



ΝΙΚΟΛΑΟΣ Κ. ΔΟΥΚΑΣ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΤΗΣ
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΕΛΦΟΣ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020

1





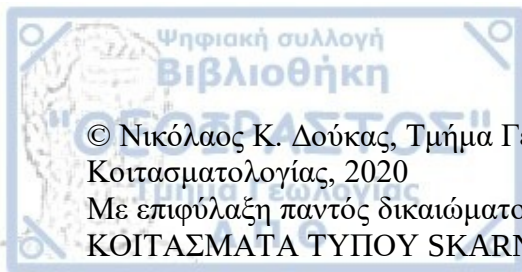
ΝΙΚΟΛΑΟΣ Κ. ΔΟΥΚΑΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5107

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας Κοιτασματολογίας,
Εργαστήριο Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων

Βασίλειος Μέλφος



© Νικόλαος Κ. Δούκας, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN- *Διπλωματική Εργασία*

© Nikolaos K. Doukas, School of Geology, Dept. of Minerology-Petrology-Economic Geology, 2020
All rights reserved.
SKARN 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.

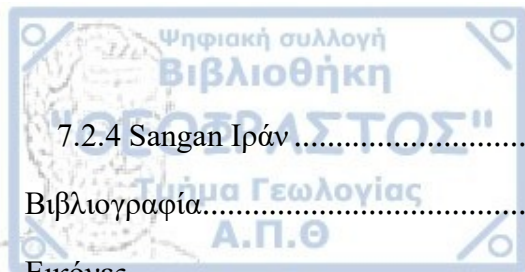
Εικόνα Εξωφύλλου: Μεταμορφωμένο πέτρωμα Skarn

Πηγή: <https://www.facebook.com/363711044483570/photos/metamorphic-rockskarn/389342365253771/>





Περίληψη	8
Abstract.....	9
1. Εισαγωγή.....	10
2. Ορισμοί και αποσαφηνίσεις	11
3. Οικονομική εκμετάλλευση.....	13
4. Μεταμόρφωση επαφής	14
4.1 Ισοχημική φάση.....	15
4.2 Μετασωματική φάση	19
5. Ιδιότητες και ορυκτοχημεία των Skarn	22
5.1 Χαρακτηριστικά των Skarn.....	22
5.2 Ορυκτοχημεία των Skarn	23
5.2.1 Ασβεστούχα κοιτάσματα Skarn.....	24
5.2.2 Μαγνησιούχα κοιτάσματα Skarn.....	30
5.2.3 Πυριτικά κοιτάσματα Skarn	35
6. Σχηματισμός και εξέλιξη των skarn	36
6.1 Τεκτονικά περιβάλλοντα και μαγματισμός.....	36
6.2 Μηχανισμός γένεσης των skarn	39
7. Ελληνικά και παγκόσμια κοιτάσματα skarn	45
7.1 Ελληνικά εμφανίσεις skarn	45
7.1.1 Λαύριο.....	45
7.1.2 Σέριφος.....	47
7.1.3 Μεταλλείο Μαντέμ Λάκκος (Στρατώνι).....	49
7.1.4 Μαρώνεια Ροδόπης.....	50
7.2 Παγκόσμια κοιτάσματα skarn	52
7.2.1 Ertsberg Ινδονησία.....	52
7.2.2 Beiminghe Κίνα (BMH).....	54
7.2.3 Fenghuangshan Κίνα.....	55



7.2.4 Sangam Ιράν	56
Βιβλιογραφία.....	58
Εικόνες.....	Error! Bookmark not defined.



ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN

Δούκας Νικόλαος

Η παρούσα πτυχιακή διατριβή αφορά τα κοιτάσματα skarn. Γίνεται αναφορά στον ορισμό του συγκεκριμένου τύπου κοιτάσματος, στην ταξινόμησή του ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες σχηματισμού που επικρατούν και τα χαρακτηριστικά του. Ο συγκεκριμένος τύπος κοιτάσματος έχει μεγάλη οικονομική σημασία, καθώς αποτελεί αντικείμενο εκμετάλλευσης πληθώρας χρήσιμων χημικών στοιχείων. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στην ορυκτολογία και την γεωχημεία των skarn και στο πώς κατατάσσονται βάση αυτών των χαρακτηριστικών. Αναλύεται η έννοια της μετασωμάτωσης επαφής και της διαδικασίας της διάχυσης και διήθησης που είναι υπεύθυνη για την γένεση των κοιτασμάτων skarn σε συγκεκριμένα τεκτονικά περιβάλλοντα, καθώς και οι αναγκαίες συνθήκες για τον σχηματισμό τους, αλλά και η εξέλιξη των συγκεκριμένων κοιτασμάτων skarn. Τέλος αναφέρονται κάποια σημαντικά κοιτάσματα skarn στην Ελλάδα αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο.



SKARN DEPOSITS

Doukas Nikolaos

The present diploma thesis refers to the skarn mineral deposits. Special reference is made to the definition of the term skarn and to the classification of the deposits according to their characteristics and the prevailing conditions of formation. This deposit type is economically valuable because of the large variety of chemical elements that includes. Special reference is made to the mineralogy and geochemistry of skarn deposits and their classification based on them. The definition of metasomatism, the progress of diffusion and filtration which is responsible for the genesis of skarn deposits at specific tectonic environments, the formation conditions and the evolution of skarn deposits, are discussed in details. Finally, some important skarn deposits from Greece and worldwide are described.



1. Εισαγωγή

Τα κοιτάσματα Skarn είναι ένας σημαντικός τύπος κοιτάσματος. Μεγάλης οικονομικής σημασίας αποτελούν τα ίδια αλλά και τα κοιτάσματα που συνδέονται με αυτά λόγω της μεταλλοφορίας τους. Εκτενής αναφορά θα γίνει στην ορυκτολογία, την γεωχημεία και τις ιδιότητες του κοιτάσματος καθώς και στις συνθήκες και τα περιβάλλοντα σχηματισμού τους.

Αναλυτικότερα στην εργασία θα αναφερθούν:

- Ορισμοί και αποσαφηνίσεις για τα κοιτάσματα Skarn
- Η ορυκτολογία τους και η γεωχημεία τους
- Οι φάσεις εξέλιξης τους
- Οι ιδιότητες τους και η κατάταξη τους
- Τα κοιτάσματα που συνδέονται με αυτά
- Το πετρολογικό - τεκτονικό - κοιτασματολογικό μοντέλο δημιουργίας τους
- Ο σχηματισμός και η εξέλιξή τους
- Παγκόσμια και ελληνικά κοιτάσματα Skarn

Οι εικόνες που θα παρατίθενται στο κείμενο θα αναφέρονται στο τέλος αυτού.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή του τομέα Πετρολογίας - Ορυκτολογίας - Κοιτασματολογίας κ. Βασίλειο Μέλφο, για την ανάθεση αυτού του θέματος καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές του.

2. Ορισμοί και αποσαφηνίσεις

Ο όρος skarn αναφέρθηκε πρώτη φορά από τον Σουηδικής προέλευσης Tornebohm (1985) στην προσπάθειά του να περιγράψει τα αδρόκκοκα ασβεστοπυριτικά ενός κοιτάσματος σιδηροσουλφιδίων το οποίο βρισκόταν στο Persberg της Σουηδίας. Λίγο αργότερα ο Burt (1982) σημειώνει ότι ο όρος skarn θα πρέπει να αναφέρεται για την ορυκτολογική παραγένεση και όχι για τον τρόπο γένεσης του σχηματισμού. Σήμερα οι περισσότεροι συγγραφείς έχουν αποδεχθεί την πρόταση των Einaudi et al. (1981) ότι ο όρος Skarn πρέπει να αναφέρεται για την περιγραφή της ορυκτολογικής παραγένεσης και όχι του τρόπου γένεσης των σχηματισμών αυτών.

Σύμφωνα με τους Einaudi et al. (1981) τα Skarn αποτελούνται αδρόκκοκα πυριτικά ορυκτά του μαγνησίου, μαγγανίου, σιδήρου και αργίλιου τα οποία έχουν δημιουργηθεί από την αντικατάσταση των ανθρακικών πετρωμάτων που πραγματοποιείται κατά την περιοχική μεταμόρφωση ή την μεταμόρφωση επαφής. Δηλαδή τα skarn αποτελούν θερμομεταμορφωμένα μετασωματικά πετρώματα όπου προκύπτουν από την θερμομεταμόρφωση ασβεστολιθικών πετρωμάτων και η κύρια παραγένεση τους είναι ασβεστοπυριτικά ορυκτά.

Σύμφωνα με τον Lindgren (1933) η μετασωμάτωση είναι μια διεργασία ταυτόχρονης διάλυσης και απόθεσης κατά την οποία αναπτύσσονται νέα ορυκτά με μερικώς ή ολικώς διαφορετικής σύστασης στον χώρο ενός παλαιότερου ορυκτού ή συσσωματώματος ορυκτών. Έτσι τα Skarn δημιουργούνται από μετασωματικές διεργασίες και περιλαμβάνουν ρευστά τα οποία μπορεί να είναι διαφόρων προελεύσεων (Meinert, 1992) όπως:

1. Μαγματικά
2. Μεταμορφικά
3. Μετεωρικά
4. Ακόμη και θαλασσινό νερό

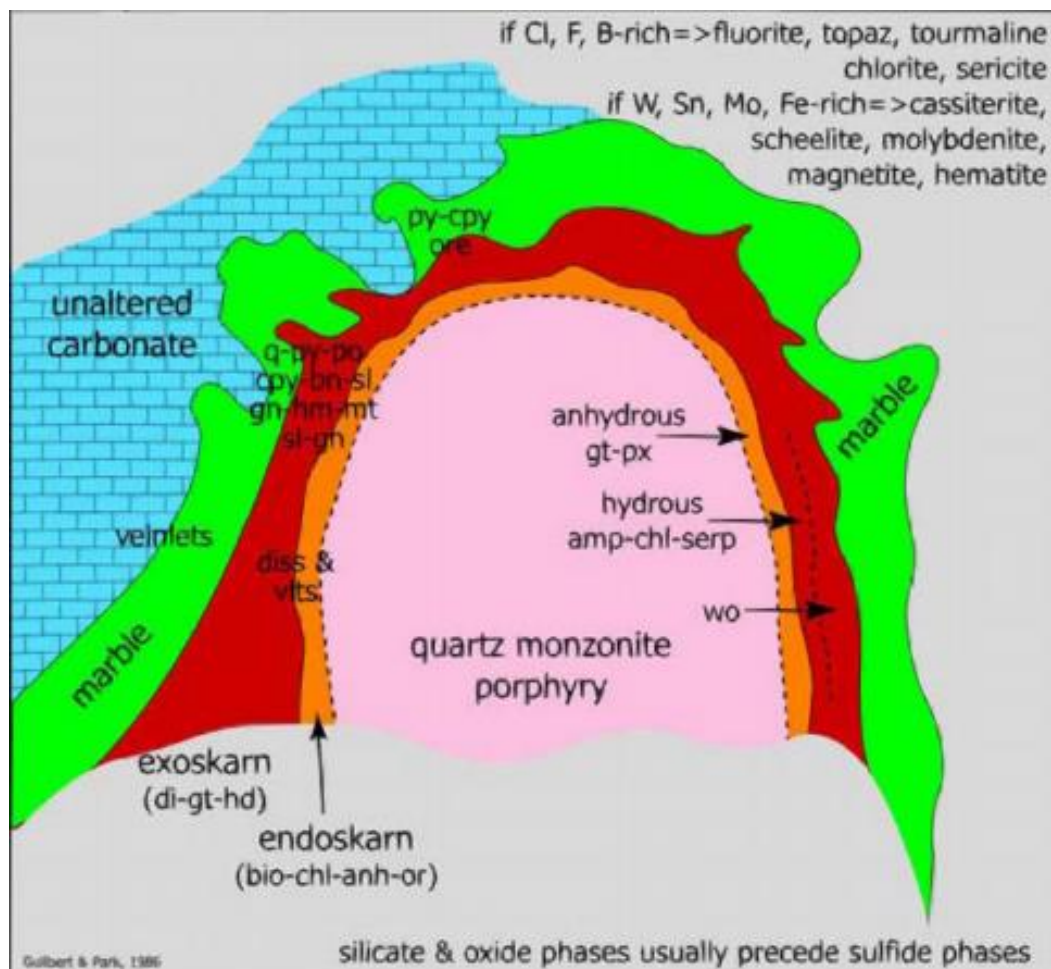
Η πλειοψηφία των Skarn εντοπίζετε σε ανθρακικά πετρώματα, αλλά αυτά μπορούν να σχηματιστούν σε οποιοδήποτε πέτρωμα όπως είναι οι ψαμμίτες οι γρανίτες οι βασάλτες και οι κομματίτες (Harlov 2013).

Η δημιουργία των Skarn μπορεί να σχετίζεται με μεταμόρφωση επαφής, με περιοχική μεταμόρφωση, ακόμη με διατμητικές ζώνες καθώς και με αβαθή γεωθερμικά πεδία. Ο σχηματισμός των Skarn καθώς και η μεταλλογένεση που πραγματοποιείται αποτελούν αποτέλεσμα του ίδιου γεωθερμικού συστήματος καθώς είναι πολύ πιθανό να παρουσιάζεται διαφορετική χωρική και χρονική κατανομή των παραγενέσεων (Einaudi et al. 1981, Einaudi & Burt 1982, Meinert 1992, Misra 2000).

Τα Skarn αναπτύσσονται εντός του πλουτωνίτη, αλλά αναπτύσσονται και εκτός της άλως μεταμόρφωσης. Ανάλογα με τον τρόπο που αναπτύσσονται μπορούμε και τα διακρίνουμε σε endo-Skarn, exo-Skarn, σύνθετα-Skarn (Εικ 1).

- Endo-Skarn: ονομάζονται αυτά που αναπτύσσονται εις βάρος του πλουτωνίτη
- Exo-Skarn: ονομάζονται αυτά που αναπτύσσονται στα πετρώματα ξενιστές
- Σύνθετα-Skarn: ονομάζονται αυτά που αποτελούνται από endo και exo Skarn

Σε περίπτωση που το Skarn αναπτύσσεται σε απόσταση >1km από τον πλουτωνίτη (Meinert 2005) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο όρος τηλε-Skarn. Πολύ συχνά εμφανίζεται ο όρος skarnoids, ο οποίος περιγράφει λεπτόκοκκα ασβεστοπυριτικά ορυκτά, τα οποία είναι φτωχά σε Fe και έχουν αντιπροσωπευτική χημική σύσταση σε σχέση με τον πρωτόλιθο (Einaudi et al. 1981, Einaudi & Burt 1982, Meinert 1992, Misra 2000).



Εικόνα 1: Το endo-skarn αναπτύσσεται εις βάρος του πλουτωνίτη καθώς και το exo-skarn αναπτύσσεται στο πέτρωμα-ξενιστή. Πηγή : Silicate and oxide phases usually precede sulfide phases. Guilbert & Park, 1986

3. Οικονομική εκμετάλλευση

Κοιτάσματα Skarn: χαρακτηρίζονται τα Skarn που περιέχουν οικονομικά εκμεταλλεύσιμα μεταλλικά ορυκτά. Τα κοιτάσματα Skarn, καθώς και τα κοιτάσματα που συνδέονται με αυτά, έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκμετάλλευσης πληθώρας στοιχείων όπως: Fe, Co, PGE, W, Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Mo, U, REE, B, F, Sn, Be, Sc, Nb. Η γένεση των παραπάνω κοιτασμάτων μπορεί να είναι σύγχρονη με την κοιτασματογένεση των Skarn ή συνοδή ή μπορεί να είναι μεταγενέστερη.

- Τα κοιτάσματα με σύγχρονη κοιτασματογένεση σχηματίζονται μαζί με τα Skarn και περιέχουν ως ορυκτά τον μαγνητίτη, τον γραφίτη και βορικά άλατα. Τα κοιτάσματα αυτά σχηματίζονται στην επαφή του πλουτωνίτη με τα περιβάλλοντα πετρώματα.
- Τα κοιτάσματα με συνοδή κοιτασματογένεση σχηματίζονται στο τέλος του σχηματισμού των Skarn και έχουν ως κύρια παραγένεση τον μαγνητίτη, τον σεελίτη και βορικά άλατα και σχηματίζονται σε όλα τα τμήματα του Skarn.
- Τα κοιτάσματα με μεταγενέστερη κοιτασματογένεση σχηματίζονται κατά την ανάδρομη εξαλλοίωση στην περιοχή που σχηματίζονται τα Skarn αλλά και στα περιβάλλοντα πετρώματα. Η ανάδρομη εξαλλοίωση πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες 200-400 C και λαμβάνει χώρα αντικατάσταση των άνυδρων πυριτικών ορυκτών από ένυδρα. Εδώ δημιουργούνται οι εξής τύποι κοιτασμάτων: σιδήρου-χαλκού, χαλκού, μολύβδου, μολυβδαινίου, μολύβδου-ψευδαργύρου, χρυσού, κασσίτερου, ουρανίου και σεελίτη.

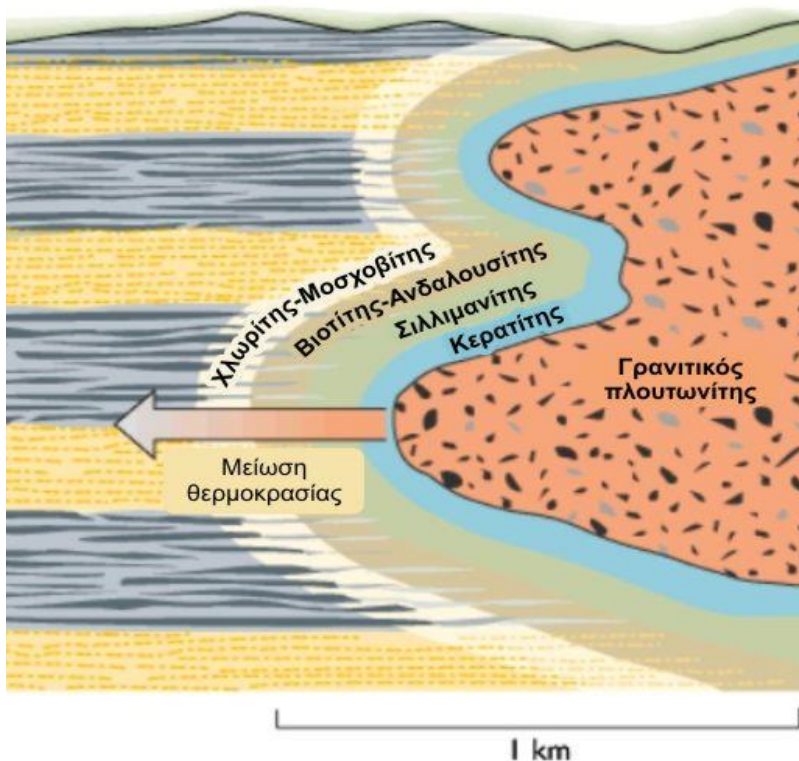
Αναλυτικότερα σύμφωνα με τους (Einaudi et al 1981, Meinert 1992, Misra 2000) υπάρχουν τα εξής κοιτάσματα που συνδέονται με τα κοιτάσματα Skarn και αποτελούν μεγάλης οικονομικής σημασίας:

- 1) Κοιτάσματα Fe
- 2) Κοιτάσματα Fe-Co
- 3) Κοιτάσματα Pb-Zn
- 4) Κοιτάσματα Cu
- 5) Κοιτάσματα Au
- 6) Κοιτάσματα PGE'S
- 7) Κοιτάσματα Sn
- 8) Κοιτάσματα Be-Sc
- 9) Κοιτάσματα Φλογοπίτη
- 10) Κοιτάσματα B
- 11) Κοιτάσματα Ουρανίου
- 12) Κοιτάσματα REE'S + Nb

Παγκοσμίως έχουν εκμεταλλευτεί πολλά κοιτάσματα Skarn για την εκμετάλλευση των παραπάνω στοιχείων, πολλά από αυτά τα κοιτάσματα θα αναφερθούν αργότερα σε παρακάτω κεφάλαιο.

4. Μεταμόρφωση επαφής

Αρχικά είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί η μεταμόρφωση επαφής και οι φάσεις που την χαρακτηρίζουν καθώς οι διαδικασίες είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση των σχηματισμών Skarn. Γύρω από μια πλουτώνια διείσδυση λόγω της αύξησης της γεωθερμικής βαθμίδας, εμφανίζεται η μεταμόρφωση επαφής. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται σε μικρά βάθη, και οφείλετε στην ύπαρξη μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των πετρωμάτων ξενιστών και του μάγματος που διεισδύει. Κατά την διείσδυση αυτή αποτίθενται γρανιτοειδή, καθώς απουσιάζουν και φαινόμενα τεκτονικής παραμόρφωσης στα πετρώματα ξενιστές, γι' αυτό και δεν παρατηρείται η δημιουργία φολίδωσης στα νεοσχηματισθέντα πετρώματα. Με την μεταμόρφωση επαφής δημιουργούνται οι κερατίτες. Οι κερατίτες είναι πετρώματα λεπτοκρυσταλλικά με ιστό: ιδιοβλαστικό - υπιδιοβλαστικό. Η περιοχή γύρω από την επαφή διείσδυσης που έχει υποστεί θερμική μεταμόρφωση ονομάζεται άλως επαφής (Εικ 2) (Miyashiro 1994, Kretz 1994).



Εικόνα 2: Δημιουργία κερατίτη και εμφάνιση άλως επαφής.

Πηγή: http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_metamorphic.htm

Με την επίδραση της θερμότητας στα πετρώματα ξενιστές λαμβάνει χώρα ένα σύνολο διεργασιών: η ανακρυστάλλωση, η μετασωματώση που αποτελεί τον κύριο παράγοντα δημιουργίας των Skarn και ο εμπλουτισμός σε νέα ορυκτά. Στην μεταμόρφωση επαφής παρατηρούνται δύο κύριες φάσεις εξέλιξης (Einaudi et al 1981, Misra 2000):

- 1) Η ισοχημική φάση
- 2) Η μετασωματική φάση

4.1 Ισοχημική φάση

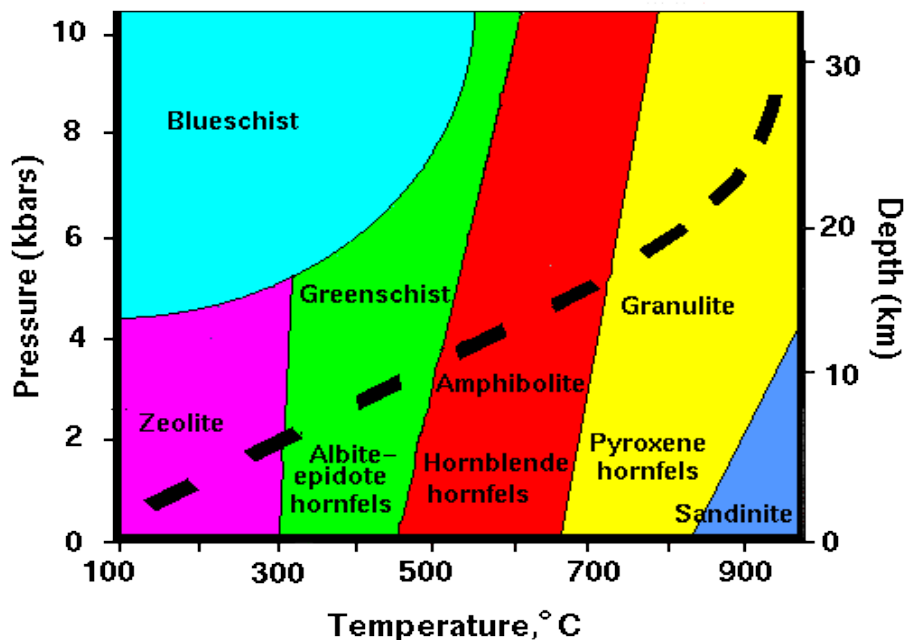
Στην ισοχημική φάση οι διεργασίες που πραγματοποιούνται πρώτες είναι:

- I. Η απλή ανακρυστάλλωση: όπου δημιουργούνται ορυκτά ίδιου χημισμού
- II. Η ανακατανομή των χημικών στοιχείων και η δημιουργία νέων παραγενέσεων

Κατά την μεταμόρφωση επαφής εμφανίζονται στα πετρώματα ξενιστές διάφορες ορυκτολογικές φάσεις, με αυξανόμενη θερμοκρασία, σχεδόν σταθερή πίεση και δημιουργούνται κατά αυτόν τον τρόπο οι κερατίτες. (Εικ 3) (Miyashiro 1994, Kretz 1994, Kornprobst 2002).

Οι Κερατιτικές φάσεις κατά αυξανόμενη θερμοκρασία και σταθερή πίεση είναι οι εξής:

1. Φάση Αλβίτη - Επιδότου
2. Φάση Κεροστίλβης
3. Φάση Πυροξένων
4. Φάση Σανιδίνου



Εικόνα 3: Οι μεταμορφικές φάσεις σε συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.
Πηγή:

Οι ορυκτολογικές παραγενέσεις που δημιουργούνται κατά την μεταμόρφωση επαφής είναι ανάλογες με το είδος του πρωτόλιθου (Kornprobst 2002) και είναι οι εξής (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Ορυκτολογικές παραγενέσεις κατά την μεταμόρφωση επαφής (Kornprobst 2002)

	Πηλινικά Πετρώματα	Χαλαζιακά - αστρειούχα Πετρώματα	Βασικά πετρώματα	Ασβεστιτικά πετρώματα
ΚΕΡΑΤΙΤΙΚΗ ΦΑΣΗ ΑΛΒΙΤΗ- ΕΠΙΔΟΤΟΥ	χαλαζίας + επίδοτο + αλβίτης + μοσχοβίτης ανδαλουσίτης + χλωρίτης + βιοτίτης	ή μικροκλινής + χαλαζίας + αλβίτης + μοσχοβίτης + βιοτίτης	ακτινόλιθος + βιοτίτης + χλωρίτης ± επίδοτο + τάλκης ± χαλαζίας + αλβίτης	ασβεστίτης + τρεμόλιθος + επίδοτο ± χαλαζίας
ΚΕΡΑΤΙΤΙΚΗ ΦΑΣΗ ΚΕΡΟΣΤΙΑΒΗ Σ	χαλαζίας + πλαγιόκλαστο + μοσχοβίτης ή ανδαλουσίτης κορδερίτης χαλαζίας + πλαγιόκλαστο + μοσχοβίτης + βιοτίτης + κορδερίτης	μικροκλινής + χαλαζίας + μοσχοβίτης + πλαγιόκλαστο + βιοτίτης ± αλμανδίνης	πλαγιόκλαστο + βιοτίτης ± αλμανδίνης ± χαλαζίας + ανθοφυλλίτης + κορδερίτης	πλαγιόκλαστο + γροσσουλάριος + τρεμόλιθος ± χαλαζίας ασβεστίτης + διοψίδιος + γροσσουλάριος ± χαλαζίας
ΚΕΡΑΤΙΤΙΚΗ ΦΑΣΗ ΠΥΡΟΞΕΝΩΝ	χαλαζίας + πλαγιόκλαστο + Κ- άστριοι + συλλιμανίτης + κορδερίτης	χαλαζίας + πλαγιόκλαστο + Κ- άστριοι + βιοτίτης	πλαγιόκλαστο + κορδερίτης + βιοτίτης ± χαλαζίας πλαγιόκλαστο + υπερσθενής + βιοτίτης διοψίδιος ± χαλαζίας	πλαγιόκλαστο + γροσσουλάριος + διοψίδιος ± χαλαζίας βολλαστονίτης + διοψίδιος + γροσσουλάριος ± χαλαζίας

ΚΕΡΑΤΙΤΙΚΗ ΦΑΣΗ ΣΑΝΙΔΙΝΟΥ	σανίδινο + ανορθίτης + υπερσθενής + κορδερίτης + μουλίτης + σιλλιμανίτης + κορούνδιο ± τριδυμίτης	αυγίτης + υπερσθενής + βυτοβνίτης + βρουκίτης + τριδυμίτης ολιβίνης + αυγίτης + πλαγιόκλαστο + μαγνητίτης + ιμενίτης υπερσθενής + πλαγιόκλαστο + μαγνητίτης + ιμενίτης + ψευδοβρουκίτης κορδερίτης + πλαγιόκλαστο + μαγνητίτης + αιματίτης	βολλαστονίτης + ανορθίτης + διοψίδιος βολλαστονίτης + μελίλιθος Ασβεστίτης + λαρνίτης + πραουνμιλλερίτ ης + μειγερίτης
---	--	--	---

Με την διείσδυση ενός πλουτωνίτη στα γειτονικά πετρώματα παρατηρείται μια ζώνη αύξησης της θερμοκρασίας, η οποία ονομάζεται ζώνη επαφής. Η θερμότητα μεταφέρεται σύμφωνα με το νόμο του Fournier ο οποίος εκφράζεται από τον τύπο:

$$\vec{q}(x, y, z) = -k\left(\frac{dT}{dx} + \frac{dT}{dy} + \frac{dT}{dz}\right)$$

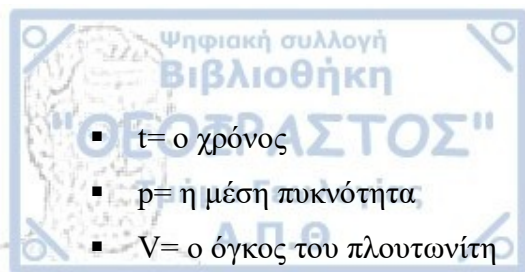
- Όπου το $\vec{q}(x, y, z)$ = τοπική θερμική ροή στις διαστάσεις x, y, z.
- T = θερμοκρασία

Η θερμοκρασία παρουσιάζει συνεχή μείωση από τον πλουτωνίτη προς τα γειτονικά πετρώματα και ισχύει ο εκθετικός νόμος:

$$\frac{T - T_{intrusion}}{T_0 - T_{intrusion}} = \exp\left(\frac{-h * A * t}{p * C_p * V}\right)$$

Όπου:

- $T_{intrusion}$ = θερμοκρασία διείσδυσης
- T_0 = αρχική θερμοκρασία
- h = ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- A = το εμβαδόν της επιφανειακής εμφάνισης του πλουτωνίτη



- $t =$ ο χρόνος
- $\rho =$ η μέση πυκνότητα
- $V =$ ο όγκος του πλουτωνίτη

- $C_p =$ η ειδική θερμότητα του πλουτωνίτη

Η ελάττωση της θερμοκρασίας σε σχέση με την απομάκρυνση από τον πλουτωνίτη φαίνεται με την βοήθεια των ισόθερμων καμπυλών οι οποίες μεταξύ τους έχουν τον ίδιο βαθμό μεταμόρφωσης. Η απόσταση μεταξύ τους εξαρτάται από το βάθος της διείσδυσης, όσο μεγαλύτερη απόσταση έχουν τόσο πιο βαθιά διείσδυση έχει πραγματοποιηθεί. Σε αβαθείς διεισδύσεις ο παράγοντας της εκθετικής συνάρτησης είναι αρκετά μεγάλος, κατ' αυτόν τον τρόπο περιορίζονται οι μεταλλευτικές διεργασίες και παρατηρείται το φαινόμενο της τηλεσκοπικής σύμπτυξης (Miyashiro 1994, Kretz 1994).

Η ζώνη επαφής καθορίζεται από την μεταβολή της θερμοκρασίας, η οποία με την σειρά της καθορίζεται από (Miyashiro 1994, Kretz 1994):

1. Την ολική μάζα του πλουτωνίτη
2. Την χημική σύσταση του πλουτωνίτη και τον γειτονικών πετρωμάτων
3. Το βάθος διείσδυσης
4. Την $T_{intrusion}$
5. Την T_0 των γειτονικών πετρωμάτων
6. Την θερμική αγωγιμότητα των γειτονικών πετρωμάτων
7. Την διαπερατότητα των γειτονικών πετρωμάτων
8. Την λανθάνουσα θερμότητα κρυστάλλωσης του μάγματος
9. Την θερμότητα που παράγεται κατά την μεταμόρφωση επαφής
10. Το εκατοστιαίο ποσοστό κατ' όγκο σε νερό και άλλων πτητικών

Γενικότερα η ύπαρξη ζώνης επαφής γύρω από έναν πλουτωνικό όγκο συνδέεται με την ροή των ρευστών που φτάνουν έως και μερικά χιλιόμετρα μακριά από αυτόν (Meinert 2005). Η γένεση των Skarn περιλαμβάνει διεργασίες ισοχημικής μεταμόρφωσης και μετασωμάτωσης που θα αναλυθεί αμέσως μετά λόγω της μεταφοράς θερμότητας στοιχείων και ρευστών.

Σύμφωνα με τον Lindgren (1933) η μετασωμάτωση είναι μια διεργασία ταυτόχρονης διάλυσης και απόθεσης κατά την οποία αναπτύσσονται νέα ορυκτά με μερικώς ή ολικώς διαφορετικής σύστασης στον χώρο ενός παλαιότερου ορυκτού ή συσσωματώματος ορυκτών. Η μετασωμάτωση είναι ένα σύνολο διεργασιών που πραγματοποιούνται σε ορισμένο βάθος στα πετρώματα που έχουν ήδη θερμομεταμορφωθεί στις ζώνες μεταμόρφωσης επαφής, από διαλύματα που σχετίζονται με την διείσδυση. Τα Skarn θεωρούνται ως τελικό αποτέλεσμα των μετασωματικών διεργασιών που προκαλούν μια χημική αλλαγή στα περιβάλλοντα ασβεστολιθικά πετρώματα λόγω της τάσης για χημική εξισορρόπηση μεταξύ αυτών και του υπό τοποθέτηση μάγματος και το ευνοϊκότερο βάθος σχηματισμού είναι 0,5-2 km (Einaudi et al. 1981, Einaudi & Burt 1982, Meinert 1992, Misra 2000).

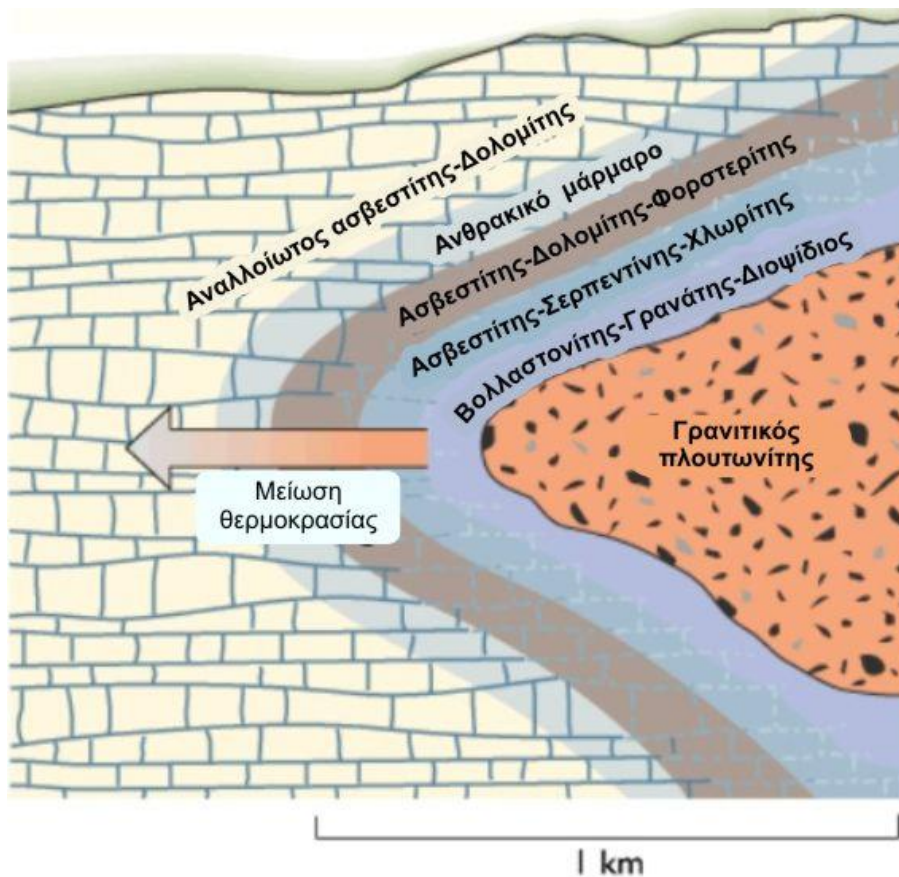
Η μετασωματική φάση περιλαμβάνει την μεσολάβηση ρευστών φάσεων καθώς και την μετασωμάτωση και αντικατάσταση ορυκτών που έχουν θερμο-μεταμορφωθεί. Φαινόμενα μετασωμάτωσης παρατηρούνται εκατέρωθεν των επιφανειών διείσδυσης των ενδιάμεσων μονζονιτών - γρανοδιοριτών. Ιδιαίτερη προσοχή αξίζει να δοθεί στο γεγονός ότι σε περιπτώσεις όξινης και βασικής διείσδυσης η επίδραση είναι θερμική και όχι τόσο μετασωματική. Τα πετρώματα που δεν αντιδρούν, όπως είναι οι χαλαζίτες, δεν υφίστανται κάποια αλλαγή ενώ αυτά που αντιδρούν, όπως τα μάρμαρα, υφίστανται αλλαγές ακόμη και αν βρίσκονται σε απόσταση. Βεβαία σημαντικό ρόλο κατέχει και η τεκτονική της περιοχής διότι αυτή κατευθύνει την κίνηση των ρευστών. Έτσι οι θραυστιγενείς δομές και η διαπερατότητα των πετρωμάτων που μπορεί να αυξηθεί κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων σχηματισμού των ορυκτών των skarn, ρυθμίζουν την ροή των ρευστών που σχετίζονται με την δημιουργία των Skarn (Meinert et al. 2005). Οι θραυστιγενείς δομές που προαναφέρθηκαν είναι οι εξής:

- Ρήγματα
- Διακλάσεις
- Μικρορωγμές στο περιβάλλον πέτρωμα

Οι θραυστιγενείς δομές που συνδέονται με τον πλουτωνίτη περιλαμβάνουν διασταλτικές ρωγμές ψύξης και διακλάσεις που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της κρυστάλλωσης του. Αυτές οι ρωγμές στα πλουτωνικά πετρώματα οδηγούν στην κυκλοφορία ρευστών πλούσιων σε

Ca, τα οποία ρευστά δημιουργούνται από την αντίδραση με τα περιβάλλοντα ανθρακικά πετρώματα και δημιουργούνται φλέβες μέσα στις οποίες περιλαμβάνονται ορυκτά όπως είναι:

- Γρανάτης
- Βολλαστονίτης
- Πυρόξενι
- Ασβεστίτης



Εικόνα 4: Θερμομεταμόρφωση ασβεστολιθικών πετρωμάτων και δημιουργία Skarn με την διαδικασία της μετασωμάτωσης

Πηγή: http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_metamorphic.htm

Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του Skarn της Μαρόνειας, όπου το ανατολικό τμήμα του πλουτωνίτη (μονζογάββρος) έρχεται σε επαφή με την μεταηφαιστειοϊζηματογενή σειρά της ενότητας της Μάκρης. Η ζώνη των κερατιτών έχει έκταση 500 έως 1000 m. Στα βόρεια και δυτικά του μονζογάββρου, όπου έρχεται σε επαφή με ασβεστολιθικά πετρώματα (ασβεστιτικούς φυλλίτες και μάρμαρα μεταγραουβάκες μετακροκαλοπαγή πρασινοσχιστόλιθοι και γνεύσιοι) της ενότητας της Μάκρης παρατηρείται ο σχηματισμός Skarn με την διαδικασία της μετασωμάτωσης.

Γενικότερα η μετασωμάτωση περιέχει δύο βασικά είδη μετασωματισμού:

- 1) Διαχυτική μετασωμάτωση: Αυτός πραγματοποιείται από τη διάχυση ενός προς διάλυση υλικού μέσω μίας στάσιμης υγρής διάλυσης. Η διάχυση συντελείται από χημική δραστηριότητα και εισέρχεται στο πέτρωμα. Διηθητική μετασωμάτωση: Αυτός πραγματοποιείται από τη μεταφορά διαλυμένου υλικού καθώς φιλτράρεται από τα πετρώματα που το περιέχουν. Η διήθηση συντελείται από την πίεση και την συγκέντρωση και το προϊόν του εισχωρεί στο πέτρωμα.

Τα διαχυτικά πετρώματα σχηματίζουν μη συμπαγή ζωνώδη στρώματα κατά μήκος των ρωγμών, των φλεβών και ακόμη σχηματίζουν μια επιφάνεια επαφής και η σύνθεση των ορυκτών μεταβάλλεται σταδιακά διαμέσου της μετασωματικής ζώνης. Τα διηθητικά πετρώματα καταλαμβάνουν μεγαλύτερους όγκους και η σύνθεση των ορυκτών είναι σταθερή διαμέσου της μετασωματικής ζώνης.

Σύμφωνα με τον Korzhinskii (1953) η μετασωμάτωση διαχωρίζεται σε 2 στάδια:

- 1) Του μαγματικού σταδίου: όπου ανήκουν οι μετασωματίτες που σχηματίστηκαν στα περιβάλλοντα πετρώματα όταν τα μαγματικά διαλύματα διαχωρίστηκαν από την μαγματική μάζα
- 2) Του μεταμαγματικού σταδίου: οι μετασωματικές διεργασίες είναι αμφίδρομες καθώς πραγματοποιούνται μετά από την στερεοποίηση αλλά και την κρυσταλλοποίηση των μαγματικών όγκων που διεισδύουν. Επίσης, συσχετίζονται και με υδροθερμικά διαλύματα που προέρχονται από το ψυχόμενο μάγμα και από άλλες εξωγενείς θερμές πηγές.

Στην συνέχεια ο Korzhinskii (1953) υποδιαίρεσε τα παραπάνω στάδια σε τρία υποστάδια:

- i) Του πρώιμου αλκαλικού σταδίου
- ii) Του σταδίου της απόπλυσης των οξέων και των αποθέσεων
- iii) Και το στάδιο του τελικού υδροθερμικού σταδίου.

Επίσης η μετασωμάτωση μπορεί να διακριθεί ακόμα και με την γεωλογική θέση που πραγματοποιείται σε

- 1) Αυτομετασωμάτωση
- 2) Μετασωμάτωση επαφής (δημιουργία skarn)
- 3) Διμετασωμάτωση
- 4) Παραφλέβια μετασωμάτωση
- 5) Περιοχική μετασωμάτωση (δημιουργία greisen).

5. Ιδιότητες και ορυκτοχημεία των Skarn

5.1 Χαρακτηριστικά των Skarn

Σύμφωνα με τον Meinert (1992) οι ιστοί που παρατηρούνται στα κοιτάσματα Skarn είναι οι εξής:

- Πορφυροβλαστικός
- Κοκκοβλαστικός
- Ποικιλοβλαστικός

Ενώ η πιο συχνοί τύποι υφής:

- Συμπαγής
- Ταινιωτοί
- Ανομοιόμορφοι

Η μορφή των κοιτασμάτων Skarn είναι:

- Φακοειδής
- Σωληνοειδής
- Φλεβική
- Πολύπλοκη έως ακανόνιστη

Ένα επίσης πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των Skarn είναι η ζώνωση, η οποία όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, προκύπτει από την αλληλεπίδραση της αρχικής ισοχημικής φάσης με την μετέπειτα μετασωματική. Η ζώνωση αναπτύσσεται εντός της άλωσ επαφής η ορυκτολογική παραγένεση των ζωνών διαφέρει μεταξύ τους. Οι παραγενέσεις αυτές καθορίζονται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- Την μάζα του πλουτωνίτη
- Το βάθος διείσδυσης του
- Τον χημικό του χαρακτήρα
- Την θερμοκρασία και την πίεση των μετασωματικών ρευστών
- Τα περιβάλλοντα πετρώματα
- Την τεκτονική της περιοχής.

Στις εσωτερικές ζώνες αναπτύσσονται άνυδρα ορυκτά (γρανάτης και πυρόξενος), με τους γρανάτες να βρίσκονται πλησιέστερα στην επαφή με τον πλουτωνίτη ενώ τους πυρόξενους να εμφανίζονται όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν (Meinert 1992). Όσο πλησιάζουμε στις εξωτερικές ζώνες επικρατούν τα ένυδρα ορυκτά όπως (χαλαζίας, ασβεστίτης, τάλκης, επίδοτο).

5.2 Ορυκτοχημεία των Skarn

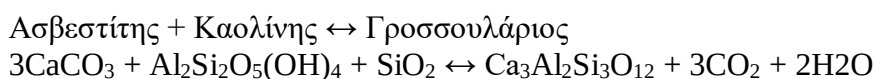
Τα κυριότερα ορυκτά που συναντάμε στα Skarn είναι τα άνυδρα πυριτικά όπως είναι ο γρανάτης, οι πυρόξενοι, ο βολλαστονίτης και ο σκαπόλιθος, ενώ από ένυδρα ο τρεμολίτης και το επίδοτο τα οποία δημιουργούνται από την ανάδρομη εξαλλοίωση καθώς και η παρουσία τους εξαρτάται από την τεκτονική της περιοχής (π.χ. παρουσία ρήγματος) (Meinert 1992). Όταν τα Skarn έρχονται σε επαφή με μάρμαρα παρατηρούνται ορυκτά όπως ο βολλαστονίτης και οι πυρόξενοι. Η παρουσία σπινέλιου υποδηλώνει τον εμπλουτισμό των μαρμάρων σε Mg. Σε αυτήν την επαφή των Skarn με τα μάρμαρα στους πυρόξενους παρατηρείται αύξηση του ποσοστού των στοιχείων Fe και Mn, ενώ στους γρανάτες που βρίσκονται πιο κοντά στον πλουτωνίτη μια αύξηση του Fe. Μερικά ορυκτά όπως είναι ο χαλαζίας ο ασβεστίτης είναι παρόντα σχεδόν σε όλα τα Skarn. Άλλα ορυκτά όπως είναι ο φλογοπίτης, ο σερπεντινίτης, ο τάλκης, ο χουμίτης, το περίκλαστο ο βρουσίτης αν και πρόκειται για τυπικά μαγνησιούχα ορυκτά απουσιάζουν από πολλά Skarn, καθώς δεν υπάρχουν δολομιτικά πετρώματα στην περιοχή.

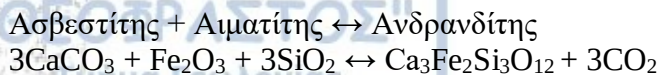


Εικόνα 5: Τυπική εικόνα Skarn όπου με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται ο γρανάτης, με άσπρο ο βολλαστονίτης και με πράσινο ο διοψίδιος.

Πηγή: <http://profharwood.x10host.com/GEOL101/Labs/AtlasMetamorphic/Images/D025-192-75.jpg>

Ο γρανάτης στα Skarn είναι ένας γρανδίτης δηλαδή γροσσουλάριος $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ - ανδρανδίτη $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$. Σύμφωνα με τους Einaudi and Burt (1982) οι γρανάτες αυτοί σχηματίζονται με τον εξής τρόπο:





Τα ορυκτά πολλές φορές μπορούν να παρουσιάζουν χρωματική ζώνωση εντός του Skarn. Ο γρανάτης που βρίσκεται κοντά στην πλουτωνική διείσδυση είναι ο αλμανδίνης με βαθύ κόκκινο χρώμα όσο απομακρυνόμαστε συναντάμε τον ανδρανδίτη με πιο καστανό χρώμα και όσο πλησιάζουμε το μάρμαρο συναντάμε τον γροσσουλάριο με πράσινο χρώμα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του Fe ή του Mn όσο προχωράμε από τον πλουτωνίτη προς το μάρμαρο (Pirajno 2010).

Τα Skarn κατατάσσονται βάση τον χημικό χαρακτήρα των πετρωμάτων ξενιστών σε:

- 1) Ασβεστούχα Skarn
- 2) Μαγνησιούχα Skarn
- 3) Πυριτικά Skarn

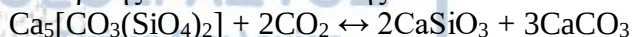
Ακόμη κατατάσσονται και βάση του κύριου μεταλλεύματός τους σε Σιδηρούχα, Βολφραμιούχα, Μολύβδου-Ψευδαργύρου κ.λπ.

5.2.1 Ασβεστούχα κοιτάσματα Skarn

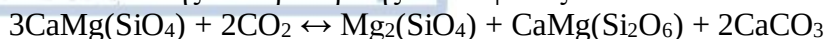
Τα skarn που προκύπτουν από ασβεστούχα πετρώματα με Fe-Ca πυριτικά ορυκτά όπως ο ανδρανδίτης και ο εδεμβεργίτης, ονομάζονται ασβεστούχα κοιτάσματα Skarn.

Τα συγκεκριμένα κοιτάσματα προέρχονται από την μετασώματωση μαρμάρων και ασβεστολίθων. Πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα κοιτάσματα αυτά και καθορίζει την κατάταξη τους είναι το βάθος του σχηματισμού τους διότι σε μεγάλα βάθη επικρατεί πλαστική παραμόρφωση και όχι θραυσιγενής στα πετρώματα, έτσι οι εμφανίσεις των Skarn εντοπίζονται σε μεγάλα βάθη με μορφή στενή και επιμήκεις και μικρού μεγέθους και η επαφή διείσδυσης είναι σχεδόν παράλληλη με την φολίδωση. Αντίθετα, στα Skarn μικρότερου βάθους οι επαφές διείσδυσης είναι ασύμφωνες με την φολίδωση και τα Skarn ως συμπαγή στρώματα αντικαθιστούν τα πετρώματα ξενιστές. Τα πετρώματα δέχονται θραυσιγενή παραμόρφωση με την μορφή ρηγμάτωσης, η οποία αυξάνει την διαπερατότητα των σχηματισμών αυτών ως προς τα μαγματικά ρευστά αλλά και τα μετεωρικά ρευστά. Έτσι κατά την ανάδρομη εξαλλοίωση με την είσοδο των μετεωρικών ρευστών σχηματίζονται skarn αβαθούς περιβάλλοντος. Με την αύξηση του βάθους αυξάνεται και η διαφυγή του CO_2 (PCO_2). Με την αύξηση του PCO_2 προκαλείται μια σειρά αντιδράσεων κατά την οποία δημιουργούνται ασβεστιτικά νεοπυριτικά ορυκτά (Misra 2000).

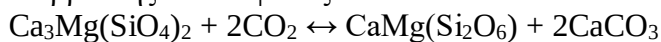
Σπουρίτης ↔ Βολλαστονίτης



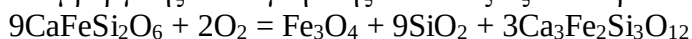
Μοντισελλίτης + Φορστερίτης ↔ Διοψίδιος



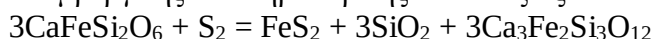
Μερβινίτης ↔ Διοψίδιος



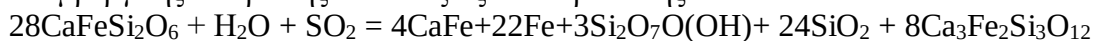
Εδεμβεργίτης = Μαγνητίτης + Χαλαζίας + Ανδρανδίτης



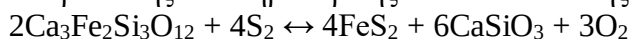
Εδεμβεργίτης = Σιδηροπυρίτης + Χαλαζίας + Ανδρανδίτης



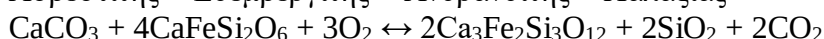
Εδεμβεργίτης = Ιλβαΐτης + Χαλαζίας + Ανδρανδίτης



Ανδρανδίτης = Σιδηροπυρίτης + Βολλαστονίτης



Ασβεστίτης + Εδεμβεργίτης = Ανδρανδίτης + Χαλαζίας

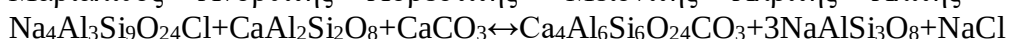


Ο ανδρανδίτης και ο εδεμβεργίτης είναι σταθεροί σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλά ποσοστά CO_2 , με τον πρώτο να υποδηλώνει οξειδωτικές συνθήκες και τον δεύτερο αναγωγικές ενώ σε ενδιάμεσες και υπάρχουν και τα δύο ορυκτά. Η παρουσία αυτής της παραγένεσης ρυθμίζει τις διαφυγές του O_2 και του S_2 .

Σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές PCO_2 ο ανδρανδίτης και ο εδεμβεργίτης αντικαθιστώνται από ασβεστίτη, χαλαζία και μαγνητίτη. Σε ακόμα χαμηλότερες θερμοκρασίες και πολύ υψηλότερες PCO_2 δημιουργείται η παραγένεση: χαλαζίας + ασβεστίτης + σιδηρίτης. Τα ένυδρα ορυκτά ιλβαΐτης, ακτινόλιθος και μπαμπιγκονίτης είναι σταθερά σε αναγωγικές συνθήκες και πλούσια σε Fe (Einaudi et al. 1982, Misra 2000).

Για τον καθορισμό του βάθους σχηματισμού των συγκεκριμένων Skarn χρησιμοποιείται ως δείκτης η χημική σύσταση του ζεύγους του πλαγιокλάστου και του σκαπόλιθου του οποίου τα ακραία μέλη είναι μαριάλιθος και ο μειονίτης.

Μαριάλιθος + Ανορθίτης + Ασβεστίτης ↔ Μειονίτης + Αλβίτης + Αλίτης

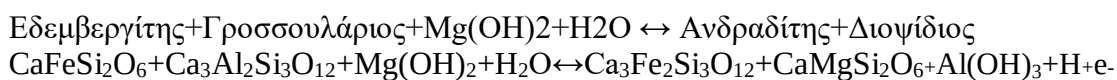


Στα Skarn μεγάλου βάθους επικρατεί ο σκαπόλιθος με μεγάλο ποσοστό μειονίτη και πλαγιόκλαστα και μικρότερο ποσοστό ανορθίτη, ενώ δεν συναντάτε ο βολλαστονίτης σε αυτά τα βάθη (Misra 2000).

Επομένως καθώς προχωράμε από τα μικρότερα βάθη προς τα μεγαλύτερα συναντάμε τις εξής φάσεις μετασωμάτωσης:

- Την φάση χωρίς την παρουσία βολλαστονίτη
- Την φάση με την παρουσία του βολλαστονίτη
- Την φάση του μελίλιθου με μοντισελλίτη
- Και του μελβινίτη με λαρνίτη

Ένας ακόμη παράγοντας πέρα από το βάθος σχηματισμού τους που καθορίζει την κατάταξη τους είναι και η σύσταση των πυροξένων και των γρανάτων τους. Σύμφωνα με τον Misra (2000) Η παραγένεση εδεμβεργίτης ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) με γροσσουλάριο ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό των κοιτασμάτων σεελίτη και μολυβδαινίτη-σεελίτη. Ενώ στα μεταλλικά και Fe-ούχα κοιτάσματα Skarn η κύρια παραγένεση είναι σαλίτης με ανδρανδίτης.



Ένας ακόμη παράγοντας που καθορίζει την κατάταξη των ασβεστούχων Skarn είναι η θερμοκρασία σχηματισμού τους διότι αυτή επηρεάζει την μετασωμάτωση και τις σχηματισθέντες παραγενέσεις. Έτσι διακρίνουμε 5 φάσεις μετασωμάτωσης:

- Του βολλαστονίτη - πλαγιόκλαστου ($T=750-800\text{ }^\circ\text{C}$)
- Του βολλαστονίτη - γρανάτη ($T=550-800\text{ }^\circ\text{C}$ για $T=750\text{ }^\circ\text{C}$ συνυπάρχουν)
- Του πυροξένου - γρανάτη ($T=500-550\text{ }^\circ\text{C}$)
- Του γρανάτη - επιδότου ($T=400-500\text{ }^\circ\text{C}$ στους $450\text{ }^\circ\text{C}$ συνυπάρχουν)
- Του πυροξένου - επιδότου ($T=350-450\text{ }^\circ\text{C}$ στους $400\text{ }^\circ\text{C}$ συνυπάρχουν)

Ακόμη, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλκαλιμέταλα διακρίνονται οι φάσεις:

- Του πλαγιόκλαστου με πυροξένους και πλαγιόκλαστα
- Του σκαπόλιθου με πυροξένους και σκαπόλιθους
- Του ορθόκλαστου με ορθόκλαστα και γρανάτη

Τελευταίος παράγοντας που επηρεάζει την κατάταξη των ασβεστούχων skarn είναι το ποσοστό τους σε Fe γι' αυτό και διακρίνονται:

- Φάση βολλαστονίτη
- Φάση διοψιδίου
- Φάση σαλίτη

- Φάση εδεμβεργίτη
- Φάση ανδραδίτη



Εικόνα 6: Skarn από την επαφή γρανιτικού μάγματος με μάρμαρα. Διακρίνονται οι κρύσταλλοι του πυροξένου και του ανδραδίτη

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τους (Einaudi et al. 1981, Einaudi and Burt 1982, Meinert 1992, Meinert 1993, Misra 2000) στα ασβεστούχα κοιτάσματα Skarn παρατηρούνται τα εξής ορυκτά (Πίνακας 2, Πίνακας 3).

Πίνακας 2: Κύρια ορυκτολογική παραγένεση στα ασβεστούχα Skarn

ΚΥΡΙΑ ΟΡΥΚΤΑ	
<u>ΠΥΡΙΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u> γρανάτης: ανδρανδίτης ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)-γροσσουλάριος ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) πυρόξενος: διοψίδιος ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)-εδεμβεργίτης ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) σκαπόλιθος: μαριάλιθος ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{Cl}$)-μειονίτης ($\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{CO}_3$) βολλαστονίτης ($\text{CaSiO}_3$) μελίλιθος $[(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}^{+2})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_7]$.	<u>ΥΔΡΟΠΥΡΙΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u> αμφίβολοι βεζουβιανίτης ($\text{Ca}_{19}(\text{Al}, \text{Mg})_{13}\text{B}_{0-5}\text{Si}_{18}\text{O}_{68}(\text{OH}, \text{O}, \text{F})_{10}$) επίδοτο $[\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{Fe}^{+3}, \text{Al})(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})]$ ιλβαΐτης $[\text{CaFe}^{2+}_2\text{Fe}^{3+}(\text{SiO}_4)_2\text{OH}]$ χλωρίτης $[(\text{Al}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Li}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ni})_{5-6}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8]$

<u>ΟΞΕΙΔΙΑ:</u> μαγνητίτης (Fe_3O_4) αιματίτης (Fe_2O_3) <u>ΛΟΙΠΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u> ασβεστίτης (CaCO_3) φθορίτης (CaF_2) γραφίτης (C) βαρύτης (BaSO_4) σεελίτης (CaWO_4)	<u>ΣΟΥΛΦΙΔΙΑ:</u> σιδηροπυρίτης (FeS_2) χαλκοπυρίτης (CuFeS_2) γαληνίτης (PbS) μαγνητοπυρίτης (FeS) μολυβδαινίτης (MoS_2) αρσеноπυρίτης (FeAsS)
--	--

Πίνακας 3: Επουσιώδη ορυκτολογική παραγένεση στα ασβεστούχα Skarn

ΕΠΟΥΣΙΩΔΗ ΟΡΥΚΤΑ
<u>ΠΥΡΙΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΠΥΡΙΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u> πλαγιόκλαστο, ορθόκλαστο χρυσοβήρυλλος, βήρυλλος τιτανίτης, ανδαλουσίτης ζιρκόνιο, σαλίτης κορδερίτης, τεφροΐτης ελβίνης, ροδονίτης δαλάλιθος, βουσταμίτης λαρνίτης, λαζουρίτης σπουρίτης, μερινίτης φενακίτης, δανβουργίτης

ΟΞΕΙΔΙΑ:

κορούνδιο
βολφαμίτης
φραγκλινίτης
σπινέλλιοι
κασσιτερίτης
ουρανίτης
κοππίτης
τσιγκίτης
περβσκίτης

ΛΟΙΠΑ ΟΡΥΚΤΑ:

απατίτης
σιδηρίτης
μαγνησίτης
ανγκερίτης
βιθερίτης

ΣΟΥΛΦΙΔΙΑ:

τετραεδρίτης
τενναντίτης
μαρκασίτης
βορνίτης
κοβελίνης
χαλκοσίνης
αντιμονίτης
βισμούθινίτης
εναργίτης
πυραργυρίτης
προυσίτης
τζεϊμσονίτης
φαματινίτης
σκουττερουίτης
στανίτης
κοβαλτίτης
λελλιγκίτη
σαφφλορίτης
κουμπανίτης
λιννείτης
πολυδυμίτη
ς μιλλερίτης
γεσδορφίτης
σμαλτίτης
χλοανθίτης
σπερρύλιθος
κουπερίτης
Sb-παλλανδίτης
γλαυκοδότης



Εικόνα 7: Ασβεστούχο Skarn από το Lead Hill Mines των Adirondack Mountains στην New York State με σκαπόλιθο, γραφίτη και πυρόξενους.

Πηγή:<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/26140365182https://www.alexstrekeisen.it/immagin>
[i/](#)

5.2.2 Μαγνησιούχα κοιτάσματα Skarn

Τα Skarn που δημιουργούνται από αντικατάσταση πετρωμάτων που περιέχουν μαγνησιούχα ορυκτά (π.χ. φορστερίτη και σερπεντινίτη) όπως οι δολομίτες και μαγνησίτες, ονομάζονται μαγνησιούχα κοιτάσματα Skarn.

Ο συγκεκριμένος τύπος Skarn δημιουργείται σε βάρος μαγνησιούχων πετρωμάτων τα οποία είναι φτωχά σε SiO_2 κατά τον τελευταίο στάδιο της μαγματικής κρυστάλλωσης ή μετά από αυτήν από μαγματικά ρευστά με την διαδικασία του Δεύτερου Βρασμού (Misra 2000) με την προϋπόθεση ότι δεν έχει αποκατασταθεί η χημική ισορροπία στην περιοχή.

Σύμφωνα με τον Misra (2000) με την τοποθέτηση ενός πλουτωνίτη στα πετρώματα ξενιστές, ως θερμότερος από αυτά οδηγούμαστε στην απώλεια θερμότητας. Αυτό έχει σαν συνέπεια η κρυστάλλωση να πραγματοποιείται από εξωτερικά προς τα εσωτερικά (περιβάλλοντα πετρώματα-πλουτωνίτης). Το τήγμα αρχίζει και γίνεται κορεσμένο κοντά στα περιθώρια του λόγω του χαμηλού ποσοστού διάχυσής του διαλυμένου νερού στα πυριτικά τήγματα. Αυτό έχει ως συνέπεια την απομόνωση του εσωτερικού του πλουτωνίτη και την εμπόδιση μεταφοράς θερμότητας αέριων και ιόντων από μέσα προς τα έξω, αλλά και αντίστροφα. Η πτητική και

ιοντική φάση ελέγχεται από την διαλυτότητα του νερού. Σε ένα γρανιτικό έως διοριτικό τήγμα η διαλυτότητα του νερού εξαρτάται από το βάθος και από την πίεση:

- Για $P=2\text{kbar}$ και βάθος 8km η διαλυτότητα είναι $2,7-3\text{ wt \%}$
- Για $P=5\text{kbar}$ και βάθος 18km η διαλυτότητα είναι $6,1-6,4\text{ wt \%}$

Επίσης η διαλυτότητα του νερού καθορίζεται και από το ποσοστό κρυστάλλωσης:

- Για $33\text{ vol \%}$
- Για $73\text{ vol \%}$
- Για $83\text{ vol \%}$

Η διαλυτότητα του νερού είναι $9-10\text{ wt \%}$.

Με την ψύξη της περιφερειακής ζώνης και την κρυστάλλωση στο σημείο του κορεσμού, προκαλείται ο διαχωρισμός της πτητικής και ιοντικής φάσης από το υπολειμματικό τήγμα μέσω του Δευτέρου Βρασμού.

Στα μαγνησιούχα κοιτάσματα χρησιμοποιούμε σαν δείκτη θερμοκρασίας σχηματισμού τα ορυκτά φορστερίτης και σπινέλιος τα οποία έχουν σαν θερμοκρασία σταθερότητας τους $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ η οποία θερμοκρασία αποτελεί και την ελάχιστη θερμοκρασία σχηματισμού αυτών των Skarn. Τα κοιτάσματα αυτά παρουσιάζουν θερμοκρασιακό εύρος $450-750\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε πιέσεις $0,5-10\text{ kbar}$.

Τα μαγνησιούχα κοιτάσματα Skarn χωρίζονται ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση σε:

- 1) Μεγάλου βάθους κοιτάσματα: Όπου επικρατεί μεγάλη διαφυγή του CO_2 και τα ορυκτά σε αυτά τα βάθη είναι αρκετά ασταθή.
- 2) Μικρού βάθους κοιτάσματα: Όπου το βάθος είναι μεγαλύτερο από 10 km και η πίεση είναι λιθοστατική, δηλαδή $P=0,3\text{ GPa}$ και οι διαφυγές του CO_2 είναι μικρότερες.

Σε αυτά τα κοιτάσματα επικρατεί ο σκαπόλιθος, ο οποίος αναπτύσσεται σε βάρος του πλαγκιοκλάστου, σκαπόλιθος έχει ποσοστό $50-70\%$ μεγιονίτη ($\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{CO}_3$). Επίσης επικρατεί ο χρωμίτης έναντι του φορστερίτη καθώς εμφανίζονται και άλλα ορυκτά:

- κεροστίλβη ($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2}, \text{Fe}^{+3}, \text{Al})_5(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)
- φλογοπίτης ($\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$)
- παργασίτης $\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2})_4\text{Al}(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Τα μαγνησιούχα skarn σχετίζονται με μεταμαγματικά στάδια και η μελέτη τους έχει πραγματοποιηθεί σε γενευσιακά συμπλέγματα του Προκαμβρίου. Τα συγκεκριμένα κοιτάσματα σχηματίζονται με αντιδράσεις επαφής μαγνησιούχων και αργίλικών πετρωμάτων μέσω της διαδικασίας της διήθησης. Συνήθως αντικαθιστούν παλαιότερα μαγνησιούχα skarns.

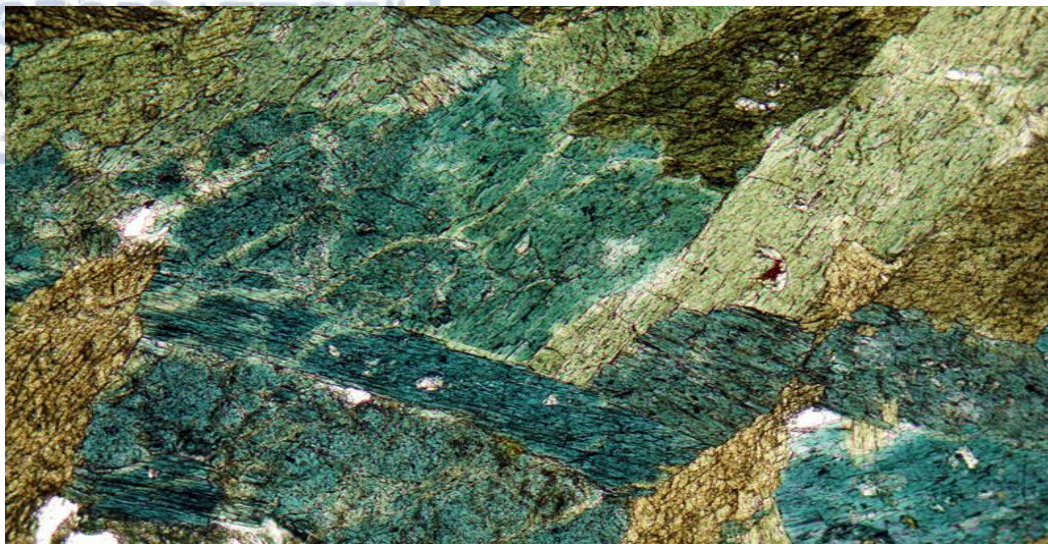
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πέρα από τον παράγοντα του βάθους, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η αλκαλικότητα και η περιεκτικότητα σε Fe του περιβάλλοντος σχηματισμού τους γι' αυτό και διακρίνονται οι εξής φάσεις ανάλογα με το είδος του περιβάλλοντος:

- Πυροξένου-Σπινελλίου όπου επικρατούν συνθήκες χαμηλής αλκαλικότητας και περιεκτικότητας σε Fe
- Σπινελλίου-Παργασίτη όπου επικρατούν συνθήκες χαμηλής αλκαλικότητας και αυξημένης περιεκτικότητας σε Fe
- Η φάση του Φλογοπίτη όπου επικρατούν συνθήκες μέσης αλκαλικότητας και χαμηλή περιεκτικότητα σε Fe
- Φλογοπίτη-Παργασίτη σε συνθήκες αλκαλικές και αυξημένης περιεκτικότητας σε Fe

Τα μαγνησιούχα skarn συνήθως φιλοξενούν κοιτάσματα Fe, Cu, Au, Fe-Mg και βορικά.

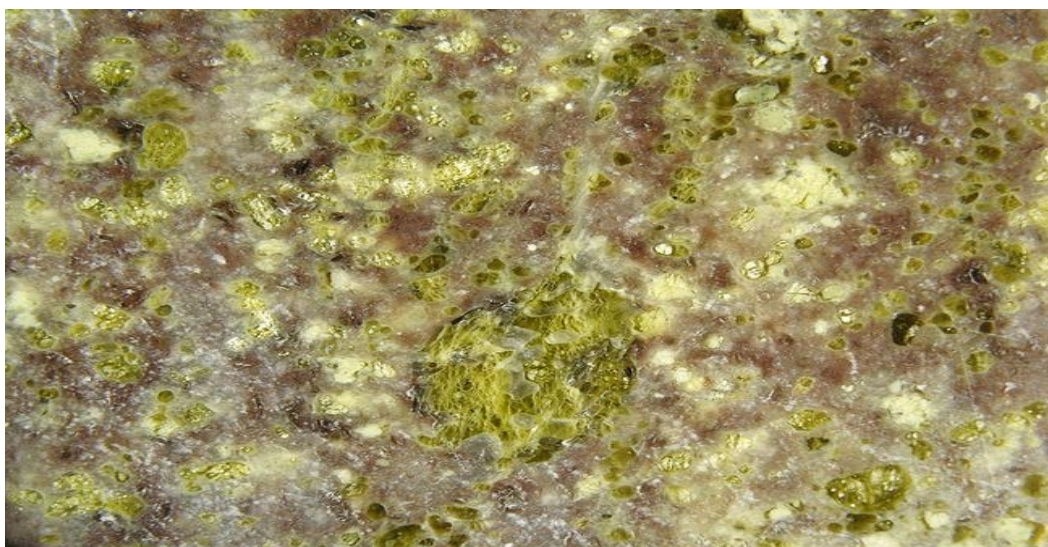


Εικόνα 8: Παργασιτικό skarn από το Sassi Neri της Σουηδίας
Πηγή: <https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/skarn.php>

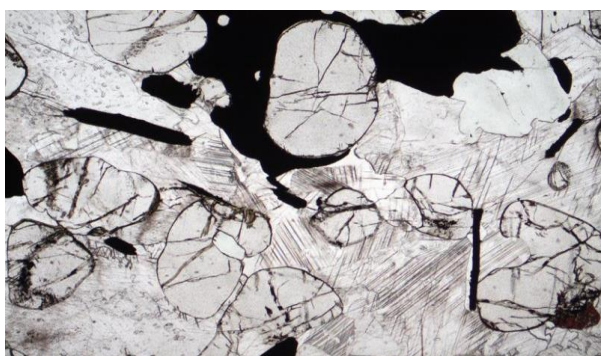


Εικόνα 9: Τομή από μαγνησιούχο Skarn στο Sassi neri της Σουηδίας, όπου με πολωτή και αναλυτή διακρίνονται με μπλε χρώμα οι κρύσταλλοι του παρασίτη.

Πηγή: <https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/skarn.php>



Εικόνα 10: Μαγνησιούχο Skarn στο Parone της Ιταλίας με χαρακτηριστικούς κρυστάλλους φορστερίτη. Πηγή: www.alexstrekeisen.it/english/meta/forsteritemarble.php



Εικόνα 11 & Εικόνα 12: Μικροσκοπικές τομές από το μαγνησιούχο skarn στο Parone της Ιταλίας. Παρατηρούνται οι στρογγυλεμένοι κόκκοι του Φορστερίτη που αποτελεί και το κύριο ορυκτό του συγκεκριμένου κοιτάσματος. Πηγή: www.alexstrekeisen.it/english/meta/fo

Στα μαγνησιούχα κοιτάσματα Skarn παρατηρούνται τα εξής ορυκτά (Einaudi et al. 1981, Einaudi and Burt 1982, Meinert 1992,1993, Misra 2000) (Πίνακας 4, Πίνακας 5).

Πίνακας 4: Κύρια ορυκτολογική παραγένεση στα μαγνησιούχα Skarn

ΚΥΡΙΑ ΟΡΥΚΤΑ	
<u>ΠΥΡΙΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u>	<u>ΥΔΡΟΠΥΡΙΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u>
γρανάτης: ανδρανδίτης($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)- γροσσουάριος ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) πυρόξενος: διοψίδιος($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)- εδεμβεργίτης ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) φορστερίτης ($\text{Mg}_2\text{SiO}_4$)	αμφίβολοι όπως: κεροσίλβη ($\text{Na,KCa}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) τρεμολίτης $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ακτινόλιθος $\text{Ca}_2(\text{Fe,Mg})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ παργασίτης $\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ανθοφυλλίτης ($\text{Mg,Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ σερπεντίνης ($\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ή $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ φλογοπίτης ($\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$) χουμίτης ($\text{Mg,Fe})_7(\text{SiO}_4)_3(\text{F,OH})_2$. χλωρίτης ($\text{Al, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Li, Mg, Mn, Ni})_{5-6}(\text{Al, Fe}^{3+}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
<u>ΟΞΕΙΔΙΑ:</u>	<u>ΣΟΥΛΦΙΔΙΑ:</u>
μαγνητίτης (Fe_3O_4) αιματίτης (Fe_2O_3) σπινέλιος (MgAl_2O_4)	σιδηροπυρίτης (FeS_2) σφαλερίτης (ZnS) χαλκοπυρίτης (CuFeS_2) μαγνητοπυρίτης (FeS)
<u>ΒΟΡΙΚΑ:</u>	<u>ΛΟΙΠΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u>
κοτοΐτης (Mg_2FeBO_3)	ασβεστίτης (CaCO_3) μαγνησίτης (MgCO_3) γραφίτης (C)

Πίνακας 5: Επουσιώδη ορυκτολογική παραγένεση στα μαγνησιούχα κοιτάσματα Skarn

ΕΠΟΥΣΙΩΣΗ ΟΡΥΚΤΑ	
<u>ΠΥΡΙΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΠΥΡΙΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u> ορθόκλαστο, πλαγιόκλαστο, σκαπόλιθος, ζirkόνιο, τιτανίτης, ανδαλουσίτης, κορδερίτης, βουσταμίτης, ροδονίτης, τεφροΐτης, ελβίνης-δαλάλιθος, δανβουργίτης, λαζουρίτης, χρυσοβήρυλλος, φενακίτης, σαλίτης, βήρυλλος, σπουρίτης, λαρνίτης, μερινίτης,	
<u>ΟΞΕΙΔΙΑ:</u> βρουκίτης περίκλαστο	<u>ΣΟΥΛΦΙΔΙΑ:</u> μαρκασίτης εναργίτης προυσίτης βορνίτης τζειμσονίτης τετραεδρίτης-τενναντίτης
<u>ΒΟΡΙΚΑ:</u> σουανίτης Φθοριούχος βορίτης βαρβικίτης μαγνησίτης σιναλίτης σερεντιμπίτης	<u>ΛΟΙΠΑ ΟΡΥΚΤΑ:</u> βαρύτης απατίτης σιδηρίτης ανγκερίτης

5.2.3 Πυριτικά κοιτάσματα Skarn

Τα πυριτικά κοιτάσματα Skarn δημιουργούνται σε βάρος πυριτικών πετρωμάτων όπως τα ηφαιστειακά και πλουτώνια πετρώματα καθώς και ιζήματα. Χαρακτηριστικό τους ορυκτό ο σκαπόλιθος και οι ορυκτολογικές του παραγενέσεις είναι παρόμοιες με αυτές των ασβεστούχων κοιτασμάτων Skarn (Einaudi and Burt 1982).

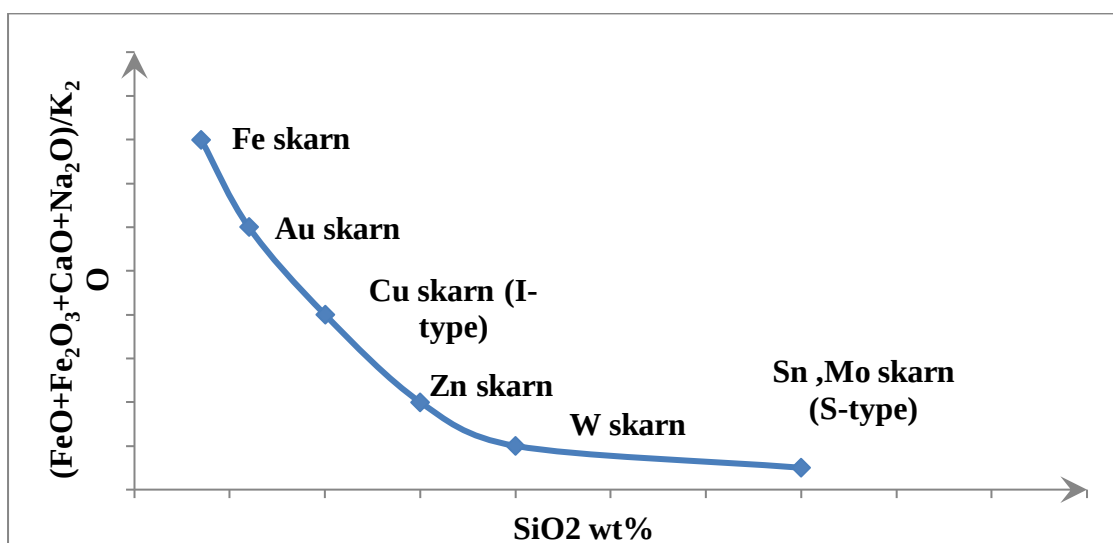
6. Σχηματισμός και εξέλιξη των skarn

Είναι πολύ σημαντικό να αντιληφθούμε ότι η μαγματική δραστηριότητα και τα τεκτονικά περιβάλλοντα αποτελούν ένα μοντέλο πολύ σημαντικό για και καθοριστικό για την δημιουργία των κοιτασμάτων Skarn. Γι' αυτό το λόγο επικρατεί ένα μοντέλο πετρογένεσης - τεκτονικού περιβάλλοντος που καθορίζουν την δημιουργία του κοιτάσματος, καθώς και τον τύπου αυτού.

6.1 Τεκτονικά περιβάλλοντα και μαγματισμός

Όπως προανέφερα ο μαγματισμός είναι καθοριστικός για την δημιουργία των κοιτασμάτων Skarn και συνδέεται άρρηκτα με τα τεκτονικά περιβάλλοντα.

- Τα Fe-skarn είναι συνδεδεμένα με μαγματικά πετρώματα (πλουτωνίτες) τα οποία είναι φτωχά σε SiO₂ και πλούσια σε Fe.
- Τα κοιτάσματα Sn-skarn και Mo-skarn είναι συνδεδεμένα με πετρώματα που περιέχουν πολύ υψηλό ποσοστό SiO₂. Επίσης προέρχονται από πετρώματα της σειράς ιλμενίτη, τα οποία προδίδουν αναγωγικές συνθήκες και χαρακτηρίζονται ως S-type.
- Αρκετά κοιτάσματα Au-skarn προέρχονται από πετρώματα της σειράς ιλμενίτη (S-type).
- Τα κοιτάσματα Cu-skarn προέρχονται από πετρώματα της σειράς του μαγνητίτη, τα οποία προδίδουν οξειδωτικές συνθήκες και χαρακτηρίζονται ως I-type και είναι άμεσα συνδεδεμένα με μαγματικά τόξα βύθισης καθώς και αβαθή τεκτονικά περιβάλλοντα.
- Τα κοιτάσματα W-skarn προέρχονται από πετρώματα πολύ μεγαλύτερου βάθους τους βαθόλιθους και υποδηλώνουν ένα τεκτονικό περιβάλλον πολύ μεγαλύτερου βάθους.



Εικόνα 12: Μέσος όρος της χημικής σύστασης των πλουτωνιτών που συνδέονται με την γένεση κοιτασμάτων skarn (Misra, 2000).

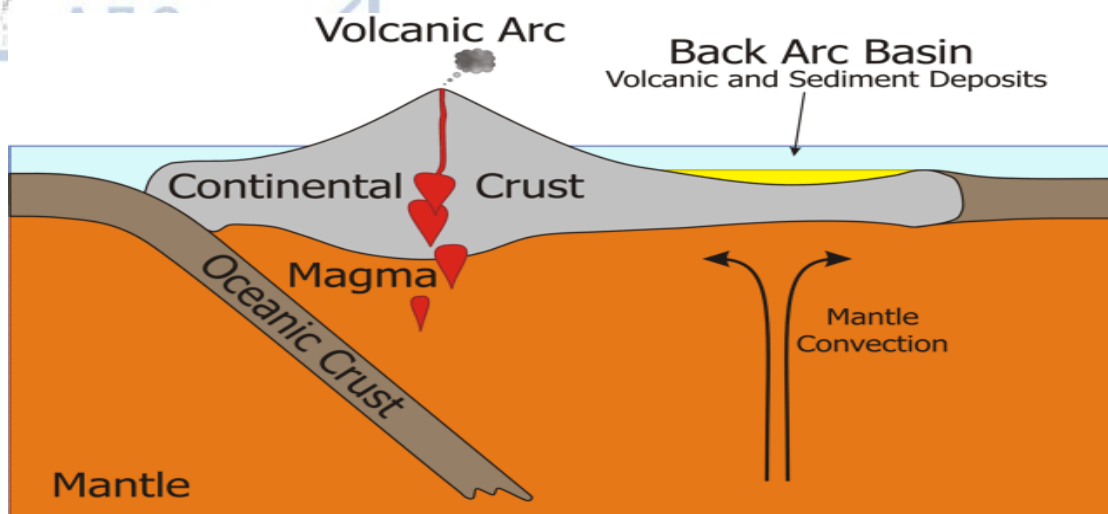
- Βαθμός οξείδωσης
- Χημική σύσταση του πλουτωνίτη
- Το μέγεθος του
- Το βάθος και η θέση του
- Και το γεωτεκτονικό περιβάλλον του.

- 1) Η ωκεάνια υποβύθιση
- 2) Η μικρής γωνίας μεταβατική υποβύθιση
- 3) Η ηπειρωτική σύγκρουση και υποβύθιση
- 4) Η ηπειρωτική διάρρηξη

A 3D block diagram illustrating a convergent plate boundary. On the left, a blue plate labeled 'Τάφρος' (Trench) is shown subducting under a brown plate labeled 'Γηρωτικό πύλο' (Volcanic arc). The subducting plate is labeled 'Λιθόσφαιρα' (Lithosphere) and the overriding plate is also labeled 'Λιθόσφαιρα'. Below the lithosphere is the 'Ασθενόσφαιρα' (Asthenosphere). A red plume of magma is shown rising from the subducting plate towards a volcano on the volcanic arc. Arrows indicate the direction of plate movement and magma flow.

[illegible]

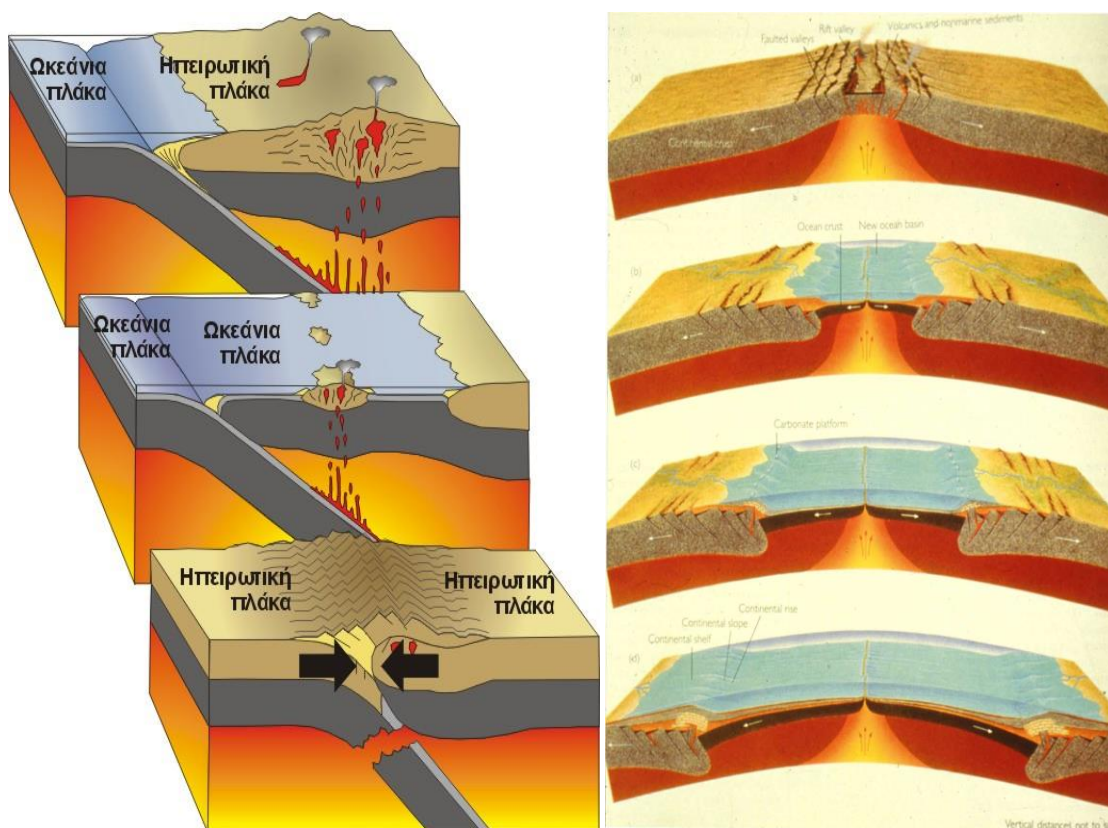
Ορισμένα skarn κοιτάσματα χρυσού είναι συνδεδεμένα με οπισθολεκάνες νησιωτικού τόξου (back-arc basin).



Εικόνα 14: Η λεκάνη πίσω από το τόξο (back-arc basin) που δημιουργείται από τις εφελκυστικές τάσεις πίσω από το τόξο και ιδιαίτερα πίσω απ' το πρίσμα επαύξησης.

Πηγή: <http://geologylearn.blogspot.com/2015/07/arc-related-basins.html>

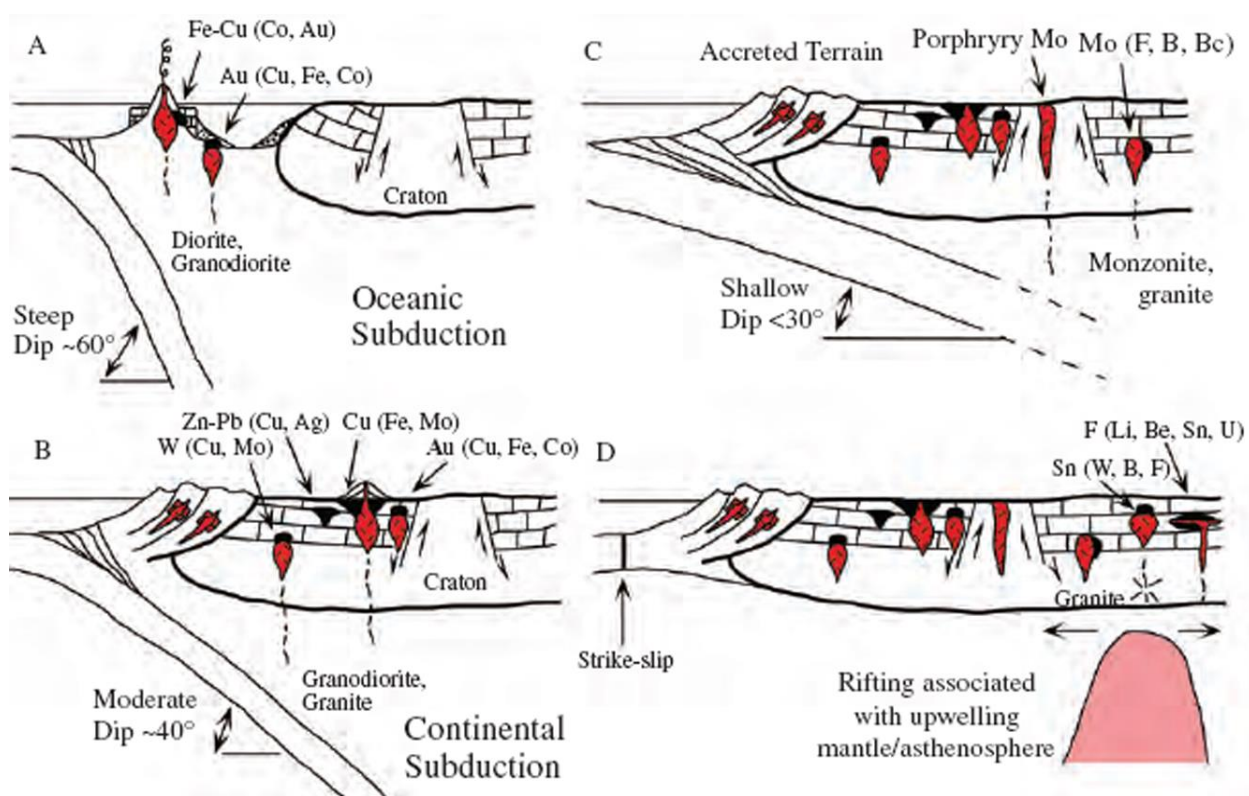
Τα περισσότερα κοιτάσματα skarn συνδέονται με σύγκρουση και υποβύθιση ηπειρωτικού φλοιού καθώς και με ηπειρωτική διάρρηξη.



Εικόνα 15 & Εικόνα 16: Υποβύθιση ωκεάνιας πλάκας κάτω από ηπειρωτική, καθώς και το στάδιο της τελικής ηπειρωτικής σύγκρουσης με την εφίπλευση της μιας ηπειρωτικής πάνω από την άλλη. Επίσης απεικονίζεται και η ηπειρωτική διάρρηξη με την απομάκρυνση ηπειρωτικών πλακών και την δημιουργία ωκεανού.

Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg871y/>

Σε μερικές περιπτώσεις δημιουργίας κοιτασμάτων Skarn δεν οφείλονται σε κάποιο γεωτεκτονικό περιβάλλον αλλά σε διεισδύσεις γρανιτικού μάγματος τύπου-S. Σε αυτές τις διεισδύσεις οφείλονται τα κοιτάσματα skarn τα οποία είναι πλούσια σε: Sn, F, W, Zn, Pb, B, Be, Li, Bi, U, F, Nb, REE's.



Εικόνα 17: Τεκτονικά περιβάλλοντα και τύποι κοιτασμάτων που συνδέονται με αυτά (modified from Meinert, 1992).

Πηγή: <http://pacrim.ausimm.com/wp-content/uploads/sites/10/2018/11/SC4-Skarn-Meinert.pdf>

6.2 Μηχανισμός γένεσης των skarn

Σύμφωνα με τους Einaudi and Burt (1982), καθορίστηκε ως κύριος μηχανισμός γένεσης των skarn κατά τη διάρκεια της μετασώματωσης είναι οι διαδικασίες της διάχυσης και της διήθησης. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία το skarn προκύπτει από ένα σύστημα στο οποίο επικρατεί μεταβλητότητα στην θερμοκρασία καθώς και στην χημική σύσταση των ρευστών αυτού του συστήματος αλλά και στην χημική σύσταση των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύσσεται μέσα σε θερμά υδατικά διαλύματα, τα οποία διεισδύουν και εμποτίζουν τόσο τον πλουτωνίτη όσο και τα περιβάλλοντα πετρώματα της επαφής (Newberry, 1991). Μέσω της διήθησης γίνεται μια προσπάθεια για ομογενοποίηση του

διαλύματος, καθώς πραγματοποιείται μια μετακίνηση των χημικών στοιχείων. Μέσω της διήθησης τα στοιχεία μετακινούνται από θέσεις υψηλότερης συγκέντρωσης σε θέσεις χαμηλότερης συγκέντρωσης μέσω μιας προσπάθειας για την αποκατάσταση της χημικής ισορροπίας στο σύστημα αυτό. Πραγματοποιείται μια σειρά αντιδράσεων που οδηγεί στην ανταλλαγή στοιχείων μεταξύ των θερμών διαλυμάτων και των πετρωμάτων εκατέρωθεν της επαφής. Τα διαλυόμενα αυτά στοιχεία όμως, δεν παρουσιάζουν την ίδια κινητικότητα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να φτάνουν σε διαφορετικούς χρόνους στην θέση όπου πραγματοποιείται η διάχυση και να υπάρχει μια διαφοροποίηση στην συγκέντρωση τους. Η διαφοροποίηση αυτή στην κινητικότητα των στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ζώνωσης, η οποία εύκολα μπορεί να διακριθεί μέσω των ορυκτολογικών παραγενέσεων.

Υπάρχουν 4 ομάδες χημικών στοιχείων και χημικών ενώσεων που διακρίνονται βάση της κινητικότητας του από τα περισσότερο ευκίνητα στα λιγότερο είναι:

- 1) H_2O CO_2
- 2) K, Na, Cl, S
- 3) Ca, Fe, Mg, O, Si
- 4) Al, W, P,

Έτσι μέσω της διήθησης αλλά και της διάχυσης πραγματοποιείται μία μαζική μεταφορά στοιχείων η οποία είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της διαδικασίας της μετασώματωσης που έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και κατ' επέκταση της δημιουργίας των skarn.

Κατά τη διαδικασία της διήθησης με την συμβολή των ρευστών πραγματοποιείται μεταφορά των χημικών στοιχείων σε απόσταση ακόμη και μερικών χιλιομέτρων. Με την μετακίνηση αυτής της ρευστής φάσης πραγματοποιούνται ταυτόχρονα και αντιδράσεις αντικατάστασης των πετρωμάτων. Οι αντιδράσεις αυτές οδηγούν στην αλλαγή της σύστασης της ρευστής φάσης με αποτέλεσμα να αλλάζει και ο τύπος των αντιδράσεων σε σχέση με την απόσταση που διανύθηκε.

Αντίθετα κατά την διαδικασία της διάχυσης η μεταφορά των χημικών στοιχείων πραγματοποιείται σε στερεή κατάσταση και η διάχυση συμβαίνει σε μικρές αποστάσεις, γι' αυτό και η μετασώματωση σε αυτήν την περίπτωση δεν ξεπερνά τα μερικά μέτρα.

Γίνεται λοιπόν πλήρως αντιληπτό ότι η δημιουργία των skarn μέσω της μετασώματωσης στηρίζετε σε ένα μοντέλο που εξαρτάται από το τεκτονικό περιβάλλον τον μαγματισμό αυτού καθώς και της φυσικοχημικές συνθήκες και διεργασίες που πραγματοποιούνται κατά την

κοιτασματογένεση. Αναλυτικότερα για την δημιουργία των skarn πραγματοποιούνται οι παρακάτω διεργασίες:

- 1) Διείσδυση του μαγματικού τήγματος μέσα σε πετρώματα ξενιστές σε αβαθή τεκτονικά περιβάλλοντα σε θερμοκρασίες 700-800 °C
- 2) Ισοχημική μεταμόρφωση κατά την οποία αφυδατώνονται αι απανθρακώνονται τα περιβάλλοντα πετρώματα σε θερμοκρασίες 700-500 °C . Στην συγκεκριμένη φάση διεισδύει ο πλουτωνίτης στα περιβάλλοντα πετρώματα τα οποία θερμομεταμορφώνονται και μετατρέπονται σε κερατίτες. Σ' αυτή τη φάση επίσης υπάρχουν και μικρές ποσότητες μεταμορφικών ρευστών H₂O και CO₂. Τέλος η φάση αυτή δεν σχετίζεται με τον σχηματισμό μεταλλοφορίας (Einaudi et al., 1981; Meinert, 1992, 1993; Misra, 2000).
- 3) Πρόδρομη φάση μετασώματωσης και αντικατάστασης (prograde phase). Αυτή η φάση πραγματοποιείται λόγω του κορεσμού του υδροθερμικού συστήματος σε μαγματικά ρευστά σε θερμοκρασίες 650-400 °C. Πλέον αρχίζουν και σχηματίζονται ορυκτά όπως ο γρανάτης, ο πυρόξενος, ο φορστερίτης και ο φλογοπίτης. Η φάση αυτή σχετίζεται με την διαφυγή των ρευστών από τον πλουτωνίτη στα περιβάλλοντα πετρώματα. Αυτή η διαφυγή γίνεται στο στάδιο του 1^{ου} και του 2^{ου} βρασμού και τα ρευστά μετακινούνται εντός και εκτός της μεταμορφικής άλω. Τα ρευστά αυτά στα μεγαλύτερα βάθη κινούνται μέσω διακλάσεων ρηγματώσεων και στρώσεων ενώ στα μικρότερα βάθη στην κεφαλή του γρανοδιοριτικού πλουτωνίτη και στην επαφή της με τα περιβάλλοντα πετρώματα. Κατά τη μετασώματωση πραγματοποιείται και διεισδυτική εξαλλοίωση, όπου σχηματίζονται μεγάλοι κρύσταλλοι και αντικαθιστούν τα ορυκτά της ισοχημικής και της μετασωματικής φάσης. Το σύστημα μας εμπλουτίζεται με Fe, Al, Si από τα μαγματικά ρευστά και με Ca Mg και CO₂ από τα περιβάλλοντα πετρώματα. Σε αυτή την φάση δεν αποτίθενται σουλφίδια και τα μεταλλεύματα μας είναι ο σεελίτης και ο μαγνητίτης που αποτίθενται στο τελικό στάδιο της μετασώματωσης (Einaudi et al., 1981; Meinert, 1992, 1993; Misra, 2000).
- 4) Η φάση της ανάδρομης υδροθερμικής εξαλλοίωσης και διείσδυση των μετεωρικών ρευστών σε θερμοκρασία 400-300 °C (retrograde phase). Αποτελεί τη κύρια φάση της μεταλλογένεσης Το υδροθερμικό σύστημα εδώ υπέστητε ψύξη λόγω των μετεωρικών ρευστών. Αυτή η κατείσδυση πραγματοποιείται λόγω του δευτερογενούς πορώδους της διαπερατότητας των σχηματισμών (Einaudi et al., 1981; Meinert, 1992, 1993; Misra, 2000).

Σε αυτή τη φάση της ανάδρομης εξαλλοίωσης αναπτύσσονται ορυκτά σε βάρος ορυκτών των προηγούμενων φάσεων:

- Σε βάρος των γρανατών εμφανίζονται τα:

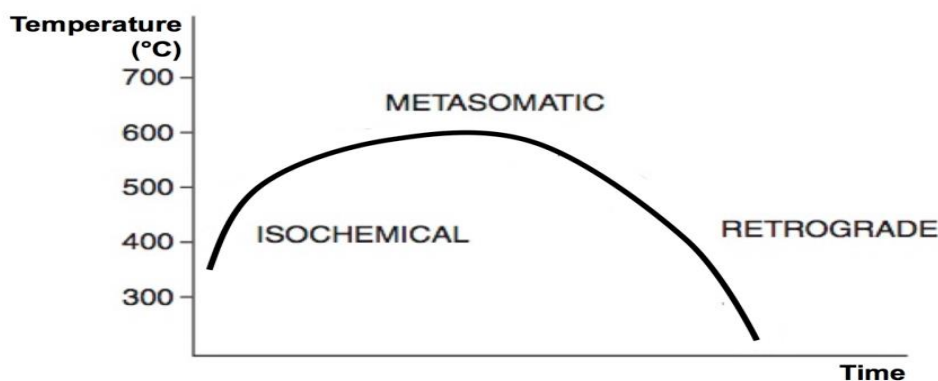
Επίδοτο
Χλωρίτης
Πλαγιόκλαστο
Βιοτίτης
Χαλαζίας
Ασβεστίτης

- Σε βάρος των πυροξένων και του ολιβίνη:

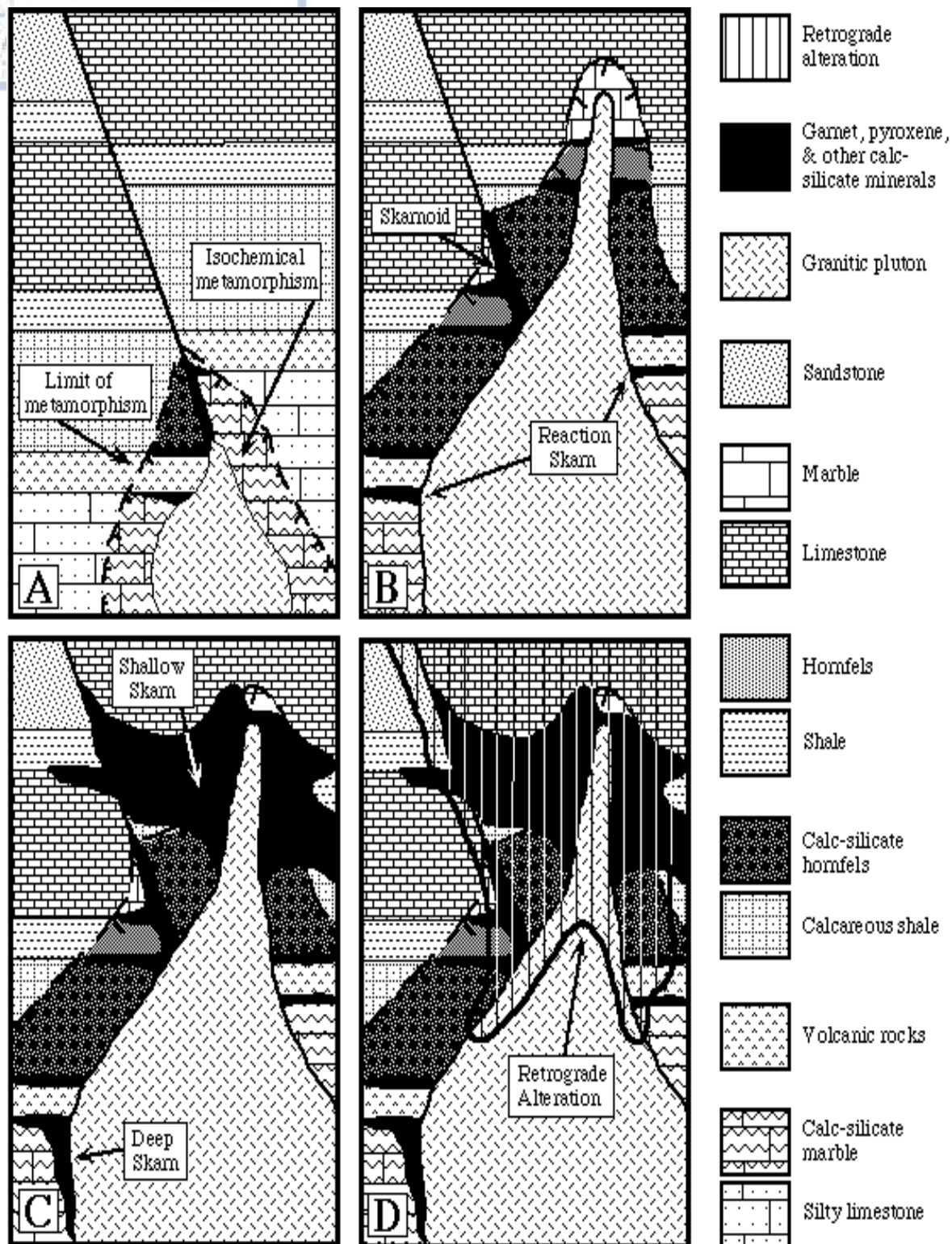
Τρεμολίτης
Ακτινόλιθος
Τάλκης

- Τα σουλφίδια και τα μεταλλεύματα αιματίτη και μαγνητίτη εμφανίζονται διάσπαρτα. Ο σιδηροπυρίτης ο χαλκοπυρίτης και ο μαγνητίτης εντοπίζονται κοντά στην διείσδυση ο σφαλερίτης και ο γαληνίτης σε μεγαλύτερη απόσταση.

Οι μεταλλοφορίες όπως γίνεται αντιληπτό αποτίθενται λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας που οφείλεται στην κατείσδυση των μετεωρικών ρευστών.



Εικόνα 16: Στάδια σχηματισμού των skarn σε σχέση με την θερμοκρασία και τον χρόνο (Pirajno, 2009) Πηγή : Gomes, G. L. (2016). Spatial simulation of the W-Sn ore grades of São Pedro das Águias skarn mineral deposit (Tabuaço, northern Portugal) (Doctoral dissertation)



Εικόνα 17: Στο τμήμα Α) παρατηρείται η φάση της ισοχημικής μεταμόρφωσης. Στο τμήμα Β) και στο τμήμα Γ) παρατηρείται η φάση της μετασώματωσης και της αντικατάστασης με την συμμετοχή ρευστών διαλυμάτων. Στο τμήμα Δ) παρατηρείται η φάση της ανάδρομης εξαλλοίωσης και η είσοδος μετεωρικών ρευστών που οδηγούν στην ψύξη του συστήματος (Meinert 1992).

Πηγή:.

Μεταξύ της ισοχημικής μεταμόρφωσης και της πρόδρομης φάσης της μετασωμάτωσης δημιουργείται η ζώνωση των skarn σε υψηλές θερμοκρασίες 800-600 °C και αναπτύσσονται τα ορυκτά του γρανάτη και του πυροξένου. Έπειτα ακολουθεί η φάση της ανάδρομης εξαλλοίωσης και η μεταλλογένεση με την εμφάνιση των σουλφιδίων.

5) Για την σκαρνοποίηση υπάρχουν δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες (Einaudi et al., 1981; Meinert, 1992, 1993; Misra, 2000):

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την εξαλλοίωση είναι το βάθος σχηματισμού των skarn, καθώς επηρεάζει την θερμοκρασία του συστήματος, καθώς και τον όγκο και τον χρόνο που διαρκεί η δημιουργία των skarn, ελαχιστοποιώντας την εξαλλοίωση. Ο δεύτερος παράγοντας είναι, η διαπερατότητα των περιβαλλόντων πετρωμάτων που είναι σε άμεση συνάρτηση με το βάθος, καθώς σε μεγαλύτερα βάθη μειώνεται το πορώδες των πετρωμάτων επομένως και την ποσότητα των μετασωματικών ρευστών που αντιδρούν με τα πετρώματα αυτά. Σε μεγάλα βάθη επικρατούν συνθήκες πλαστικής παραμόρφωσης ενώ στα μικρότερα θραυσιγενείς συνθήκες που ευνοούν την περατότητα και την κίνηση των ρευστών αυτών.

Στο στάδιο της εξαλλοίωσης πραγματοποιούνται οι διεργασίες της διάχυσης του μεταλλοφόρου ρευστού, όπως προαναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, μεταβάλλεται η σύσταση του αλλά και των περιβαλλόντων πετρωμάτων, όπου παρατηρείται μια ουδετεροποίηση του pH. Η ροή αυτή του μεταλλοφόρου ρευστού καθορίζεται από τη διάχυση το πορώδες και την διαπερατότητα των σχηματισμών, αλλά και την πίεση των ρευστών διαλυμάτων.

Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε ρευστά εγκλείσματα των skarn έχουμε λάβει τα παρακάτω συμπεράσματα για τις συνθήκες σχηματισμού τους (Misra, 2000). Τα περισσότερα κοιτάσματα skarn σχηματίζονται σε θερμοκρασίες $T \leq 700$ °C

- Σε συνθήκες αλατότητας ≥ 50 % wt. NaCl
- Περιέχονται αέριες φάσεις: CO₂, H₂S, N₂ και CH₄
- Περιέχονται στερεές φάσεις: CaCl₂ NaCl, KCl και MgCl₂

7. Ελληνικά και παγκόσμια κοιτάσματα skarn

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά σε μερικά ελληνικά κοιτάσματα skarn καθώς και σε άλλα παγκόσμια. Τα κοιτάσματα skarn, έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκμετάλλευσης πληθώρας στοιχείων όπως: Fe, Co, PGE'S, W, Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Mo, U, REE, B, F, Sn, Be, Sc, Nb/ Γι' αυτό το λόγο έχουν γίνει αρκετές μελέτες αλλά και εκμεταλλεύσεις των κοιτασμάτων αυτών ανά τον κόσμο.

7.1 Ελληνικά εμφανίσεις skarn

Εδώ θα αναφερθούν μερικές εμφανίσεις skarn οι οποίες βρίσκονται στον ελλαδικό χώρο.

7.1.1 Λαύριο



Εικόνα 20: Γεωγραφική θέση Λαυρίου.

Πηγή: http://neaattikis.blogspot.com/2010/12/blog-post_28.html

Το Λαύριο βρίσκεται στην Αττικοκυκλαδική ζώνη και συγκεκριμένα Νοτιοανατολικά της Αθήνας. Γεωλογικά εντοπίζονται τρεις ενότητες οι οποίες από την κατώτερη προς την ανώτερη είναι οι εξής (Voudouris et al. 2008) :

- Κατώτερη ενότητα: Ονομάζεται ενότητα Καμάριζας ή ενότητα βάσης και αποτελείται από μάρμαρο ηλικίας Τριαδικό - Κάτω Ιουρασικό και έναν ενδιάμεσο ορίζοντα σχιστόλιθων και μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων, καθώς και σιπολινομαρμάρων.
- Ανώτερη ενότητα Λαυρίου: διαχωρίζεται από την κατώτερη ενότητα με ανάστροφο ρήγμα detachment. Αποτελείται από αργιλικούς σχιστόλιθους, φυλλίτες, στρώσεις ασβεστόλιθων με μάρμαρα και μάρμαρα με μετά-οφειολιθικά πετρώματα τους επονομαζόμενους πρασινίτες.

- Ανώτερη Κυκλαδίτικη ενότητα: Συναντάται νοτιοδυτικά της Καμάριζας και αποτελείται από Άνω Κρητιδικούς ασβεστόλιθους.

Ο πλουτωνίτης που συναντάμε είναι γρανοδιορίτης Μειοκαινικής ηλικίας, είναι I-type και αποτελείται από: χαλαζία + βιοτίτη + κεροσίλβη + αλλανίτη + πλαγιόκλαστα + απατίτη + μαγνητίτη + ζirkόνιο + κλινοζωισίτη.

Στο Λαύριο συναντάμε σε δύο περιοχές κοιτάσματα Skarn καθώς και αντικατάσταση ανθρακικών πετρωμάτων χωρίς την δημιουργία Skarn, τα οποία αντικατάσταση είναι συνδεδεμένη με μεταλλοφορίες στοιχείων όπως το Au, W, Bi και άλλα. Στην παρούσα διατριβή θα αναλυθούν μόνο οι εμφανίσεις Skarn στις συγκεκριμένες περιοχές, οι οποίες είναι της Πλάκας και της Καμάριζας (Voudouris. et al. 2008, 2018).

Στην Πλάκα συναντάμε ένα Cu-Fe skarn. Το συγκεκριμένο skarn σχηματίστηκε σε θερμοκρασίες 440 - 600 °C. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα exo-skarn το οποίο παρατηρείται στους σχιστόλιθους της Καισαριανής όπως και στο ανώτερο μάρμαρο γύρω από τον γρανοδιορίτη

Περιλαμβάνει: Γρανάτη (Γροσσουλάριο - Ανδρανδίτη) + Κλινοπυρόξενο (Διοψίδιο - Εδεμπεργίτη) + χλωρίτη + επίδοτο + Πλαγιόκλαστα + πυρροτίτη + μαγνητίτη + σιδηροπυρίτη + γαληνίτη + σφαλερίτη + χαλκοπυρίτη. (Voudouris et al. 2008,2018)

Μετέπειτα από το skarn της Πλάκας ανακαλύφθηκε το γρανατούχο-βολλαστονικό skarn στην Καμάριζα είναι και αυτό ένα exo-skarn, που βρίσκεται στην επαφή μικρογρανιτικού σώματος (του γρανοδιορίτη της Πλάκας) με το κατώτερο μάρμαρο της Καμάριζας. Σχηματίστηκε σε θερμοκρασίες 275 - 400 °C.

Περιλαμβάνει: Γρανάτη (Γροσσουλάριο - Ανδρανδίτη) + βολλαστονίτη + ανδραδίτη + απατίτη + μαγνητίτη + ασβεσίτη + ακτινόλιθο + επίδοτο + χλωρίτη + χαλαζία + αιματίτη + σιδηροπυρίτη + χαλκοπυρίτη + πυρροτίτη. (Voudouris et al. 2008,2018)

Η ανακάλυψη του νέου αυτού skarn (Καμάριζας) αλλά και η κρυστάλλωση που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή αυτή μας δίνει πληροφορίες για την προέλευση των σουλφιδίων που κρυσταλλώθηκαν στο Λαύριο. Επιτρέπει ακόμη την άμεση σύγκριση με το κύριο skarn (Πλάκας) του Λαυρίου.



Εικόνα 21: Χάρτης της νήσου της Σερίφου.

Πηγή: <http://ontheworldmap.com/greece/islands/serifos/serifos-tourist-map.html>

Η Σέριφος βρίσκεται 100 km νοτιο-ανατολικά της Αθήνας και συγκεκριμένα στις δυτικές Κυκλάδες. Η γεωλογία της Σερίφου χαρακτηρίζεται από τρεις γεωλογικές ενότητες, οι οποίες από πάνω προς τα κάτω είναι οι εξής (Ducoux et al. 2016) :

— **Κυκλαδικό υπόβαθρο - Cycladic Basement Unit (CCBU):**

Αποτελείται από μυλονιτωμένους γνεύσιους, ορθογνεύσιους, σχιστόλιθους, ασβεστιτικά και δολομιτωμένα μάρμαρα.

— **Ενότητα κυανοσχιστολίθων Κυκλάδων - Cycladic Blueschists Unit (CBU):**

Αποτελείται από αμφιβολίτες, πρασινοσχιστόλιθους, ορίζοντες μαρμάρων, μεταβασίτες και εμφανίζεται και γλαυκοφανής δηλώνοντας HP/LT συνθήκες.

— **Ανώτερη Κυκλαδίτικη ενότητα - Upper Cycladic Nape (UCU):**

Περιλαμβάνει μάρμαρα και επιδοτικούς σχιστόλιθους.

Ο πλουτωνίτης της Σερίφου είναι γρανοδιορίτης Μειοκαινικής ηλικίας 11,5 - 9,5 Ma και περιέχει χαλαζία, K-αστρίους, πλαγιόκλαστα, βιοτίτη, κεροσίτλη, τιτανίτη και αλλανίτη.

Στην Σέριφο εμφανίζονται Ca-Fe-Mg skarns, τα οποία μπορεί να είναι skarn υψηλής θερμοκρασίας (HT 450 - 560 °C), καθώς και μέσης θερμοκρασίας (MT 260 - 350 °C). Έτσι λοιπόν στην νήσο της Σερίφου εμφανίζονται οι παρακάτω τύποι skarn (Igleseder et al. 2008, Ducoux et al. 2016) :

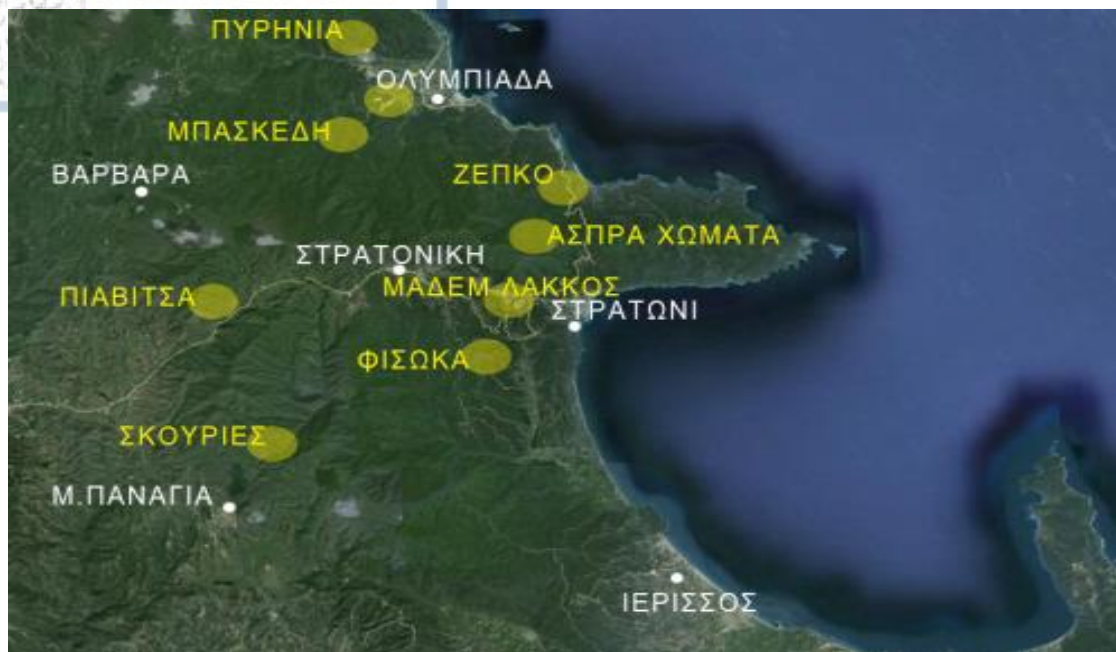
- Τα HT γρανατούχα skarn στην τοποθεσία Άγιος Γεώργιος και εντοπίζονται σε μάρμαρα της γεωλογικής ενότητας CCBU ανάμεσα από τους γενεύσιους και τον γρανοδιορίτη και είναι endo-skarn. Περιέχει: Γρανάτη (κυρίως ανδραδίτη) + μαγνητίτη + επίδοτο + αιματίτη + ακτινόλιθο + χαλαζία + ασβεστίτη.
- Τα HT γρανατούχα-πυροξενικά skarn στην παραλία Βαγιά σε μάρμαρα της CCBU και είναι endo-skarn. Περιέχει: Γρανάτη(κυρίως ανδραδίτη) + πυρόξενους (διοψίδιο + ενδεμβεργίτη) + βεζουβιανίτη + βολλαστονίτη + χλωρίτη + σιδηροπυρίτη + χαλκοπυρίτη + ακτινόλιθο + χαλαζία + ασβεστίτη ± αιματίτη ± τάλκη.
- Τα HT γρανατούχα-πυροξενικά skarn στους αμφιβολίτες της CBU στην τοποθεσία Πλαγιά και πρόκειται για exo-skarn. Περιέχουν: Γρανάτες (καφέ ανδραδίτη) + πυρόξενους (πράσινο ενδεμβεργίτη) + επίδοτο + μαλαχίτη.
- Τα MT πυροξενικά - ιλβαϊτικά skarn στην τοποθεσία Μεγάλο Λιβάδι που εντοπίζονται στους αμφιβολίτες της CBU και στα μάρμαρα της CCBU. Περιέχει: Πυρόξενους (κυρίως ενδεμβεργίτη) + ιλβαϊτη + επίδοτο + ασβεστίτη + χαλαζία (εμφάνιση πράσινου χαλαζία) + μαγνητίτη + σιδηροπυρίτη.
- Τα MT πυροξενικά skarn στην τοποθεσία Κάβο Κύκλωπας, τα οποία είναι exo-skarn και εντοπίζονται σε μυλωνιτοποιημένα μάρμαρα της CBU και περιέχουν: Πυρόξενους (κυρίως διοψίδιο) + ασβεστίτη + χαλαζία + αιματίτη + σιδηροπυρίτη + γρανάτες + επίδοτο.



Εικόνα21: Πράσινος χαραζίας από την νήσο Σέριφο.

Πηγή: <https://shakila.gr/πράσινος-χαραζίας-σερίφου/>

7.1.3 Μεταλλείο Μαντέμ Λάκκος (Στρατώνι)



Εικόνα 23: Περιοχή Στρατωνίου ΒΑ Χαλκιδικής.

Πηγή: <https://stratoniki.wordpress.com/2009/11/11/ιδού-το-σχέδιο-της-καταστροφής-του-τόπ/>

Το μεταλλείο Μαντέμ Λάκκος βρίσκεται στην περιοχή του Στρατωνίου στην ΒΑ Χαλκιδική. Η περιοχή δομείται από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας με ποικίλες Μεσοζωικές και Καινοζωικές πυριγενής διεισδύσεις. Οι σχηματισμοί αυτοί εντάσσονται στην σειρά των Κερδυλίων που υπέρκειται τεκτονικά της σειράς του Βερτίσκου. Επομένως στην περιοχή γεωλογικά συναντάμε τις σειρές των Κερδυλίων και του Βερτίσκου (Nebel et al. 1991).

Η σειρά των Κερδυλίων αποτελείται από: Μιγματιτικούς γενέσιους αλλά και βιοτιτικούς, γρανατούχους διμαρμαρυγιακούς γενέσιους, γενέσιους, αμφιβολίτες, αμφιβολιτωμένοι εκλογίτες και μάρμαρα.

Η σειρά του Βερτίσκου αποτελείται από: Μιγματίτες, ορθογενέσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, λεπτά στρώματα μαρμάρων, μεταγάββρους και μεταδιαβάσες καθώς και ορθοαμφιβολίτες.

Ο πλουτωνίτης της περιοχής είναι ένας γρανοδιορίτης Ηωκαινικής - Ολιγοκαινικής ηλικίας ο γρανοδιορίτης της Ιερισσού - Στρατωνίου και γύρω από αυτόν βρίσκονται πηγματίτες και απλίτες (Nebel et al. 1991, Siron et al. 2019).

Εντοπίζεται στο μεταλλείο ένα Cu skarn το οποίο είναι ένα exo-skarn που βρίσκεται σε μάρμαρα και αποτελείται από: Γρανάτη (ανδραδίτη κυρίως) + κλινοπυρόξενους + επίδοτο + μαγνητίτη ± ανυδρίτη + χλωρίτη + ακτινόλιθο + σιδηροπυρίτη + χαλκοπυρίτη + πυρροτίτη +

βισμουθινίτης + κουβανίτη + σεελίτη + σφαλερίτη + τενναντίτη + κοζαλίτη + αϊκινίτη (Siron et al 2019).

Επίσης εντοπίζεται ένα Mg-skarn σε δολομιτικά μάρμαρα το οποίο είναι και αυτό exo-skarn και αποτελείται από: Φορστερίτης + μαγνητίτη + πυρίτη + σερπεντινίτη + τάλκη + τρεμολίτη + φλογοπίτη + μαγνησιούχο χλωρίτη + ασβεστίτη + ανυδρίτη + σιδηροπυρίτη + κουβανίτη + πυρροτίτη + χαλκοπυρίτη (Siron et al 2019).

Τα skarn εμφανίζουν θερμοκρασία σχηματισμού στους 278 °C - 450 °C.

7.1.4 Μαρώνεια Ροδόπης



Εικόνα 24: Χάρτης νομού Ροδόπης.

Πηγή: <https://novoscriptorium.com/2019/01/30/τα-ευρήματα-νεολιθικής-εποχής-στο-νομ-2/>

Η περιοχή μελέτης ανήκει στην Περιοδοπική ζώνη. Η Μαρώνεια ανήκει στην ενότητα της Μάκρης ή αλλιώς στην σειρά των Φυλλιτών. Η ενότητα της Μάκρης βρίσκεται σε ασυμφωνία με το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Ροδόπης και αποτελείται από την κατώτερη μεταϊζηματογενή σειρά των πρασινοσχιστολίθων και την ανώτερη μεταφαιστειοϊζηματογενή σειρά.

Έτσι λοιπόν από τα κατώτερα προς τα ανώτερα έχουμε (Μαρούση 2018, Voudouris et al. 2005). :

- Κατώτερη ενότητα: Αδρόκκοκοι κλαστικοί σχηματισμοί, μετακροκακαλοπαγή και μεταγραφουβάκες καθώς και μεταχαλαζίτες. Ο ανώτερος ορίζοντας της κατώτερης ενότητας αποτελείται από ανθρακικά πετρώματα (μάρμαρα και ασβεστιτικοί φυλλίτες) που παρεμβάλλονται από σερικιτικούς φυλλίτες και χαλαζιακούς σχιστόλιθους.

— Ανώτερη ενότητα: Πρασινοσχιστόλιθοι, χλωριτικοί - ταλκικοί - μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και χαλαζίτες. Στον ανώτερο ορίζοντα της ανώτερης ενότητας εμφανίζεται ο φυλλίτης.

Ο πλουτωνίτης της Μαρώνιας είναι Ολιγοκαινικής ηλικίας (28,7 Ma). Κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι διαχωρίζεται σε 3 πετρογραφικούς τύπους και είναι από βασικής έως ενδιάμεσης αλλά και όξινης σύστασης.

- Ο πετρογραφικός τύπος της βασικής σύστασης είναι γάββρος και περιέχει: Πλαγιόκλαστα + πυρόξενους + βιοτίτη + ορθοπυρόξενους.
- Της ενδιάμεσης σύστασης είναι ένας χαλαζιακός μονζονίτης, χαλαζιακός μονζογάββρος και μονζογάββρος. Ο σημαντικότερος τύπος που είναι υπεύθυνος για την δημιουργία των skarn στα ανθρακικά πετρώματα της Μάκρης είναι ο μονζογάββρος ο οποίος περιέχει: Πλαγιόκλαστα + ορθοπυρόξενους + πυρόξενους + αμφίβολους + χαλαζία + βιοτίτη.
- Ο όξινης σύστασης είναι ένας γρανίτης, απλητικές φλέβες και πορφυριτικός μικρογρανίτης και περιέχει: Χαλαζία + καλιούχους αστρίους + πλαγιόκλαστα + βιοτίτη + μοσχοβίτη.

Το skarn της Μαρώνιας σχηματίζεται από την διείσδυση του μονζογάββρου στα μάρμαρα και στους ασβεστιτικούς φυλλίτες της Μάκρης σε θερμοκρασία 440 - 600 °C. Στην συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζεται και endo-skarn και exo-skarn (Μαρούση 2018, Voudouris et al. 2005).

Το endo-skarn χωρίζεται σε 2 υποζώνες:

- 1^η υποζώνη: Ανακρυσταλλωμένοι μονζογάββροι λίγα εκατοστά από τον πλουτωνίτη και περιέχει: Γρανάτη (κυρίως γροσσουλάριο) + αμφίβολο + επίδοτο + τιτανίτης + ανδραδίτης + απατίτης + βολλαστονίτης + μαγνητίτης + χαλκοπυρίτης + μαγνητοπυρίτης.
- 2^η υποζώνη: Γρανάτης (κυρίως γροσσουλάριο) + ορθόκλαστο + σοδάλιθος + Ti-ανδραδίτης + τιτανίτης + περοβσκίτης + κλινοπυρόξενος + βολλαστονίτης.

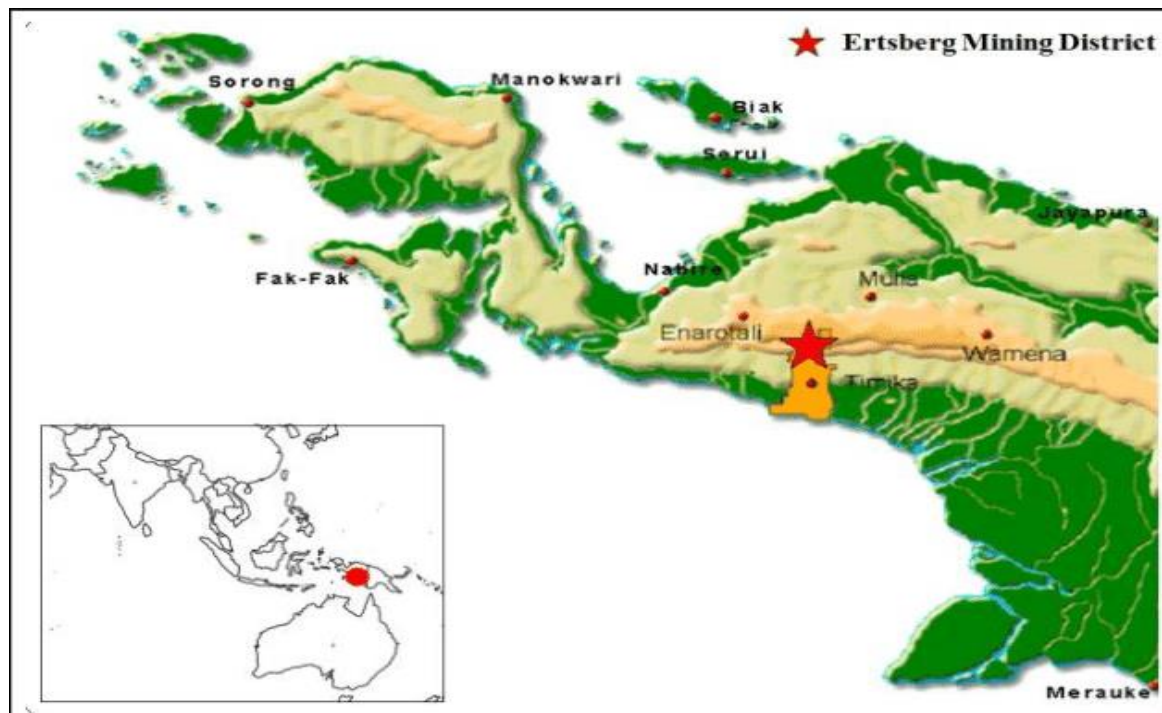
Το exo-skarn παρουσιάζει και αυτό 2 υποζώνες:

- 1^η υποζώνη: Γρανάτης (κυρίως γροσσουλάριος) + τιτανίτης + τιτανιούχος ανδραδίτης + περοβσκίτης + φλογοπίτης + σοδάλιθος + βεζουβιανίτης.
- 2^η υποζώνη: Η συγκεκριμένη υποζώνη υποδιαιρείται σε ακόμα περισσότερες υποζώνες. Η μία υποζώνη περιλαμβάνει σε ποικίλες αναλογίες τις παρακάτω ορυκτολογικές παραγενέσεις: Γρανάτης (γροσσουλάριος) + πυρόξενος (διοψίδιος) + τιτανιούχοι γρανάτες + περοβσκίτης + βολλαστονίτης+ φλογοπίτης + σοδάλιθος + ασβεστίτης + βεζουβιανίτης. Η άλλη υποζώνη περιλαμβάνει μελίλιθο. Μεταξύ της παραπάνω υποζώνης και της υποζώνης του μελιλιθικού skarn παρεμβάλλεται η παραγένεση: Βεζουβιανίτης + ασβεστίτης.

7.2 Παγκόσμια κοιτάσματα skarn

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν μερικά σημαντικά κοιτάσματα skarn διαφόρων χωρών.

7.2.1 Ertzberg Ινδονησία



Εικόνα 18: Χάρτης που αποτυπώνει την θέση του μεταλλείου Ertzberg στην Ινδονησία.

Πηγή: Bensaman, Benny, et al. "Hydrothermal Alteration and Mineralization Characteristics of Gajah Tidur Prospect, Ertzberg Mining District, Papua, Indonesia."

Σύμφωνα με τους Rubin & Kyle (1994, 1996) στο Ertzberg της Ινδονησίας παρατηρούνται μια σειρά πυροκλαστικών στρωμάτων της Kembelagan και μια από ανθρακικά της New Guinea. Η σειρά της Kembelagan αποτελείται από τους σχηματισμούς των Korai, Wonigoni, Piniya, Ekmai που αποτελούνται κυρίως από ψαμμίτες ασβεστόλιθους και δολομίτες. Αυτά της New Guinea αποτελούνται από την σειρά Faumai και την σειρά Ainod και την σειρά Waripi.

- Η σειρά Faumai αποτελείται από: ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, δολομίτες.
- Η σειρά Ainod περιλαμβάνει: ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, ενστρώσεις λιγνιτικών οριζόντων και ιλύολιθους.
- Η σειρά Waripi περιλαμβάνει: ασβεστόλιθους, ψαμμίτες δολομίτες.

Ο πλουτωνίτης της περιοχής είναι ένας μονζοδιορίτης έως μονζογρανίτης που περιλαμβάνει: πλαγιόκλαστα + βιοτίτης + αμφίβολου + κλινοπυρόξενους + μαγνητίτη

Στην περιοχή υπάρχουν 3 κοιτάσματα skarn (Rubin & Kyle 1996):

1. Το κύριο skarn του Ertzberg (GB)

2. Το σύμπλεγμα (GBT)

3. Και το Dom skarn

4. Το Big Gossan

Το GB skarn είναι H/T exo-skarn από μετασωμάτωση δολομιτικών ασβεστολίθων. Πρόκειται για έναν μεγάλο όγκο μαγνητιτικού skarn που περιβάλλεται από ασβεστοπυριτική ζώνη με το μαγνητιτικό skarn να είναι νεότερο από το ασβεστοπυριτικό. Παράγεται 0,8 g/t Au.

Στο συγκεκριμένο όγκο skarn εμφανίζονται τα παρακάτω ορυκτά:

Μαγνητίτης + γρανάτης (ανδραδίτης) + πυρόξενος (διοψίδιος) + φορστερίτης + μελίλιθος
Σπινέλιος + κλινοπυρόξενος + βεζουβιανίτης + Ca-αμφίβολος + βορνίτης + χαλκοπυρίτης
σιδηροπυρίτης + διγενίτης + μολυβδαινίτης + γαληνίτης + σφαλερίτης + βισμούθινίτης +
αυτοφυής Au + τάλκης + χλωρίτης + φλογοπίτης + σερπεντίνης + μοντιμοριλονίτης.

Το σύμπλεγμα GBT περιλαμβάνει 3 οριζόντια σε διάταξη στρώματα. Αυτό του GBT, της ενδιάμεσης ζώνης ορυκτών (IOZ) και αυτό της βαθιάς ζώνης ορυκτών (DOZ). Αυτά τα 3 μαζί συνιστούν το μεγαλύτερο Mg-skarn παραγωγής Cu στον κόσμο καθώς παράγονται και 0,8 g/t Au.

Το endo-skarn του DOZ περιλαμβάνει: φορστερίτη + κλινοπυρόξενους + μαγνητίτη + βορνίτη ± σπινέλιο + ανυδρίτη + τάλκη + σερπεντινίτη + τρεμόλιτη + ακτινόλιθο + χλωρίτη ± ζirkόνιο + αμφίβολο + ανυδρίτη + ασβεστίτης ± γύψος + χαλαζίας + φλογοπίτης + χρυσός ± γαληνίτης ± σφαλερίτης

Το exo-skarn του IOZ περιλαμβάνει: γρανάτη (ανδραδίτης) + κλινοπυρόξενους + τάλκης + σερπεντίνης + τρεμόλιθος + ακτινόλιθος + χλωρίτης + επίδοτο + ανυδρίτη + ασβεστίτη ± γύψο + χαλαζία + φλογοπίτη + μαγνητίτη + βορνίτη ± χαλκοπυρίτη ± σιδηροπυρίτη ± μαρκασίτη ± μολυβδαινίτη ± γαληνίτη.

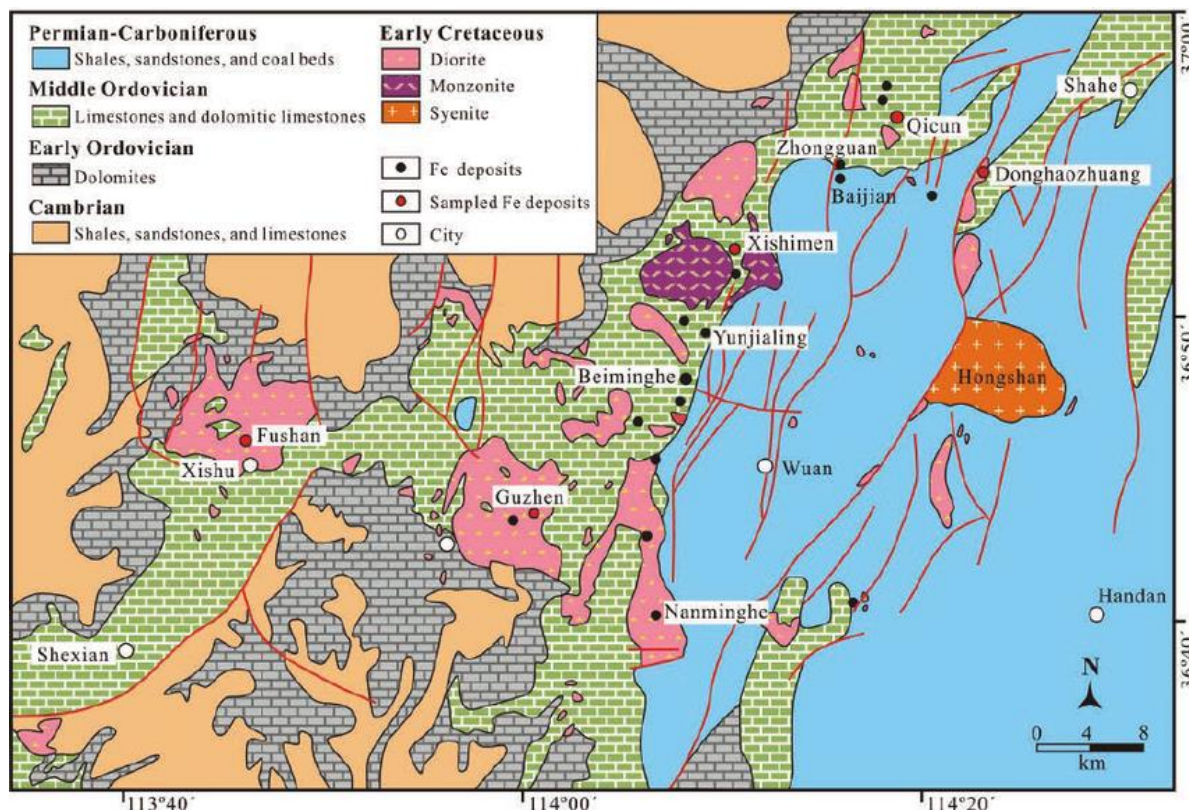
Το exo-skarn του GBD περιλαμβάνει: γρανάτη (ανδραδίτης) + κλινοπυρόξενους + φορστερίτη ± μοντισελλίτη + βεζουβιανίτη + βολλαστονίτη + χλωρίτη + επίδοτο + σερπεντινίτη + ασβεστίτη + ανυδρίτη ± γύψο + μαγνητίτη + βορνίτη + χαλκοπυρίτη ± σιδηροπυρίτη ± μαρκασίτη + κουβανίτη ± γαληνίτη ± σφαλερίτη.

Το κοίτασμα του Dom skarn περιλαμβάνει διάφορες ζώνες. Την ζώνη του μοντισελλιτικού skarn, την ζώνη του γρανατούχου + μαγνητιτικού skarn, μία ζώνη μπλοκ (block zone) και μία ζώνη αιματίτη. Η block zone περιλαμβάνει μάρμαρα και ασβεστόλιθους από την σειρά Ainos και γρανατούχο skarn που περιέχει: γρανάτη (ανδραδίτης) + μαγνητίτη + χαλκοπυρίτη + αιματίτη + χαλαζία. Διαχωρίζεται από ένα τεράστιο μαγνητιτικό ± γρανατούχο skarn από ένα ρήγμα. Η αιματιτική ζώνη περιέχει: αιματίτη + χαλαζία + μαγνητίτη + χαλκοπυρίτη. Ο μαγνητίτης και ο γρανάτης σχηματίζουν το μεγαλύτερο μέρος του skarn ενώ κυρίαρχο ορυκτό

είναι ο χαλκοπυρίτης. Από την αλλοίωση του χαλκοπυρίτη προκύπτουν ο κοβελλίνης, ο χαλκοσίνης και ο διγενίτης. Ουσιαστικά στο Dom skarn συναντάμε: ανδραδίτη + διοψίδιο + μαγνητίτη + χαλκοπυρίτη + αιματίτη + μοντισελλίτη + χλωρίτη + τάλκη + ασβεστίτη + μολυβίτη + φλογοπίτη + χαλαζία + κοβελλίνη + χαλκοσίνη + διγενίτη ± γαληνίτη ± σιδηροπυρίτη ± σφαλερίτη.

Το κοίτασμα Cu-Au Big Gossan είναι ένα Mg-skarn (exo-skarn) που προκύπτει από την μετασώματωση των ανθρακικών πετρωμάτων της σειράς Waripi και Ekmai. Τα ορυκτά που του συγκεκριμένου skarn είναι τα εξής: γρανάτης (ανδραδίτης) + πυρόξενος (διοψίδιος) + αμφίβολος + μαγνητίτης + χαλκοπυρίτης + βορνίτης + φορστερίτης + μοντισελλίτης + ανυδρίτης + ασβεστίτης + χλωρίτης + φλογοπίτης + τάλκης + πυροτίτης + γύψος + αιματίτης + επίδοτο + σερπεντινίτης + χαλαζίας ± γαληνίτης ± σφαλερίτης + σιδηροπυρίτης + αυτοφυής χρυσός (Meinert et al. 1996).

7.2.2 Beiminghe Κίνα (BMH)



Εικόνα 19: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Handan-Xingtai (modified from IGSNC and HGI, 1976). Πηγή: : Deng, X. D., Li, J. W., & Wen, G. (2015). U-Pb geochronology of hydrothermal zircons from the early Cretaceous iron skarn deposits in the Handan-Xingtai district, North China craton. *Economic Geology*, 110(8), 2159-2180.

Το ΒΜΗ κοιτάσμα παραγωγής σιδήρου και βρίσκεται στο νότιο τμήμα του βουνού Taihang βορειοδυτικά της πόλης Wu'an στο Hebei της Κίνας σε μια περιοχή που ονομάζεται Handan-Xingtai. Τα κοιτάσματα skarn της συγκεκριμένης περιοχής έχουν γίνει ευρέως αποδεκτά ως προϊόντα μεταμόρφωσης επαφής μεσοζωικού πλουτωνισμού και Ορδοβίσιων ανθρακικών πετρωμάτων (J.-F. Shen et al. 2013).

Οι κύριες λιθολογικές ενότητες της περιοχής αποτελούνται από Προκάμβρια μεταμορφωμένα πετρώματα και Φανεροζωϊκά ιζηματογενή, καθώς και μαγματικές διεισδύσεις. Το σημαντικότερο ιζηματογενές πέτρωμα στο οποίο πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της μετασώματωσης και κατ' επέκταση η δημιουργία του skarn είναι ο ασβεστόλιθος της Majiagou.

Ο πλουτωνίτης της περιοχής είναι ένας μεσοζωικός μονζοδιορίτης έως και διορίτης ο οποίος διείσδυσε και οδήγησε στην μεταμόρφωση των ασβεστολίθων της Majiagou (μέσο Ορδοβίσιο).

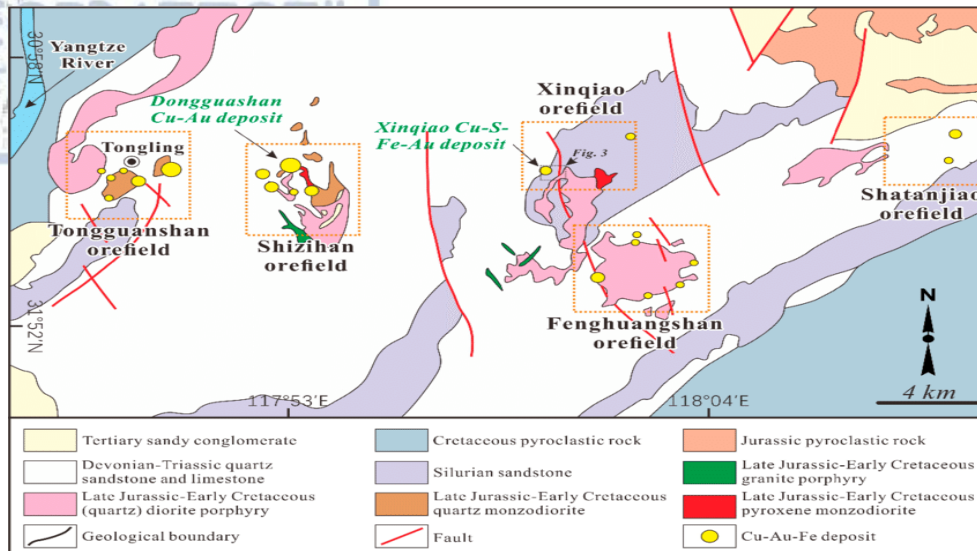
Στο κοιτάσμα αυτό εμφανίζονται διάφορες ζώνες οι οποίες είναι οι εξής(J.-F. Shen et al. 2013):

- Η ζώνη του διορίτη
- Η ζώνη του endo-skarn
- Η ζώνη των σουλφιδίων - μαγνητίτη
- Η ζώνη του exo-skarn
- Και η ζώνη των μαρμάρων

Το skarn του κοιτάσματος είναι κυρίως πυροξενικό με κυρίαρχο πυρόξeno τον διοψίδιο και περιστασιακά γρανατούχο. Συγκεκριμένα τα ορυκτά που συναντάμε στο συγκεκριμένο skarn είναι τα εξής: διοψίδιος + τρεμόλιθος + ακτινόλιθος + φλογοπίτης + χουμανίτης + σερπεντινίτης + γρανάτης (ανδραδίτης) + επίδοτο + μαγνητίτης + σιδηροπυρίτης ± αιματίτης ± χαλκοπυρίτης ± πυροτίτης ± Ni-μαγνητίτης (J.-F. Shen et al. 2013).

7.2.3 Fenghuangshan Κίνα

Το μεταλλείο του Fenghuangshan βρίσκεται επίσης στην Κίνα στην περιοχή Tongling της ανατολικής Κίνας. Πρόκειται για ένα γρανατούχο - διοψιδικό κοιτάσμα skarn το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή χαλκού και χρυσού. Στην συγκεκριμένη περιοχή υπάρχουν ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και σχιστόλιθοι, ενώ οι πλουτωνίτες είναι: χαλαζιακός μονζοδιορίτης, πυροξενικός μονζοδιορίτης, γρανοδιορίτης και διορίτης. Το skarn προκύπτει από την μεταμόρφωση επαφής του ασβεστόλιθου με τον διορίτη. Ο γρανοδιορίτης αυτός, αποτελείται από πλαγιόκλαστα + καλιούχους αστρίους + χαλαζία + βιοτίτη + πυρόξενους + ζirkόνιο + απατίτη.



Εικόνα 27: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Tongling και εμφάνιση του κοιτάσματος Fenghuangshan. Πηγή: Zhang, Y., Shao, Y., Zhang, R., Li, D., Liu, Z., & Chen, H. (2018). Dating ore deposit using garnet U-Pb geochronology: Example from the xinqiao Cu-S-Fe

Το γρανατούχο - πυροξενικό κοίτασμα skarn αποτελείται κυρίως από τα εξής ορυκτά: Γρανάτης (ανδραδίτης) + διοψίδιος + χαλκοπυρίτης + χαλαζίας + καλιούχους αστρίους + σιδηροπυρίτης + ασβεστίτης + μαγνητίτης ± βολλαστονίτης ± ακτινόλιθος ± χλωρίτης ± επίδοτο ± σερίκίτης + αυτοφυής χρυσός (J. Xie, et al.2020, S. Li et al 2014).

7.2.4 Sangam Ιράν

Βρίσκεται στην περιοχή Khorassan στο βορειοανατολικό Ιράν. Παράγεται περισσότερο από 1000 Mt Fe-μεταλλεύματος και είναι ένα παγκοσμίου φήμης Fe-skarn. Η περιοχή αποτελείται από κάτω Ιουρασικούς σχιστόλιθους, ιλυόλιθους, και ψαμμίτες καθώς και στα υπερκείμενα στρώματα από Αν Ιουρασικούς έως Κρητιδικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες ενώ ο πλουτωνίτης της περιοχής που διεισδύει και προκαλεί την θερμομεταμόρφωση επαφής στους δολομίτες και στα μάρμαρα είναι ένα συνηθισμένος γρανίτης έως και γρανίτης (A. Golmohammadi et al. 2015).

Στο κοιτάσμα του Sangam υπάρχουν 7 μεταλλευτικά σώματα όπου από δυτικά προς τα ανατολικά είναι τα εξής: A', A, B, C-south, (δυτικά μεταλλευτικά σώματα) C-north, Baghak (BA), Dardvay (D) (ανατολικά μεταλλευτικά σώματα). Τα δυτικά skarn προκύπτουν από, μετασώματωση σε ασβεστόλιθους και είναι ανθρακικά τα δε ανατολικά είναι από δολομίτες και είναι μαγνησιακά (F. Sepidbar et al. 2017).

Στο A' σώμα παρατηρούνται τα εξής ορυκτά: γρανάτες (ανδραδίτης - γροσσουλάριος) + πυρόξενοι (κυρίως εδεμβεργίτης και διοψίδιος) + καλιούχοι αμφίβολοι + καλιούχος άστριοι + πλαγιόκλαστα [endo-skarn] + χλωρίτης [exo-skarn] + χαλαζίας + μαγνητίτης + αιματίτης.

Στο Α σώμα παρατηρούνται: γρανάτες (ανδραδίτης-γροσσουλάριος) + καλιούχος αμφίβολος [endo-skarn] + χλωρίτης + ακτινόλιθος + χαλαζίας [exo-skarn] + μαγνητίτης + αιματίτης.

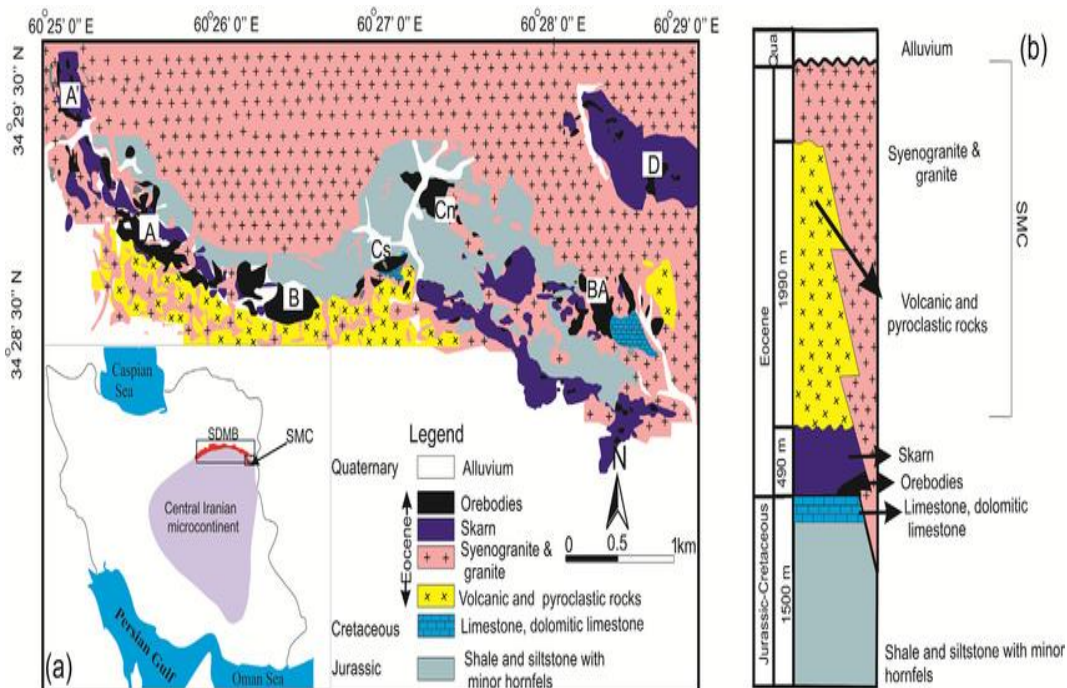
Στο Β σώμα παρατηρούνται: καλιούχοι άστριοι [endo-skarn] + ακτινόλιθος + χαλαζίας + χλωρίτης [exo-skarn] + μαγνητίτης + αιματίτης ± σιδηροπυρίτης.

Στο Cs σώμα υπάρχουν τα εξής: γρανάτες (ανδραδίτης κυρίως) + πυρόξενοι (εδεμβεργίτης + διοψίδιος) + καλιούχοι αμφίβολοι + βολλαστονίτης + καλιούχοι άστριοι [endo-skarn] + ακτινόλιθος χλωρίτης + χαλαζίας [exo-skarn] + μαγνητίτης + αιματίτης + σιδηροπυρίτης.

Στο σώμα Cn υπάρχουν τα εξής: γρανάτες (κυρίως ανδραδίτης) + φορστερίτης + αμφίβολος + πυρόξενος (κυρίως διοψίδιος) [endo-skarn] + ακτινόλιθος + χλωρίτης + φλογοπίτης [exo-skarn] + μαγνητίτης + αιματίτης + σιδηροπυρίτης + χαλκοπυρίτης ± πυροτίτης.

Στο σώμα BA υπάρχουν: γρανάτες (κυρίως ανδραδίτης) + φορστερίτης + πυρόξενοι (κυρίως διοψίδιος) [endo-skarn] + χλωρίτης + επίδοτο + φλογοπίτης + χαλαζίας [exo-skarn] + μαγνητίτης + σιδηροπυρίτης + χαλκοπυρίτης.

Και τέλος στο σώμα D: γρανάτες (κυρίως ανδραδίτης) + φορστερίτης + πυρόξενος (κυρίως διοψίδιος) [endo-skarn] + ακτινόλιθος + επίδοτο + φλογοπίτης [exo-skarn] + μαγνητίτης + αιματίτης.



Εικόνα 2028: Γεωλογικός χάρτης του κοιτάσματος Sangam στο Ιράν (Alavi Naini, 1982) και στρωματογραφική στήλη της περιοχής (modified after Mazaheri, 1996). Πηγή: Sepidbar, Fatemeh, et al. "Mineral geochemistry of the Sangam skarn deposit, NE Iran: implicati

Δημητριάδης, Σ. (1988). "Εισαγωγή στην πετρολογία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων", Εκδόσεις: Γιαχούδη Γιαπούλη

Μαρούση, Γ. Ε. (2018). Ορυκτολογική και ορυκτοχημική μελέτη των εμφανίσεων μελίλιθου από τη ζώνη skarn στη Μαρόνεια, Ροδόπης, Θράκη,= Mineralogical and geochemical study of the melilite from the skarn zone of Maronia Rhodope, Thrace. Προ/Μεταπτυχιακές Διατριβές στη Βιβλιοθήκη Θεόφραστος του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ.

Μουντράκης, Δ. (2010). "Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας", Εκδόσεις: University Studio Press

Μπόσκος, Ε., (1978). Ο σκαπόλιθος της Σερίφου και παρατηρήσεις σχετικά με τη σύσταση του γρανάτη ορισμένων γρανατιτών της νήσου. Δελτ.Ελλην.Γεωλ.Εταιρίας, τομ. XIII/2, σελ.34-45.

Παπασπύρου, Μ. Α. Γ. (2016). Ορυκτολογική και γεωχημική μελέτη του σχηματισμού Skarn του πλουτωνίτη του Πανοράματος, Δράμα Β. Ελλάδα. Προ/Μεταπτυχιακές Διατριβές στη Βιβλιοθήκη Θεόφραστος του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ.

Σολωμός, Χ., Βουδούρης, Π., & Κατερινόπουλος, Α. (2004). Ορυκτολογική μελέτη μεταλλοφορίας βισμούθιου-χρυσού-αντιμονίου στην περιοχή Καμαρίζας Λαυρίου. Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 36(1), 387-396.

Burt, D. M. (1982). Skarn deposits; historical bibliography through 1970. Economic Geology, 77(4), 755-763.

Cartwright, I., and I. S. Buick, (1995). Formation of wollastonite-bearing marbles during late regional metamorphic channelled fluid flow in the Upper Calcsilicate Unit of the Reynolds Range Group, central Australia. Journal of Metamorphic Geology 13.3 397-417.

Ducoux, M., Branquet, Y., Jolivet, L., Arbaret, L., Grasemann, B., Rabillard, A,... & 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, M. T., & Burt, D. M. (1982). Introduction; terminology, classification, and composition of skarn deposits. Economic geology, 77(4), 745-754.

Einaudi, M. T., MT, E., & LD, M. (1981). Skarn deposits.

Fitros, M., Tombros, S. F., Kokkalas, S., Kiliass, S. P., Perraki, M., Skliros, V.,... & Zhai, D. (2020). REE-enriched skarns in collisional settings: The example of Xanthi's Fe-skarn, Rhodope Metallogenetic Massif, Northern Greece. Lithos, 105638.

- Fitros, M., Tombros, S. F., Williams-Jones, A. E., Tsikouras, B., Koutsopoulou, E., & Hatzipanagiotou, K. (2017). Physicochemical controls on bismuth mineralization: an example from Moutoulas, Serifos island, Cyclades, Greece. *American Mineralogist*, 102(8), 1622-1631.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M. H., Shafaroudi, A. M., & Mazaheri, S. A. (2015). Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangon iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 65, 545-563.
- Hammarstrom, J. M., Kotlyar, B. B., Theodore, T. G., Elliott, J. E., John, D. A., Doebrich, J. L.,... & Klein, D. P. (1995). Cu, Au, and Zn-Pb Skarn Deposits. Preliminary Compilation of Descriptive Geoenvironmental Mineral Deposit Models, US Geological Survey Open-File Report, 95-831.
- Hewitt, W. P. (1984). Two articles on skarn deposits; a discussion. *Economic Geology*, 79(4), 768-769.
- Iglseder, C., Grasemann, B., Schneider, D. A., Petrakakis, K., Miller, C., Klötzli, U. S.,... & Ramboisek, C. (2009). I and S-type plutonism on Serifos (W-Cyclades, Greece). *Tectonophysics*, 473(1-2), 69-83.
- Kornprobst, J., 2002. Metamorphic rocks and their geodynamic significance. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 208pp.
- Kwak, T. A. P. (1986). Fluid inclusions in skarns (carbonate replacement deposits). *Journal of Metamorphic Geology*, 4(4), 363-384.
- Kwak, T. A. (2012). W-Sn skarn deposits: and related metamorphic skarns and granitoids. Elsevier.
- Leavitt, D. L. (1987). Skarns of southwestern Maine. *Rocks & Minerals*, 62(6), 429-432.
- Li, S., Yang, X., Huang, Y., & Sun, W. (2014). Petrogenesis and mineralization of the Fenghuangshan skarn Cu-Au deposit, Tongling ore cluster field, Lower Yangtze metallogenic belt. *Ore Geology Reviews*, 58, 148-162.
- Meinert, L.D., (1990). Skarn deposits in Nevada-geology, mineralogy, and petrology of Au, Cu, W, and Zn skarns. In: Meinert, L.D., Myers, G.L., Brooks, J.W. (Eds.), *Geological Society of Nevada Fieldtrip #2 Guidebook*, pp. 41-72.
- Meinert, L. D. (1992). Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*.
- Meinert, L. D. (1997). Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration. *Exploration and Mining Geology*, 6, 185-208.
- Meinert, L. D. (2020). 3. THE GENESIS AND EXPLORATION OF SKARN DEPOSITS. *Geochemical Perspectives*, 9(1), 17-41.
- Meinert, L. D., Hedenquist, J. W., Satoh, H., & Matsuhisa, Y. (2003). Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids. *Economic Geology*, 98(1), 147-156.

- Meinert, L. D., Hefton, K. K., Mayes, D., & Tasiran, I. (1997). Geology, zonation, and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg district, Irian Jaya. *Economic Geology*, 92(5), 509-534.
- Mertig, H. J., Rubin, J. N., & Kyle, J. R. (1994). Skarn Cu-Au orebodies of the Gunung Bijih (Ertsberg) district, Irian Jaya, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1-3), 179-202.
- Misra, K. C. (2000). Skarn deposits. In *Understanding Mineral Deposits* (pp. 414-449). Springer, Dordrecht.
- Miyashiro, A. (1994). *Metamorphic petrology*. CRC Press.
- Murakami, H. (2005, July). How to Study skarn type Deposits. In *A short time expert seminar in MTA, Ankara*.
- Nakano, T., Yoshino, T., Shimazaki, H., & Shimizu, M. (1994). Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits. *Economic Geology*, 89(7), 1567-1580.
- Pirajno, F. (2009). Skarn systems. In *Hydrothermal processes and mineral systems* (pp. 535-580). Springer, Dordrecht.
- Nebel, M. L., Hutchinson, R. W., & Zartman, R. E. (1991). Metamorphism and polygenesis of the Madem Lakkos polymetallic sulfide deposit, Chalkidiki, Greece. *Economic Geology*, 86(1), 81-105.
- Rubin, J. N., & Kyle, J. R. (1997). Precious metal mineralogy in porphyry-, skarn-, and replacement-type ore deposits of the Ertsberg (Gunung Bijih) District, Irian Jaya, Indonesia. *Economic Geology*, 92(5), 535-550.
- Sepidbar, F., Mirnejad, H., Li, J. W., Wei, C., George, L. L., & Burlinson, K. (2017). Mineral geochemistry of the Sangan skarn deposit, NE Iran: implication for the evolution of hydrothermal fluid. *Geochemistry*, 77(3), 399-419.
- Sepidbar, F., Mirnejad, H., Li, J. W., & Ma, C. (2017). Mineral and stable isotope compositions, phase equilibria and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology from the iron skarn deposit in Sangan, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 91, 660-681.
- Shen, J. F., Santosh, M., Li, S. R., Zhang, H. F., Yin, N., Dong, G. C.,... & 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*, 156, 218-229.
- Sieber, M. J., Brink, F. J., Leys, C., King, P. L., & Henley, R. W. (2020). Prograde and retrograde metasomatic reactions in mineralised magnesium-silicate skarn in the Cu-Au Ertsberg East Skarn System, Ertsberg, Papua Province, Indonesia. *Ore Geology Reviews*, 103697.
- Siron, C. R., Rhys, D., Thompson, J. F., Baker, T., Veligrakis, T., Camacho, A., & Dalampiras, L. (2018). Structural controls on porphyry Au-Cu and Au-rich polymetallic carbonate-hosted

- replacement deposits of the Kassandra mining district, northern Greece. *Economic Geology*, 113(2), 309-345.
- Siron, C. R., Thompson, J. F., Baker, T., Darling, R., & Dipple, G. (2019). Origin of Au-rich carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining district, northern Greece: Evidence for late Oligocene, structurally controlled, and zoned hydrothermal systems. *Economic Geology*, 114(7), 1389-1414.
- Somarin, A. K., & Moayyed, M. (2002). Granite-and gabbrodiorite-associated skarn deposits of NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 20(3-4), 127-138.
- St Seymour, K., Zouzias, D., Tombros, S., & Kolaiti, E. (2009). Geochemistry of the Serifos pluton (Cycladic islands) and associated iron oxide and sulfide ores: Skarn or metamorphosed exhalite deposits?. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 186(3), 249-270.
- Voudouris, P. (2005). Gold and silver mineralogy of the Lavrion deposit, Attika, Greece. In *Mineral deposit research: meeting the global challenge* (pp. 1089-1092). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Voudouris, P., Katerinopoulos, A., & Magganas, A. (2005, October). Skarn mineralogy of a shoshonitic plutonic complex (Maronia, NE Greece). In *2nd Congress Econ Geol Comm, Geol Soc Greece*, sp (Vol. 19, p. 28).
- Voudouris, P., Mavrogonatos, C., Rieck, B., Kolitsch, U., Spry, P. G., Scheffer, C.,... & Zaimis, S. (2018). The gersdorffite-bismuthinite-native gold association and the skarn-porphyry mineralization in the Kamariza mining district, Lavrion, Greece. *Minerals*, 8(11), 531.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P. G., Bonsall, T. A., Tarkian, M., & Solomos, C. (2008). Carbonate-replacement Pb-Zn-Ag±Au mineralization in the Kamariza area, Lavrion, Greece: Mineralogy and thermochemical conditions of formation. *Mineralogy and Petrology*, 94(1-2), 85, 93(1-2), 79-110.
- Xie, J., Tang, D., Qian, L., Wang, Y., & Sun, W. (2020). Geochemistry of sulfide minerals from skarn Cu (Au) deposits in the Fenghuangshan ore field, Tongling, eastern China: Insights into ore-forming process. *Ore Geology Reviews*, 103537.
- Zharikov, V. A. (1970). Skarns (part I). *International Geology Review*, 12(5), 541-559.