφωνα με τον Korzhinskii (1957):

- **Διαχυτικός μετασωματισμός:** συντελείται με την διαδικασία της διάχυσης με σκοπό την διάλυση του πετρώματος με βάση μια στάσιμη διάλυση. Χημική διάλυση με είσοδο στους πόρους των πετρωμάτων. Τα διαχυτικά μετασωματικά πετρώματα συναντώνται κατά μήκος επιφανειών ασυνέχειας (διακλάσεις, ρήγματα) και επιφανειών επαφής σε χαλαρά ζωνώδη στρώματα. Η σύνθεση των ορυκτών μεταβάλλεται κατά μήκος της μετασωματικής ζώνης.
- **Διηθητικός μετασωματισμός:** συντελείται με διήθηση κατά την μεταφορά του διαλυμένου υλικού εντός των πετρωμάτων. Η διήθηση πραγματοποιείται με την βοήθεια της πίεσης και της συγκέντρωσης, με εισχώρηση του διαλυμένου υλικού εντός των πόρων του πετρώματος. Τα διηθητικά μετασωματικά πετρώματα καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο από ότι τα διαχυτικά μετασωματικά πετρώματα. Τέλος, σε αντίθεση με τα διαχυτικά πετρώματα, η σύνθεση των ορυκτών παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος κάθε μετασωματικής ζώνης.

Από το μοντέλο σχηματισμού των skarn μέσα από την επίδραση της διάχυσης και της διήθησης, το skarn προκύπτει ύστερα από την απουσία χημικής ισορροπίας στο σύστημα πλουτωνίτης – περιβάλλοντα πετρώματα, εξαιτίας της μόνιμης μεταβολής – μείωσης της θερμοκρασίας και της συνεχούς αντίδρασης των υδροθερμικών διαλυμάτων με τις επιφάνειες των πετρωμάτων (μεταβολή χημισμού). Η αντίδραση των υδροθερμικών διαλυμάτων με το ανθρακικό πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως μια μορφή φυσικού εμπλουτισμού (Newberry 1991).

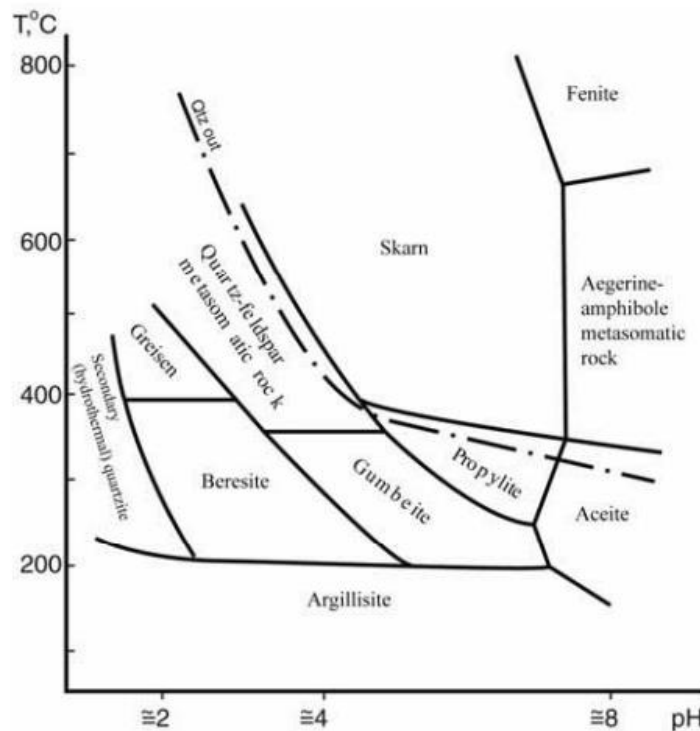
Σύμφωνα με τον Korzhinskii (1953) ο μαγματισμός επηρεάζει άμεσα την μετασωμάτωση και γι' αυτό τον λόγο διαχώρισε τις μετασωματικές διεργασίες σε στάδια με βάση τον χρόνο ως εξής: α) μετασωμάτωση στο μαγματικό στάδιο, β) μετασωμάτωση του μεταμαγματικού σταδίου.

A) Κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου σχηματίζονται πετρώματα ύστερα από διαχωρισμό διαλυμάτων των μαγματικών τηγμάτων από την υγρή φάση του μάγματος.

B) Τα πετρώματα της δεύτερης κατηγορίας σχηματίζονται έπειτα από την κρυστάλλωση του μάγματος. Τα πετρώματα αυτά επηρεάζονται από υδροθερμικά διαλύματα κατά την διάρκεια ψύξης του μαγματικού υλικού καθώς επίσης και από τυχόν θερμές πηγές, δηλαδή με μίξη υδροθερμικών νερών με μετεωρικό νερό.

Έπειτα, ο Korzhinskii (1953) διαχωρίζει το μεταμαγματικό στάδιο μετασώματωσης σε τρεις κατηγορίες ως εξής: α) το πρώιμο αλκαλικό στάδιο, β) την απόπλυση των οξέων, γ) το τελικό υδροθερμικό στάδιο. Ο Korzhinskii (1953) υποστήριξε την μεταβολή του pH των μαγματικών διαλυμάτων από όξινο έως αλκαλικό και την σταδιακή μείωση αυτού όταν λάβει την μέγιστη τιμή του. Με αυτόν τον τρόπο κατάφερε να ερμηνεύσει τις μεταμαγματικές διεργασίες που αφορούσαν την οξύτητα στις υδροθερμικές διαφοροποιήσεις.

Στο σχήμα 10 που ακολουθεί απεικονίζονται οι θερμοκρασίες σχηματισμού του skarn καθώς και των υπολοίπων μετασωματικών σχηματισμών. Επίσης, το διάγραμμα φανερώνει τις τιμές pH που επιβάλλεται να επικρατούν για τον σχηματισμό του skarn.



Σχ. 10. Διάγραμμα $T(^{\circ}\text{C})$ – pH όπου διακρίνονται οι οριακές τιμές δημιουργίας του κάθε μετασωματικού σχηματισμού. Παρατηρούμε ότι skarn δημιουργείται για $T \sim 400 - 800^{\circ}\text{C}$ και $\text{pH} \sim 3-7$ (Zharikov et al. 2007).

Ανάλογα με την γεωλογική τους τοποθέτηση προκύπτουν οι ακόλουθοι τύποι μετασώματωσης:

- **Αυτομετασώματωση:** σχηματίζεται κατά την διάρκεια του πρώιμου μεταμαγματικού σταδίου στην κορυφή του μαγματικού σώματος. Ως παράδειγμα αυτού του τύπου

μετασωμάτωσης είναι η αλβιτίωση σε γρανιτικά πετρώματα και η σερπεντινίωση σε υπερβασικούς σχηματισμούς.

- **Οριακή μετασωμάτωση:** χαρακτηρίζεται η μετασωμάτωση που λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο διαφορετικών τύπων πετρωμάτων.
- **Μετασωμάτωση επαφής:** χαρακτηρίζεται η μετασωμάτωση που προκαλείται κατά την επαφή ενός μαγματικού υλικού με ένα πέτρωμα. Συμβαίνει σε διάφορα στάδια της μαγματικής εξέλιξης. Οι εσωτερικές ζώνες επαφής αναπτύσσονται με αντικατάσταση από τον μαγματικό όγκο, ενώ οι εξωτερικές ζώνες επαφής σχηματίζονται από αντικατάσταση του πετρώματος ξενιστή.
- **Διμετασωμάτωση:** αποτελεί μια κατηγορία της μετασωμάτωσης επαφής με αμφίδρομη διάχυση πληθώρα συστατικών μεταξύ των δύο σχηματισμών.
- **Φλεβική μετασωμάτωση:** συγκαταλέγεται στην διαχυτική μετασωμάτωση με σχηματισμό συμμετρική μετασωματική ζώνωση σε κάθε πλευρά της φλέβας.
- **Περιοχική μετασωμάτωση:** Καταλαμβάνει μεγάλες εκτάσεις κατά την επίδραση του, ενώ συναντάται σε πληθώρα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα. Σχηματίζει κατά το μαγματικό και πρώιμο μεταμαγματικό στάδιο αλκαλικά μετασωματικά πετρώματα. Στις εξωτερικές ζώνες, όπου αποτελούνται κατά βάση από πετρώματα περιοχικής μετασωμάτωσης, σε μικρό έως μεσαίο βάθος σχηματισμού, συντελείται η δημιουργία κοιτασμάτων μετάλλων όπως greisens, χαλαζιο-σερικιτικά πετρώματα, προπηλίτες κ.ά. Υπάρχει γενετική συγγένεια μεταξύ μεταμορφισμού και μετασωματισμού στον μαγματικό ορίζοντα, καθώς είναι διεργασίες άρρηκτα συνδεδεμένες οι μία από την άλλη (Zhdanov et al., 1978, Plyushchev 1981, Gryaznov 1992, Zharikov et al. 2007).

7.3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ SKARN

Η σύσταση των skarn περιέχει αδρόκοκκα πυριτικά ορυκτά του Ca, Fe, Mg, Mn, Al, τα οποία δημιουργούνται ύστερα από την επίδραση της μεταμόρφωσης επαφής ή της περιοχικής μεταμόρφωσης με αντιδράσεις αντικατάστασης. Κατά των σχηματισμό των skarn συμβαίνουν τα εξής:

- A) Ανακρυστάλλωση των ανθρακικών πετρωμάτων
- B) Μετασωματικές διεργασίες μεταξύ ανόμοιων λιθολογικών σχηματισμών
- Γ) Μετασωμάτωση μέσω διήθησης με την επίδραση υδροθερμικών ρευστών από τον μαγματικό όγκο (Einaudi et al. 1981).

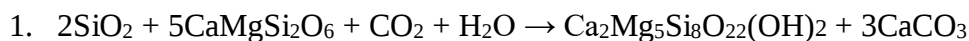
Η μεταμορφική ζώνη επαφής (άλλω μεταμόρφωσης) που σχηματίζεται περιμετρικά από τον πλουτωνικό όγκο μπορεί να λάβει διαστάσεις ακόμη και μερικών χιλιομέτρων (δημιουργία ζώνωσης). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης κινητικότητας των υδροθερμικών ρευστών (Meinert 2005). Μερικά χημικά στοιχεία και ενώσεις όπως είναι τα παρακάτω H_2O , CO_2 , S, Cl, K, Na, O, Si, Ca, Mg, Fe, P, W, Al ταξινομήθηκαν από τον Smirnov (1976) ξεκινώντας από τα στοιχεία με την μεγαλύτερη κινητικότητα και καταλήγοντας την μικρότερη. Επομένως διακρίνονται ευκίνητα και δυσκίνητα στοιχεία.

Ο Meinert (1992) υποστήριξε ότι τα ρευστά που οφείλονται για τις μετασωματικές διεργασίες δύναται να έχουν εκτός από μαγματική και μεταμορφική, μετεωρική και θαλάσσια προέλευση.

Τα θερμοκρασιακά όρια σχηματισμού του φαινομένου skarn κυμαίνονται μεταξύ 200-700°C, ενώ τα όρια της πίεσης μεταξύ 0,3-3 kbar. Τα στάδια της γένεσης skarn παρουσιάζονται σε κύριες κατηγορίες ως εξής με χρονική σειρά από το αρχικό προς το τελικό:

- I. Ισοχημική θερμική μεταμόρφωση
- II. Μετασωμάτωση
- III. Υδροθερμική εξαλλοίωση

Σύμφωνα με τους Einaudi et al. (1981) οι κυριότερες μετασωματικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την γένεση των skarn είναι οι εξής:



Διοψίδιος

Τρεμολίτης



Εδενβεργίτης

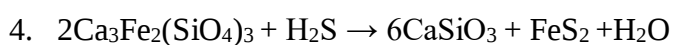
Ανδραδίτης

Μαγνητίτης



Εδενβεργίτης

Ανδραδίτης



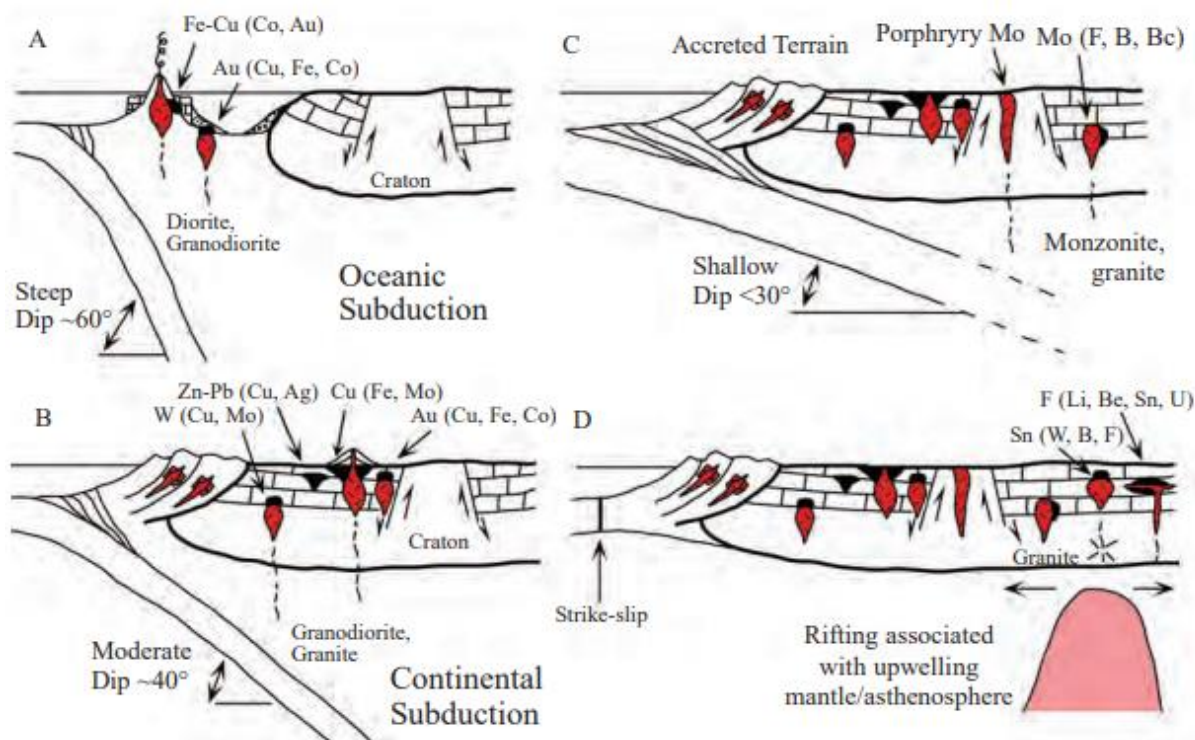
Ανδραδίτης

Βολλαστονίτης

(Παπασπύρου 2016)

Τα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα στα οποία επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες για τον σχηματισμό skarn και της μεταλλοφορίας του είναι ι) ωκεάνια υποβύθιση ιι) μεταβατική, μικρής γωνίας υποβύθιση ιιι) ηπειρωτική υποβύθιση και ιν) ηπειρωτική διάρρηξη (Meinert et al. 2005).

Στο σχήμα 11 γίνεται σχηματική αναπαράσταση των γεωτεκτονικών περιβαλλόντων που σχετίζονται με την δημιουργία skarn και εν συνεχεία με την μεταλλοφορία του.



Σχ. 11. Τα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα στα οποία σχηματίζονται κοιτάσματα τύπου skarn. Στο σχήμα αναφέρονται ανάλογα με το γεωτεκτονικό περιβάλλον, τα χρήσιμα χημικά στοιχεία τα οποία όταν υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες αποτελούν κοιτάσμα (Meinert et al 2005).

Για κάθε γεωλογικό φαινόμενο απαιτείται ένα μεγάλο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση του, έτσι και οι παραπάνω διαδικασίες λαμβάνουν τέλος, ύστερα από μια μεγάλη διάρκεια δράσης. Ο τύπος σχηματισμού των κοιτασμάτων τύπου skarn θεωρείται εξαρτώμενος από την παγκόσμια γεωδυναμική. Μέσα από όλες αυτές τις φυσικές και γεωλογικές διεργασίες γεννιούνται τα λεγόμενα κοιτάσματα τύπου skarn.

7.4. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ SKARN

Η ταξινόμηση των skarn γίνεται με βάση τα εξής κριτήρια:

- ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση → Mg-skarn ή Ca-skarn.
- ανάλογα την απόσταση από τον μαγματικό όγκο → κοντινά (proximal) skarn ή απομακρυσμένα (distal) skarn.
 - Τα κοντινά (proximal) skarn διακρίνονται ανάλογα με το είδος του πετρώματος και την λιθολογική σχέση των πετρωμάτων → Ένδο-skarn ή Έξω-skarn

Με βάση την ορυκτολογική τους σύσταση τα skarn διακρίνονται σε μαγνησιούχα και ασβεστιούχα. Μαγνησιούχα skarn (Mg-skarn) προκύπτουν όταν το προϋπάρχον πέτρωμα είναι δολομίτης, ενώ τα ασβεστιούχα skarn (Ca-skarn) προκύπτουν από ασβεστιούχους σχηματισμούς (ασβεστόλιθος, μάρμαρο).

7.4.1. ΜΑΓΝΗΣΙΟΥΧΑ SKARN

Ειδικότερα, για τα μαγνησιούχα skarn προκύπτει πως σχηματίζονται πιθανώς κατά το κύριο μαγματικό στάδιο αλλά είναι δυνατόν να δημιουργηθούν και μετέπειτα. Σύμφωνα με τους Ray and Webster (1991) προκύπτουν από την αντικατάσταση των δολομιτών. Είναι πετρώματα υψηλής θερμοκρασίας, ενώ την ορυκτολογική τους σύσταση την χαρακτηρίζουν τα ορυκτά φορστερίτης, διοψίδιος, σπινέλλιος, περίκλαστο, κλινοχουμίτης, φλογοπίτης, παραγασίτης. Τα μαγνησιούχα skarn σχηματίζονται κοντά στην επαφή του μαγματικού όγκου με τα ασβεστιο-μαγνησιούχα ή μαγνησιούχα ανθρακικά πετρώματα. Η μεταλλοφορία των μαγνησιούχων skarn περιέχει τα ακόλουθα χημικά στοιχεία Fe, Cu, Au, Fe-Mg βορικά και φλογοπίτης. Η τυπική ζώνωση που σχηματίζουν τα μαγνησιούχα skarn είναι μάγμα → πλαγιόκλαστο + διοψίδιος → κλινοπυρόξενος + σπινέλλιος → φορστερίτης + σπινέλλιος → φορστερίτης + σπινέλλιος + ασβεστίτης → δολομίτης.

Τα ορυκτά των μαγνησιούχων skarn τα οποία υπόκεινται στο μαγματικό στάδιο είναι δολομίτης, περίκλαστο, μαγνησίτης, ενστατίτης, φορστερίτης – ασβεστίτης, μοντισελλίτης, μοντισελλίτης – περίκλαστο, μοντισελλίτης – σπουρίτης, ακερμανίτης, μερβινίτης, μερβινίτης – περίκλαστο και κορούνδιο – πλαγιόκλαστο. Η παραπάνω ορυκτολογική παραγένεση είναι άμεσα εξαρτώμενη από της συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης του P_{CO_2} καθώς και με την χημική δράση του CaO .

Τα μαγνησιούχα skarn τα οποία σχετίζονται με το μεταμαγματικό στάδιο, γεννιούνται με αντικατάσταση των σχηματισμών που έχουν δημιουργηθεί κατά το μαγματικό στάδιο. Η ζώνωση τους είναι περισσότερο περίπλοκη και κυρίως ανομοιόμορφη. Η ορυκτολογική παραγένεση των μαγνησιούχων skarn που υπόκεινται στο μεταμαγματικό στάδιο είναι: φλογοπίτης – διοψίδιος, φλογοπίτης – φορστερίτης, μαγνησίτης – φορστερίτης, διοψίδιος – μοντισελλίτης, μοντισελλίτης – βρουσίτης, μοντισελλίτης - δελλαίτης, μοντισελλίτης – φοσαγίτης, παργασίτης - διοψίδιος, κλινοχουμίτης, μαγνητίτης κ.α. Η παραπάνω παραγένεση εξαρτάται τόσο από τις συνθήκες P-T όσο και από την χημική συμπεριφορά των παρακάτω στοιχείων και οξειδίων: CO₂, K₂O, Na₂O, F₂, Cl₂, B₂O₃, FeO. Τα θερμοκρασιακά όρια σχηματισμού είναι 750-450°C ενώ οι τιμές πίεσης που επικρατούν είναι μεταξύ 0.5-10 kbar.

Ένα μεγάλο εύρος μεταλλοφορίας όπως Cu, Mo, W, Be, Sn, Pb, Zn, Au, B, δύναται να σχηματιστεί κάτω από χαμηλές θερμοκρασίες κατά τις υδροθερμικές διεργασίες. Η μεταλλοφορία αυτή σχηματίζεται κοντά στο μετά-skarn με τα ορυκτά ακτινόλιθος, σερπεντίνη, τάλκης, χλωρίτης και ανθρακικά ορυκτά (Zharikov et al. 2007).

7.4.2. ΑΣΒΕΣΤΙΟΥΧΑ SKARN

Τα ασβεστιούχα skarn είναι αποτέλεσμα του μεταμαγματικού σταδίου και δημιουργούνται στην επαφή μαγματικού πετρώματος με ασβεστιτικό ανθρακικό σχηματισμό. Σύμφωνα με τους Ray and Webster (1991) προκύπτουν από αντικατάσταση ασβεστόλιθων ή μαρμάρων. Τα ασβεστιούχα skarn θεωρούνται πετρώματα μέσης έως υψηλής θερμοκρασίας που περιέχουν mega-κρύσταλλους γρανάτη, διοψίδιου, βολλαστονίτη ή πλούσια μαγγανιούχα πυροξενοειδή ορυκτά. Σε αυτού το είδους τα skarn συναντάται μεταλλοφόρα σώματα τα οποία περιέχουν βασικά μέταλλα, Fe, Cu, W, Mo, Be, B, U, REE. Τα ασβεστιούχα skarn έχουν την ικανότητα να αντικαταστήσουν τα μαγνησιούχα κάτω από μέσες συνθήκες P-T, λόγω της μεγάλης χημικής δράσης του CaO, με μείωση της θερμοκρασίας και την ταυτόχρονη μείωση της συγκέντρωσης του CO₂ στα υδροθερμικά διαλύματα (Pertsev 1977). Η ορυκτολογική παραγένεση στα ασβεστιούχα skarn είναι mega-κρυσταλλικός γρανάτης, βεζουβιανίτης, κλινοπυρόξενος, βολλαστονίτης, ροδονίτης με βουσταμίτη, επίδοτο, σκαπόλιθος, πλαγιόκλαστο και επουσιώδη πυριτικά ορυκτά με αναλογία mole Ca/Si ≥ 1.5 .

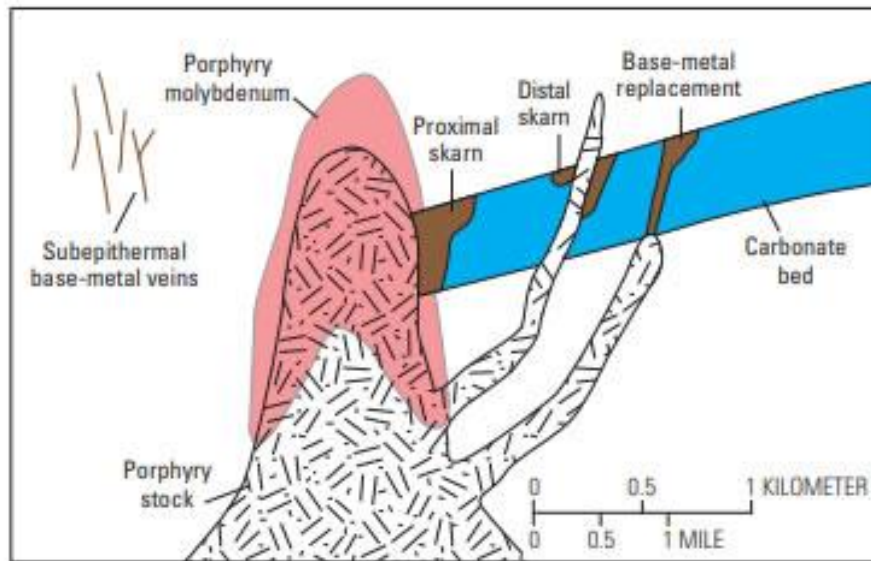
Η αλληλουχία των φάσεων χαρακτηρίζεται από μια ζώνη δύο ορυκτών ανδεσίνη ή σκαπόλιθο, ή K-άστριος που συνδέεται με διοψίδιου ή γροσσουλάριο ή επίδοτο. Έπειτα, συναντάται μια ζώνη με ένα ορυκτό μέγα-γρανάτης ή ασβεστίτης ή κλινοπυρόξενος και εν συνεχεία ακολουθεί πάλι μια ζώνη δύο ορυκτών γρανάτης-κλινοπυρόξενος. Μερικές φορές μπορεί να υπάρχει και η ζώνη του βολλαστονίτη. Τα παραπάνω είναι αποτελέσματα τα οποία εξαρτώνται από συγκεκριμένες συνθήκες P-T και την χημική δράση των Na_2O , K_2O , F_2 , Cl_2 , SO_3 , FeO , O_2 , CO_2 . Τα θερμοκρασιακά όρια για τον σχηματισμό ασβεστιούχων skarn είναι 650-400°C, ενώ τα όρια των πιέσεων είναι 0.5-4 kbar.

Χαμηλής θερμοκρασίας σχηματιζόμενα ασβεστιούχα skarn είναι εμπλουτισμένα Fe^{2+} και Mn^{2+} και περιέχουν εδενβεργίτη, σπεςσαρτίνη και ροδονίτη. Υψηλής θερμοκρασίας ασβεστιούχα skarn χαρακτηρίζονται αυτά που περιέχουν μεγάλη ποσότητα ασβεστοπυριτικά ορυκτά όπως σπουρίτης και μερβινίτης. Η θερμοκρασία σχηματισμού ποικίλει ανάμεσα 700-900°C και η πίεση 0.5-1.5 kbar, ενώ X_{CO_2} . Η μεταλλοφορία των ασβεστιούχων skarn χαρακτηρίζεται από τα εξής στοιχεία: W, Sn, Be, Mo, B, Cu, Au, Ag, U, REE (Zharikov et al. 2007).

Με βάση την απόσταση από την διείσδυση τα skarn διακρίνονται σε κοντινά (proximal) ή σε απομακρυσμένα (distal).

7.4.3. KONTINA (PROXIMAL) KAI ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΑ (DISTAL) SKARN

Τα κοντινά (proximal) είναι τα skarn τα οποία σχηματίζονται σε μικρή απόσταση από την διείσδυση. Οι διεργασίες της αντικατάστασης αναπτύσσονται κοντά στην διείσδυση (Ray and Webster 1991). Τα απομακρυσμένα (distal) είναι τα skarn τα οποία σχηματίζονται σε μακρινή απόσταση από την διείσδυση. Σύμφωνα με τους Ray and Webster (1991) σχηματίζονται λόγω της μετακίνησης των ρευστών σε μεγάλες αποστάσεις διαμέσου των κενών των πόρων του πετρώματος, ή των στρωματογραφικών ασυνεχειών, ενώ η μητρική πηγή τους είναι άγνωστη. Τα ρευστά αυτά πολλές φορές περιέχουν χρήσιμα μέταλλα τα οποία αποθέτουν σε μεγάλες αποστάσεις από την διείσδυση όπως χαρακτηρίστηκα φαίνεται στο σχήμα 12.



Σχ. 12. Μοντέλο προσομοίωσης της μαγματικής διείσδυσης στην επαφή με το ανθρακικό πέτρωμα. Διακρίνεται το κοντινό (proximal) και το απομακρυσμένο (distal) skarn (www.geology.com).

Τα κοντινά (proximal) skarn διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος του πετρώματος και την λιθολογική σχέση των πετρωμάτων που συμμετέχουν στην μεταμόρφωση. Διακρίνονται σε ένδο-skarn και έξω-skarn.

7.4.4. ΕΝΔΟ-SKARN

Ο όρος ένδο-skarn χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την περιοχή εκείνη που δημιουργείται κατά την αντικατάσταση του ανθρακικού πετρώματος εξαιτίας της διείσδυσης του μαγματικού υλικού. Το ένδο-skarn σχηματίζεται στην επαφή με τον πλουτωνίτη. Η γενεσιουργός αιτία της περιοχής αυτής θεωρείται η άνοδος υδροθερμικών διαλυμάτων. Τα ένδο-skarn συναντώνται κοντά σε πετρώματα τα οποία είναι έντονα διαρρηγμένα και συνεπώς εξαιρετικά περατά. Αυτό συμβαίνει καθώς η κίνηση των μεταμορφικών ρευστών γίνεται διαμέσου των κενών που υπάρχουν στα πετρώματα όπως ο σχιστόλιθος, ο ασβεστόλιθος κ.α. Μέσα σε αυτήν την περιοχή αποτίθενται τα χρήσιμα στοιχεία της μεταλλοφορίας. Σε μεγάλο βάθος κοντά στον πλουτωνικό όγκο η διάρρηξη είναι μικρή, επομένως η κυκλοφορία των μετασωματικών ρευστών περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό. Τα ένδο-skarn σχηματίζουν μια λεπτή ζώνη στην επαφή με την διείσδυση (Einaudi and Burt 1982).

Στην περίπτωση όπου έχει αναπτυχθεί και το ένδο-skarn και το έξω-skarn, η μεταλλοφορία βρίσκεται σε μεγαλύτερο βαθμό στο ένδο-skarn στην περίπτωση όπου απουσιάζει ο ασβεστόλιθος (Shimazaki 1982), ενώ στην περίπτωση όπου το skarn δημιουργείται κοντά ή στην οροφή του πλουτωνίτη που σχετίζεται με πορφυριτικό χαλκούχο πλουτωνισμό (Allcock 1982, Westra, 1982) και κασσιτερούχα skarn (Dobson 1982), το ένδο-skarn απουσιάζει. Επομένως, ο σχηματισμός ένδο-skarn ευνοείται στις περιοχές όπου η ροή των ρευστών κυριαρχεί, κοντά στον πλουτωνίτη (σε βάθος) ή στην επαφή με τους ασβεστόλιθους (Einaudi and Burt 1982). Στα ένδο-skarn συναντάται η ακόλουθη ζώνη ορυκτών από τον πλουτωνίτη προς τον ασβεστόλιθο: βιοτίτης → αμφίβολος → πυρόξενος → (γρανάτης). Με τον σχηματισμό του βιοτίτη κάθε K-άστριος καταστρέφεται, ενώ το πλαγιόκλαστο παραμένει στην σύσταση καθ' όλη την διάρκεια μέχρι και τον σχηματισμό του γρανάτη (Einaudi and Burt 1982).

7.4.5. ΕΞΩ-SKARN

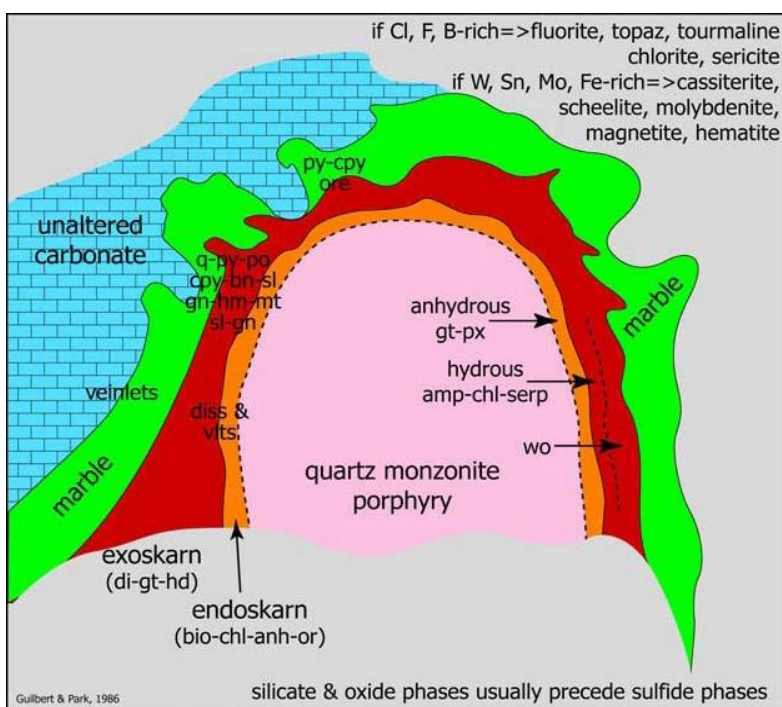
Τα έξω-skarn καταλαμβάνουν την περιοχή που βρίσκεται σε άμεση επαφή με το ανθρακικό πέτρωμα. Τα έξω-skarn αναπτύσσονται σε βάρος του ανθρακικού πετρώματος το οποίο προϋπάρχει πριν το γεγονός της διείσδυσης του πλουτωνίτη.

Ειδικότερα, η διάκριση για τα έξω-skarn σχετίζεται καθαρά με την λιθολογική ενότητα που προϋπάρχει και με την οποία λαμβάνει χώρα η αντικατάσταση της. Αν η σύσταση του περιβάλλοντος πετρώματα είναι δολομιτική, τότε σχηματίζεται μαγνησιούχο skarn, ενώ αν η είναι ασβεστιτική δημιουργείται ανθρακικό skarn. Τα μαγνησιούχα skarn περιέχουν σημαντικά μαγνησιούχα και πυριτιούχα ορυκτά όπως ο φορστερίτης, σερπεντίνη, διοψίδιος, ασβεστίτης, σπινέλλιος. Τα ασβεστιούχα skarn αποτελούνται από σημαντικά ορυκτά του ασβεστίου, σιδήρου συνδεδεμένα με πυριτική ρίζα όπως είναι ο γρανάτης και πυροξενοειδή ορυκτά. Η πηγή των χημικών στοιχείων είναι τα περιβάλλοντα πετρώματα και τα ρευστά συστατικά που ελευθερώνονται από το μάγμα. Αν αλλάξει η πηγή αλλάζει και το είδος του κοιτάσματος.

Το μεγαλύτερο κοιτασματολογικό ενδιαφέρον βρίσκεται στην κατηγορία των ασβεστιούχων έξω-skarn, δηλαδή των skarn που δημιουργούνται στην επαφή με το ασβεστιτικό πετρώματος (ασβεστόλιθος, μάρμαρο) και προκύπτει από την χημική αντικατάσταση αυτού. Στα ασβεστιούχα έξω-skarn, η ορυκτολογική σύσταση τους χαρακτηρίζεται κατά μεγάλο βαθμό από την παρουσία γρανάτη και πυρόξενου, τα οποία

ορυκτά αντιπροσωπεύουν το πρώτο στάδιο αντίδρασης μεταξύ των υδροθερμικών ρευστών και του ασβεστιτικού πετρώματος. Στο στάδιο αυτό οι ζώνες ορυκτών που γεννιούνται έχουν την ακολουθία γρανάτης → πυρόξενος → (βολλαστονίτης) → μάρμαρο. Η σύσταση του γρανάτη κατά κύριο λόγο είναι γροσσουλάριος+ ανδραδίτης και σε μικρότερες ποσότητες σπεςσαρτίνης + ανδραδίτης. Η ποσότητα σπεςσαρτίνης + ανδραδίτη αυξάνεται με αύξηση της αντικατάστασης του Al από Fe^{3+} . Στους πυρόξενους των Ca-έξω-skarn παρατηρείται μια αύξηση του Mn με ταυτόχρονη αύξηση του λόγου Fe/Mg.

Στα skarn είναι δυνατόν να βρίσκεται σε μεγάλη ποσότητα και παραπάνω από ένα χημικό στοιχείο. Ειδικότερα, πολλά κασσιτερούχα και βολφραμιούχα skarn είναι πλούσια σε Al, το οποίο αντιπροσωπεύεται από τα ορυκτά ιδοκράσης (βεζουβιανίτης) και περιέχεται επιπλέον στην περιοχή του πυρόξενου ή του βολλαστονίτη. Επίσης, στα Zn- Pb skarn συναντάται αύξηση του ποσοστού του Mn και αντιπροσωπεύεται από τα ορυκτά βουσταμίτης ή ροδονίτης στην περιοχή του βολλαστονίτη (Einaudi and Burt 1982). Συνοπτικά στο σχήμα 13 που απεικονίζει την διεύθυνση, παρουσιάζονται μερικά στοιχεία που προαναφέρθηκαν.



Σχ. 13. Σκαρίφημα της δομής ενός skarn. Διακρίνεται ο πλουτωνίτης, το ένδο-skarn, το έξω-skarn με την επαφή στο ανθρακικό πέτρωμα. Αναγράφονται, επίσης οι παραγενέσεις: α) Αν υπάρχει πληθώρα Cl, F, B τότε έχουμε τον σχηματισμό φθορίτη, τοπάζιο, τουρμαλίνη, χλωρίτη, σερίκίτη. β) Αν υπάρχει πληθώρα W, Sn, Mo, Fe τότε έχουμε τον σχηματισμό κασσιτερίτη, σεελίτη, μολυβδαινίτη, μαγνητίτη, αιματίτη (Guilbert and Park 1986).

8. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ SKARN

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό εμβαθύνει στα κοιτάσματα τύπου skarn, στα είδη τους, στα χαρακτηριστικά τους και σε ιδιαίτερες ιδιότητες τους. Θα αντιληφθούμε την αξία του συγκεκριμένου τύπου κοιτάσματος και την συνεισφορά του στις ανάγκες της παγκόσμιας αγοράς.

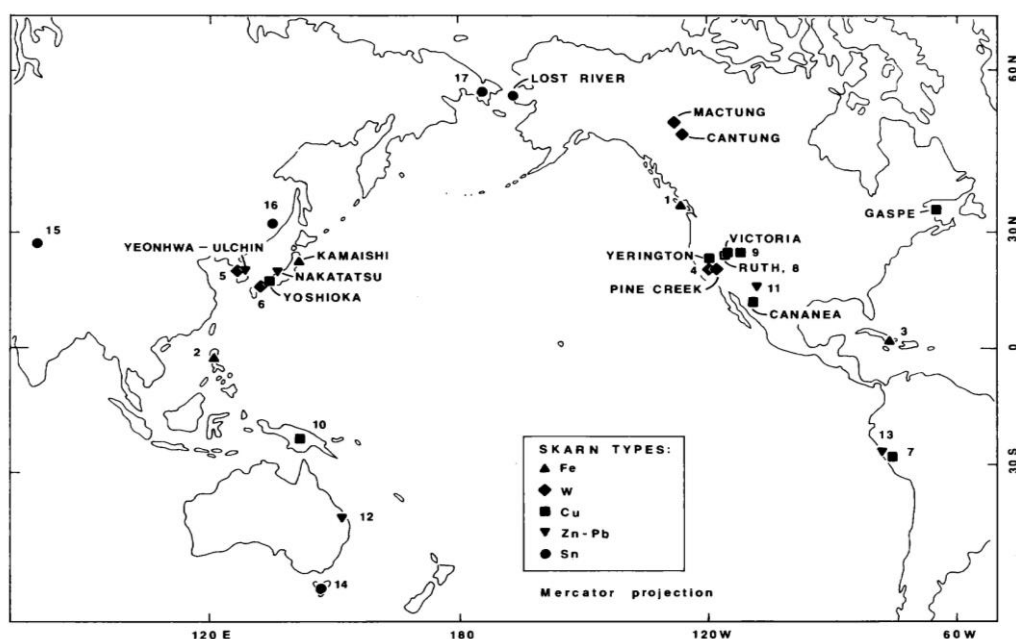
8.2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΥΠΟΥ SKARN

Κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί πως ο όρος κοιτάσματα τύπου skarn χρησιμοποιείται για να περιγράψει επαρκώς την ορυκτολογική παραγένεση που δημιουργείται κατά τις διεργασίες σχηματισμού των φαινομένων skarn. Οι Einaudi et al. (1981) ήταν οι πρώτοι που διαχώρισαν και το πρότειναν στην επιστημονική κοινότητα. Η πρόταση τους έτυχε ευρεία αποδοχή και υιοθετήθηκε. Επομένως, κάθε αναφορά στον όρο skarn προσδιορίζει την ορυκτολογική παραγένεση, οποία αντιπροσωπεύει τα κοιτάσματα (Einaudi et al. 1981).

Σύμφωνα με τον Meinert (1992) οι τρεις γεωλογικές διεργασίες οι οποίες είναι ικανές να σχηματίσουν κοιτάσμα τύπου skarn είναι α) με επίδραση της μεταμόρφωσης επαφής, β) με επίδραση της περιοχικής μεταμόρφωσης κατά το κύριο τεκτονικό γεγονός και γ) όπως προαναφέρθηκε μέσω της διαδικασίας της μετασώματωσης. Κοιτάσματα skarn χαρακτηρίζονται τα skarn τα οποία στην χημική τους σύσταση περιέχουν χρήσιμα στοιχεία που είναι κομβικής σημασίας για τις ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας. Αν η περιεκτικότητα των χρήσιμων αυτών στοιχείων είναι σε ποσοστό τέτοιο, που ξεπερνά το καθορισμένο από την εκάστοτε νομοθεσία, όριο εκμεταλλευσιμότητας, τότε το κοιτάσμα χαρακτηρίζεται εκμεταλλεύσιμο και εν συνεχεία αν οι παράγοντες είναι ευνοϊκοί και παρθούν όλα τα μέτρα περιβαλλοντικής προστασίας, μπορεί να τύχει εκμετάλλευση. Στην αντίπερα όχθη, όπου η χημική ανάλυση δείξει ότι η συγκέντρωση των στοιχείων δεν επαρκεί για να ξεπεράσει το όριο εκμεταλλευσιμότητας, τότε το κοιτάσμα είναι μη εκμεταλλεύσιμο και αντί του όρου «κοιτάσμα» χρησιμοποιείται ο όρος «εμφάνιση» .

Σύμφωνα με τους Einaudi and Burt (1982) τα κοιτάσματα skarn σχετίζονται με πολλά και διαφορετικά γεωτεκτονικά περιβάλλοντα, ενώ οι ηλικίες των κοιτασμάτων αυτού του τύπου, έχουν μεγάλο εύρος και προσδιορίζονται από την περίοδο του Προ-Κάμβριου (πριν από 540εκ. χρόνια) έως και την περίοδο του Τριτογενούς (67-1,7 εκ. χρόνια περίπου).

Τα κοιτάσματα τύπου skarn σχηματίζουν μια πολυσύνθετη εικόνα, αναμειγμένα με το πέτρωμα ξενιστή στο οποίο είναι δυνατόν να συμμετέχουν πετρώματα ανθρακικά, σχιστόλιθοι, ηφαιστειακά και πλουτωνικά. Οι Einaudi and Burt (1982) υποστήριξαν πως τα περισσότερα κοιτάσματα τύπου skarn τα οποία έχουν μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον εμφανίζονται σε ορογενετικές ζώνες με διοριτικό έως γρανιτικό πλουτωνισμό σε συνδυασμό με κάποιου είδους μαγματικής και υδροθερμικής δραστηριότητας. Στο παρακάτω σχήμα 14 προβάλλονται σε χάρτη κάποια από τα γνωστά κοιτάσματα τύπου skarn ανά τον κόσμο.



Σχ. 14. Γεωγραφικός προσδιορισμός των κοιτασμάτων τύπου skarn στον παγκόσμιο χάρτη (Einaudi and Burt 1982).

8.3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ SKARN

Τα skarn περιέχουν πληθώρα μετάλλων οικονομικής σημασίας. Συγκεκριμένα, τα μέταλλα τα οποία περιέχονται στα skarn σε μεγάλες ποσότητες και είναι μείζονος σημασίας για την παγκόσμια αγορά είναι Fe, Cu, Ag, Au, Pb, Zn, Mo, W, U, Sn, F, B και REE. Ιδιαίτερη σημασία όμως από τα προαναφερθέντα χημικά στοιχεία έχουν Fe, Cu, Au, W, Zn, Mo, Sn (Meinert 1992).

A) Κοιτάσματα Fe τύπου skarn

Τα κοιτάσματα Fe εκμεταλλεύονται για το ορυκτό μαγνητίτη που κυριαρχεί στην ορυκτολογική τους σύσταση. Στην σύσταση των εν λόγω κοιτασμάτων υπάρχουν και σε μικρότερο ποσοστό και τα στοιχεία Cu, Co, Ni και Au τα οποία συνήθως δεν είναι ικανά για εκμετάλλευση (Grigoryev et al 1990). Σύμφωνα με τον Meinert (1992) τα κοιτάσματα Fe θεωρούνται τα μεγαλύτερα κοιτάσματα τύπου skarn. Τα κοιτάσματα Fe μπορούν να φτάσουν και περισσότερο από 500εκ. τόνους με τον Fe περιέχεται ακόμη και στους 300εκ. τόνους.

Επιπροσθέτως, ορυκτά τα οποία είναι πλούσια σε Fe και εμφανίζονται στα Ca-skarn είναι τα: γρανάτης, πυρόξενος, επίδοτο, αλβίτης και ακτινόλιθος. Η εν λόγω παραγένεση συναντάται στα Ca-skarn τα οποία εξελίσσονται κατά την δημιουργία ωκεάνιου νησιωτικού τόξου στην επαφή ηφαιστειακού υλικού με ασβεστόλιθο. Σε μερικά κοιτάσματα αυτού του τύπου, στην περιοχή του ένδο-skarn η περιεκτικότητα του Fe δύναται να υπερβεί αυτή του έξω-skarn (Purton et al. 1989). Τα Mg-skarn σε αντίθεση με τα Ca-skarn δεν είναι τόσο πλούσια σε Fe καθώς τα ορυκτά φορστερίτης, διοψίδιος, περίκλαστο, τάλκης, σερπεντίνης τα οποία χαρακτηρίζουν τα Mg-skarn είναι φτωχά σε Fe (Meinert 1992).

Σύμφωνα με τους Einaudi et al. (1981), το μέγεθος των κοιτασμάτων Fe τύπου skarn υπολογίζεται μεταξύ των τιμών 5-200εκ. τόνους και η τυπική περιεκτικότητα Fe στο κοιτάσμα καταγράφεται σε ποσοστό 40%. Κυριαρχεί το χημικό στοιχείο Fe, ενώ σε μικρότερο ποσοστό υπάρχουν τα Cu, Co, Au. Τα κοιτάσματα αυτά σχηματίζονται στο ωκεάνιο νησιωτικό τόξο και στο ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο. Ο μαγματισμός ποικίλει από γαββικό έως κυρίως διοριτικό, ενώ ο πλουτωνισμός καταλαμβάνει μεγάλη έκταση αλλά με μικρά αποθέματα μάγματος. Η περιοχή στο έξω-skarn είναι πλούσια σε Fe και ιδιαίτερα φτωχή σε S, Mn. Η μεταλλοφορία του Fe βρίσκεται στο ορυκτό μαγνητίτης. Ένα παράδειγμα κοιτάσματος Fe-skarn είναι το κοιτάσμα Shinyama στην ΒΑ Ιαπωνία (Einaudi and Burt 1982).

B) Κοιτάσματα W τύπου skarn

Τα κοιτάσματα W του τύπου skarn συναντώνται σε μεγάλες ορογενετικές ζώνες και σχετίζονται κυρίως με ηπειρωτικό φλοιό στον οποίο έχει επιδράσει ασβεσταλκαλικός μαγματισμός. Σύμφωνα με τον Meinert (1992) τα κοιτάσματα W βρίσκονται κοντά σε βαθύλιθους (με πηγματίτες και απλίτες) με μεγάλη και υψηλής θερμοκρασίας μεταμορφικής άλω. Οι βαθύλιθοι με την υψηλής θερμοκρασίας μεταμορφική άλω προσδιορίζουν άρρηκτα το

μεγάλο βάθος της μεταμόρφωσης. Η περιοχή του ένδο-skarn περιέχει πλαγιόκλαστο και πυρόξενους. Η υψηλής θερμοκρασίας μεταμορφικής άλω περιέχει πληθώρα ασβεστοπυριτικών κερατιτών και σχηματισμού skarn που προκύπτουν από ανάμειξη ανθρακικών και πηλιτικών ακολουθιών.

Σύμφωνα με τους Einaudi et al. (1981) τα κοιτάσματα W έχουν κατά μέσο όρο μέγεθος 0,1-2 εκ. τόνους και το ποσοστό του WO_3 προσδιορίζεται κατά μέσο όρο στο 0,7%. Επιπρόσθετα στοιχεία που συνοδεύουν το W στο κοιτάσμα είναι Mo, Cu, Zn, Bi σε μικρότερες περιεκτικότητες. Το έξω-skarn περιέχει μεγάλη περιεκτικότητα Al, Fe ενώ είναι ιδιαίτερα φτωχό σε S. Τα κοιτάσματα αυτά συνδέονται με χαλαζιακούς διορίτες ή χαλαζιακούς μονζονίτες. Τέλος, η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων επικεντρώνεται στα ορυκτά σεελίτης, μολυβδαινίτης, χαλκοπυρίτης, σφαλερίτη, μαγνητοπυρίτης, μαγνητίτης, σιδηροπυρίτης. Ένα γνωστό κοιτάσμα W τύπου skarn βρίσκεται στο Pine Creek, California (Einaudi and Burt 1982).

Γ) Κοιτάσματα Cu τύπου skarn

Τα κοιτάσματα Cu τύπου skarn θεωρούνται ότι είναι τα συνηθέστερα παγκοσμίως σε σύγκριση με τα κοιτάσματα τύπου skarn άλλων στοιχείων. Η δημιουργία των κοιτασμάτων Cu τύπου skarn συνδέεται με υποβύθιση, τόσο ωκεάνιου φλοιού, όσο και ηπειρωτικού. Είναι κοιτάσματα τα οποία συνδέονται με έντονη τεκτονική δράση, υδροθερμική εξαλλοίωση, δημιουργία φλεβών και λατυποπαγών, πορφυριτικό πλουτωνισμό και ηφαιστειακά πετρώματα (Meinert 1992).

Σύμφωνα με τους Einaudi et al. (1981) τα κοιτάσματα Cu τύπου skarn έχουν ζωνώδη ανάπτυξη με μέγα-κρυστάλλους γρανάτη κοντά στον πλουτωνίτη, ενώ όσο αυξάνεται η απόσταση από τον πλουτωνίτη αυξάνεται και η περιεκτικότητα του πυρόξενου. Στην επαφή με τα μάρμαρα συναντάται ο βεζουβιανίτης ή/και βολλαστονίτης. Κατά μέσο όρο το μέγεθος των κοιτασμάτων Cu τύπου skarn υπολογίζεται σε 1-100 εκ. τόνους, ενώ η περιεκτικότητα του Cu υπολογίζεται στο 1-2%. Άλλα στοιχεία που συναντώνται και μπορεί να τύχουν εκμετάλλευση στα κοιτάσματα Cu τύπου skarn είναι Mo, Zn, W. Τα κοιτάσματα αυτού του τύπου σχετίζονται με γρανοδιορίτη έως χαλαζιακό μονζονίτη. Το έξω-skarn είναι πλούσιο σε Fe, S ενώ χαρακτηρίζεται φτωχό σε Al, Mn. Τα ορυκτά που εκμεταλλεύονται είναι χαλκοπυρίτης, αιματίτης, σιδηροπυρίτης, μαγνητίτης, βορνίτης, μολυβδαινίτης, τενναντίτης.

Τέλος, παράδειγμα κοιτάσματος Cu τύπου skarn είναι το Sasano, ΝΔ Ιαπωνία (Einaudi and Burt 1982).

Δ) Κοιτάσματα Zn τύπου skarn

Σύμφωνα με τον Meinert (1992) τα κοιτάσματα Zn τύπου skarn συνδέονται με περιβάλλον ηπειρωτικού φλοιού και συγκεκριμένα με υποβύθιση ή διάρρηξη. Τα κοιτάσματα αυτά εξορύσσονται για το Zn που είναι το κυρίαρχο μέταλλο αλλά και για τον Ag που πολλές φορές βρίσκεται στην σύσταση του. Τα κοιτάσματα αυτά μπορούν εύκολα να διακριθούν από άλλα κοιτάσματα skarn από την πλούσια σε Mn και Fe ορυκτολογικής τους σύσταση. Όλα τα ορυκτά μπορούν να εμπλουτιστούν σε Mn συμπεριλαμβανομένου αυτών γρανάτης, πυρόξενος, ολιβίνης, αλβίτης, πυροξενοειδή, αμφίβολος, χλωρίτης και σερπεντίνης.

Το μέγεθος των κοιτασμάτων Zn παγκοσμίως υπολογίζεται 0.2-3 εκ. τόνους, ενώ το ποσοστό περιεκτικότητας του Zn στο κοιτάσμα είναι 9%. Στο κοιτάσμα είναι δυνατόν να υπάρχουν σε αυξημένες ποσότητες και άλλα στοιχεία. Τα στοιχεία και οι μέσες τιμές περιεκτικότητας των στοιχείων είναι 6% Pb, 5 ουγκιά/τόνος Ag. Άλλα στοιχεία που συνυπάρχουν μαζί με τον Zn στα κοιτάσματα τύπου skarn είναι ο Cu και το W, τα οποία κατά πλειοψηφία βρίσκονται σε αμελητέες ποσότητες και δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν. Τα πλουτωνικά πετρώματα με τα οποία συναντώνται μερικές φορές τα κοιτάσματα είναι γρανοδιορίτης έως γρανίτης και διορίτης έως συηνίτης. Το έξω-skarn είναι πλούσιο σε Fe, Mn, S, ενώ θεωρείται φτωχό σε Al. Τα ορυκτά τα οποία έχουν κοιτασματολογικό ενδιαφέρον και εξορύσσονται είναι σφαλερίτης, γαληνίτης, μαγνητοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης και αρσеноπυρίτης. Παράδειγμα κοιτάσματος Zn τύπου skarn αποτελεί η περιοχή Linchburg, New Mexico (Einaudi et al. 1981, Einaudi and Burt 1982).

Ε) Κοιτάσματα Sn τύπου skarn

Τα κοιτάσματα Sn τύπου skarn συνδέονται με γρανίτες υψηλών ποσοστών Si κατά το στάδιο τήξης ηπειρωτικού φλοιού λόγω της ηπειρωτικής διάρρηξης. Ένα χαρακτηριστικό που έχουν τα μεγάλα κοιτάσματα Sn τύπου skarn είναι το ότι σχηματίζουν ζώνωση από το πλούσιο σε Sn skarn, στο φτωχό σε Sn skarn. Ο κασσίτερος έχει την δυνατότητα να ενσωματώνεται από ορυκτά όπως είναι ο γρανάτης, ο τιτανίτης και ο βεζουβιανίτης, και έτσι ο Sn καθίσταται οικονομικά μη ανακτήσιμος (Meinert 1992).

Τα παγκόσμια κοιτάσματα έχουν μέγεθος μεταξύ 0,1-3 εκ. τόνους με το ποσοστό του Sn να υπολογίζεται σε 0,1-0,7%. Επιπροσθέτως, χημικά στοιχεία τα οποία συνοδεύουν τον Sn στο κοίτασμα είναι F, W, Be, Zn. Το έξω-skarn αποτελείται από υψηλά ποσοστά Al και F, ενώ ο Fe και S βρίσκονται σε έλλειμμα. Τα ορυκτά τα οποία ενδιαφέρουν κατά την διάρκεια εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος Sn τύπου skarn είναι κατά κύριο λόγο ο κασσιτερίτης και δευτερογενώς τα ορυκτά σεελίτης, σφαλερίτης, μαγνητοπυρίτης, μαγνητίτης, σιδηροπυρίτης, αρσеноπυρίτης. Το κοίτασμα Lost River στην Αλάσκα λειτουργεί ως ένα παράδειγμα κοιτάσματος Sn-skarn (Einaudi et al. 1981, Einaudi and Burt 1982).

ΣΤ) Κοιτάσματα Au τύπου skarn

Σύμφωνα με τον Meinert (1988) από τα παγκόσμια κοιτάσματα Au τύπου skarn έχουν εξορυχθεί πάνω από 1000 τόνους χρυσό. Ο χρυσός κατά βάση εκμεταλλεύεται ως δευτερεύον προϊόν από κοιτάσματα skarn βασικών μετάλλων και σιδήρου. Σύμφωνα με τους Ray and Webster (1991) τα κοιτάσματα Au τύπου skarn προκύπτουν από μια πλούσια σε Fe, διοξική, πορφυριτική και ασβεσταλκαλική διείσδυση. Η σύσταση του διεισδύοντος υλικού μπορεί να ποικίλει από γρανιτική έως γαββρική αν και δεν είναι τόσο σύνηθες. Ο χρυσός σε ένα τέτοιο κοίτασμα εμφανίζεται σε απόσταση από την διείσδυση και κυρίως φιλοξενείται στο χώρο του έξω-skarn. Το έξω-skarn προσδιορίζεται από μεγάλη αναλογία πυροξένου προς γρανάτη. Στα κοιτάσματα χρυσού αυτού του τύπου υπάρχει πληθώρα σουλφιδίων και ορυκτών του τελλουρίου, ενώ είναι δυνατόν να γίνει γεωχημικός εμπλουτισμός σε στοιχεία όπως είναι τα Bi, As, Te, Co, Cu, Ag, Zn, Sb, W, Pb, Ni, Mo.

Η ανάπτυξη του skarn που περιέχει Au πραγματοποιείται όπως σε αρκετά πορφυριτικά συστήματα με την αρχική φάση της καλιούχου μετασωμάτωσης. Τυπικά ορυκτά της αρχικής αυτής φάσης είναι ο βιοτίτης και το ορθόκλαστο. Εν συνεχεία κατά την εξέλιξη του skarn προκύπτει ο σχηματισμός χλωρίτη, αμφίβολου και μετέπειτα σκαπόλιθου. Η μορφή συμπλέγματος που σχηματίζει ο χλωρίτης είναι μείζονος σημασία για την μεταφορά και επιτάχυνση της γένεσης του χρυσού στο skarn. Ορυκτά που πολλές φορές συνοδεύουν τον χρυσό στο κοίτασμα είναι μαγνητοπυρίτης, αρσеноπυρίτης, χαλκοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, βορνίτης, σφαλερίτης, μαγνητίτης, βισμούθιο καθώς και ορυκτά του τελλουρίου. Σπανίως εμφανίζεται με σεελίτη, μολυβδαινίτη και σφαλερίτη. Τέλος, είναι σύνηθες φαινόμενο ο χρυσός να συμπεριλαμβάνεται μαζί με σουλφίδια σε μικροσκοπικές μορφές κάτι που δυσκολεύει στον διαχωρισμό του από το στείρο υλικό κατά την διαδικασία της εξόρυξης.

Z) Κοιτάσματα Mo τύπου skarn

Σύμφωνα με τον Meinert (1992) τα κοιτάσματα Mo τύπου skarn συνδέονται με λευκοκρατικούς γρανίτες από υψηλού βαθμού και μικρού σχετικά μεγέθους κοίτασμα, έως χαμηλού βαθμού και μεγάλου κοίτασμα. Τα κοιτάσματα Mo τα οποία σχετίζονται με την δημιουργία skarn περιέχουν ποικιλία από χημικών μετάλλων όπως είναι W, Cu, Zn, Pb, Bi, Sn, U και αρκετά πολυμεταλλικά στοιχεία. Η εξόρυξη σε πολλά κοιτάσματα Mo για να αποτελέσει οικονομικά βιώσιμη, το Mo κρίνεται απαραίτητο να εξορυχθεί μαζί με κάποιο άλλο στοιχείο που αναφέρθηκε παραπάνω, ανάλογα με την σύσταση του κοιτάσματος. Επίσης, το Mo περιέχεται σε πολλά βολφραμιούχα και σιδηρούχα κοιτάσματα skarn, στα οποία σχηματίζει ανακτήσιμες ζώνες.

Σύμφωνα με τους Ray and Webster (1991) στα κοιτάσματα Mo αυτού του τύπου, η μεταλλοφορία συναντάται πλησίον της διείσδυσης κοντά στην επαφή των πετρωμάτων. Τα κοιτάσματα Mo σχετίζονται με Ca-skarn με πυριτικό πέτρωμα, ενώ η ορυκτολογική σύσταση αποτελείται από γρανάτη, εδενβεργιτικό πυρόξενο, βολλαστονίτη, ακτινόλιθο και επίδοτο. Επιπροσθέτως, δύναται να περιέχει μαγνητίτη, χαλκοπυρίτη, μαγνητοπυρίτη, σιδηροπυρίτη, αρσеноπυρίτη, σφαλερίτη και σπανίως βισμούθινιτη. Σπανίως τα κοιτάσματα Mo σχετίζονται με Mg-skarn.

H) Κοιτάσματα υπόλοιπων στοιχείων τύπου skarn

Τα skarn δύναται να είναι εμπλουτισμένα και σε άλλα χημικά στοιχεία όπως είναι οι ομάδες REE και PGE. Τα στοιχεία που ανήκουν στην ομάδα των σπάνιων γαιών έχουν την τάση να εμπλουτίζονται σε συγκεκριμένα ορυκτά όπως είναι ο γρανάτης, ο βεζουβιανίτης, το επίδοτο και ο αλλανίτης. Ειδικότερα, σε κοιτάσματα Au και Zn τύπου skarn έχουν βρεθεί ορυκτά βεζουβιανίτης και επίδοτο με πάνω από 20% REE (Ce > La > Pr > Nd). Αρκετά θεωρούνται τα skarn που περιέχουν σημαντικές περιεκτικότητες REE και U οικονομικού ενδιαφέροντος (Meinert 1992).

Τα κοιτάσματα τύπου skarn που έχουν άμεση σχέση με PGE σχηματίζονται ύστερα από την μετασώματωση υπερβασικών πετρωμάτων. Σύμφωνα με τους Wood et. al. (1989), γεωχημικές αναλύσεις απέδειξαν ότι τα στοιχεία της ομάδας PGE μεταφέρονται κάτω από όξινες οξειδωτικές συνθήκες. Σε περιβάλλον που δημιουργείται skarn, τέτοιες συνθήκες βρίσκονται κατά το στάδιο αντικατάστασης στο greisen στα Sn-skarn (Meinert 1992).

8.4. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΑΠΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN

Αρχικά, τα κοιτάσματα τύπου skarn συνδέονται καθαρά με ενεργές γεωτεκτονικά περιοχές. Η παρουσία κοιτασμάτων skarn είναι εκτενής στον παγκόσμιο γεωτεκτονικό κύκλο. Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής, γίνεται κατανοητό πως τα κοιτάσματα τύπου skarn περιέχουν πληθώρα χρήσιμων μετάλλων, ενώ οι περιεκτικότητες τους καλύπτουν σε ικανοποιητικό ποσοστό την παγκόσμια ζήτηση.

Τα κοιτάσματα τύπου skarn δημιουργούν συγκεντρώσεις μετάλλων. Άλλα μέταλλα βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες και είναι ανακτήσιμες, ενώ άλλα μέταλλα βρίσκονται σε μικρότερες συγκεντρώσεις και δεν μπορούν να τύχουν πάντα εκμετάλλευση. Όπως αναφέρεται στον πίνακα 2 που δημοσίευσαν οι Ray and Webster (1991) σύμφωνα με τα αποτελέσματα εξόρυξης στη British Columbia, τα skarn θεωρούνται μια σημαντική πηγή γένεσης οικονομικά εκμεταλλεύσιμου Fe, το ποσοστό του οποίου προσδιορίζεται στο 88% της συνολικής παραγωγής. Επιπλέον, σύμφωνα με τη British Columbia από τα skarn προέρχονται σημαντικές ποσότητες W (82%), Au (16%), Cu (12%). Αντίθετα, τα skarn σύμφωνα με τα παρακάτω στοιχεία, δεν παράγουν ικανοποιητικές ποσότητες σε Pb, Zn, Mo, Ag, Sn, έτσι ώστε να ενισχύσουν την παγκόσμια αγορά. Τα μέταλλα αυτά συχνά βρίσκονται ως υποπροϊόντα σε μεγάλες συγκεντρώσεις άλλων στοιχείων. Ως παράδειγμα, δίνεται ο Ag ο οποίος εμφανίζεται σε κοιτάσματα Fe, Cu, Au.

Στον πίνακα 2 αναγράφονται οι ποσότητες μετάλλων που εξορύχθηκαν από το κοιτάσμα στη British Columbia σε σχέση με την παγκόσμια παραγωγή χωρίς να υπολογίζονται τα προσχωματικά κοιτάσματα.

Πιν. 2. Συνολική παραγωγή μετάλλων – παραγωγή μετάλλων από skarn στη British Columbia (Ray and Webster 1991).

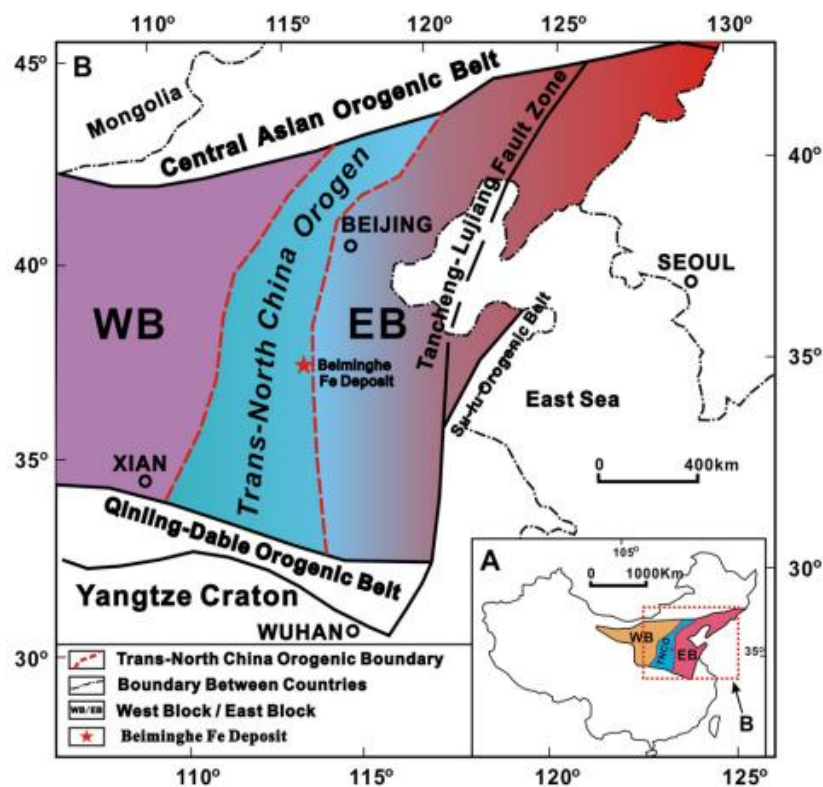
Metal	total production (t) *	skarn production (t)	% skarn production
Iron	36 693 780	32 335 144	88.1
Copper	6 606 944	850 239	12.8
Gold	615	101	16.4
Silver	20 103	359	1.7
Lead	8 642 291	42	—
Zinc	8 269 490	89	—
Molybdenum	265 387	2 951	1.1
Tungsten	9 194	7 521	82
Tin	10 592	0	—

9. ΓΝΩΣΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ SKARN

9.1. ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ

1) Κοίτασμα Beiminghe, ανατολική Κίνα

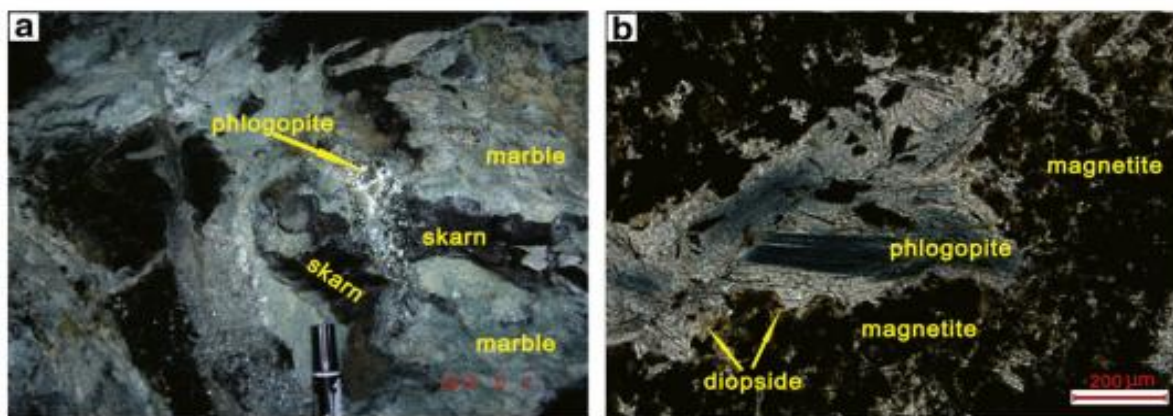
Το κοίτασμα Beiminghe βρίσκεται στην νότια πλευρά του όρους Taihang, βορειοδυτικά της πόλης Wu'an στην επαρχιακή περιοχή Hebei της Κίνας. Στο όρος Taihang συναντώνται πετρώματα όλων των ειδών. Από το γεωλογικό υπόβαθρο που αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα (γνευσίους, αμφιβολίτες), ιζηματογενείς ανθρακικές και κλαστικές ακολουθίες, μέχρι τις τοναλτικές και γρανοδιοριτικές διεισδύσεις (Li et al. 2012). Ειδικότερα, το Beiminghe χαρακτηρίζεται ως ένα σιδηρούχο κοίτασμα τύπου skarn. Το σιδηρούχο κοίτασμα αυτό εντοπίζεται μέσα στις Ανατολικές παρυφές της κεντρικής ορογενετικής ζώνης της Κίνας όπως παρατηρείται και στο σχήμα 15 .



Σχ. 15. Χάρτης της ανατολικής Κίνας. Απεικονίζεται η θέση του κοιτάσματος και οι τεκτονικές ενότητες της Κίνας (Zhao et al. 2001, Xu et al. 2009a, Zhai and Santosh 2011, Shen et al. 2013).

Σύμφωνα με τους Shen et al. (2013) το κοίτασμα Beiminghe τύπου skarn εντάσσεται στο σύμπλεγμα σιδήρου της Wu'an. Το υπόβαθρο αυτής της περιοχής συγκροτείται κυρίως από πετρώματα όπως μονζονίτης, μονζοδιορίτης, διορίτης και χαλαζιακός διορίτης (Chen et al., 2009), ενώ η ιζηματογενής ακολουθία αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθο. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται στην επαφή της διοριτικής διείσδυσης με τον ασβεστόλιθο. Το σχήμα της μεταλλοφορίας έχει την μορφή σύνθετων φακών. Στο κοίτασμα τύπου skarn έχει παρατηρηθεί ότι η περιοχή του ένδο-skarn είναι πιο φαρδιά σε μέγεθος σε σχέση με το έξω-skarn (Shen et al. 2013).

Επίσης, τα κύρια αδιαφανή ορυκτά που συναντώνται στο skarn είναι διοψίδιος, τρεμολίτης, ακτινόλιθος, φλογοπίτης, χουμίτης, σερπεντίνης, γρανάτης, επίδοτο και μερικές φορές χλωρίτης μέσα στα μάρμαρα. Από τα μεταλλικά ορυκτά που υπάρχουν είναι μαγνητίτης, σιδηροπυρίτης κατά κύριο λόγο και σε μικρότερες ποσότητες επιβεβαιώνεται η ύπαρξη των αιματίτη, χαλκοπυρίτη, μαγνητοπυρίτη και νικελιούχου μαγνητίτη. Ο σιδηροπυρίτης εμφανίζεται ιδιόμορφος. Τέλος, από γεωχρονολογήσεις που πραγματοποιήθηκαν η ηλικία σχηματισμού του Fe-skarn κοιτάσματος προσδιορίζεται στο Κατώτερο Κρητιδικό (Shen et al. 2013). Στο σχήμα 16 διακρίνονται ορυκτά από το skarn του Beiminghe.



Σχ. 16. Εικόνες από το κοίτασμα skarn του Beiminghe. α) Φλογοπίτης στην ζώνη του έξω-skarn, β) Φλογοπίτης με διοψίδιο και μαγνητίτη (Shen et al. 2013).

2) Κοίτασμα Ertzberg Ινδονησία

Το κοίτασμα Ertzberg εδρεύει στην περιοχή Gunung Bijih η οποία βρίσκεται στην κεντροδυτική Irian Jaya στην Ινδονησία. Η μεταλλοφορία έχει σχηματιστεί λόγω της ενδιάμεσης σύστασης πλουτωνικών υλικών (μονζονίτης) που διεισδύσε εντός της ιζηματογενούς ακολουθίας ανθρακικής κυρίως σύστασης, κατά το Πλειόκαινο. Ειδικότερα, η περιοχή Ertzberg εντοπίζεται εσωτερικά της Αραφούρα θάλασσας μέσα στο όρος Central Range στο νησί της Νέας Γουινέας, (Mertig et al 1994).

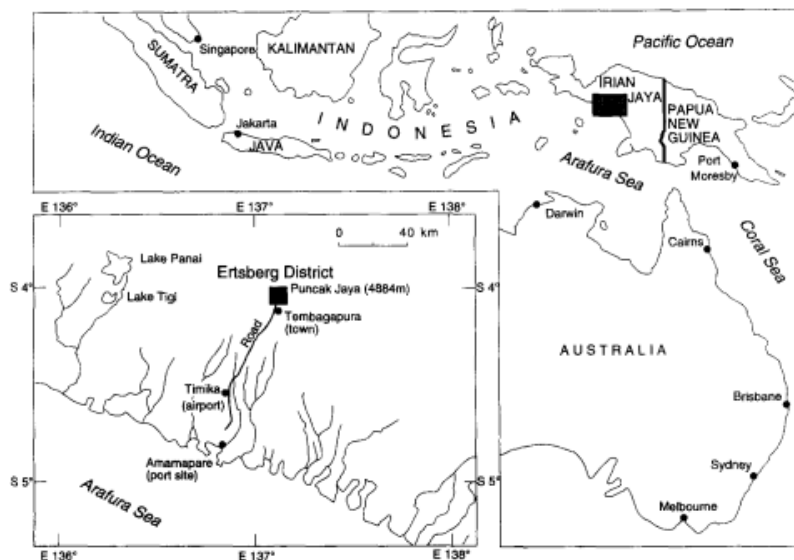
Σύμφωνα με τον McMahon (1994) και ύστερα από αναλύσεις σε χαρακτηρίστηκα ιχνοστοιχεία από δείγματα των μαγματικών διεισδύσεων της περιοχής Ertzberg υποστηρίχθηκε ότι υπάρχει ομοιότητα με τα είδη μάγματος που δημιούργησαν τα κοιτάσματα Cu-Au στην Παπούα Νέα Γουινέα. Εν συνεχεία, όμως, οι McDowell et al. (1994) υποστήριξαν ότι ο μαγματισμός που δημιούργησε το κοίτασμα στην περιοχή Ertzberg δεν σχετίζεται με υποβύθιση και δημιουργία νησιωτικού τόξου αλλά με περιβάλλον ηπειρωτικής σύγκρουσης. Το κοίτασμα Ertzberg (Gunung Bijih) χαρακτηρίζεται ως ένα Cu-Au skarn με τον χρυσό να βρίσκεται κυρίως ως υποπροϊόν στο κοίτασμα skarn καθώς σύμφωνα με τους Theodore et al. (1990) στο skarn εντοπίστηκε σε ποσότητα μικρότερη του 1g/t. Σε όλες τις μεταλλοφορίες τύπου skarn στο Ertzberg παρατηρείται ότι ο χρυσός συμμετέχει ελάχιστα στην σύσταση σε σχέση με τον Cu (Meinert, 1989).

Η περιοχή Ertzberg αποτελείται από πολλές μεταλλοφορίες τύπου skarn.

- Ertzberg (Gunung Bijih): έχει μέγεθος 33 εκατ. τόνους με 2,5% Cu και 0,8g/t Au. Τα κύρια αδιαφανή ορυκτά τα οποία σχηματίστηκαν λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του skarn είναι μοντισελλίτης, διοψίδιος, φορστερίτης, μελίλιθος, σπινέλλιος, κλινοπυρόξενος. Μετέπειτα, με μείωση της θερμοκρασία σχηματίζονται γλαυκοχλωρίτης, γρανάτης, βεζουβιανίτης, κλιντονίτης, Ca-αμφίβολοι και χαρκερίτης (Katchan 1982). Από τα μεταλλικά ορυκτά σε αφθονία βρίσκεται ο μαγνητίτης, ενώ συμμετέχουν ακόμη βορνίτης, χαλκοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, χαλκοσίνης, μολυβδαινίτης, σφαλερίτης, γαληνίτης, βισμούθινίτης, αυτοφυής χρυσός, ήλεκτρο και αυτοφυής άργυρος. Τέλος, τοπικά δημιουργούνται φλογοπίτης, τάλκης, χλωρίτης, σερπεντίνης, μοντμοριλλονίτης και κλιντονίτης (Soeparman and Budijono 1989, Mertig et al 1994).

- Ανατολική περιοχή Ertsberg (Gunung Bijih Timur): η οποία χωρίζεται σε κατώτερη-ενδιάμεση-ανώτερη ενότητα μεταλλοφορίας ανάλογα με το βάθος που συναντάται (Mertig et al 1994).

Στο σχήμα 17 παρουσιάζεται ο χάρτης της Ινδονησίας ο οποίος υποδεικνύει το σημείο του κοιτάσματος.



Σχ. 17. Χάρτης της Ινδονησίας. Διακρίνεται η περιοχή Ertsberg (Mertig et al 1994).

9.2. ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

1) Κιμμέρια Ξάνθης

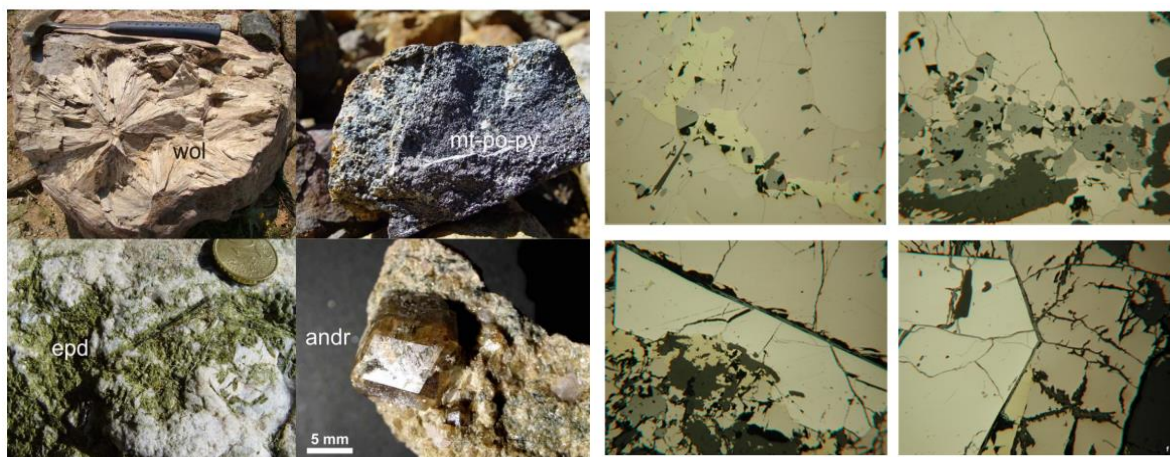
Τα Κιμμέρια είναι κωμόπολη του νομού Ξάνθης, στην περιφέρεια Θράκης. Τα Κιμμέρια εντοπίζονται σε μια απόσταση από την πόλη της Ξάνθης περίπου 5 χιλιομέτρων ανατολικά, ενώ βόρεια των Κιμμέριων εμφανίζεται σημαντική μεταλλοφορία. Η Ξάνθη ανήκει στην κρυσταλλοσχιστώδη μάζα της Ροδόπης.

Στην περιοχή των Κιμμέριων εντοπίζεται μεταλλοφορία τύπου skarn. Ως αίτιο δημιουργίας της μεταλλοφορίας είναι η μαγματική ασβεσταλκαλική διείσδυση στα προϋπάρχοντα πετρώματα (φυλλίτες, σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, αμφιβολίτες, μάρμαρα) και τον σχηματισμό skarn στην επαφή με τα μάρμαρα. Ο πλουτωνίτης είναι γρανοδιοριτικής σύστασης και χρονολογείται στο Ολιγόκαινο (Liati 1986). Η μεταλλοφορία που περιέχεται στα skarn είναι Fe, Cu, Bi, W, Au και σύμφωνα με όσα υποστήριζαν οι Michailidis et. al. (1989) στο κοιτάσμα τύπου skarn στα Κιμμέρια Ξάνθης υπάρχει αυτοφυής χρυσός μέσα σε σιδηροπυρίτη και χαλκοπυρίτη.

Σύμφωνα με χημικές αναλύσεις (Κοξένογλου 2015) που έχουν πραγματοποιηθεί, παρατηρήθηκε ότι η μεταλλοφορία του skarn είναι πλούσια σε στοιχεία όπως Cu (171,2 ppm), Co (153,8 ppm), Au (148,7 ppb), W (132,4 ppm), Fe (65,92 ppm).

Οι Liati (1986) και Michailidis et. al. (1989) στην ορυκτολογική σύσταση του skarn από μη μεταλλικά ορυκτά εντόπισαν γρανάτη, επίδοτο, βολλαστονίτη, πυρόξενο, βεζουβιανίτη και με πιο επουσιώδη παρουσία τα ορυκτά ακτινόλιθος, χλωρίτης, χαλαζίας, ασβεστίτης. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η συμπαγής μεταλλοφορία μαγνητίτη που εμφανίζεται, μαζί με ορυκτά που εμφανίζονται σε μικρές ποσότητες όπως σεελίτη-παουελλίτη, μολυβδαινίτη, βολφραμίτη, και σουλφίδια όπως μαγνητοπυρίτη, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη (Κοξένογλου 2015).

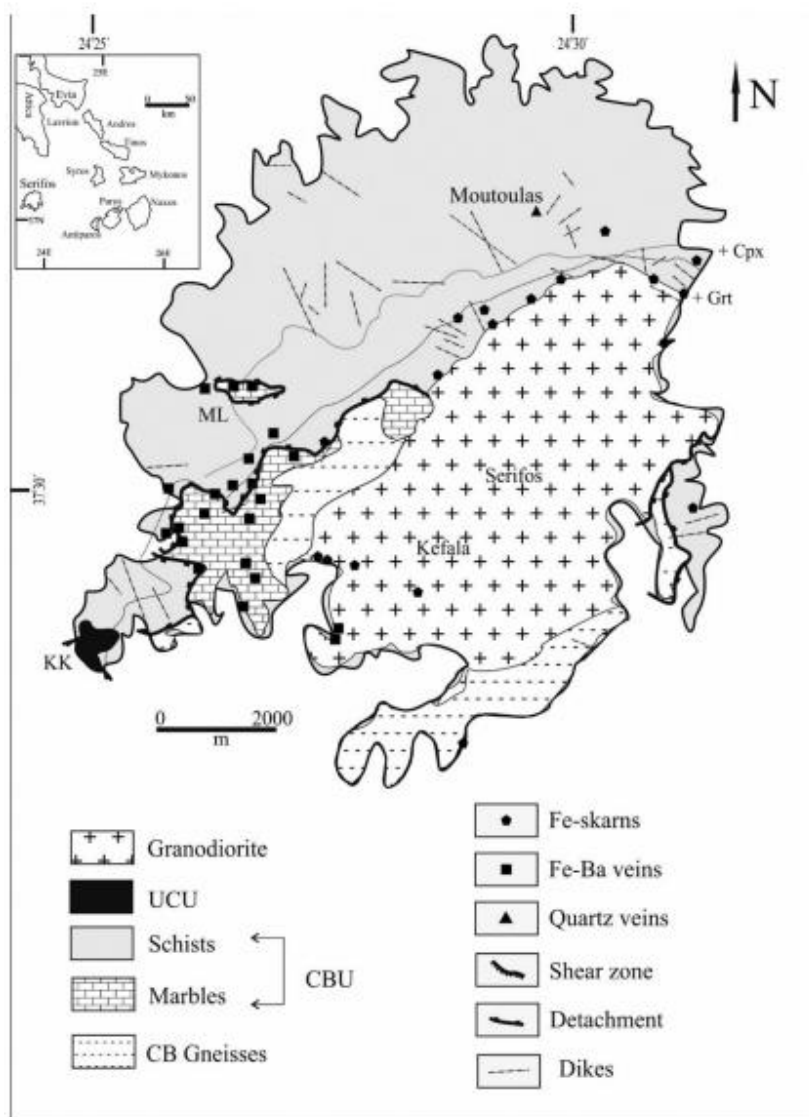
Ο μαγνητίτης με την σημαντική παρουσία του στο skarn εμφανίζεται καθαρός χωρίς απόμειξη με άλλα ορυκτά και χωρίς ένδειξη επίδρασης οξειδωτικής δράσης, δηλαδή δεν εμφανίζεται εξαλλοιωμένος. Ο μαγνητίτης είναι φτωχός σε στοιχεία όπως Ni, Co, Ti, Cr, V, ενώ ο σιδηροπυρίτης σε As, Sn, Ag, Co, Ni, Cu (Vavelidis et al. 1990). Στο σχήμα 18 παρουσιάζονται εικόνες από ορυκτά που λήφθηκαν από το skarn στα Κιμμέρια Ξάνθης.



Σχ. 18. Μακροσκοπικά (αριστερά) και μικροσκοπικά (δεξιά) δείγματα από το skarn στα Κιμμέρια Ξάνθης. Μακροσκοπικά: wol: Βολλαστονίτης, mt-po-py: μαγνητίτης-μαγνητοπυρίτης-σιδηροπυρίτης epd: επίδοτο, andr: ανδραδίτης-γρανάτης. Μικροσκοπικά: Πάνω: 1. μαγνητοπυρίτης, χαλκοπυρίτης, μαγνητίτης, σφαλερίτης. 2. μαγνητοπυρίτης, χαλκοπυρίτης, μαγνητίτης. Κάτω: 3. μαγνητοπυρίτης, χαλκοπυρίτης, κόκκοι μαγνητίτη, σιδηροπυρίτης. 4. μαγνητοπυρίτης, χαλκοπυρίτης, σιδηροπυρίτης. (Κοξένογλου 2015).

2) Νήσος Σέριφος, Κυκλάδες

Η Σέριφος αποτελεί νησί του νομού Κυκλάδων, της περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου. Στον νομό Κυκλάδων, η Σέριφος εδρεύει σε μια θέση νοτιοανατολικά από την πόλη της Αθήνας. Η Σέριφος τοποθετείται γεωτεκτονικά μέσα στην Αττικοκυκλαδική ζώνη. Στο σχήμα 19 δίνεται γεωλογικός χάρτης της Σερύφου με απεικόνιση όλων των σχηματισμών και των μεταξύ τους σχέσεων.



Σχ. 19. Γεωλογικός χάρτης νήσου Σερύφου. Διακρίνεται το όρος Μούτουλας και όλοι οι γεωλογικοί σχηματισμοί όπως ο γρανοδιωρίτης, οι σχιστόλιθοι, τα μάρμαρα, οι γνεύσιοι, οι μορφές μεταλλοφορίας και τα τεκτονικά χαρακτηριστικά. (Salemink 1985, Grasemann and Petrakakis 2007, Rabillard et al. 2015, Fitros et al. 2017).

Από το πλούσιο κοίτασμα Fe τύπου skarn εξορύχθηκαν περίπου 6.5 εκ. τόνοι μεταλλεύματος. Η δημιουργία του κοιτάσματος Fe είναι το αποτέλεσμα της διείσδυσης του πλουτωνίτη κυρίως γρανοδιοριτικής σύστασης Ι-τύπου στα ήδη προϋπάρχοντα πετρώματα, γνευσίους, μάρμαρα, σχιστολίθους. Σύμφωνα με τους (Iglseder et al. 2009) ο πλουτωνίτης χρονολογείται στο Μ. Μειόκαινο.

Η διείσδυση θεωρείται ότι έγινε σε μικρό βάθος κατά μήκους του δυτικού ρήγματος αποκόλλησης των Κυκλάδων και σχημάτισε skarn με μια μεγάλη μεταμορφική ζώνη στην οποία το κύριο μέταλλευμα αποτελεί ο Fe (Ducoux et al. 2017).

Στην ορυκτολογική σύσταση του skarn συμμετέχουν από τα μη μεταλλικά ορυκτά ασβεστίτης, βαρύτης, γρανάτης, πυρόξενος, χλωρίτης, τάλκης, φθορίτης, επίδοτο, αδουλαίος. Τα μεταλλικά ορυκτά τα οποία αντιπροσωπεύουν και την μεταλλοφορία είναι σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης, αρσеноπυρίτης, γαληνίτης, σφαλερίτης, τενναντίτης. Τα μεταλλικά ορυκτά εμφανίζονται σε μεγάλο ποσοστό επηρεασμένα από οξειδωτικές συνθήκες (Melfos and Voudouris 2017). Σύμφωνα με τους Fitros et al. (2017) στην νήσο Σέριφο αναπτύσσεται μεταλλοφορία τύπου skarn και μεταλλοφορία φλεβικής μορφής. Ακόμη, στην περιοχή του έξω-skarn εντοπίζεται υψηλής θερμοκρασίας σχηματισμού, μαγνητίτης. Τέλος, στα μεταλλικά ορυκτά συναντάται και αυτοφυή βισμούθιο.

10. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκαν τα κοιτάσματα που δημιουργούνται κατά τον σχηματισμό skarn. Τα κοιτάσματα τύπου skarn είναι άμεσα συνδεδεμένα με μαγματικές διεσόδσεις καθώς σύμφωνα με τους Lang and Baker (2001) οι μεταλλοφορίες των κοιτασμάτων που εξαρτώνται από άνοδο μαγματικού υλικού εντοπίζονται είτε εντός του κρυσταλλωμένου συμπαγούς μαγματικού όγκου, είτε εντός των περιβαλλόντων πετρωμάτων τα οποία προϋπάρχουν της διεσόδσης. Η παραπάνω θεωρία των Lang and Baker (2001) επαληθεύεται για τα κοιτάσματα τύπου skarn όπως προσδιορίζεται από την παρούσα έρευνα.

Τα skarn σχηματίζονται σε περιοχές με έντονη τεκτονική και ηφαιστειακή δραστηριότητα. Η δημιουργία skarn συνδέεται με γεωτεκτονικά περιβάλλοντα σύμφωνα με τους Meinert et al. (2005) όπως είναι α) ωκεάνια υποβύθιση β) μεταβατική, μικρής γωνίας υποβύθιση γ) ηπειρωτική υποβύθιση και δ) ηπειρωτική διάρρηξη, στα οποία παρατηρείται δημιουργία μαγματικού υλικού και σταδιακή άνοδος του με τήξη και μεταμόρφωση του φλοιού. Το skarn είναι το αποτέλεσμα της θερμικής μεταμόρφωσης κατά βάση ανθρακικών πετρωμάτων κάτι που σύμφωνα με τους Harlow and Austrheim (2013) δεν είναι απόλυτο. Αν το μάγμα και τα ρευστά αυτού είναι εμπλουτισμένα σε μέταλλα, αποθέτουν την μεταλλοφορία τους και σχηματίζουν το λεγόμενο κοιτάσμα τύπου skarn. Ο όρος κοιτάσμα τύπου skarn χαρακτηρίζει την ορυκτολογική παραγένεση που συναντάται στο skarn και όχι την διαδικασία γένεσης του τύπου κοιτάσματος ή άλλων χαρακτηριστικών του (Einaudi et al. 1981). Τα κοιτάσματα τύπου skarn όπως προσδιορίζεται από τον παγκόσμιο χάρτη έχουν μεγάλη γεωγραφική κατανομή.

Το skarn θεωρείται μια πλούσια πηγή μεταλλικών ορυκτών οικονομικού ενδιαφέροντος, τα οποία έχουν ιδιαίτερη σημασία για την σύγχρονη κοινωνία και για την εξέλιξη της. Στα skarn συναντώνται όπως προαναφέρθηκε πληθώρα χημικών στοιχείων όπως Fe, Cu, Ag, Au, Pb, Zn, Mo, W, U, Sn, F, B και REE από τα οποία ανάλογα τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, ενδείκνυνται και η χρήση τους. Μερικά στοιχεία που αναφέρονται βρίσκονται ως δευτερεύοντα υλικά στο κοιτάσμα και εκμεταλλεύονται ως υποπροϊόντα μαζί με το κύριο μέταλλευμα. Τα γνωστά κοιτάσματα τύπου skarn έχουν μεγάλη γεωγραφική κατανομή στο παγκόσμιο χάρτη. Τέλος, αντιλαμβανόμαστε πως η συνεισφορά αυτού του τύπου κοιτάσματος συνδράμει ουσιαστικά στην τροφοδοσία της παγκόσμιας βιομηχανίας και καλύπτει μεγάλο μέρος των αναγκών της με τα μεγάλα σε έκταση και περιεκτικότητα κοιτάσματα.

- Αργυράκη Α., Στουραϊτή Χ., Misra K.C., 2018. Εισαγωγή στην Γεωχημεία Αρχές και Εφαρμογές. Εκδόσεις Πεδίο, Αθήνα.
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών, 2020. Ανθεκτικότητα ως προς τις Πρώτες Ύλες Κρίσιμης Σημασίας: Χαρτογραφώντας την Πορεία προς Μεγαλύτερη Ασφάλεια και Βιωσιμότητα, Βρυξέλες.
- Γεωργιάδης, Γ. 2003. Τα ορυκτά στη ζωή μας. Χρηστικότητα, Περιβάλλον, Προβλήματα. Εκδοτικός Οργανισμός Λιβάνη, Αθήνα.
- Δημητριάδης, Σ. 1988. Εισαγωγή στην Πετρολογία των Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.
- Θεοδωρίκας, Σ. 2017. Ορυκτολογία Πετρολογία, 4^η έκδοση. Εκδόσεις ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΕΣ «ΜΕΛΙΣΣΑ», Θεσσαλονίκη.
- Καζάκου, Φ. (2018). Βαρέα μέταλλα στις ιπτάμενες τέφρες των ελληνικών ατμοηλεκτρικών σταθμών. Διπλωματική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Κοξένογλου, Π. (2015). Κοιτασματολογική και ορυκτολογική μελέτη της μεταλλοφορίας που συνδέεται με τη μαγματική διείσδυση στα Κιμμέρια Ξάνθης. Διπλωματική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μαρούση, Γ.Ε. (2018). Ορυκτολογική και ορυκτοχημική μελέτη των εμφανίσεων μελίλιθου από την ζώνη skarn στην Μαρώνεια, Ροδόπης, Θράκη. Διπλωματική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Παπασπύρου, Μ. Α. Γ. (2016). Ορυκτολογική και γεωχημική μελέτη του σχηματισμού skarn του πλουτωνίτη του Πανοράματος, Δράμα Β. Ελλάδα. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Σαμαρά, Ζ. (2018). Μεταλλευτικές δραστηριότητες και αέρια ρύπανση. Εφαρμογή στην περιοχή της Ροδόπης. Διπλωματική Διατριβή. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο Πάτρας.
- ΣΕΒ 2013. Ο τομέας του μετάλλου. Μηχανισμός Ανάγνωσης των αναγκών των επιχειρήσεων σε επαγγέλματα και δεξιότητες.
- Τσιραμπίδης Α. 2005. Ο ορυκτός πλούτος της Ελλάδος. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.
- Τσώλη Χ. (2017). Προσδιορισμός τοξικότητας αποβλήτων δοκιμών επίπλευσης. Διπλωματική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ξενογλώσση

- Allcock, J. B., (1982). Skarn and porphyry copper mineralization at Mines GaspS, Murdochville, Quebec: ECON. GEOL., v. 77, p. 971- 999.
- Bourgeois J. (2007)."Geology", Microsoft Encarta Online Encyclopedia, Διαθέσιμο: 09/12/2017
- Chen, L., Cheng, C., Wei, Z.G., (2009). Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. Earth and Planetary Science Letters 286, 171–183.
- Dobson, D.C., (1982). Geology and alteration at the Lost River SnW-F deposit, Alaska: ECON. GEOL., v. 77, p. 1055-1052.
- Ducoux, M., Branquet, Y., Jolivet, L., Arbaret, L., Grasemann, B., Rabillard, A., Gumiaux Drufin, S., (2017). Synkinematic skarns and fluid drainage along detachments: The West Cycladic Detachment System on Serifos Island (Cyclades, Greece) and its related mineralization. Tectonophysics 695, 1–26.
- Einaudi MT., Meinert LD., Newberry RJ (1981). Skarn deposits. Economic Geology, 75.
- Einaudi MT. and Burt DM. (eds) (1982). A special issue devoted to skarn deposits – Introduction, terminology, classification and composition of skarn deposits. Economic Geology, 745-754.
- EPA-Environmental Protection Agency, USA, (2010). Overview of Airborne Metals Regulations, Exposure Limits, Health Effects, and Contemporary Research. APPENDIX C, December 3, 2010.
- Fitros, M., Tombros, S. F., Williams-Jones, A. E., Tsikouras, B., Koutsopoulou, E. and Hatzipanagiotou, K. (2017). Physicochemical controls on bismuth mineralization: an example from Moutoulas, Serifos island, Cyclades, Greece, American Mineralogist, 102(8), 1622-1631.
- Grigoryev, N.A., Sazonov, V.N, Murzin, V.V. and Gladkovskiy, (1990). Sulfides as gold carriers in skarn magnetite deposit skarns and ores: Geochemical international, v. 27, p.142-146.
- Gryaznov O.N. (1992) Ore-bearing metasomatic formations of folded belts. Nedra Publishing, Moscow.
- Harlov D. E and Austrheim H., (2013). Metasomatism and the chemical transformation of rock the role of fluids in terrestrial and extraterrestrial processes. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 203-252.

Iglseder, C., Grasemann, B., Schneider, D.A., Petrakakis, K., Miller, C., Klötzli, U.S., Thöni, M., Zámolyi, A., Rambousek, C., 2009. I and S-type plutonism on Serifos (W-Cyclades, Greece). *Tectonophysics* 473, 69–83.

Kabata-Pendias A., (2011). *Trace Elements in Soils and Plants* Fourth Edition. 2011 by Taylor and Francis Group, LLC.

Katchan, G., (1982). *Mineralogy and geochemistry of the Ertzberg (Gunung Bijih) and Ertzberg East (Gunung Bijih Timur) skarns, Irian Jaya, Indonesia and the OK Tedi Skarns, Papua New Guinea*. Ph.D. thesis, University of Sydney, 498 pp.

Korzhinskii D.S. (1953) *Outline of Metasomatic Processes*. In: *Main Problems on the Science of Magmatogenic Ore Deposits*. Acad. Sci. Publishing, Moscow. Pp. 334-456, (In Russian). German edition, 1965. *Abriss der Metasomatischen Prozesse*, Akad. Verl., Berlin.

Korzhinskii D.S. (1957) *Physico-chemical basement of the mineral parageneses analysis*. Nauka Publ., Moscow; Second edition, 1973; (Theoretic basement of the mineral parageneses analysis). Nauka Publishing, Moscow. (In Russian); English edition: (1959) *Physico-chemical basis of analysis of the paragenesis of minerals*. Consultants Bureau, New York; French edition, 1957. *Bases physico-chimiques de l' analyse des parageneses de mineraux*. Bureau. Recherches geol. Et Minières. Serv. D'inform. Geol. Trad. № 2294.

Misra, K.C., (2012). *Introduction to Geochemistry: Principles and Applications*. Wiley – Blackwell, USA.

Li, S.R., Santosh, M., Zhang, H.F., Shen, J.F., Dong, G.C., Wang, J.Z., Zhang, J.Q., (2012). *Inhomogeneous lithospheric thinning in the central North China Craton: zircon U–Pb and S–He–Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains*. *Gondwana Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.006>.

Liati, A. (1986). *Regional metamorphism and overprinting contact metamorphism of the Rhodope zone, near Xanthi (N. Greece): petrology, geochemistry, geochronology*. PhD Thesis, Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany, p. 186.

Lang R.J. and Baker T., (2001). *Intrusion – related gold systems: the present level of understanding*, *Mineralium Deposita*, 36, 477-489.

McDowell, F.W., McMahon, T.P., Warren, P.Q. and Cloos, M., (1994). *Pliocene Cu-Au-bearing igneous intrusions of the Gunung Bijih (Ertzberg) district, Irian Jaya, Indonesia: K-Ar geochronology (in preparation)*.

McMahon, T.P., (1994). Petrology and geochemistry of the Pliocene intrusions in the Ertzberg (Gunung Bijih) district, Irian Jaya, Indonesia. Ph.D. Dissertation, Univ. Texas, Austin (in preparation).

Meinert L.D., (1988). Gold in Skarn Deposits – A Preliminary Overview; Proceedings of the Seventh Quadrennial IAGOD Symposium, E. Schweizerbartische Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Meinert, L.D., (1989). Gold skarn deposits--geology and exploration criteria. In: R.R. Keays, W.R.H. Ramsay and D.I. Groves (Editors), The Geology of Gold Deposits: The Perspective in 1988, Econ. Geol. Monograph 6. Econ. Geol. Publ. Co., pp. 537-552.

Meinert L.D., (1992). Skarns and skarn deposits. Geoscience Canada 19:145–162.

Meinert L.D., Dipple G.M and Nicolescu S., (2005). World skarn deposits, Economic Geology 100th Anniversary, 299–336.

Melfos, V., and Voudouris, P. (2017). Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration. Ore Geology Reviews, 89, 1030-1057.

Mertig, H.J., Rubin, J.N., and Kyle, J.R., (1994). Skarn Cu-Au ore bodies of the Gunung Bijih (Ertzberg) district, Irian Jaya, Indonesia: Journal of Geochemical Exploration, v. 50, p. 179-202.

Michailidis K., Vavelidis M., Christofides G., (1989). Native gold in the skarn-type mineralization of Kimmeria, NE of Xanthi. Geologica Rhodopica, 1: 396-402.

Morais S., Garcia e Costa F., Pereira M.L, (2012). Heavy Metals and Human Health. Chapter in book: Environmental Health – Emerging Issues and Practice, February 2012.

Newberry R.J., (1991). Scheelite-bearing skarns in the Sierra Nevada region, California. Contrasts in zoning and mineral compositions and tests of the infiltration metasomatism theory. In Barto- Kyriakidis (ed) Skarns – their genesis and metallogeny, Theophrastus Publications, Athens, 343–384.

Pertsev N.N. (1977). High temperature metamorphism and metasomatism of carbonate rocks. Nauka Publishing, Moscow.

Plyushchev E.V. (1981) Altered rocks and their prospecting significance. Nedra Publishing, Moscow.

Purtov, V.K., Kholodnov, V.V., Anfilogov, V.N. and Nechkin, G.S., (1989). The role of chlorine in the formation of magnetite skarns: international Geology Reviews, v. 31, p.63-71.

Ray, G.E. and Webster, I.C.L., (1991a). An Overview of Skarn Deposits, in Ore Deposits, Tectonics and Metallogeny in the Canadian Cordillera: British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Paper 1991-4, p.213-252.

- Ross J.R., Vaxevanopoulos M., Melfos V., Voudouris P. (2017). Precious Metals and the Rise of Philip II of Macedonia. In: Oztunali 2017 Geoarchaeology, Ancient Mining and Metallurgy Symposium. Istanbul University, Istanbul, Turkey, 1-2 November 2017.
- Sharma R. and Srivastava P.K. (2014). Hydrothermal Fluids of Magmatic Origin. Springer International Publishing Switzerland. P.181-182.
- Shen, J.F., Santosh, M., Li S.R., Zhang, H.F., Yin, N., Dong, G.C., Wang, Y.J., Ma, G.G., Yu, H.J. (2013). The Beiminghe skarn iron deposit, eastern China: geochronology, isotope geochemistry and implications for the destruction of the North China Craton. *Lithos*, v. 156-159, p. 218-229.
- Shimazaki, H., (1982). The Sasano hastingsite-bearing copper skarn deposit formed in aluminous sediment at the Yoshioka mine, Japan: *ECON. GEOL.*, v. 77, p. 868-876.
- Smirnov VI., (1976). *Geology of mineral deposits*. MIR, Moscow.
- Soeparman, S. and Budijono, (1989). Cu-skarn deposits in Ertzberg mine area, Irian Jaya, Indonesia. *Geol. Indonesia*, 12: 359-374.
- Theodore, T.G., Orris, G.J., Hammarstrom, J.M. and Bliss, J.D., (1990). Gold-bearing skarns. *U. S. Geol. Surv., Bull.* 1930, 61 pp.
- Vavelidis M., Michailidis K., Christofides G., Boboti-Tsitlakides, I., (1990). Geochemical study of placer gold and the gold-bearing skarn-type mineralization of Kimmeria area, Xanthi district, NE Greece. *Geologica Rhodopica*, 2: 297-308
- Westra, G., (1982), Alteration and mineralization in the Ruth porphyry copper deposit near Ely, Nevada: *ECON. GEOL.*, v. 77, p.950-970.
- Wood, S.A., Mountain, B.W. and Fenlon, B.J., (1989). Thermodynamic constraints on the solubility of platinum and palladium in Hydrothermal Solutions; reassessment of Hydroxide, Bisulfide, and ammonia complexing: *Economic Geology*, v. 84, p. 2020-2028.
- Zhdanov V.V., Rundquist D.V., & Baskov E.A. (1978) The experience of regional metasomatites and their rows systematics. *Zapiski Vses. Mineral. Obshch.*, vol.116, 4. 408-416.
- Zharikov V.A., Pertsev N.N., Rusinov V.L., Callegari E. and Fettes D.J. (2007). 9. Metasomatism and Metasomatic Rocks. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks: Web version 01.02.07.