



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-  
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΣΟΦΙΑ ΦΩΤΙΑΔΟΥ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN: ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ-  
ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ  
ΧΩΡΟ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2022





ΦΩΤΙΑΔΟΥ ΣΟΦΙΑ  
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5288

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ-ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ  
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-  
Κοιτασματολογίας

**Επιβλέποντες**

Παπαδοπούλου Λαμπρινή  
Μέλφος Βασίλειος



© Σοφία Φωτιάδου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ SKARN:ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ-ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ – *Διπλωματική Εργασία*

© Sofia Fotiadou, School of Geology, Dept. of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, 2022

All rights reserved.

SKARN DEPOSITS:PETROGRAPHY-METALLOGENESIS AND EXAMPLES FROM THE GREEK AREA – *Bachelor Thesis*

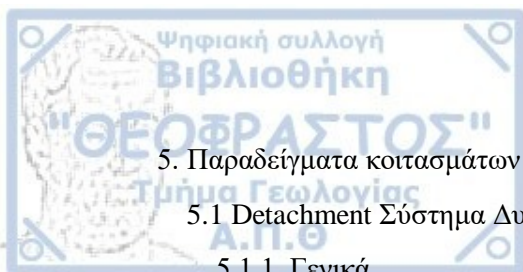
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται 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.



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract .....	2
1. Εισαγωγή .....	3
2. Σχηματισμός skarn .....	4
2.1 Γενικά .....	4
2.2. Τεκτονικό περιβάλλον .....	7
2.3 Βάθος σχηματισμού.....	9
3. Τύποι skarn .....	10
3.1 Κοιτάσματα skarn σιδήρου .....	10
3.1.1 Ασβεστούχα κοιτάσματα skarn μαγνητίτη σε περιβάλλον νησιώτικου τόξου .....	10
3.1.2 Μαγνησιούχα κοιτάσματα skarn μαγνητίτη τύπου Κορδιλιέρας.....	11
3.2 Κοιτάσματα skarn βολφραμίου .....	11
3.3 Κοιτάσματα skarn με μολυβδαίνιο .....	13
3.4 Κοιτάσματα skarn χαλκού .....	14
3.4.1 Skarn χαλκού που συνδέονται με πορφυριτικά πετρώματα .....	14
3.4.2 Διαφορές Πορφυριτικών και μη πορφυριτικών κοιτασμάτων skarn .....	16
3.5 Κοιτάσματα Skarn με κασσίτερο .....	16
3.5.1 Μαγνησιούχα skarn .....	17
3.5.2 Επικάλυψη μαγνησιούχων skarn από ασβεστιτικά.....	18
3.5.3 Ασβεστιτικά skarn .....	18
3.6 Zn κοιτάσματα Skarn.....	19
3.6.1 Skarn ψευδαργύρου κοντά σε βαθύλιθους.....	20
3.6.2 Skarn ψευδαργύρου κοντά σε φλέβες .....	20
3.6.3 Skarn ψευδαργύρου κοντά σε φλέβες .....	20
3.6.4 ZnSkarns από πιθανή ή άγνωστη μαγματική πηγή.....	21
3.6.5 Ασβεστιτικά-φλεβικά κοιτάσματα με μαγγανιούχα ή ασβεστοπυριτικά ορυκτά .	21
3.7 Κοιτάσματα Skarn χρυσού.....	22
4. Εξελικτικά στάδια και διεργασίες .....	23
4.1 Μεταμόρφωση επαφής .....	23
4.2 Μεταμορφικές αντιδράσεις.....	24
4.3 Μετασωματική ανάπτυξη του skarn.....	26
4.4 Θερμοκρασία και μερική πίεση θείου και οξυγόνου .....	26
4.5 Εναπόθεση σουλφιδίων και ανάδρομη μετασώματωση .....	27

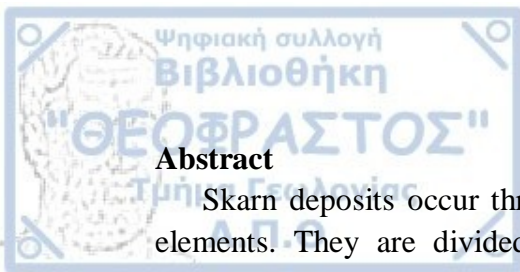


5. Παραδείγματα κοιτασμάτων skarn στον ελληνικό χώρο.....	29
5.1 Detachment Σύστημα Δυτικών Κυκλάδων - Σέριφος.....	29
5.1.1. Γενικά.....	29
5.1.2 Γεωδυναμικό περιβάλλον.....	29
5.1.3 Πετρολογία - δομή των Skarn .....	30
Skarn υψηλής θερμοκρασίας .....	30
Skarn μέσης θερμοκρασίας.....	31
Ορυκτογένεση Fe/Ba χαμηλής θερμοκρασίας .....	32
5.2 Skarn στην περιοχή της Ξάνθης.....	32
5.2.1 Πυριγενή της Ξάνθης.....	32
5.2.2 Τύποι skarn - Ξάνθη.....	33
5.2.3 Skarn - Κιμμέρια.....	34
5.3 Skarn στην περιοχή του Λαυρίου.....	34
5.3.1 Γεωλογία της περιοχής.....	34
5.3.2 Σχηματισμός και υπάρχοντα skarn .....	35
Βιβλιογραφία .....	36



### **Περίληψη**

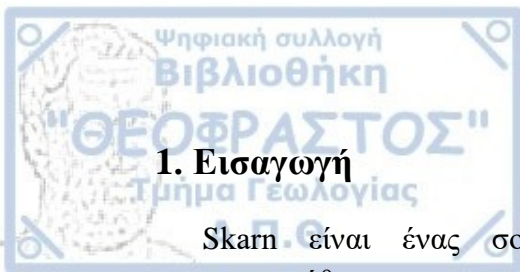
Τα κοιτάσματα skarn εμφανίζονται σε όλο τον κόσμο και έχουν γίνει αντικείμενο εκμετάλλευσης για διάφορα στοιχεία. Χωρίζονται σε επτά βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι: σιδήρου, βολφραμίου, μολυβδαινίου, χαλκού, κασσίτερου, ψευδαργύρου και χρυσού. Ο σχηματισμός τους λαμβάνει χώρα σε ποικίλα βάθη και γεωτεκτονικά περιβάλλοντα. Τα skarn δημιουργούνται από την αντικατάσταση ανθρακικών πετρωμάτων μέσω διεργασιών περιοχικής μεταμόρφωσης ή μεταμόρφωσης επαφής και μετασωμάτωσης. Στον ελληνικό χώρο τα μεγαλύτερα κοιτάσματα skarn βρίσκονται στη Σέριφο, στο Λαύριο και στην Ξάνθη.



### **Abstract**

Skarn deposits occur throughout the world and have been exploited for various elements. They are divided into seven main categories including iron, tungsten, molybdenum, copper, tin, zinc and gold. Formation of skarns take place at various depths and geotectonic environments. Skarns are formed from the replacement of carbonate rocks through processes of regional or thermal metamorphism and metasomatism. In the Greek area, the largest skarn deposits occur in Serifos, Laurium and Xanthi.



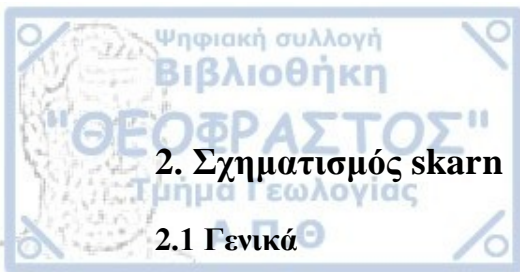


## 1. Εισαγωγή

Skarn είναι ένας σουηδικός όρος που αφορά την εξόρυξη. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει έναν τύπο πυριτικού στείρου υλικού (αμφίβολο, πυρόξενο, γρανάτη κτλ) που σχετίζεται με κοιτάσματα ορυκτών του σιδήρου και σουλφιδίων της Αρχαιοζωικής εποχής ιδιαίτερα εκείνων που προήλθαν από αντικατάσταση ασβεστόλιθων και δολομιτών στην περιοχή Persberg της Σουηδίας. Ο όρος έχει επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει και άλλες μεταμορφικές και μετασωματικές διεργασίες σε πετρώματα όλων των ηλικιών κυρίως αντικατάσταση λιθολογιών που περιέχουν ασβεστόλιθο από πυριτικά ορυκτά του ασβεστίου, σιδήρου, μαγνησίου και μαγγανίου σύμφωνα με τους με τους Einaudi et al. (1981).

Τα κοιτάσματα skarn αποτελούν σημαντικές πηγές εξόρυξης βολφραμίου, χαλκού, σιδήρου, μολυβδαίνιου, ψευδάργυρου και σε μικρότερο βαθμό κοβαλτίου, χρυσού, αργύρου, μολύβδου, βισμούθιου, κασσίτερου, βορίου, βήρυλλου. Μπορούν να εξορυχθούν επίσης για βιομηχανικά ορυκτά όπως γραφίτης, αμίαντος, βολλαστονίτης, μαγνησίτης, φλογοπίτης, τάλκης και φθορίτης.

Καθώς τα skarn περιέχουν πολλά σημαντικά ορυκτά και στοιχεία είναι ουσιώδες να αναγνωρίζονται η πηγή, τα χαρακτηριστικά όπως και ο τρόπος της δημιουργίας των κοιτασμάτων αυτών.



## 2. Σχηματισμός skarn

### 2.1 Γενικά

Τα skarn είναι τύπος πετρώματος πλούσιο σε ασβέστιο, μαγνήσιο, αργίλιο, σίδηρο και μαγγάνιο που μπορεί να συνδέονται με στοιχεία σημαντικής οικονομικής αξίας. Η πλειοψηφία τους συναντάται σε λιθολογίες που περιέχουν ασβεστόλιθο όμως μπορούν να σχηματιστούν και σε άλλους τύπους πετρωμάτων όπως σχιστόλιθο, ψαμμίτη, γρανίτη βασάλτη και κοματιτίτη. Μπορούν να σχηματιστούν κατά τη διάρκεια περιοχικής μεταμόρφωσης ή μεταμόρφωσης επαφής από πολλές μετασωματικές διεργασίες που περιλαμβάνουν ρευστά μαγματικής, μεταμορφικής, μετεωρικής ή θαλάσσιας προέλευσης. Τα skarn μπορούν να βρεθούν σε ποίκιλα περιβάλλοντα όπως γειτονικοί πλουτωνίτες, κατά μήκος ρηγμάτων και κύριων shear ζωνών, σε ρηχά γεωθερμικά συστήματα, στους πυθμένες θαλασσών και βαθιά στο φλοιό καλυμμένα από μεταμορφωμένους σχηματισμούς.

Όλα τα περιβάλλοντα και τις διεργασίες μέσα στα οποία μπορεί να δημιουργηθούν τα skarn αυτό που τα χαρακτηρίζει είναι η ορυκτολογία του. Περιλαμβάνουν ποικιλία ασβεστοπυριτικών ορυκτών αλλά τα κυρίαρχα είναι ο γρανάτης και ο πυρόξενος. Τα ορυκτά είναι πολύ σημαντικά καθώς στην εξέλιξη του η θερμοκρασία, η πίεση, τα ρευστά και το πέτρωμα ξενιστής είναι στο εύρος ισορροπίας αυτών (Meinert 1992).

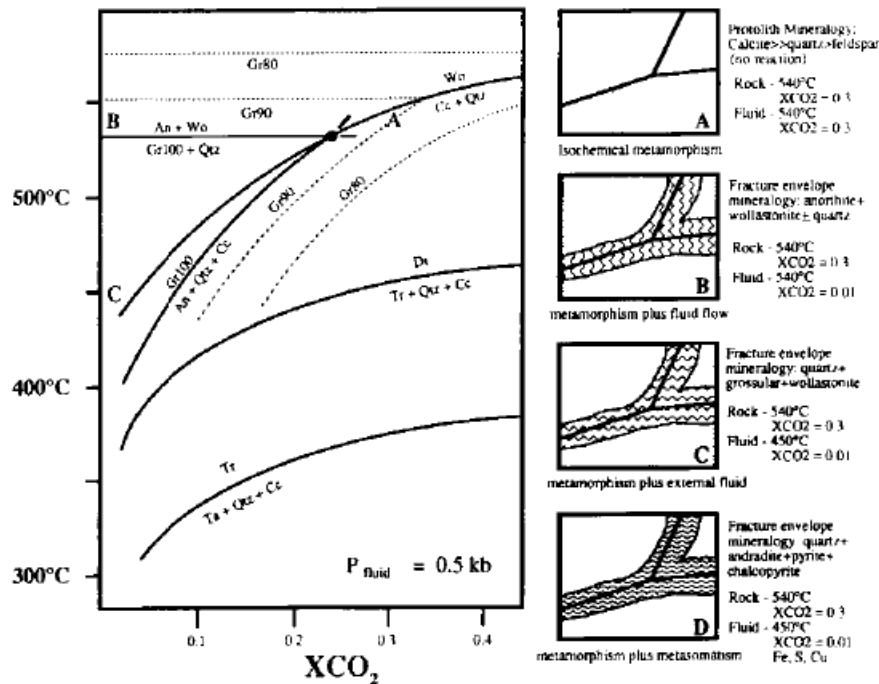
Η αντικατάσταση, κυρίως λιθολογιών με ασβεστολιθικό υλικό, από την οποία προκύπτει ο σχηματισμός των skarn (Einaudi et al. 1981) μπορεί να εξηγηθεί με τους εξής τρόπους:

- Μεταμόρφωση με ανακρυστάλλωση με λίγη ή καθόλου μεταφορά χημικών στοιχείων στο σύστημα.
- Ανταλλαγή στοιχείων σε τοπική κλίμακα μεταξύ διαφορετικών λιθολογιών
- Ανταλλαγή στοιχείων τοπικά και σε μεγάλη θερμοκρασία μεταξύ ενός μάγματος και ενός ανθρακικού πετρώματος
- Μεταφορά χημικών στοιχείων σε μεγάλη κλίμακα και με εύρος θερμοκρασιών μεταξύ υδροθερμικών ρευστών (που συνήθως προέρχονται από μαγματική πηγή) και κυρίως ασβεστολιθικών πετρωμάτων.

Ο σχηματισμός των skarn μπορεί να προκύψει από καθαρά μεταμορφικές ή καθαρά μετασωματικές διεργασίες όπως επίσης ποικίλουν οι περιπτώσεις που είναι ανάμεσα σε αυτά τα ακραία μέλη.

Ένα χαρακτηριστικό που έχει παρατηρηθεί από τους παλιούς ερευνητές (π.χ. Lindgren 1902, Barrel 1907, Goldschmidt 1911, Umpleby 1913, Knopf 1918) ο σχηματισμός skarn είναι δυναμική διεργασία. Στα μεγαλύτερα κοιτάσματα skarn υπάρχει μετάβαση από την αρχική/περιφερειακή μεταμόρφωση που έχει ως αποτέλεσμα κερατίτες, skarn αντίδρασης και σκαρνοειδή (skarnoids), σε μεταγενέστερη/εσωτερική μεταμόρφωση που δίνει skarn που αποτελούνται από

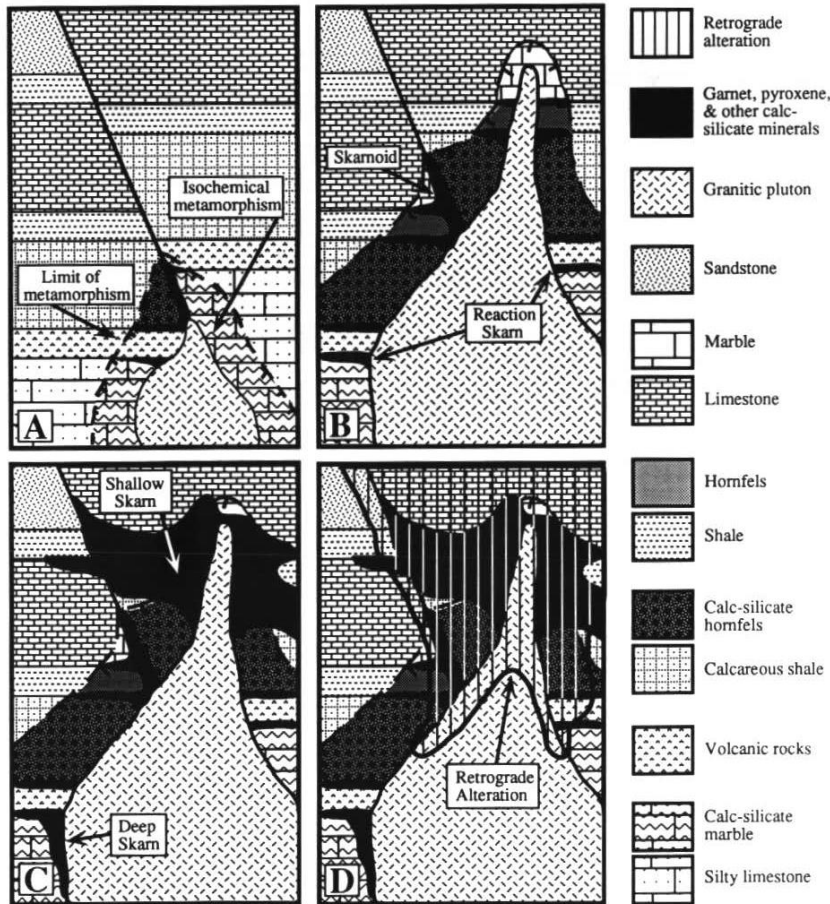
σχετικά αδρόκοκκα ορυκτά. Λόγω των υψηλών γεωθερμικών βαθμίδων και την εκτεταμένη κυκλοφορία ρευστών που προκύπτουν από τη διείδυση του μάγματος (Norton 1982, Salemink and Schuiling 1987, Bowers et al. 1990) η μεταμόρφωση επαφής μπορεί να είναι ιδιαίτερα περίπλοκη σε σχέση με το απλό μοντέλο της ισοχημικής ανακρυστάλλωσης που τυπικά συνδέεται με την τοπική μεταμόρφωση.



Σχήμα 1. Εικονογράφηση της ισοροπίας μεταμορφικών φάσεων για επιλεγμένες αντιδράσεις στο σύστημα Ca-Mg-Al-Si-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> τροποποιημένα από τους Greenwood (1967) και Kerrick (1974).

Η κυκλοφορία τέτοιων ρευστών με απότομες γεωθερμικές βαθμίδες είναι συνηθισμένη στα περισσότερα πλουτωνικά περιβάλλοντα και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σύνθετων μεταμορφικών ζωνών που συμπληρώνονται από μικρής κλίμακας μετασωματική μεταφορά. Πιο περίπλοκα μετασωματικά ρευστά που μπορεί να περιέχουν μαγματικά συστατικά όπως σίδηρο, πυρίτιο και χαλκό, παράγουν μία συνέχεια μεταξύ των καθαρά μεταμορφικών και καθαρά μετασωματικών διεργασιών. Η αρχική μεταμόρφωση που συνεχίζεται με μετασωμάτωση σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (οι Wallmach και Hatton (1989) περιέγραψαν θερμοκρασίες > 1200°C) ακολουθείται από ανάδρομη μεταμόρφωση όπου οι θερμοκρασίες πέφτουν.

Στα skarn που σχετίζονται με πλουτωνίτες υπάρχει σύνδεση μεταξύ της σειράς τοποθέτησης, κρυστάλλωσης, τροποποίησης, ψύξης του πλουτωνίτη και της αντίστοιχης μεταμόρφωσης, μετασωμάτωσης και ανάδρομης μεταμόρφωσης των γύρω πετρωμάτων. Το σχήμα 2 δείχνει τα εξελικτικά στάδια ανάπτυξης τέτοιων skarn τα οποία είναι:



Σχήμα 2. Εξελκτικά στάδια κοιτασμάτων skarn που συνδέονται με πλουτωνίτες (Meinert 1992).

1. Η αρχική διείσδυση προκαλεί μεταμόρφωση των ιζηματογενών πετρωμάτων.

2. Η μεταμορφική ανακρυστάλλωση και η αλλαγή των φάσεων αντικατοπτρίζει τη σύσταση του πρωτόλιθου με τοπική διμετασωμάτωση και κυκλοφορία ρευστών που δημιουργούν ποικίλα ασβεστοπυριτικά ορυκτά (skarn αντίδρασης και σκαρνοειδή) μέσα σε μη αμιγείς λιθολογίες και κατά μήκος ορίων ρευστών. Η μεταμόρφωση είναι πιο εκτεταμένη και μεγαλύτερης θερμοκρασίας σε βάθος από ότι κοντά στο μικρό θόλο ψηλά στο σύστημα.

3. Η κρυστάλλωση και η απελευθέρωση ξεχωριστής υδατικής φάσης έχει ως αποτέλεσμα μετασωματικό skarn που διαμορφώνεται από τα ρευστά. Το skarn σε βάθος είναι μικρό σε σχέση με την μεταμορφική άλω. Είναι επίσης κάθετα τοποθετημένο σε σύγκριση με το κατά πλάτος εκτεταμένο skarn που τοπικά φτάνει μέχρι πέρα από τη μεταμορφική άλω κοντά στην κορυφή του συστήματος.

4. Η ψύξη του πλουτωνίτη και η πιθανή κυκλοφορία ψυχρών, πλούσιων σε οξυγόνο μεταωρικών νερών προκαλούν ανάδρομη μεταμόρφωση των μεταμορφικών και μετασωματικών ασβεστοπυριτικών ορυκτών. Αυτή η ανάδρομη μεταμόρφωση είναι πιο εκτεταμένη σε ρηχές ζώνες.



Ο βαθμός στον οποίο αναπτύσσεται το κάθε στάδιο εξαρτάται από τις συνθήκες του γεωλογικού περιβάλλοντος στο οποίο σχηματίζεται το skarn. Για παράδειγμα η μεταμόρφωση πιθανόν να είναι πιο εκτεταμένη και υψηλότερου βαθμού σε skarn που σχηματίζονται σε μεγάλα βάθη του φλοιού παρά σε εκείνα που σχηματίζονται σε πιο ρηχές συνθήκες. Αντίθετα, ανάδρομη μεταμόρφωση κατά την ψύξη και αλληλεπίδραση με μετεωρικά νερά είναι έντονα σε μικρά βάθη του φλοιού. Επίσης στα μεγαλύτερα βάθη τα ανθρακικά πετρώματα παραμορφώνονται πλαστικά ενώ στα μικρότερα βάθη η παραμόρφωση είναι περισσότερο θραυστιγενής.

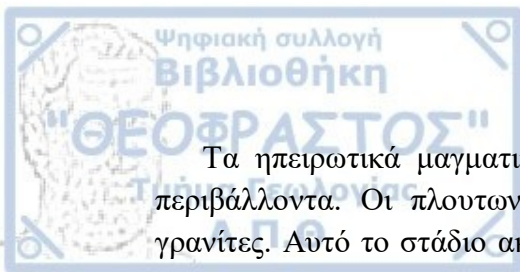
Όλες αυτές οι διαφορές επηρεάζουν το skarn που σχηματίζεται ως προς το μέγεθος και τη μορφολογία του. Συνεπώς, η σύσταση του πετρώματος ξενιστή, το βάθος σχηματισμού και το περιβάλλον προκαλούν διαφοροποιήσεις και αποκλίσεις από το εξιδανικευμένο μοντέλο (σχ. 2) για τα skarn που σχετίζονται με πλουτωνίτες.

Αξίζει να αναφερθούν δύο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη δημιουργίας των skarn, το τεκτονικό περιβάλλον και το βάθος σχηματισμού.

## 2.2. Τεκτονικό περιβάλλον

Τα ορογενετικά στάδια διακρίνονται στο πρώιμο, ύστερο και τελικό (Einaudi et al., 1981).

Ένα πρώιμο ορογενετικό περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί αυτό του νησιωτικού τόξου. Ο μαγματισμός σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνει βασαλτικά και ανδεσιτικά ηφαιστειακά πετρώματα που συνδέονται τοπικά με κλαστικά ιζήματα της οπισθοτόξειας λεκάνης (back arc basin) ενώ όσο το ηφαιστειακό τόξο πλησιάζει το επίπεδο της θάλασσας, με κλαστικά ιζήματα ρηχής θάλασσας συμπεριλαμβανομένων κοραλλιογενείς ασβεστόλιθους. Τα πυριγενή πετρώματα αυτής της κατηγορίας ποικίλουν από γάββρο μέχρι γρανοδιορίτη με λιγότερα αλκαλικά πετρώματα όπως οι πλαγιογρανίτες και πλαγιοσηνίτες. Κοιτάσματα skarn πλούσια σε μαγνητίτη συνδέονται με τέτοιους πλουτωνίτες είναι και σχηματίζονται τόσο στα ανδεσιτικά ηφαιστειακά πετρώματα όσο και στους ασβεστόλιθους. Τα skarn που σχηματίζονται σε αυτά τα περιβάλλοντα έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που τα διαχωρίζουν από εκείνα που η δημιουργία τους συνδέεται με πιο εξελιγμένα μάγματα και ηπειρωτικό φλοιό. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η σύνδεσή τους με γάββρους και διορίτες, ο μεγάλος όγκος ένδο-skarn, η εκτενής Na-μετασώματωση, η ολική σύστασή τους που είναι πλούσια σε σίδηρο και φτωχή σε μαγνήσιο, η παρουσία ανωμαλιών σιδήρου, κοβαλτίου, χαλκού, χρυσού, νικελίου και ψευδαργύρου ενώ απουσιάζουν ο κασσίτερος, το βολφράμιο και ο μόλυβδος. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά αντανακλούν την πρωταρχική ωκεάνια φύση του φλοιού και τον αντίστοιχων πετρωμάτων.



Τα ηπειρωτικά μαγματικά τόξα αντιπροσωπεύουν πιο εξελιγμένα ορογενετικά περιβάλλοντα. Οι πλουτωνίτες σε αυτήν την περίπτωση είναι γρανοδιορίτες ως γρανίτες. Αυτό το στάδιο ακολουθεί το πρώιμο ορογενετικό στάδιο με δύο τρόπους: είτε ως ένα νησιώτικο τόξο που προσαρτίζεται στο ηπειρωτικό περιθώριο είτε πρόκειται για την έναρξη ενός κύκλου υποβύθισης.

Τα skarn που συνδέονται με γρανοδιορίτες και οι χαλαζιακούς μονζονίτες οι οποίοι σχετίζονται με υποβύθιση εξαρτώνται από το βάθος στον οποίο συμβαίνει ο σχηματισμός τους.

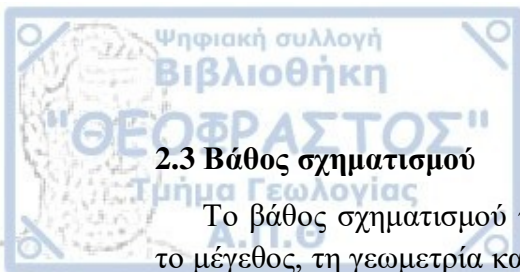
Όταν το μάγμα τοποθετείται σε μεγάλα βάθη (5-15 χιλιόμετρα) προκύπτουν μεγάλοι και αδρόκοκοι βαθύλιθοι που προκαλούν εκτεταμένη μεταμόρφωση αλλά εκλείπουν σημαντικά ποσά χαμηλού βαθμού αλλοιώσεων. Τα skarn που σχετίζονται με αυτούς τους πλουτωνίτες εξορύσσονται κυρίως για το βολφράμιο με μικρότερα ποσοστά χαλκού και μολυβδαίνιου ενώ μπορεί να υπάρχει ψευδάργυρος και μόλυβδος περιφερειακά των skarn.

Όταν το μάγμα είναι τοποθετημένο σε μικρά βάθη του φλοιού (1-6 χιλιόμετρα) προκύπτουν πορφυριτικές διεισδύσεις και γρανοδιορίτες ως χαλαζιακοί μονζονίτες. Η μεταμορφική άλω σε αυτές τις περιπτώσεις είναι λιγότερο εκτενής και χαμηλότερου βαθμού από ότι στους βαθύλιθους που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη και οι αλλοιώσεις των διεισδύσεων μπορεί να είναι εκτεταμένη. Τα skarn που συνδέονται με αυτά τα πετρώματα και βάθη είναι πλούσια σε σουλφίδια και εξορύσσονται κυρίως για χαλκό, χαλκό-σίδηρο και ψευδάργυρο-μόλυβδο με τοπικά σημαντικά παραπροϊόντα μολυβδαίνιο, χρυσό και άργυρο.

Κατά τη μετάβαση στα μετέπειτα στάδια της υποβύθισης, το μαγματικό τόξο διευρύνεται ή μεταναστεύει στην ενδοχώρα. Τα πυριγενή που διεισδύουν μπορεί να είναι I ή S τύπου και σύμφωνα με ισοτοπικά στοιχεία (Takahashi et al. 1980) θεωρείται ότι έχουν αλληλοεπιδράσει με τον ηπειρωτικό φλοιό σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι τα προηγούμενα μάγματα.

Τα μάγματα I τύπου είναι σύστασης μεταξύ χαλαζιακού μονζονίτη ως γρανίτη και σχετίζονται με skarn που περιέχουν κυρίως βολφράμιο ή μολυβδαίνιο με μεγάλες ποσότητες χαλκού και ψευδάργυρου και λιγότερα ποσά βισμούθιου, μόλυβδου, αργύρου, χρυσού.

Τα S τύπου μάγματα που σχετίζονται με αυτό το τελευταίο ορογενετικό στάδιο είναι γρανιτικής σύστασης. Ηφαιστειακά πετρώματα που συνδέονται με αυτά ή εκτεταμένη μεταμορφική άλω είναι σπάνια. Τα skarn που σχετίζονται με αυτά τα μάγματα εξορύσσονται κυρίως για τον κασσίτερο αλλά μπορεί να περιέχουν και άλλα οικονομικής σημασίας στοιχεία όπως βηρύλλιο, βόριο, φθόριο, βισμούθιο, βολφράμιο, χαλκό, ψευδάργυρο, μόλυβδο και ουράνιο.



### 2.3 Βάθος σχηματισμού

Το βάθος σχηματισμού των skarn είναι ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει το μέγεθος, τη γεωμετρία και το είδος της τροποποίησης. Η επίδραση του βάθους στη μεταμόρφωση είναι ένας παράγοντας που σχετίζεται με τη θερμοκρασία των περιβαλλόντων πετρωμάτων πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διείσδυση. Υποθέτοντας ότι η μέση τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας σε ορογενετική ζώνη είναι περίπου 35°C ανά χιλιόμετρο (Blackwell and al. 1990) η θερμοκρασία των περιβαλλόντων πετρωμάτων στα 2 χιλιόμετρα θα είναι περίπου 70°C πριν τη διείσδυση. Με τη ροή θερμότητας που παρέχεται από την πυριγενή δραστηριότητα ο όγκος των πετρωμάτων που επηρεάζεται από θερμοκρασίες μεταξύ 400-700°C είναι μεγαλύτερος και η επίδραση διαρκεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα όταν περιβάλουν βαθύτερα παρά ρηχά skarn. Επιπλέον οι υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος πετρώματος επηρεάζουν την πορεία κρυστάλλωσης του πλουτωνίτη και μειώνουν το βαθμό της ανάδρομης μετασώματωσης των ορυκτών. Σε βάθος 12 χιλιομέτρων με τις θερμοκρασίες των περιβαλλόντων πετρωμάτων να είναι περίπου στους 400°C το skarn δεν ψύχεται κάτω από το πεδίο σταθερότητας του γρανάτη και του πυρόξενου χωρίς να συμβεί επακόλουθη ανύψωση ή κάποια άλλη τεκτονική μεταβολή.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι το βάθος όπου σχηματίζεται το skarn επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος ξενιστή.

Στα μεγάλα βάθη τα πετρώματα παραμορφώνονται περισσότερο πλαστικά. Η επαφή που δημιουργείται από τη διείσδυση του πυριγενούς πετρώματος σε ιζηματογενή πετρώματα είναι υποπαράλληλη με τη στρώση, είτε ο πλουτωνίτης διεισδύει κατά το επίπεδο της στρώσης είτε το ιζηματογενές πέτρωμα πτυχώνεται μέχρι να ευθυγραμμιστεί με το πυριγενές. Γενικά, στις περιπτώσεις σχηματισμού skarn σε μεγάλα βάθη, το skarn διακρίνεται ως στενό περίβλημα μικρού μεγέθους σε σχέση με τον πλουτωνίτη και την μεταμορφική του άλω.

Αντίθετα στα μικρά βάθη τα πετρώματα θραύονται και η παραμόρφωση είναι συνήθως θραυσιγενής. Στα περισσότερα skarn που σχηματίζονται σε μικρά βάθη και αναφέρονται από τον Einaudi (1982) παρατηρείται ότι το πέτρωμα που διεισδύει είναι ασύμφωνο με τη στρώση του ιζηματογενούς. Το skarn σε αυτήν την περίπτωση κόβει τη στρώση, αντικαθιστά κάποια στρώματα και ξεπερνά σε μέγεθος την εμφάνιση του πλουτωνίτη με τον οποίο σχετίζεται. Επιπλέον χαρακτηριστικό στα ρηχά περιβάλλοντα είναι ότι λόγω υδραυλικής θραύσης αυξάνει η περατότητα των πετρωμάτων όχι μόνο για τα μετασωματικά ρευστά των πυριγενών πετρωμάτων, αλλά και για το ψυχρότερο μετεωρικό νερό στη συνέχεια. Η επιρροή του μετεωρικού νερού που οδηγεί στην καταστροφή των αρχικών ορυκτών του skarn κατά την ανάδρομη μετασώματωση είναι ένα από τα πιο ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των skarn που σχηματίζονται σε ρηχά περιβάλλοντα.

### 3. Τύποι skarn

Για την ταξινόμηση των κοιτασμάτων τύπου skarn μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα χαρακτηριστικά τους, όπως η σύσταση του πρωτόλιθου, ο τύπος του πετρώματος, τα κύρια οικονομικά μέταλλα ή γενετικά χαρακτηριστικά όπως ο μηχανισμός κίνησης των ρευστών, η θερμοκρασία σχηματισμού και η έκταση εμπλοκής του μαγματικού όγκου. Πιο σύγχρονος τρόπος κατάταξης είναι τα βασικά τους οικονομικώς εκμεταλλεύσιμα μέταλλα. Οι κύριοι τύποι skarn είναι αυτοί που εξορύσσονται για ορυκτά του σιδήρου, βολφραμίου, χαλκού, ψευδαργύρου-μολύβδου, μολυβδαίνιου και κασσίτερου (Einaudi et al. 1981) αλλά υπάρχει και ένας έβδομος τύπος το skarn χρυσού (Meinert, 1992).

#### 3.1 Κοιτάσματα skarn σιδήρου

Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα skarn είναι αυτού του τύπου και κατά την εξόρυξή τους λαμβάνεται κυρίως μαγνητίτης. Αν και μπορεί να υπάρχουν μικρότερες ποσότητες άλλων στοιχείων όπως χαλκός, κοβάλτιο, νικέλιο και χρυσός το πιο σημαντικό στοιχείο απόληψης για αυτόν τον τύπο skarn είναι ο σίδηρος (Grigoryev et al. 1990). Γενικά είναι μεγάλου μεγέθους κοιτάσματα (περιεκτικότητα 40-300 εκατομμύρια τόνοι σιδήρου) εντοπίζονται όμως και μικρότερα (2-10 εκατομμύρια τόνοι σιδήρου) με κύριο ορυκτό τον μαγνητίτη και πολύ μικρή ποσότητα πυριτικού στείρου υλικού. Υπάρχουν δύο συγκεκριμένα περιβάλλοντα που δίνουν skarn με κύριο ορυκτό τον μαγνητίτη:

##### 3.1.1 Ασβεστούχα κοιτάσματα skarn μαγνητίτη σε περιβάλλον νησιώτικου τόξου

Σχετίζονται κυρίως με πλουτωνίτες πλούσιους σε σίδηρο που διεισδύουν σε ασβεστόλιθους και ηφαιστειακά πετρώματα. Χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτής της κατηγορίας skarn που τα διαχωρίζουν από άλλους τύπους με μαγνητίτη είναι η σύνδεσή τους με γάββρους και διορίτες σε ηφαιστειο-ιζηματογενείς ακολουθίες, ο μεγάλος όγκος σχηματιζόμενου ένδο-skarn που πολλές φορές ξεπερνάει το έξω-skarn, η παρουσία εκτενούς Na-μετασώματωσης και οι ανώμαλες συγκεντρώσεις κοβαλτίου και μερικές φορές νικελίου.

Τα πιο συνηθισμένα ηφαιστειακά πετρώματα που συναντώνται στο σχηματισμό τέτοιου τύπου skarn είναι ροές ανδεσίτη ή βασάλτη και τόφφοι ενστρωματωμένοι με ψαμμίτες, γραουβάκες, σχιστοπυλούς και μάργες. Τα πυριγενή πετρώματα ποικίλουν από γάββρο μέχρι γρανοδιορίτη με λιγοστά αλκαλικά πετρώματα όπως πλαγιογρανίτες και πλαγιοσηνίτες. Ο διορίτης είναι συνήθως ο πιο κοινός πετρογραφικός τύπος που συνδέεται με το σχηματισμό skarn στην επαφή με ασβεστόλιθο.

Χαρακτηριστικό σε αυτά τα skarn είναι είτε η εκτεταμένη μετασώματωση των πυριγενών πετρωμάτων στα οποία αναπτύσσεται ένδο-skarn που περιέχει μαγνητίτη και συνοδεύεται από επίδοτο, πυρόξενο και γρανάτη είτε η Na- μετασώματωση των



ηφαιστειακών και τον πλουτωνικών πετρωμάτων. Στη δεύτερη περίπτωση ο μαγνητίτης συνοδεύεται από αλβίτη και σκαπόλιθο.

Στα ασβεστοπυριτικά ορυκτά αυτής της κατηγορίας η ζώνωση είναι φτωχή και δύσκολη στην αναγνώριση. Τα πιο χαρακτηριστικά πυριτικά ορυκτά περιλαμβάνουν γρανάτη, πυρόξενο και επίδοτο, με το τελευταίο να είναι πιο σύνηθες στα πυριγενή που έχουν υποστεί μετασώματωση. Επίσης ο γρανάτης που συνδέεται με μαγνητίτη εντοπίζεται κυρίως στον ασβεστόλιθο που έχει αντικατασταθεί.

Στην επαφή του ασβεστόλιθου με το πυριγενές, όπου το κοίτασμα σχηματίζεται μέσα στον ασβεστόλιθο, η ζώνωση ακολουθεί ένα μοτίβο: ένα ένδο-skarn με επίδοτο και πυρόξενο, έξω-skarn με γρανάτη και πυρόξενο που συνοδεύεται από μαγνητίτη και μία τελευταία ζώνη έξω-skarn με πυρόξενο και σουλφίδια.

Οι χημικές αναλύσεις στα ασβεστούχα skarn με μαγνητίτη έχουν δείξει ότι οι γρανάτες και οι πυρόξενοι που περιέχονται σε αυτούς είναι πλούσιοι σε σίδηρο και συγκεκριμένα οι πρώτοι έχουν σύσταση γροσσουλάριου-ανδραδίτη με 20 ως 95 mole % ανδραδίτη ενώ οι δεύτεροι έχουν σύσταση διοψίδιου-εδενβεργίτη με 20 ως 80 mole % εδενβεργίτη (Tsusue 1961, Haug 1976). Χαρακτηριστικά ορυκτά ανάδρομης μεταμόρφωσης αποτελούν ο ακτινόλιθος, ο χλωρίτης, ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας.

### 3.1.2 Μαγνησιούχα κοιτάσματα skarn μαγνητίτη τύπου Κορδιλιέρας

Στις ορογενετικές ζώνες τύπου Κορδιλιέρα παρατηρείται ο σχηματισμός μαγνησιούχων skarn που περιέχουν μαγνητίτη. Οι πλουτωνίτες που συμβάλουν στο σχηματισμό τους είναι συνήθως πετρώματα με σύσταση χαλαζιακού μονζονίτη ή γρανοδιορίτη και πολύ σπάνια γρανίτη και τα περιβάλλοντα πετρώματα αποκλειστικά δολομίτες. Η ευκολία στο σχηματισμό του μαγνητίτη σε αυτά τα skarn οφείλεται στο γεγονός ότι τα μαγνησιούχα ασβεστοπυριτικά ορυκτά που περιέχουν, όπως ο φορστερίτης, ο τάλκης και ο σερπεντίνης δεν απορροφούν σίδηρο κατά τα οξειδωτικά στάδια σχηματισμού του skarn κι έτσι ο σίδηρος είναι διαθέσιμος για το σχηματισμό μαγνητίτη. Στα πυριγενή πετρώματα το ένδο-skarn είναι περιορισμένο ενώ η μετασώματωση των πλουτωνιτών, εάν υπάρχει, περιλαμβάνει άστριους, χλωρίτη και λίγο επίδοτο.

Στο αρχικό στάδιο σχηματισμού του skarn όπου η θερμοκρασία είναι υψηλή υπάρχει δημιουργία διοψίδιου-σπινέλιου κοντά στον πλουτωνίτη και φορστερίτη-ασβεστίτη κοντά στο δολομίτη. Στα τελευταία στάδια περιλαμβάνονται ορυκτά της ομάδας του χουμίτη, φλογοπίτη, σερπεντίνη, βοριούχα ορυκτά που συνοδεύονται από μαγνητίτη.

## 3.2 Κοιτάσματα skarn βολφραμίου

Τα κοιτάσματα skarn βολφραμίου συναντώνται στις περισσότερες περιπτώσεις συνδεδεμένα με ασβεσταλκαλικούς πλουτωνίτες στις κύριες ορογενετικές ζώνες. Πιο συγκεκριμένα οι πλουτωνίτες που σχετίζονται με αυτά τα κοιτάσματα είναι αδρόκοκκοι με ισομεγέθεις κρυστάλλους βαθύλιθοι με απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες. Συνήθως συνοδεύονται από μεταμορφική άλω μεγάλης θερμοκρασίας. Αυτά

τα χαρακτηριστικά δείχνουν μεγαλύτερο βάθος σχηματισμού από τους πλουτωνίτες που συνδέονται με μεταλλοφορία πορφυριτικού χαλκού.

Η μετασώματωση των πλουτωνιτών είναι περιορισμένη και εντοπίζεται σε στενές ζώνες ενδοσκάρν που περιέχουν κλινοπυρόξενο, επίδοτο και πλαγιόκλαστο ή σε άλλες περιπτώσεις μυρμηκίτη. Σε μερικές περιπτώσεις παρατηρείται στα πυριγενή εξαλλοίωση με μοσχοβίτη (ή βιοτίτη), χαλαζία και σιδηροπυρίτη στα δίπλα σε ζώνες ανάδρομης μετασώματωσης του skarn.

Τα κοιτάσματα skarn βολφραμίου εμφανίζονται κυρίως σε αργιλούχα ανθρακικά και παρεμβολές ανθρακικών-πηλιτικών ή ανθρακικών-ηφαιστειακών ακολουθιών. Το κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις το πέτρωμα ξενιστής είναι εξαιρετικά ανθρακικό και αυτό δείχνει χαμηλό στάδιο οξειδωσης του περιβάλλοντος σχηματισμού (Dick 1976; Shimazaki 1980).

Η μεταμόρφωση μη αμιγών ασβεστολίθων από την επίδραση πυριγενών όγκων έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό ασβεστοπυριτικών ορυκτών φτωχών σε σίδηρο μαζί με πλούσιο σε σίδηρο skarn που περιέχει σχεελίτη, είναι χαρακτηριστικό σε περιοχές με skarn βολφραμίου. Αυτά τα χαμηλού βαθμού ή στείρα σε βολφράμιο πετρώματα έχουν σημασία καθώς βρίσκονται ανάμεσα σε skarn βολφραμίου και δυσκολεύουν την εξόρυξη. Για την προέλευση αυτών των ασβεστοπυριτικών πετρωμάτων υπάρχουν διάφορες απόψεις.

Ο Bateman (1965) θεωρεί ότι προέκυψαν από μεταμορφική ανακρυστάλλωση με παράλληλη καταστροφή του ασβεστιτικού υλικού. Έτσι μεταξύ του μαρμάρου και του skarn δημιουργείται μία ζώνη απεμπλουτισμένου και πυριτιωμένου μαρμάρου.

Ο Gray και άλλοι (1968) θεωρούν ότι η προέλευση αυτών των πετρωμάτων είναι μετασωματική και τα ονομάζουν ασβεστοπυριτικά πετρώματα.

Το γεγονός ότι τα αμιγή μάρμαρα δεν εμφανίζουν τέτοια φτωχά σε σίδηρο ασβεστοπυριτικά ορυκτά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτά προήλθαν από προσμίξεις στο μάρμαρο.

Τα βολφραμιούχα skarn είναι τις περισσότερες φορές σε μορφή στρωμάτων. Σε μερικές περιπτώσεις είναι συνεχή για εκατοντάδες μέτρα κατά μήκος των λιθολογικών επαφών αλλά το πάχος τους είναι μικρότερο από 15 μέτρα. Η μορφή φλεβών είναι σπάνια.

Επίσης, τα χαρακτηριστικά του skarn επηρεάζονται από το πέτρωμα στο οποίο σχηματίζονται. Στην περίπτωση που προέρχονται από μη αμιγή ή ασβεστοπυριτικά μάρμαρα τείνουν να είναι αδρόκοκκα, τραχιά και με άνισους βαθμούς βολφραμίου ενώ όταν προέρχονται από αμιγές μάρμαρο είναι μεσόκοκκα, συμπαγή και ο βαθμός του βολφραμίου ομοιόμορφος.

Η ορυκτολογία που παρουσιάζει είναι αποτέλεσμα της σύστασης του πετρώματος ξενιστή και το στάδιο οξειδωσης του πυριγενούς που διεισδύει και του περιβάλλοντος πετρώματος.

Σύμφωνα με τον Einaudi (1981) τα βολφραμιούχα skarn μπορούν να διαχωριστούν σε δύο τύπους, αναγωγικά και οξειδωτικά βάσει του πετρώματος ξενιστή, της ορυκτολογίας του skarn και το σχετικό βάθος σχηματισμού.

Πιο συγκεκριμένα, ο αναγωγικός τύπος σχηματίζεται σε ανθρακικό πέτρωμα ξενιστή, τα ορυκτά περιέχουν δισθενή σίδηρο και σχηματίζεται σε σχετικά μεγάλο

βάθος. Ορυκτολογικά περιέχει παραγενέσεις ορυκτών με δισθενή Fe, κυρίως εδενβεργίτικο πυρόξενο και λιγότερο γρανάτη συστάσεως γροσσουλάριου-ανδραδίτη (γρανδίτης) που συνδέεται με παουελίτη (σχεελίτη πλούσιο σε μολυβδαίνιο). Οι γρανάτες που σχηματίζονται αργότερα είναι υποαλκαλικοί (Newberry 1983) με σύσταση σπεςσαρτίνη και αλμανδίνη. Αυτοί συνδέονται με την έκπλυση του αρχικού σχεελίτη και την επαναπόθεσή του ως αδρόκοκκο σχεελίτη φτωχό σε μολυβδαίνιο. Επιπλέον εμφανίζονται σουλφίδια, όπως μαγνητοπυρίτης, μολυβδαινίτης, χαλκοπυρίτης, σφαλερίτης, αρσενοπυρίτης και ένυδρα ορυκτά, όπως βιοτίτης, κεροσίλβη και επίδοτο.

Από την άλλη, στον οξειδωτικό τύπο skarn η σύσταση του πετρώματος ξενιστή είναι αιματιτική, περιέχει τρισθενή σίδηρο και δημιουργείται σε μικρότερα βάθη. Ο ανδραδίτης είναι πιο άφθονος από τον πυρόξενο και ο σχεελίτης είναι φτωχός σε μολυβδαίνιο.

Επιπλέον στα skarn με βολφράμιο είναι κοινά ορισμένα ένυδρα ορυκτά, συγκεκριμένα κεροσίλβη, ακτινόλιθος, επίδοτο και βιοτίτης.

Οι μελέτες ρευστών και σταθερών ισοτόπων σε πολλά μέρη δείχνουν ότι ο σχηματισμός των ένυδρων αυτών ορυκτών συμβαίνει σε μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα αρχικά άνυδρα ορυκτά. Ενδεικτικές θερμοκρασίες για το αρχικό skarn είναι 600-500°C ενώ για την ανάδρομη μετασμάτωση κυμαίνονται μεταξύ 450-300°C. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βολφραμίου συνυπάρχουν με τις ανάδρομες συγκεντρώσεις όπου υπάρχουν άφθονα τιτανίτης και απατίτης. Η αφθονία τους δικαιολογείται από την διάσπαση του πυρόξενου και του γρανάτη κατά την ανάδρομη μετασμάτωση που δίνει μεγάλα ποσά ασβεστίου (Newberry 1980b).

Η ανάδρομη μετασμάτωση πολλές φορές κόβει το skarn και σχηματίζει συγκεντρώσεις χαμηλής θερμοκρασίας στο μέτωπο του μαρμάρου που περιέχει επίδοτο, χλωρίτη, ακτινόλιθο και ποίκιλες συγκεντρώσεις φθορίτη και σχεελίτη. Σουλφίδια είναι επίσης παρόντα και συγκεκριμένα χαλκοπυρίτης, μαγνητοπυρίτης και σιδηροπυρίτης κοντά στις επαφές με το πυριγενές.

### 3.3 Κοιτάσματα skarn με μολυβδαίνιο

Τα κοιτάσματα skarn που περιέχουν μολυβδαίνιο βρίσκονται σε πολλά μέρη του κόσμου και η δημιουργία τους συνδέεται με πλουτωνίτες πιο εξελιγμένους σε σχέση με άλλους τύπους skarn όπως του χαλκού και του βολφραμίου.

Οι πλουτωνίτες που σχετίζονται με αυτόν τον τύπο skarn είναι λευκοκρατικοί γρανίτες που μπορεί να περιέχουν 2-5% φεμικά ορυκτά (Pokalon 1977 και Sonnevil 1979).

Ορισμένα μολυβδαινιούχα skarn είναι πολυμεταλλικά και περιέχουν ποικιλία μετάλλων όπως μολυβδαίνιο, βολφράμιο, χαλκό και βισμούθιο ενώ τοπικά μπορεί να είναι μεγάλης σημασίας ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος, ο κασσίτερος και το ουράνιο. Σε αυτήν την κατηγορία skarn η εξόρυξη μπορεί να γίνει για πολλά μέταλλα.

Η ορυκτολογία τους περιλαμβάνει κυρίως εδενβεργίτικο πυρόξενο, γρανιτικό γρανάτη με λίγη περιεκτικότητα πυραλσπίτη και βολλαστονίτη. Τα ανάδρομα ορυκτά

μπορεί να είναι κερροσίλβη, ακτινολιθικός αμφίβολος, επίδοτο, φθορίτης και χλωρίτης.

Τα μεταλλικά ορυκτά σε αυτήν την κατηγορία είναι ο μολυβδαινίτης, ο σχεελίτης, ο χαλκοπυρίτης, ο βισμούθινης με λιγότερο σφαλερίτη και γαληνίτη.

Παρόμοια κοιτάσματα διαφέρουν από την παραπάνω κατηγορία σε ορισμένα χαρακτηριστικά. Δεν είναι πολυμεταλλικά αλλά περιέχουν σαν κύριο σουλφίδιο μόνο τον μολυβδαινίτη, οι φλέβες χαλαζία που περιέχουν μολυβδαινίτη περιέχονται τόσο μέσα στα ιζηματογενή όσο και στα πυριγενή πετρώματα και το φθόριο βρίσκεται ανώμαλα μέσα στα πυριτικά ορυκτά ή ως ορυκτό φθορίτης. Είναι επίσης μεγαλύτερα σε έκταση από τα πολυμεταλλικά skarn αλλά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για παραγωγή.

### 3.4 Κοιτάσματα skarn χαλκού

Τα κοιτάσματα skarn που περιέχουν χαλκό είναι ο πιο άφθονος τύπος παγκοσμίως. Περισσότερες αναλύσεις σε αυτά τα κοιτάσματα προέρχονται από τους Einaudi et al. (1981).

Το τεκτονικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται είναι ορογενετικές ζώνες υποβύθισης είτε ωκεάνιας είτε ηπειρωτικής πλάκας.

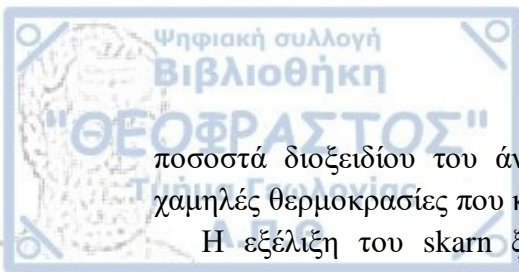
Η πλειοψηφία των κοιτασμάτων skarn που εξορύσσονται για χαλκό σχετίζονται με ασβεσταλκαλικούς γρανοδιορίτες μέχρι και χαλαζιακούς μονζονίτες που τοποθετήθηκαν σε ηπειρωτικές ορογενετικές ζώνες. Οι περιπτώσεις που βρίσκονται σε περιβάλλον νησιωτικού τόξου είναι λιγότερες και σχετίζονται με χαλαζιακούς διορίτες ή γρανοδιορίτες.

Όπως έχει παρατηρηθεί αυτή η ομάδα των skarn παρουσιάζει γενικά ζώνωση, τόσο στο χρώμα ορισμένων ορυκτών όσο και στην περιεκτικότητα του σε ορισμένα σουλφίδια και αναλογίες μετάλλων όσο αλλάζει η απόσταση από τον πλουτωνίτη. Σε σχέση με την ορυκτολογία πιο κοντά στον πυριγενή όγκο σχηματίζεται γρανατίτης (garnetite = μεταμορφωμένο πέτρωμα υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης που περιέχει πάνω από 75% γρανάτη). Όσο μεγαλώνει η απόσταση από το πυριγενές πέτρωμα αυξάνεται η συγκέντρωση των πυροξένων ενώ στην επαφή με το μάρμαρο εμφανίζεται βεζουβιανίτης και κάποιες φορές βολλαστονίτης.

#### 3.4.1 Skarn χαλκού που συνδέονται με πορφυριτικά πετρώματα

Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα χαλκού σε skarn συνδέονται με πορφυριτικούς πλουτωνίτες που διεισδύουν σε ανθρακικά πετρώματα. Οι εν λόγω πλουτωνίτες είναι υποηφαιστειακοί γρανοδιορίτες ως χαλαζιακοί μονζονίτες σε συστήματα. Τα πυριγενή πετρώματα αυτά είναι μικρά σε μέγεθος πολύ ρηγματωμένα και παρουσιάζουν λεπτόκοκκο πορφυριτικό ιστό γεγονός που δείχνει ρηχή τοποθέτηση. Η ρηγματώση αυξάνει τη διαπερατότητα με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η ροή ρευστών και η διαφυγή διοξειδίου του άνθρακα. Για αυτόν το λόγο τα συγκεκριμένα skarn έχουν μεγάλο πάχος. Σε αυτές τις συνθήκες υπό χαμηλή πίεση και μικρά





ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα ξεκινάει ο σχηματισμός του skarn σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 500° ως 350°C.

Η εξέλιξη του skarn ξεκινάει από μετασώματωση K-Si παράλληλα με την ορυκτογένεση σουλφιδίων του χαλκού - σιδήρου και αργότερα καταλήγει σε σερικιτική μετασώματωση.

Η πρώτη παρατηρείται στο αρχικό στάδιο ψύξης του μάγματος σε θερμοκρασίες 600° μέχρι 400°C. Η ορυκτολογία του skarn σε αυτήν τη φάση μπορεί να προβλεφθεί από τη λιθολογία του ανθρακικού ιζηματογενούς πετρώματος δηλαδή ανάλογα αν αυτό είναι ασβεστόλιθος ή δολομίτης.

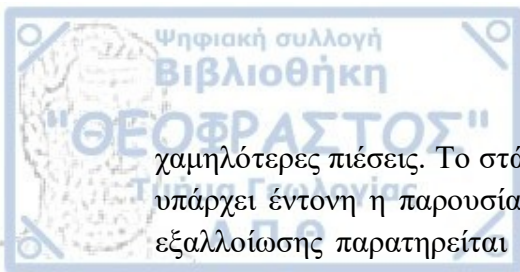
- Στην περίπτωση που το ιζηματογενές είναι ασβεστόλιθος δημιουργείται ασβεστούχο skarn. Τα πυριτικά ορυκτά που σχηματίζονται στην αρχή είναι γρανάτης, κλινοπυρόξενος και βολλαστονίτης τα οποία παρουσιάζουν ζώνωση ανάλογα με την απόσταση από το πυριγενές. Πιο συγκεκριμένα ο γρανάτης μαζί με μικρότερη ποσότητα κλινοπυρόξενου βρίσκεται κοντά στον πλουτωνίτη ενώ πιο εξωτερικά κοντά στο μάρμαρο κυριαρχεί ο βολλαστονίτης μαζί με μικρότερες ποσότητες γρανάτη, κλινοπυρόξενου και βεζουβιανίτη. Ο γρανάτης παρουσιάζει και σε αυτήν την περίπτωση χρωματική ζώνωση αφού κοντά στο πυριγενές έχει καστανοκόκκινο χρώμα ενώ όσο απομακρύνεται από αυτόν γίνεται πρασινωπός ειδικά όταν αντικαθιστά τον βολλαστονίτη.

Ο τύπος γρανάτη που κυριαρχεί είναι ο ανδραδίτης, λιγότερο γροσσουλάριος και αμελητέες μπορεί να είναι οι ποσότητες σπεςσαρτίνη και αλμανδίνη. Οι κλινοπυρόξενοι είναι κατά κύριο λόγο σύστασης διοψίδιου. Μπορεί σε ένα ποσοστό 15-35 mole% να υπάρχει εδενβεργίτης και ελάχιστος γιοχανσενίτης (johannsenite).

Τα σουλφίδια και τα οξειδία του σιδήρου σχηματίζονται σε ποσοστό 2-15% και 10% αντίστοιχα. Η μορφή τους μπορεί να είναι διάσπαρτη, σε φλέβες ή συμπαγής σε αντικατάσταση του μαρμάρου. Η ζώνωση που παρατηρείται είναι κοντά στον πλουτωνίτη, σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης και μαγνητίτης μαζί με ανδραδίτη και εξωτερικά, προς το ιζηματογενές, βορνίτης, χαλκοπυρίτης μαζί με βολλαστονίτη. Αυτή η μεταβολή όσο μεγαλώνει η απόσταση από το πυριγενές δείχνει γενικά την ελάττωση του σιδήρου.

- Όταν το ιζηματογενές είναι δολομίτης το skarn που σχηματίζεται είναι μαγνησιούχο αλλά αυτή η κατηγορία είναι μικρότερης σημασίας. Σχηματίζει κυρίως φορστερίτη, σερπεντίνη και τάλκη ορυκτολογία που δείχνει περιβάλλον με μειωμένο πυρίτιο. Ο φορστερίτης είναι γενικά ασταθές ορυκτό και μετατρέπεται σε σερπεντίνη. Αυτή η κατηγορία είναι πιο επιρρεπής στην ανάδρομη μετασώματωση σε σχέση με τα ανθρακικά της προηγούμενης κατηγορίας καθώς ο ανδραδίτης και ο διοψίδιος είναι πιο σταθερά ορυκτά στην επίδραση των πλούσιων σε νερό ρευστών και θερμοκρασίες άνω των 400°C. Επίσης περιέχει μεγάλες ποσότητες μαγνητίτη αλλά πολύ μικρή περιεκτικότητα σε σουλφίδια συνήθως κάτω από 6%.

Σε αυτήν την κατηγορία των skarn χαλκού που συνδέονται με πορφυριτικούς πλουτωνίτες είναι έντονη η ανάδρομη μετασώματωση που εκφράζεται κυρίως μέσω της σερικιτικής εξαλλοίωσης και επηρεάζει την πλειοψηφία αυτών των κοιτασμάτων. Αυτή η εξαλλοίωση συμβαίνει σε μικρότερες θερμοκρασίες, περίπου 300°C, και



χαμηλότερες πιέσεις. Το στάδιο της οξειδωσης και της σουλφιδίωσης είναι υψηλό και υπάρχει έντονη η παρουσία μετεωρικού νερού. Γενικά στην πορεία της ανάδρομης εξαλλοίωσης παρατηρείται ο σχηματισμός πυριτικών ένυδρων ορυκτών παράλληλα με την ελάττωση του ασβεστίου.

Τα ορυκτά με τη μεγαλύτερη αφθονία σε αυτό το στάδιο είναι ο τρεμολίτης και ο ακτινόλιθος. Επίσης μεγάλη είναι η περιεκτικότητα σε ανθρακικά ορυκτά, όπως ο ασβεστίτης και ο σιδηρίτης, και οι μορφές χαλαζία, χαλκηδόνιος ή οπάλιος όπως και η παρουσία οξειδίων του σιδήρου ή/και σουλφιδίων. Λιγότερο αλλά συχνά συναντώνται τάλκης, επίδοτο και χλωρίτης.

### **3.4.2 Διαφορές Πορφυριτικών και μη πορφυριτικών κοιτασμάτων skarn**

Οι δύο αυτές κατηγορίες skarn έχουν κοινά στοιχεία μεταξύ τους αλλά στα πορφυριτικά κάποια χαρακτηριστικά είναι μοναδικά και βοηθούν στον εντοπισμό και την εκμετάλλευσή τους.

Ως προς την κοκκομετρία, τα πορφυριτικά κοιτάσματα skarn λόγω της τεκτονικής και της έντονης υδροθερμικής δραστηριότητας καθώς και το ρηχό περιβάλλον σχηματισμού τους, ευνοούν τη γρήγορη απόθεση ορυκτών με αποτέλεσμα να έχουν λεπτόκοκκη υφή. Επιπλέον η ρηγμάτωση και θραύση των πετρωμάτων με τις πολλές φάσεις διεξόδου δημιουργούν χαρακτηριστικά πολύ πυκνά συστήματα φλεβών. Έντονη είναι και η μετασώματωση σε αυτά τα συστήματα καθώς η παρουσία υδροθερμικών συστημάτων πλούσια σε σουλφίδια λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική ορυκτολογία αλλάζει από ανθρακικά σε ένυδρα πυριτικά ορυκτά και τα ανθρακικά αντικαθίσταται από διοξείδιο του πυριτίου και σιδηροπυρίτη.

Αντίθετα, τα μη πορφυριτικά συστήματα είναι πιο απλά. Λόγω της έλλειψης έντονης ροής ρευστών και του σχηματισμού τους σε μεγαλύτερα βάθη μακριά από το πυριγενές σώμα, τα ορυκτά έχουν περισσότερο χρόνο να αναπτύξουν κρυστάλλους οπότε είναι γενικά πιο αδρόκοκκα. Επειδή η παραμόρφωσή τους δεν είναι έντονη και η κυκλοφορία ρευστών μικρότερη δεν σχηματίζουν φλέβες σε μεγάλο βαθμό όπως τα πορφυριτικά συστήματα. Η απουσία τεκτονικής μειώνει τη διαπερατότητα των πετρωμάτων και σε συνδυασμό με τη χαμηλή παρουσία νερού σε σχέση με τον όγκο των πετρωμάτων δεν ευνοείται την ανάδρομη μετασώματωση. Τέλος, η ορυκτολογία τους είναι πιο απλή. Στα αρχικά στάδια παρουσιάζουν ζώνες με αποκλειστικά ένα ορυκτό να κυριαρχεί ενώ τα τελευταία ορυκτά που σχηματίζονται όπως ο ασβεστίτης, ο χλωρίτης, ο χαλαζίας, ο σιδηροπυρίτης ή ο αιματίτης υπάρχουν σε κοιλότητες μέσα στον γρανατίτη, σε μικρές φλέβες ή στην επαφή κοντά στο πυριγενές.

### **3.5 Κοιτάσματα Skarn με κασσίτερο**

Τα κοιτάσματα skarn με κασσίτερο, όπως και τα περισσότερα κοιτάσματα κασσίτερου, συνδέονται με γρανιτικά πετρώματα που έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πυρίτιο και κάλιο από ότι οι μέσοι γρανίτες. Οι περισσότεροι

προέρχονται είτε από την τοποθέτηση τους στο τέλος του ορογενετικού κύκλου σε ηπειρωτικά τόξα είτε σε σχετικά σταθερά ή αρχικά τεκτονισμένα κρατονικά περιβάλλοντα. Σύμφωνα με τον Taylor (1979) το 80% των σημαντικής ή μέσης οικονομικής αξίας κοιτασμάτων με κασσίτερο βρίσκονται σε πτυχωμένες ζώνες ηλικίας Φανεροζωικού και σχετίζονται με μεταορογενετικούς γρανίτες. Τα χαρακτηριστικά που συνδέουν τους τύπους skarn Sn (Einaudi et al.) είναι δύο: τα ιχνοστοιχεία που περιέχονται στα ορυκτά, όπως Sn, F, B, Be, Li, W, Mo, Rb και τα πυριγενή πετρώματα με τα οποία σχετίζονται.

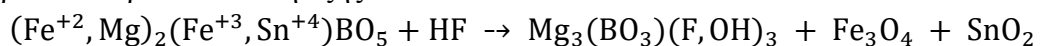
Ένας ακόμα τρόπος διαχωρισμού είναι η εμφάνιση σε πολλά skarn αυτού του είδους greisen μετασωμάτωσης που δεν υπάρχει σε κανέναν από τους άλλους τύπους (Kwak 1987). Επιδρά στη διείδυση, στο αρχικό skarn και τον ασβεστόλιθο και μπορεί να καταστρέψει τις προηγούμενες μορφές μετασωμάτωσης. Χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργότητα φθορίου και παρουσία ορυκτών όπως φθορίτης, τοπάζιο, μοσχοβίτης, τουρμαλίνης, γρουνερίτης, ιλμενίτης και πολύ χαλαζίας.

Ο κασσίτερος μπορεί να ενσωματώνεται στα ασβεστοπυριτικά ορυκτά όπως ο γρανάτης, ο βεζουβιανίτης και ο τιτανίτης και στην περίπτωση αυτή είναι μη ανακτήσιμος. Με την ανάδρομη μετασωμάτωση ή τη μετασωμάτωση greisen ο κασσίτερος απελευθερώνεται σχηματίζοντας σουλφίδια ή οξείδια.

Τα κοιτάσματα skarn με κασσίτερο μπορούν να χωριστούν με πολλά κριτήρια αλλά οι κατηγορίες δεν είναι αποκλειστικές. Ένας άλλος τρόπος διαχωρισμού τους είναι σε μαγνησιούχα και ασβεστιτικά skarn.

### 3.5.1 Μαγνησιούχα skarn

Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές (Aleksandron 1974 και Nekrasov 1971) το αρχικό στάδιο σχηματισμού χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες και υδροθερμικά ρευστά που είναι ουδέτερα ως ελαφρώς αλκαλικά και σχηματίζονται ορυκτά όπως σπινέλιος, πυρόξενος, φορστερίτης και πιθανόν να υπάρχει ασβεστίτης. Αυτή η σειρά παρατηρείται από την επαφή του γρανίτη προς το μέτωπο του μάρμαρου και δεν περιέχει καθόλου βόριο, φθόριο ή κασσίτερο. Στη συνέχεια της κυκλοφορίας των ρευστών στο ενδιάμεσο στάδιο εμφανίζονται ορυκτά που περιέχουν κασσίτερο και βόριο. Η εσωτερικότερη ζώνη του πρόδρομου skarn εξαλλοιώνεται σε φλογοπίτη, μαγνητίτη και μαγνησιο-βορικά ορυκτά (ουλσίτη, λουντβιγκίτη, κοτοΐτη). Ο κασσίτερος βρίσκεται στο μαγνητίτη, στα βορικά ορυκτά και σε περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχει χαλαζίας (Burt 1978). Στο τελευταίο στάδιο που το περιβάλλον είναι όξινο, τα υδροθερμικά ρευστά απελευθερώνουν τον κασσίτερο από τα βορικά ορυκτά και σχηματίζονται κασσιτερίτης, φθοροβορίτης, μαγνητίτης και μαρμαρυγίες. Η χημική αντίδραση από λουντβιγκίτη με κασσίτερο που διασπάται και δίνει τα παραπάνω ορυκτά είναι η εξής:



Τα μαγνησιούχα skarn περιέχουν μικρότερα ποσοστά σουλφιδίων και περισσότερο βόριο σε σχέση με τα ασβεστιτικά skarn.

### 3.5.2 Επικάλυψη μαγνησιούχων skarn από ασβεστιτικά

Σε πολλές περιπτώσεις εμφανίσεων κοιτασμάτων skarn με κασσίτερο σε δολομίτες, η εξέλιξη των ρευστών σε μεγάλες ως ενδιάμεσες θερμοκρασίες ακολουθεί μια διαδικασία κατά την οποία αυξάνει το ασβέστιο και ο σίδηρος ενώ μειώνεται η περιεκτικότητα σε μαγνήσιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα skarn κασσίτερου σε δολομίτες να καλύπτονται από ασβεστιτικά skarn που περιορίζουν ή εξαφανίζουν το στάδιο κασσίτερου-βόριου.

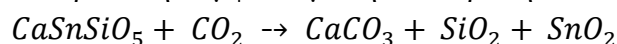
Αρχικά τα ορυκτά που προϋπήρχαν, όπως σπινέλιος-φορστερίτης ή πυρόξενος-φλογοπίτης αντιδρούν με ρευστά πλούσια σε ασβέστιο, πυρίτιο και σίδηρο με αποτέλεσμα τον σχηματισμό βεζουβιανίτη και μαγνητίτη. Όσο μειώνεται το μαγνήσιο στο skarn αρχίζει να εμφανίζεται ανδραδίτης, ο οποίος περιέχει κασσίτερο. Κατά την εξέλιξη των ρευστών σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και πιο όξινες συστάσεις σχηματίζονται διαφορετικά ορυκτά από αυτά των μαγνησιούχων skarn λόγω της αλλαγής της συνολικής σύστασης του πετρώματος. Τα μαγνησιούχα βορικά ορυκτά απουσιάζουν και επιπλέον, η περιεκτικότητα σε ασβεστοβορικά ή βοριοπυριτικά ορυκτά είναι μικρότερη από τα καθαρά ασβεστιτικά skarn. Τα ορυκτά στα οποία υπάρχει βόριο είναι ο αξινίτης και ο τουρμαλίνης που συνυπάρχουν με αμφίβολο και λιγότερο με κασσιτερίτη και σουλφίδια. Το κύριο μεταλλογενετικό στάδιο περιλαμβάνει το σχηματισμό κασσιτερίτη, φθορίτη, χαλαζία και σουλφιδίων που αντικαθιστούν τους γρανάτες, ενώ ο κασσίτερος απελευθερώνεται από αυτούς. Τα σουλφίδια, όπως ο αρσενοπυρίτης, ο μαγνητοπυρίτης, ο σταννίτης, ο λοελινγκίτης, ο σφαλερίτης και ο γαληνίτης έπονται του κύριου σταδίου του κασσιτερίτη και δείχνουν γενικά χαμηλή θείωση.

### 3.5.3 Ασβεστιτικά skarn

Τα skarn με κασσίτερο μέσα στον ασβεστόλιθο είναι εκτενή και υπάρχουν σε πολλές χώρες. Όμως σε κάποιες περιπτώσεις ο κασσίτερος βρίσκεται μέσα στα ασβεστοπυριτικά ορυκτά όπως ο ανδραδίτης και ο μαλαυίτης ( $\text{CaSnSiO}_5$ ). Σε αυτήν τη δεύτερη κατηγορία φαίνεται πόσο σημαντική είναι η ανάδρομη μεταμόρφωση για να απελευθερωθεί ο κασσιτερίτης από τα πυριτικά ορυκτά.

Το αρχικό στάδιο περιλαμβάνει είτε την υψηλού ποσοστού ασβεστίου παραγένεση ανδραδίτη-βollaστονίτη είτε βεζουβιανίτη-μαγνητίτη-φθορίτη σε αντικατάσταση του μάρμαρου. Αυτό το στάδιο στα περισσότερα skarn αυτής της κατηγορίας δεν περιέχει κασσιτερίτη. Ο κασσίτερος βρίσκεται στον ανδραδίτη ή πιο σπάνια στον αξινίτη, στο μαγνητίτη ή στην αμφίβολο.

Στα επόμενα στάδια ο κασσίτερος μπορεί να βρεθεί στον μαλαυίτη που συνήθως συνοδεύεται από ντανμπουρίτη (danburite) ένα βοριοπυριτικό ορυκτό. Ο μαλαυίτης είναι σταθερός σε υψηλές θερμοκρασίες και βασικά περιβάλλοντα και συνυπάρχει συχνά με βollaστονίτη (Burt, 1978). Όταν η θερμοκρασία πέφτει και το περιβάλλον γίνεται όξινο συμβαίνει η διάσπαση του ανδραδίτη και του μαλαυίτη σε κασσιτερίτη, φθορίτη, χαλαζία και ασβεστίτη σύμφωνα με την αντίδραση:





Σε αυτό το στάδιο σχηματίζονται τα χαμηλού βαθμού σουλφίδια, όπως ο μαγνητοπυρίτης και ο αρσеноπυρίτης ενώ πιο σπάνια ο λοελλινγκίτης, ο σφαλερίτης και ο βορνίτης.

Σε ζώνες με βεζουβιανίτη, γρανάτη και μαγνητίτη στα τελευταία στάδια η εξαλλοίωση μέσα σε φλέβες και διατμήσεις παράγει φθορίτη, αμφίβολο, φλογοπίτη και μαγνητίτη που συνοδεύονται από μαγνητοπυρίτη και σφαλερίτη. Ορυκτά του βορίου περιλαμβάνουν ασβεστοβορίτη, ντατόλιθο, αξινίτη και τουρμαλίνη ενώ δεν υπάρχουν αντίστοιχα σιδηρομαγνησιούχα ορυκτά.

Σε πολλά κοιτάσματα αυτό το στάδιο παρουσιάζει μετασώματωση τύπου greisen (Nekrasov, 1971). Χαρακτηριστικά αυτού του τύπου μετασώματωσης είναι οι φλέβες μοσχοβίτη και φθορίτη με μικρές ποσότητες από χαλαζία, τουρμαλίνη, τοπάζιο, βασικά σουλφίδια και κασσιτερίτης. Σε περιοχές που εκτείνεται περισσότερο η μετασώματωση greisen σχηματίζει φθορίτη με σπάνια στοιχεία (π.χ. βόριο, βηρύλλιο, κασσίτερο) μέσα σε ασβεστόλιθο.

Τα τελευταία στάδια χαρακτηρίζονται από τον Nekrasov (1971) από χλωρίτη-χαλαζία με κασσιτερίτη, μετά αρσеноπυρίτη-μαγνητοπυρίτη και τέλος σφαλερίτη, χαλκοπυρίτη, σταννίτη, σιδηρίτη, βισμούθινη και γαληνίτη.

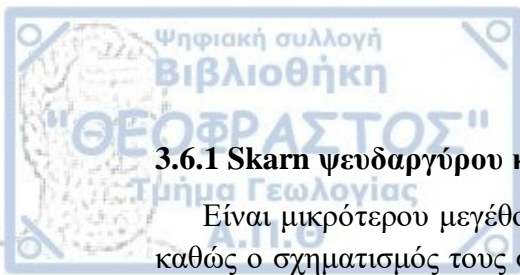
### 3.6 Zn κοιτάσματα Skarn

Τα skarn αυτής της κατηγορίας εντοπίζονται κυρίως σε ηπειρωτικά περιθώρια που σχετίζονται είτε με υποβύθιση είτε με ηπειρωτική διάρρηξη. Εξορύσσονται για την περιεκτικότητά τους σε ψευδάργυρο που είναι κυρίαρχος αλλά και για μόλυβδο και άργυρο.

Τα πυριγενή που συμμετέχουν στο σχηματισμό τους έχουν μεγάλο εύρος σύστασης από γρανοδιορίτες μέχρι λευκογρανίτες. Με βάση τον ιστό τους κυμαίνονται από ισόκοκκους και ολοκρυσταλλικούς βαθύλιθους μέχρι υποηφαιστειακά πορφυριτικά πετρώματα και φλέβες, αφαντικές ρυολιθικές φλέβες και λατυποπαγείς χοάνες. Κάποιες φορές σε αυτήν την κατηγορία skarn δεν μπορεί να βρεθεί η μαγματική πηγή που συνδέεται με το σχηματισμό τους.

Ξεχωρίζουν από τα άλλα skarn λόγω της ιδιαίτερης ορυκτολογίας τους σε μαγγάνιο και σίδηρο, την παρουσία τους κατά μήκος δομικών και λιθολογικών επαφών, την απουσία σημαντικής μεταμορφικής ζώνης επαφής. Χαρακτηρίζεται από ορυκτά πλούσια με μαγγάνιο συμπεριλαμβανομένου γρανάτη, πυρόξενου, ολιβίνη, ιλβαΐτη (ilvaite), πυροξενοειδή, αμφίβολο, χλωρίτη και σερπεντίνη.

Όλα τα παραπάνω ξεχωρίζουν τα κοιτάσματα skarn ψευδαργύρου - μόλυβδου από τις υπόλοιπες κατηγορίες. Όμως η παρουσία τους περιφερειακά και γενικά μακριά από τη μαγματική πηγή είναι το χαρακτηριστικό με το οποίο γίνεται κυρίως η ταξινόμηση τους.



### 3.6.1 Skarn ψευδαργύρου κοντά σε βαθύλιθους

Είναι μικρότερου μεγέθους και πιο φτωχά σε μαγγάνιο από τις άλλες κατηγορίες καθώς ο σχηματισμός τους συμβαίνει σε μεγαλύτερα βάθη. Κυρίαρχο ορυκτό είναι ο πυρόξενος, πιο συγκεκριμένα ο εδενβεργίτης και λιγότερο ο γιοχανσενίτης. Τα σουλφίδια δεν υπάρχουν σε σημαντικές ποσότητες στον ασβεστόλιθο έξω από το skarn.

### 3.6.2 Skarn ψευδαργύρου κοντά σε φλέβες

Είναι skarn που σχηματίζονται στην επαφή με μικρότερου μεγέθους πυριγενή πετρώματα. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη έκταση ένδο-skarn με επίδοτο, αμφίβολο και χλωρίτη, ενώ μπορούν να υπάρχουν ροδονίτης και φλέβες γρανάτη-βεζουβιανίτη. Από τα υδροθερμικά ρευστά συμβαίνει εξαλλοίωση K-Si στο πυριγενές που όμως κάποιες φορές εξαπλώνεται πέρα από το ένδο-skarn.

Η ζώνη του skarn σχηματίζεται σε ρήγματα, επαφές πετρωμάτων ή φλέβες. Το κύριο ασβεστοπυριτικό ορυκτό είναι κλινοπυρόξενος πλούσιος σε μαγγάνιο που σχετίζεται με σφαλερίτη, ενώ σε μικρότερες ποσότητες βρίσκεται ο γρανάτης.

Επίσης παρατηρείται ζώνωση των κύριων πυριτικών ορυκτών και των σουλφιδίων. Κοντά στην πηγή της μετασώματωσης υπάρχει γρανάτης, μαγνητίτης και λιγότερο χαλκοπυρίτης ενώ μακριά από αυτήν πυρόξενος με σφαλερίτη (Schmitt, 1939). Σε άλλη περίπτωση παρατηρήθηκε ζώνωση από γρανάτη σε πυρόξενο και στη συνέχεια βουσταμίτης από τον πλουτωνίτη προς το μάρμαρο και αύξηση της αναλογίας γρανάτη/πυρόξενο και ψευδαργύρου/μολύβδου όσο αυξάνεται το βάθος (Yun 1979).

Υπάρχουν παραδείγματα σε αυτήν την κατηγορία όπου η μεταλλοφορία εμφανίζεται τόσο στον ασβεστόλιθο όσο και στο skarn. Η αντικατάσταση του ασβεστόλιθου από μεταλλοφορία συμβαίνει και πέρα από τα όρια του skarn από 1-10 μέτρα ή ακόμα και πολλά εκατοντάδες μέτρα μακριά από αυτό.

Η θερμοκρασία και η πίεση σχηματισμού προσδιορίζονται ανάλογα με τη μέθοδο και την τοποθεσία στην οποία βρίσκονται. Έχουν εντοπιστεί πιέσεις σχηματισμού βάσει στρωματογραφικών κριτηρίων στα 0,5 kb (Corsini, 1980). Από στοιχεία ρευστών εγκλεισμάτων σε άλλες περιοχές έχει εντοπιστεί παρόμοια πίεση στα 0,5 kb (Surles, 1978) αλλά από τις ιδιότητες της παραμόρφωσης των πετρωμάτων στην ίδια περιοχή έχει εκτιμηθεί πίεση στα 2 kb (Lehman, 1978). Η θερμοκρασία προσδιορίζεται με ρευστά εγκλείσματα από 550°-400°C μέχρι 490°-350°C.

Το θείο σε αυτά τα κοιτάσματα προέρχεται από τη μαγματική πηγή αλλά κάποιες φορές από στρώματα εβαποριτών (Corsini et al. 1980).

### 3.6.3 Skarn ψευδαργύρου κοντά σε φλέβες

Οι φλέβες κοντά στις οποίες εμφανίζονται τα skarn Zn αυτής της κατηγορίας έχουν σύσταση από γρανοδιορίτη ως ρυόλιθο. Όμως το μικρό μέγεθος των φλεβών (πάχος λιγότερο από 10 μέτρα) δεν μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη θέρμανση στα

γύρω πετρώματα ούτε να γίνει πηγή μεταφοράς συστατικών και επιπλέον το skarn παρατηρείται σε μεγάλες αποστάσεις από τις φλέβες μέσα σε ρήγματα ή λιθολογικές επαφές. Συμπεραίνεται από αυτά πως η πηγή της μετασώματωσης είναι πιο βαθιά από κάποιον πλουτωνίτη συγγενετικό με τις φλέβες.

Το ένδο-skarn μπορεί να εμφανίζεται με επίδοτο, γρανάτη-βεζουβιανίτη ή γρανάτη-πυρόξενο και σερικιτική, σερικιτική-αργιλική εξαλλοίωση ή εξαλλοίωση σερικίτη-τοπάζιου.

Το skarn υπάρχει κατά μήκος των φλεβών, σε ρήγματα και πολλές φορές πέρα από το skarn, εμφανίζεται εκτεταμένης αντικατάσταση του ασβεστόλιθου από σουλφίδια. Τα κύρια ορυκτά του skarn είναι ο πυρόξενος σε μορφή γιοχανσενίτη με παρουσία μπουστανίτη ενώ ο γρανάτης ως ανδραδίτης είναι πιο σπάνιος. Σε αυτά τα skarn η ζώνωση ξεκινάει από γρανάτη σε πυρόξενο και τέλος σε μπουστανίτη από τις φλέβες προς το μάρμαρο. Ο γρανάτης μπορεί να αυξάνει σε ποσότητα με το βάθος, καθώς και η περιεκτικότητά του σε μαγγάνιο και σίδηρο με το χρόνο, μαζί με τον πυρόξενο. Στα μέταλλα η ζώνωση με το βάθος ξεκινάει από μόλυβδο στη συνέχεια ψευδάργυρο-μόλυβδο και τέλος χαλκό-σίδηρο.

Στα ανάδρομα ορυκτά περιλαμβάνονται ο ροδονίτης, ο ιλβαΐτης, η αμφίβολος και ο χλωρίτης, όλα πλούσια σε μαγγάνιο.

#### **3.6.4 Zn Skarns από πιθανή ή άγνωστη μαγματική πηγή**

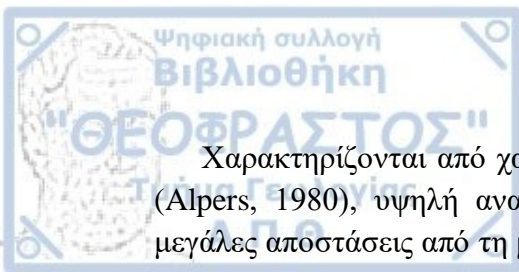
Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα skarn Zn που η μαγματική πηγή είναι πολλά χιλιόμετρα μακριά ή δεν είναι καθόλου εκτεθειμένη.

Τα βασικά ορυκτά είναι ο γιοχανσενίτης (πυρόξενος), βουστανίτης και βολλαστονίτης. Σε πολλές περιοχές παρατηρούνται μαγγανιούχα μέλη από κουμμινγκτονίτη και ιλβαΐτη μαζί με χλωρίτη, ενώ σε άλλες μαγγανιούχος μαμμινγκτονίτης με αξινίτη.

Ενδιαφέρον σε αυτήν την κατηγορία παρουσιάζει ο δρόμος που διασχίζουν τα διαλύματα ώστε να σχηματιστεί το skarn. Η μετακίνηση τους έχει ως επακόλουθο την ψύξη και την επιλεκτική αφαίρεση σχετικά αδιάλυτων στοιχείων πριν τον σχηματισμό του skarn, διεργασίες πολύ σημαντικές στην ανάπτυξη του skarn Zn-Pb (Meinert, 1980b)

#### **3.6.5 Ασβεστιτικά-φλεβικά κοιτάσματα με μαγγανιούχα ή ασβεστοπυριτωρικά ορυκτά**

Αυτή η κατηγορία δεν είναι skarn με την τυπική έννοια όμως περιέχουν, έστω σε μικρές ποσότητες ή ίχνη, μαγγανιούχα πυριτωρικά ορυκτά όμοια με τα skarn ψευδαργύρου-μόλυβδου και θεωρείται πως υπάρχει γενετική σύνδεση μεταξύ τους. Το πυριγενές πέτρωμα είναι ανδεσιτικές και πορφυριτικές φλέβες που διεισδύουν σε ασβεστολίθους. Μέσα σε ασβεστιτικές-χαλαζιακές-σουλφιδικές φλέβες συναντώνται ίχνη κνεμπεΐτη (knebeite) ή σε άλλες περιπτώσεις γιοχανσενίτη και μπουσταμίτη.



Χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες σχηματισμού περίπου στους 300°C (Alpers, 1980), υψηλή αναλογία σουλφίδια/πυριτικά και παρουσία τους σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τη μαγματική πηγή.

### 3.7 Κοιτάσματα Skarn χρυσού

Τα κοιτάσματα skarn με χρυσό δεν ήταν μέχρι πρόσφατα στις κύριες ομάδες των κοιτασμάτων skarn γιατί δεν είχαν μελετηθεί επαρκώς παρόλο που εξορύσσονται από τα τέλη του 19ου αιώνα.

Αυτά τα κοιτάσματα μπορεί να είναι μεγάλης περιεκτικότητας σε χρυσό (5-13 g/t) και εξορύσσονται μόνο για το πολύτιμο μεταλλικό περιεχόμενό τους. Δεν έχουν άλλα βασικά μέταλλα οικονομικής σημασίας.

Τα περισσότερα skarn υψηλής περιεκτικότητας σε χρυσό συνδέονται με διοριτικούς και γρανοδιοριτικούς πλουτωνίτες στους οποίους κύριο ορυκτό είναι οι πυρόξενοι πλούσιοι σε σίδηρο. Στις ζώνες κοντά σε αυτούς τους πλουτωνίτες τα συνήθη ορυκτά είναι γρανδίτης (γροσσουλάριος-ανδραδίτης) και επιπλέον καλιούχοι άστριοι, σκαπόλιθος, βεζουβιανίτης, απατίτης και υψηλού χλωρίου αργιλιούχα αμφίβολος. Η εξωτερική ζώνη του skarn αποτελείται από κερατίτες με βιοτίτη και καλιούχους άστριους και μπορεί να εκτείνεται εκατοντάδες μέτρα μακριά από την κύρια ζώνη του skarn. Λόγω της φύσης των ασβεστολιθικών ιζηματογενών πετρωμάτων σε αυτά τα κοιτάσματα τα περισσότερα skarn είναι σχετικά λεπτόκοκκα.

Από την άλλη, τα κοιτάσματα skarn με χρυσό που είναι μικρότερης περιεκτικότητας σε αυτόν (περίπου 0,01-1 g/t) περιέχουν και άλλα μέταλλα σε σημαντικές ποσότητες που είναι και οικονομικής σημασίας. Κάποια από αυτά είναι ο χαλκός, ο μόλυβδος και ο ψευδάργυρος. Είναι επίσης περισσότερο οξειδωτικά κοιτάσματα.

Ο χρυσός μπορεί να εξορυχθεί και από άλλα κοιτάσματα skarn. Αυτά είναι είτε κάποια skarn χαλκού που περιέχουν τον χρυσό σαν υποπροϊόν σε ποσότητες 0.01-1 g/τείτε από κάποια άλλα κοιτάσματα skarn που παρόλο που έχουν σε κάποιο βαθμό μεταλλικό περιεχόμενο εξορύσσονται αποκλειστικά για την περιεκτικότητά τους σε χρυσό.

#### 4. Εξελικτικά στάδια και διεργασίες

Όλα τα κοιτάσματα skarn πέρα από τις διαφορές βάση των οποίων χωρίζονται σε κατηγορίες, έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό πως η εξέλιξη τους είναι παράλληλη με την τοποθέτηση και την ψύξη ενός πυριγενούς πετρώματος με το οποίο συνδέονται. Υπάρχει ένα κοινό μοτίβο σταδίων που διαδέχεται το ένα το άλλο κατά την εξέλιξή τους:

- Ισοθερμική μεταμόρφωση επαφής συνοδευόμενη από την τοποθέτηση του μάγματος.
- Μετασωμάτωση-σχηματισμός του skarn συνοδευόμενη από την κρυστάλλωση του μάγματος και την εξέλιξη ενός μεταλλοφόρου ρευστού.
- Ανάδρομη εξαλλοίωση συνοδευόμενη με την τελική ψύξη όλου του συστήματος.

Η εξέλιξη του κάθε σταδίου εξαρτάται από το γεωτεκτονικό περιβάλλον, καθώς και την ορυκτολογία και τις μεταλλικές παραγενέσεις του skarn.

##### 4.1 Μεταμόρφωση επαφής

Η μεταμόρφωση επαφής συμβαίνει όταν το μάγμα ανεβαίνει σε ανώτερα τμήματα του φλοιού και έρχεται σε επαφή με διάφορα πετρώματα. Συχνά σχηματίζεται θερμική άλως που σε βαθιά περιβάλλοντα μπορεί να εκτείνεται πολλά χιλιόμετρα πέρα από την επαφή, ενώ η αντίστοιχη μεταμόρφωση στα πιο ρηχά υποηφαιστειακά περιβάλλοντα είναι λιγότερο εκτενής.

Κατά τη μεταμόρφωση απουσιάζουν τα μεταλλικά ορυκτά. Όμως είναι απαραίτητο σαν στάδιο για να σχηματιστούν αργότερα συγκεντρώσεις μεταλλευμάτων, καθώς κατά την τοποθέτηση του μάγματος σχηματίζονται ρωγμές στα περιβάλλοντα πετρώματα ή αυξάνεται το πορώδες τους από την απώλεια πτητικών στοιχείων.

Τα ιζηματογενή που έρχονται σε επαφή με τους πλουτωνίτες μπορεί να είναι μη αμιγείς ασβεστόλιθοι, ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, ψαμμίτες και σε αυτές τις περιπτώσεις τα ασβεστοπυριτικά ορυκτά που σχηματίζονται κατά τη μεταμόρφωση αποτελούν μεγάλο μέρος του skarn. Γενικά, η σύσταση που έχει ο πρωτόλιθος, δηλαδή το ιζηματογενές, επηρεάζει τη σύσταση των ορυκτών που θα σχηματιστούν κατά τη μεταμόρφωση. Για παράδειγμα, αν οι προσμίξεις είναι με μαγνήσιο και αργίλιο τα ορυκτά που θα σχηματιστούν κυρίως είναι γροσσουλάριος και διοψίδιος (Cooper, 1957), ενώ αν το ιζηματογενές πέτρωμα περιέχει πολύ σίδηρο τα αντίστοιχα ασβεστοπυριτικά ορυκτά που θα σχηματιστούν θα είναι σιδηρούχα.

Για να διαχωριστούν τα παραπάνω μεταμορφικά ορυκτά από τα μετασωματικά υπάρχουν δύο κύρια κριτήρια:

- 1) Οι φάσεις στα μεταμορφωμένα πετρώματα είναι πολλές σε σχέση με τον αριθμό των συστατικών που περιέχουν, ενώ στα μετασωματικά πετρώματα οι φάσεις είναι λιγότερες (λίγες φάσεις για τα ίδια συστατικά) και

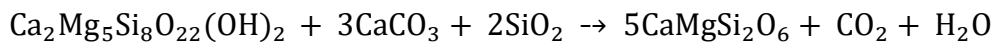


2) η ολική σύσταση όλων των ζωνών που σχηματίζονται κατά τη μεταμόρφωση είναι πανομοιότυπη εκτός του  $H_2O$  και  $CO_2$ , ενώ η μετασώματωση χαρακτηρίζεται από ασυνέχειες στη σύσταση δηλαδή εμφανίζονται στοιχεία που δεν υπήρχαν πριν.

#### 4.2 Μεταμορφικές αντιδράσεις

Τα ορυκτά που σχηματίζονται κατά τη μεταμόρφωση συνήθως καταστρέφονται αργότερα στη διαδικασία της μετασώματωσης. Τα ορυκτά αυτά όμως αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στα αρχικά στάδια του σχηματισμού *skarn*, όπως επίσης τη θερμική κατανομή και τη ροή ρευστών όπου υπάρχει μεταμορφική άλως.

Το χαρακτηριστικό στις μεταμορφικές αντιδράσεις είναι πως οι αλλαγές συμβαίνουν κυρίως στο ποσοστό των πτητικών συστατικών, όπως το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό, αλλά όχι στο σύνολο των συστατικών του πετρώματος:

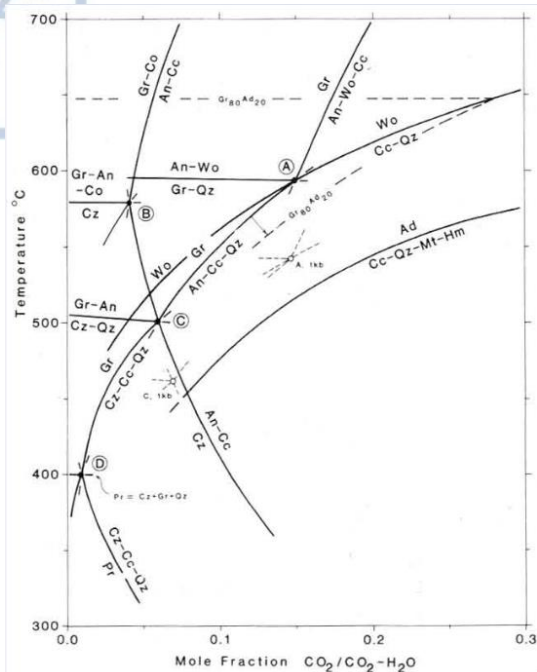


Υπάρχουν επίσης δεδομένα από μεταμορφικές αντιδράσεις με μικτά πτητικά συστήματα και καθαρά ακραία μέλη ορυκτών στα συστήματα  $CaO-MgO-SiO_2-CO_2-H_2O$  και  $CaO-Al_2O_3-SiO_2-CO_2-H_2O$ .

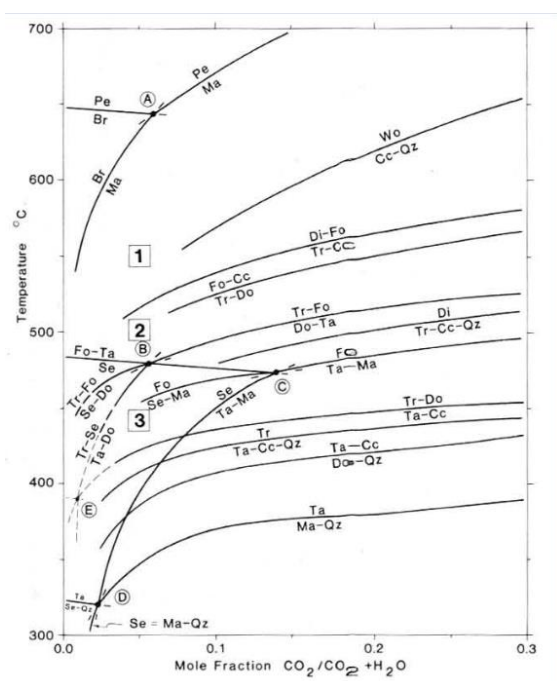
Σε αυτά τα συστήματα υπό σταθερή πίεση η ισορροπία των ασβεστοπυριτικών ορυκτών εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το γραμμομοριακό κλάσμα του διοξειδίου του άνθρακα ( $X_{CO_2}$ ) στο ρευστό  $H_2O-CO_2$ . Βάσει αυτών των μεταβλητών υπάρχουν διαγράμματα που δείχνουν την παρουσία ορυκτών ανάλογα με τις τιμές θερμοκρασίας και  $X_{CO_2}$ .

Ο σχηματισμός των ασβεστοπυριτικών ορυκτών μπορεί να συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες ή όταν η ρευστή φάση είναι πλούσια σε νερό και όχι σε διοξείδιο του άνθρακα και για αυτόν τον λόγο μπορεί να προσδιοριστεί η θερμοκρασία σχηματισμού των ορυκτών παίρνοντας ως δεδομένη την τιμή της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα. Το  $X_{CO_2}$  στα ρευστά που εισέρχονται στον ασβεστόλιθο κατά τη μεταμόρφωση και τη μετασώματωση είναι γενικά χαμηλό, λιγότερο από 0,1 (Taylor and O'Neil, 1977, Huang, 1976).

Με αυτά τα δεδομένα, αν θεωρηθεί ότι το  $X_{CO_2}$  είναι 0,1 σε πίεση 2 kb (σχήματα 3 και 4) φαίνεται ότι πάνω από τους  $420^\circ C$  σχηματίζεται τρεμολίτης, πάνω από  $475^\circ C$  παρουσιάζουν σταθερότητα ο διοψίδιος, ο ανδραδίτης και ο φορστερίτης, ενώ ο βολλαστονίτης πάνω από τους  $550^\circ C$ . Με τη μείωση του  $X_{CO_2}$  στα 0,01 οι παραπάνω τιμές μειώνονται περίπου  $50^\circ-100^\circ C$  ενώ η μείωση της πίεσης σε 1 kb μειώνει τη θερμοκρασία περίπου  $50^\circ C$  (σχήμα 4).



Σχήμα 3: Διάγραμμα  $T-X_{CO_2}$  για ρευστά πλούσια σε νερό στο σύστημα Ca-Al-Si-C-O-H σε συνολική πίεση 2 kb.



Σχήμα 4: Διάγραμμα  $T-X_{CO_2}$  για ρευστά πλούσια σε νερό στο σύστημα Ca-Mg-Si-C-O-H σε συνολική πίεση 2 kb.

Η σερπεντινίωση των μαγνησιούχων skarn με φορστερίτη γίνεται σε πιο χαμηλές πιέσεις που μπορεί να είναι ακόμα και 500 bars. Εκεί το  $X_{CO_2}$  υπάρχει σε πιο χαμηλές τιμές λιγότερο από 0,05 και θερμοκρασία μικρότερη από 420°C.

#### 4.3 Μετασωματική ανάπτυξη του skarn

Η μετασώματωση είναι μία διεργασία η οποία ξεκινάει με την κρυστάλλωση του μάγματος κατά τη διάρκεια της οποίας απελευθερώνονται μαγματικά υδροθερμικά ρευστά. Αυτά με την ανάμιξή τους με μεταμορφικά ή μετεωρικά νερά μεταφέρονται στα γύρω πετρώματα, σε φλέβες, επαφές ιζηματογενών πετρωμάτων και όπου υπάρχει διαπερατότητα. Το περιεχόμενο των ρευστών σε μέταλλα και θείο εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης-θερμοκρασίας, την ισορροπία με το πυριγενές, την οξειδωτική κατάσταση και την περιεκτικότητα αλογόνων στο μάγμα.

Το skarn στο αρχικό στάδιο είναι άνυδρο. Σχηματίζεται ως ένδο-skarn μέσα στο πυριγενές ή στους κερατίτες και σαν έξω-skarn στον ασβεστόλιθο με την εισαγωγή χημικών στοιχείων που μπορεί να προέρχονται είτε από το κοντινό περιβάλλον είτε από εξωτερική πηγή. Ο ασβεστόλιθος χαρακτηρίζεται από γρανάτη, πυρόξενο και πιο εξωτερικά βολλαστονίτη, βεζουβιανίτη και πιθανόν πυροξενοειδή ενώ η αντίδραση του δολομίτη (μαγνησιούχα skarn) με τα ρευστά δίνουν κλινοπυρόξενο, φορστερίτη και ασβεστίτη. Η σύσταση των ορυκτών έχει σχέση με την οξειδωτική κατάσταση του συστήματος με την παρουσία παραγενέσεων με τρισθενή σίδηρο, όταν αυτή είναι υψηλή, και παραγενέσεων δισθενούς σιδήρου όταν είναι χαμηλή. Στο αρχικό στάδιο σχηματισμού skarn δεν υπάρχουν σουλφίδια αλλά σχελίτης στα ασβεστιτικά skarn και μαγνητίτης και βορικά ορυκτά στα μαγνησιούχα skarn. Στα τελευταία στάδια σχηματισμού του πρόδρομου skarn παρουσιάζεται αύξηση στη συγκέντρωση σιδήρου και εξάντληση του μαγνησίου στα πυριτικά ορυκτά.

Σε αυτό το στάδιο του skarn εμφανίζεται μαγνητίτης και σουλφίδια. Στα ασβεστιτικά skarn ο μαγνητίτης αντικαθιστά τον ανδραδίτη ενώ στα μαγνησιούχα skarn συνοδεύει φλογοπίτη, χουμίτη, βορικά ορυκτά και σερπεντίνη. Ένυδρη μετασώματωση επίσης λαμβάνει χώρα μόνο στα ορυκτά της τελευταίας κατηγορίας.

Το πυριγενές πέτρωμα μπορεί να εμφανίσει αλκαλική εξαλλοίωση με περαιτέρω ανάπτυξη του ένδο-skarn και περιορισμένη μετασώματωση που είναι ορατή με γυμνό μάτι.

#### 4.4 Θερμοκρασία και μερική πίεση θείου και οξυγόνου

Κατά την ανάπτυξη του skarn μπορεί να υπάρχουν στο περιβάλλον του σιδήρου, μαγγάνιο και θείο, στοιχεία που εμφανίζουν πολλές φάσεις οξείδωσης. Για αυτό η σταθερότητα των ορυκτών που τα περιέχουν εξαρτάται από την αφθονία του θείου και του οξυγόνου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Επιπλέον, από αυτά, ο σίδηρος και το μαγγάνιο αντικαθιστούν στα ασβεστοπυριτικά ορυκτά το μαγνήσιο και το αργίλιο οπότε αλλάζουν τα πεδία σταθερότητας των ορυκτών που σχηματίζονται.

Κάποια ορυκτά που θεωρούνται υψηλότερης θερμοκρασίας έχει διαπιστωθεί με τον παραπάνω συσχετισμό να είναι σταθερά και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες της τάξης των 350°-450°C ειδικά σε χαμηλές τιμές πίεσης, οξειδωτικής κατάστασης, θείωσης και  $X_{CO_2}$ .

Η σχέση μερικής πίεσης οξυγόνου-θερμοκρασίας μπορεί να διαχωρίσει τα περιβάλλοντα σχηματισμού των skarn. Οι οξειδωτικές συνθήκες σχετίζονται με τα





υποηφαιστειακά skarn χαλκού (Einaudi, 1981) ενώ οι αναγωγικές συνθήκες με βαθύτερα βολφραμιούχα skarn σε ασβεστόλιθο (Newberry, 1980b).

#### 4.5 Εναπόθεση σουλφιδίων και ανάδρομη μετασώματωση

Τα σουλφίδια συνήθως αποτίθενται όταν σταματάει η ανάπτυξη του skarn (Zharikov, 1970, Smirnov, 1976) και συνοδεύεται από ένυδρη εξαλλοίωση των ορυκτών του. Όλες αυτές οι διεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα στο τέλος την ολοσχερή καταστροφή του skarn το οποίο μπορεί να διαπιστωθεί μόνο από κάποια κατάλοιπα των πρόδρομων ορυκτών του ή τις ψευδομορφώσεις τους.

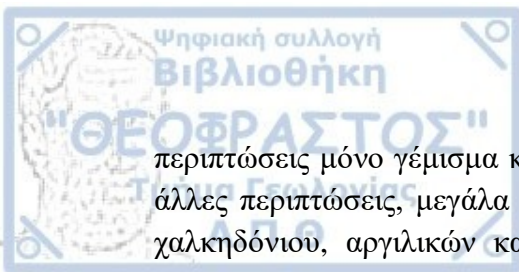
Η απόθεση των σουλφιδίων κόβει τους σχηματισμούς του skarn και συχνά εκτείνεται μέχρι το μάρμαρο ή τους κερατίτες. Τα προϊόντα της εξαλλοίωσης αντανakλούν τη σύσταση των αρχικών πυριτικών ορυκτών του skarn τα οποία έχουν τροποποιηθεί από την έκπλυση του ασβεστίου και την εισαγωγή πτητικών συστατικών. Ο γροσσουλάριος αντικαθίσταται από επίδοτο φτωχό σε σίδηρο, χλωρίτη και ασβεστίτη, ο ανδραδίτης από χαλαζία, οξειδία του σιδήρου και ασβεστίτη, ο αλμανδίνης από βιοτίτη, κερυστίλβη και πλαγιόκλαστο, ο διοψίδιος από τρεμολίτη, ακτινόλιθο και τάλκη. Ο εδενβεργίτης όταν είναι πλούσιος σε μαγγάνιο αντικαθίσταται από ιλβαίτη, ροδονίτη ή ροδοχρωσίτη, ο εδενβεργίτης από ακτινόλιθο πλούσιο σε σίδηρο και τέλος ο φορστερίτης μετατρέπεται σε σερπεντίνη. Όλο το ασβέστιο που έχει εκπλυθεί από τα παραπάνω ορυκτά μπορεί μέσω των διαλυμάτων στα οποία ενσωματώνεται να σχηματίσει σχελίτη (Newberry, 1980b).

Η απόθεση σουλφιδίων στο μάρμαρο μπορεί να συμβεί κάτω από συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας με οξειδωτικές ή αναγωγικές αντιδράσεις ανάλογα με τη ζώνη του skarn με την οποία συνδέονται (Burt, 1977) ή με την εξουδετέρωση των υδροθερμικών διαλυμάτων στην επαφή με το μάρμαρο. Αυτή η διεργασία στους δολομίτες, άρα σε μαγνησιούχα skarn, σχηματίζει τάλκη και ασβεστίτη (Einaudi, 1977) ενώ στα ασβεστιτικά σχηματίζεται χαλαζίας, ασβεστίτης, χλωρίτης και επίδοτο στην διεπιφάνεια του βολλαστονίτη-ασβεστίτη (Sonnevill, 1977, Newberry, 1980a).

Το στάδιο της υδροπυριτικής-σουλφιδικής εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από υψηλότερη οξείδωση και χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η ανάπτυξη του σταδίου αυτού εξαρτάται από το βάθος και την απόστασή του από το υδροθερμικό σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, τα βαθιά περιβάλλοντα, όπως συμβαίνει στα skarn με βολφράμιο, εμφανίζουν σε μικρότερο βαθμό αυτήν την εξαλλοίωση, σε αντίθεση με υποηφαιστειακά περιβάλλοντα όπως για παράδειγμα στα skarn πορφυριτικού χαλκού. Η περίπτωση της εξαλλοίωσης του πλουτωνίτη με χαλαζία-μοσχοβίτη-σιδηροπυρίτη μπορεί να παρατηρηθεί όμως τόσο σε ρηχά (Einaudi, 1981) όσο και σε βαθιά περιβάλλοντα (Newberry, 1981). Λιγότερο εμφανίζεται επίσης σε φλέβες με ψευδάργυρο ενώ είναι πιο εκτενής σε skarn που έρχονται σε επαφή με τους πλουτωνίτες.

Στις πυριγενείς φλέβες αυτού του σταδίου μπορεί να γίνει πορφυριτική εξαλλοίωση ενώ στο ένδο-skarn εξαλλοίωση με χλωρίτη-επίδοτο.

Τα τελευταία στάδια καταστροφής του skarn, καθώς συνεχίζει η κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών σε χαμηλές θερμοκρασίες, περιλαμβάνουν σε μερικές



περιπτώσεις μόνο γέμισμα κοιλοτήτων με χαλαζία, ασβεστίτη και σουλφίδια, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, μεγάλα τμήματα του skarn έχουν μετατραπεί σε μίγμα χαλαζία, χαλκηδόνιου, αργιλικών και ανθρακικών ορυκτών, σουλφιδίων και οξειδίων του σιδήρου.

## 5. Παραδείγματα κοιτάσμάτων skarn στον ελληνικό χώρο

Τα κυριότερα κοιτάσματα skarn στον ελληνικό χώρο για τα οποία θα γίνει αναφορά είναι αυτά του Λαυρίου, της Ξάνθης και της Σέριφου.

### 5.1 Detachment Σύστημα Δυτικών Κυκλάδων - Σέριφος

#### 5.1.1. Γενικά

Στην περιοχή του Αιγαίου έλαβε χώρα μία εκτατική τεκτονική σε οπισθοτόξια λεκάνη (back arc) με πολλά ρήγματα αποκόλλησης (detachment). Το νησί της Σέριφου διαπερνάται από ένα τέτοιο ρήγμα το West Cycladic Detachment System (WCDS) ηλικίας Ολιγοκαίνου-Μειόκαινου συγχρόνως με διείσδυση ενός γρανοδιορίτη. Στις επαφές του πυριγενούς με τα γύρω πετρώματα λαμβάνουν χώρα μετασωματικές διεργασίες δημιουργώντας skarn με την κυκλοφορία ρευστών. Πρόκειται για μεγάλης θερμοκρασίας skarn που αντιστοιχούν σε τρεις κατηγορίες:

- Μεγάλου όγκου ένδο-skarn με γρανάτη
- Ένδο-skarn με γρανάτη-πυρόξενο (μορφή ribbon ή bubble)
- Ρωγμές έξω-skarn με γρανάτη και πυρόξενο και skarn λατυποπαγή με μέσης θερμοκρασίας πυρόξενο ± ιλβαίτη (Μεγάλο Λιβάδι, Κάβος Κύκλωπας)

Τα ένδο-skarn και έξω-skarn σχηματίζονται ταυτόχρονα με τις θραυσιγενείς και πλαστικές τεκτονικές δομές. Κάποια skarn σχηματίζονται μακριά από την επαφή με το πυριγενές σώμα του γρανοδιορίτη καθώς τα μαγματικά ρευστά κινούνται μέσω ασυνχειών σε μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον τα skarn με μαγνητίτη σχηματίζονται στα τελευταία στάδια της θραυσιγενοϋς τεκτονικής στα detachment ρήγματα ενώ ρευστά της επιφάνειας έχουν ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση ορυκτολογίας σιδήρου/βαρίου οικονομικής σημασίας (Ducoux et al. 2017).

#### 5.1.2 Γεωδυναμικό περιβάλλον

Τα τεκτομεταμορφικά τμήματα που εντοπίζονται στο Αιγαίο και κατ' επέκταση στα νησιά του είναι τρία (Bonneau, 1984). Συγκεκριμένα το Cycladic Continental Basement Unit (CCBU) στις κεντρικές και νότιες Κυκλάδες που αποτελείται από προ-αλπικούς γρανίτες, ορθογενεύσιους και παραγενεύσιους (Andriessen et al., 1987) που καλύπτονται από μεταπηλίτες και μάρμαρα της ζώνης Γαβρόβου-Τριπολιτσάς. Το Cycladic Blueschists Unit (CBU) εμφανίζεται στα περισσότερα νησιά του Αιγαίου με μία σειρά από μεταπελίτες, μεταβασίτες και μάρμαρα που ανήκουν στη ζώνη της Πίνδου. Το Upper Cycladic Unit (UCU) αποτελείται από οφιολιθικά πετρώματα που έχουν υποστεί μερική υψηλής θερμοκρασίας μεταμόρφωση στο Άνω Κρητιδικό (Jansen et al., 1978; Maluski et al., 1987; Katzir et al., 1996).

Πιο συγκεκριμένα για τη Σέριφο από τη βάση προς τα πάνω διακρίνονται 3 τεκτονικά καλύμματα (Grasemann et al., 2002). Το κατώτερο τμήμα ανήκει στο CCBU και αποτελείται από γνεύσιο και μυλωνιτικούς σχιστόλιθους πάχους περίπου



200 μέτρων που καλύπτονται από ασβεστιτικά και δολομιτικά μυλωνιτικά μάρμαρα. Το ενδιάμεσο τμήμα που αποτελείται από αμφιβολίτες, πράσινους σχιστόλιθους με παρεμβολές μαρμάρων βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νησιού και εμφανίζει γλαυκοφανή που είναι χαρακτηριστικό του CBU (Salemink1985). Το ανώτερο τέμαχος συγκροτείται από μάρμαρα και σχιστόλιθους.

Τα τμήματα που αποτελούν τη Σέριφο χωρίζονται από δύο detachment ρήγματα που κινούνται προς τα ΝΝΔ. Τα CCBU-CBU έχουν επαφή στο Μεγάλο Λιβάδι και η επαφή CBU-UCU εμφανίζεται στις χερσονήσους Κάβος Κύκλωπας και Πλατό Γιαλό (Grasemann and Petrakakis, 2007). Τα δύο ρήγματα ονομάζονται Μεγάλο Λιβάδι και Κάβος Κύκλωπας detachment αντίστοιχα (MLD, KKD).

### 5.1.3 Πετρολογία - δομή των Skarn

#### Skarn υψηλής θερμοκρασίας

Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις γρανάτη-πυρόξενου skarn μεγάλης θερμοκρασίας. Το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι η κοντινή απόσταση με το πυριγενές σώμα. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

#### I. Ενδο-skarn γρανάτη μέσα σε γνεύσιους του CCBU

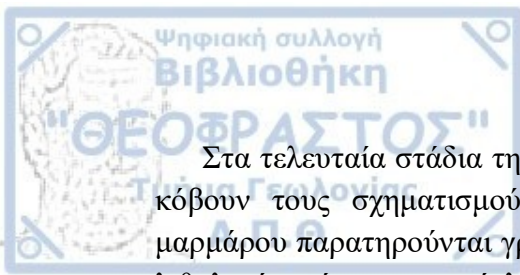
Συναντάται στο κέντρο του νησιού, πιο συγκεκριμένα στην περιοχή του Αγίου Γεωργίου. Εκεί στο CCBU και ακριβώς κάτω του MLD αναπτύσσεται το skarn από την επαφή του γρανοδιορίτη με τους γνεύσιους. Σχηματίζονται φακοί πάχους 15 μέτρων με ξενόμορφο και κοκκινωπό ανδραδίτη. Το ανάδρομο στάδιο αυτού του skarn περιλαμβάνει φλέβες με γρανάτη και μαγνητίτη, αιματίτη, επίδοτο, ακτινόλιθο, χαλαζία και ασβεστίτη.

#### II. Ενδο-skarn γρανάτη-πυρόξενου σε μάρμαρα του CCBU

Τα πετρώματα σε αυτήν την περίπτωση είναι ο γρανοδιορίτης πάχους περίπου 10 μέτρων που διεισδύει σε τεφρά και λευκά μάρμαρα με το skarn να σχηματίζεται μέσα στο πυριγενές ή στο σημείο επαφής με το μάρμαρο.

Μέσα στις γρανοδιοριτικές φλέβες σχηματίζεται ένδο-skarn τύπου "bubble" με πρόδρομα ορυκτά τον ανδραδίτη (Salemink, 1985) και εδενβεργιτικός πυρόξενος με βεζουβιανίτη και βολλαστονίτη. Συνήθως οι γρανάτες είναι σε μεγαλύτερη ποσότητα από τους πυρόξενους. Η άλλη χαρακτηριστική μορφή είναι τα ένδο-skarn τύπου "ribbon" στο πάνω μέρος του γρανοδιορίτη στην επαφή με τα μάρμαρα. Περιέχουν κυρίως ανδραδίτη και λιγότερο εδενβεργιτή.

Στα "ribbon" ένδο-skarn τα πρόδρομα ορυκτά αντικαθίσταται από μαγνητίτη σαν κύριο ορυκτό που συνοδεύεται από σιδηροπυρίτη, πιθανόν χαλκοπυρίτη παρουσία μαλαχίτη, ακτινόλιθο, επίδοτο, χαλαζία και ασβεστίτη. Στο πάνω μισό των φλεβών γρανοδιορίτη παρατηρείται μετασώματωση με πλούσιο σε ασβέστιο πηγματίτη και σχηματισμό τιτανίτη, αμφίβολο και εδενβεργιτή.



Στα τελευταία στάδια της μαγματικής δραστηριότητας στη Βάγια μαφικές φλέβες κόβουν τους σχηματισμούς μέχρι το ενδοσκάρν και στο σημείο επαφής του μαρμάρου παρατηρούνται γρανάτες και αμφίβολοι πάχους λίγων εκατοστών. Όλες οι λιθολογίες τέμνονται από λευκές κάθετες φλέβες και αραιά κανονικά ρήγματα που πληρώνονται με αιματίτη και βαρύτη.

### **III. Εξω-skarn γρανάτη-πυρόξενου στους αμφιβολίτες του CBU**

Τα εξω-skarn αυτά εντοπίζονται στην περιοχή Πλάγια μεταξύ του CBU και του βόρειου άκρου του γρανοδιορίτη. Μέσα στους αμφιβολίτες σε φλέβες en-echelon αναπτύσσεται κεντρικά καστανός ανδραδίτης και πιο έξω πράσινος εδενβεργίτης. Ανάδρομα ορυκτά είναι το επίδοτο σε φλέβες που κόβουν όλο το σχηματισμό και σπάνια παρατηρείται μαλαχίτης.

### **Skarn μέσης θερμοκρασίας**

Σε αυτήν την κατηγορία οι συγκεντρώσεις των skarn βρίσκονται σχετικά πιο μακριά από τον πλουτωνίτη. Σχηματίζουν κυρίως πυρόξενο και ιλβαΐτη με θερμοκρασίες σχηματισμού να κυμαίνονται μεταξύ 350-260°C (Saleminck, 1985).

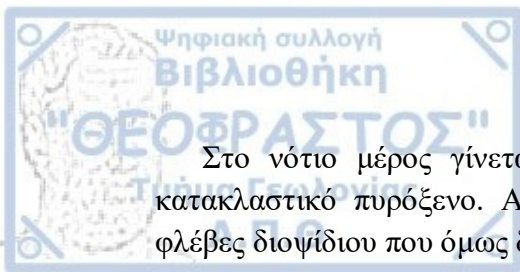
Στο Μεγάλο Λιβάδι, βόρεια του κόλπου, το skarn αναπτύσσεται πάνω από τα μάρμαρα του CCBU πιο συγκεκριμένα στο επίπεδο του MLD και το πάχος του μπορεί να φτάσει τα 30 μέτρα.

Αρχικά στη φύλλωση του μυλωνιτωμένου μαρμάρου στο επίπεδο του MLD εμφανίζεται ένα λεπτό στρώμα μαγνητίτη που συνοδεύεται με ασβεστίτη. Ο μαγνητίτης αργότερα μετατρέπεται σε αιματίτη. Πάνω από αυτό το στρώμα εμφανίζεται cokade λατυποπαγές του οποίου συγκολλητικό υλικό είναι συγκεντρώσεις ορυκτών του skarn. Στο πρόδρομο στάδιο το πρώτο ορυκτό που σχηματίζεται είναι το επίδοτο, το οποίο αντικαθιστά προηγούμενες μικροδομές. Έπειτα σχηματίζονται ο εδενβεργίτης (Vergouwen, 1976) και ο ιλβαΐτης σε φλέβες, ribbons και ταινίες σαν πολυπληθέστερα ορυκτά και σχετίζονται με την εμφάνιση χαλαζία και ασβεστίτη. Ο χαλαζίας με τη σειρά του συνδέεται με μαγνητίτη και σιδηροπυρίτη που στο οξειδωτικό στάδιο μετατρέπεται σε γκαιτίτη. Στο ανάδρομο στάδιο σχηματίζονται δεύτερης γενιάς επίδοτο και χαλαζίας μέσα σε ρωγμές.

Στην περιοχή Ακρωτήριο Κάβος Κύκλωπας παρατηρείται λατυποπαγές skarn παρόμοιο με το παραπάνω με τη διαφορά πως το μήκος του είναι πιο περιορισμένο στα 100 μέτρα και το πάχος του 3-5 μέτρα. Είναι στρωματογραφικά το ανώτερο στη Σέριφο στο κάτω τέμαχος του KKD μέχρι βόρεια στο steep κανονικό ρήγμα.

Το skarn εμφανίζεται σαν cokade και crackle λατυποπαγές με φλέβες πυρόξενου και κοιλότητες με διοψίδιο, ασβεστίτη και αιματίτη μεταξύ των κλαστών. Ο αιματίτης δεν είναι προϊόν αντικατάστασης. Επίσης βρίσκονται σιδηροπυρίτης και σπάνια γρανάτες.





Στο νότιο μέρος γίνεται μετάβαση από το λατυποπαγές skarn σε skarn με κατακλαστικό πυρόξενο. Αυτή η μετάβαση φαίνεται από κάθετες και οριζόντιες φλέβες διοψίδιου που όμως δεν είναι συνεχές δίκτυο.

Η ανάδρομη φάση περιέχει διακλάσεις που πληρώνονται με δεύτερης γενιάς επίδοτο και τέμνονται αργότερα από άλλα ρήγματα.

### **Ορυκτογένεση Fe/Ba χαμηλής θερμοκρασίας**

Στο τελευταίο υδροθερμικό στάδιο και σε περιβάλλον περίπου 200°C (Saleminck, 1985) πραγματοποιείται η ορυκτογένεση με σίδηρο και βάριο με τους σχηματισμούς αυτούς να τέμνουν όλες τις προϋπάρχουσες δομές.

Πιο συγκεκριμένα βρίσκονται σε όλους τους σχηματισμούς του νησιού πάνω και κάτω του MLD αλλά συνήθως κοντά στα λατυποπαγή skarn. Στα ανοίγματα ή στις διακλάσεις των μαρμάρων του CCBUSχηματίζονται λατυποπαγή και φλέβες αιματίτη-λειμωνίτη με βαρύτη και λίγο φθορίτη. Σε μικρότερο βαθμό έχει παρατηρηθεί σχηματισμός αιματίτη/βαρύτη στους αμφιβολίτες και μεταπηλίτες του CBU.

## **5.2 Skarn στην περιοχή της Ξάνθης**

Η μάζα της Ροδόπης, στην οποία ανήκει η περιοχή της Ξάνθης, αποτελείται αρχικά από δύο αλπικά τεκτονικά λείπια.

Το Lower Tectonic Unit (LTU) αποτελείται από ορθογνεύσιους, παραγνεύσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και αμφιβολίτες. Όλα αυτά τα καλύπτουν Τριαδικά δολομιτικά μάρμαρα που στην κορυφή τους βρίσκονται οφθαλμο-γνεύσιοι (Krenn et al., 2010).

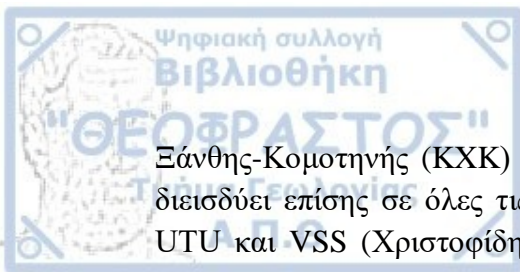
Έπειτα εμφανίζεται το Upper Tectonic Unit (UTU) που αποτελείται από πετρώματα αμφιβολιτικής φάσης όπως ορθογνεύσιους, παραγνεύσιους, μιγματιωμένους γνεύσιους και μιγματίτες, μη αμιγή μάρμαρα, αμφιβολίτες, διατηρημένους εκλογίτες και σπάνια μεταμαφικά ή υπερμαφικά πετρώματα (Krenn et al., 2010, Nagel et al., 2011). Παρουσιάζει δύο τμήματα με διαφορετική ηλικία στα μεταμορφικά γεγονότα. Πιο συγκεκριμένα το κάτω τμήμα έχει υποστεί Παλαιογενή μεταμόρφωση (Kroheand and Mroskos, 2002) ενώ το άνω τέμαχος παρουσιάζει το μεταμορφικό γεγονός στο Άνω Κρητιδικό.

Αυτά τα αλπικά τεμάχη της Ροδόπης χωρίζονται από το Nestos Shear Zone (NSZ) που είναι ρήγμα thrust.

Στο UTU υπέρκειται μια ηφαιστειο-ιζηματογενής σειρά (VSS) ηλικίας Ηώκαινου-Μειόκαινου που αποτελείται από φλύσχη, ψαμμίτες, μάργες, ιλιόλιθους, αρκόζες και ασβεστόλιθους.

### **5.2.1 Πυριγενή της Ξάνθης**

Στην Ξάνθη εμφανίζεται ένα πλουτωνικό πέτρωμα του οποίου η τοποθέτηση ελέγχεται από δύο βασικές δομές: το μικρής γωνίας detachment ρήγμα Καβάλας-



Ξάνθης-Κομοτηνής (KXK) και το thrust ρήγμα του Νέστου (NSZ). Ο πλουτωνίτης διεισδύει επίσης σε όλες τις δομές που αναφέρθηκαν παραπάνω δηλαδή στα LTU, UTU και VSS (Χριστοφίδης, 1977, Eleftheriadis et al., 1984, Koukouvelas and Piper, 1991).

Ο πλουτωνίτης χρονολογείται στο δυτικό μέρος στα 34-25 ( $\pm 0,5$ ) εκατομμύρια χρόνια (Bigazzi et al., 1994, Christofides et al., 2010, 2012) με σύσταση γνευσιακού και πορφυριτικού γρανοδιορίτη μέχρι γρανίτη που σχηματίστηκε σε πίεση 0,5 GPa και θερμοκρασία  $\leq 1300^{\circ}\text{C}$  (Christofides et al., 2010, 2012).

Το ανατολικό τμήμα που χρονολογείται στα 27-25 ( $\pm 0,6$ ) εκατομμύρια χρόνια (Bigazzi et al., 1994, Christofides et al., 2010, 2012) αποτελείται απόδιορίτη, μονζοδιορίτη, μονζο-γάββρο και σωρειτικό γάββρο, με κρυστάλλωση σε πίεση περίπου 0,07 GPa και θερμοκρασία στους  $700^{\circ}\text{C}$  (Christofides et al., 2010, 2012).

### 5.2.2 Τύποι skarn - Ξάνθη

Τα έξω-skarn είναι μεσόκοκκα ως αδρόκοκκα σαν στρώματα και έχουν μέγεθος από μερικά εκατοστά ως αρκετά μέτρα. Ανάλογα με τη σύσταση του πρωτόλιθου σχηματίζονται μαγνησιούχα και ασβεστούχα skarn, ωστόσο τα δεύτερα επικρατούν.

Τα μαγνησιούχα skarn σχετίζονται με τα μάρμαρα του LTU ή με τα μεταμαφικά και υπερμαφικά του UTU (Liati, 1986). Στα δολομιτικά μάρμαρα το skarn είναι μέγεθος μέτρου σε στρώματα και παρουσιάζει ζώνωση. Κοντά στο μάρμαρο αναπτύσσεται ζώνη με φορστερίτη, διοψίδιο και μαγνησιούχο σπινέλλιο ενώ προς τον πλουτωνίτη ζώνη με φορστερίτη, διοψίδιο και φλογοπίτη.

Στην περίπτωση που ο πρωτόλιθος είναι τα μετα- και υπερ-βασικά παρουσιάζουν μόνο τη ζώνη φορστερίτη, διοψιδίου και φλογοπίτη (Liati, 1986).

Τα ασβεστικά skarn εμφανίζονται στα μάρμαρα του UTU ή στους ασβεστόλιθους και ψαμμίτες του VSS. Σε αυτήν την κατηγορία το skarn σχηματίζει τέσσερις διαδοχικές και ευδιάκριτες ζώνες: την πρόδρομη ζώνη με βολλαστονίτη-γρανάτη κοντά στο μάρμαρο, τη ζώνη πυρόξενου-γρανάτη κοντά στον πλουτωνίτη, μια ανάδρομη ζώνη επίδοτου-γρανάτη που βρίσκεται προς τον πλουτωνίτη και τέλος μία διακοπτόμενη σειρά βεζουβιανίτη-σκαπόλιθου κοντά στο πυριγενές.

Η ανάδρομη ζώνη επίδοτου-γρανάτη που καλύπτει τις άλλες ζώνες και αποτελεί περίπου το 50% του skarn της Ξάνθης παρουσιάζει εκτός αυτών την δύο κύριων ορυκτών επίσης κλινοπυρόξενο, ακτινόλιθο, βιοτίτη, ασβεσίτη, απατίτη, αλβίτη ή αδουλαίο και χλωρίτη.

Από τις διεργασίες μετασώματωσης επηρεάζονται και τα πυριγενή πετρώματα όπως ο γρανοδιορίτης και ο μονζονίτης οπότε σχηματίζονται ένδο-skarn. Δομικά αποτελείται από κάθετες φλέβες ή σωλήνες με απλικτική υφή και πλάτος ως 30 μέτρα. Παρατηρούνται δύο ζώνες, η εσωτερική με γρανίτη και επίδοτο που ακολουθείται από επίδοτο και ορθόκλαστο.

### 5.2.3 Skarn - Κιμμέρια

Στα Κιμμέρια έλαβε χώρα μεταλλογένεση από την επίδραση της επαφής των πυριγενών πετρωμάτων με τα μάρμαρα. Παρατηρούνται 2 τύποι μεταλλοφορίας σε αυτήν την περιοχή.

Η περιοχή της επαφής του γρανοδιορίτη με τα γύρω μάρμαρα παρουσιάζει skarn σε άλω επαφής με χρυσό-χαλκό-σίδηρο. Αποτελείται από συγκεντρώσεις ορυκτών πλούσιες σε μαγνητίτη και μαγνητοπυρίτη ενώ τα ανάδρομα ορυκτά είναι ο χλωρίτης και ο σερικίτης. Αυτή η κατηγορία έχει υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού, μόλυβδου και ψευδαργύρου ενώ είναι εμπλουτισμένο σε αρσενικό, βολφράμιο, βισμούθιο, αντιμόνιο, άργυρο και κασσίτερο. Σε μικρές συγκεντρώσεις βρίσκονται χρυσός και τελλούριο (Voudouris et al., 2016, Theodoridou et al., 2016, Melfos and Voudouris 2017).

Ο δεύτερος τύπος είναι φλεβικού τύπου με φλέβες χαλαζία που κόβουν τον γρανοδιορίτη με ορυκτολογία που περιέχει μόλυβδο-χαλκό-βισμούθιο-βολφράμιο. Κυρίως περιέχει σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη και μολυβδαινίτη ενώ σε μικρότερο βαθμό σφαλερίτη, τετραεδρίτη-τενναντίτη, γαληνίτη και ρουτίλιο. Τα ανάδρομα ορυκτά είναι ο χλωρίτης και ο σερικίτης.

## 5.3 Skarn στην περιοχή του Λαυρίου

### 5.3.1 Γεωλογία της περιοχής

Το Λαύριο γεωτεκτονικά ανήκει στην Αττικοκυκλαδική κρυσταλλική μάζα στην οποία διακρίνονται δύο κύρια τεκτονικά κομμάτια το lower tectonic unit (LTU) και το upper tectonic unit (UTU) (Papanikolaou, 1987; Brocker et al., 2004; Forster and Lister, 2005).

Στην περιοχή του Λαυρίου το LTU αποτελείται από αυτόχθονη σειρά πετρωμάτων Τριαδικής - Κάτω Ιουρασικής ηλικίας και έχουν υποστεί πρασινοσχιστολιθική ως αμφιβολιθική μεταμόρφωση. Περιλαμβάνει τις κάτω σειρές μάρμαρου, τον σχιστόλιθο της Καισαριανής που συνδέεται με ηφαιστειο-ιζηματογενή υλικά και τις πάνω σειρές μάρμαρου. Όλα αυτά καλύπτονται από μη μεταμορφωμένα κροκαλοπαγή πετρώματα και ασβεστόλιθους ηλικίας Άνω Ιουρασικού - Κάτω Κρητιδικού (Marinos and Petrascheck 1956; Photiades and Carras, 2001). Πάνω από το LTU παρεμβαίνει μια αλλόχθονη σειρά, πιο συγκεκριμένα ένα φυλλιτικό λέπι που έχει υποστεί γλαυκοφανιτική μεταμόρφωση και είναι ηλικίας Άνω Κρητιδικού (Marinos and Petrascheck, 1956; Papanikolaou and Syskakis, 1991; Photiades and Carras, 2001). Αποτελείται από ηφαιστειο-ιζηματογενείς σχηματισμούς (σχιστόλιθους, μάρμαρα, χαλαζίτες), μαφικά μετά-οφιολιθικά (πρασινίτες) και κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους. Το UTU στο Λαύριο αποτελείται από μη μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους του Άνω Κρητιδικού που χωρικά σχετίζονται με οφιολιθικά πετρώματα (Photiades and Carras, 2001).



Συνολικά η περιοχή του Λαυρίου έχει υποστεί δύο φάσεις μεταμόρφωσης. Η πρώτη στο Ηώκαινο με μεγάλη πίεση περίπου 10 kbar και χαμηλές θερμοκρασίες 350-400°C που υποδεικνύει υποβύθιση, ενώ η δεύτερη μεταμόρφωση είναι χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας στο Μειόκαινο, όπου τα μάγματα έχουν ανοδική πορεία σε μικρό βάθος και τοποθετούνται τα γρανοδιοριτικά πετρώματα.

Η είσοδος των μαγματικών πετρωμάτων στα ανώτερα τμήματα του φλοιού συνδέεται με την έκταση του Αιγαίου κατά το Μειόκαινο (Altherr and Siebel, 2002). Ο I-τύπου γρανοδιορίτης της Πλάκας στο Λαύριο είναι μεσόκοκκος, ισόκοκκος με πορφυριτική υφή και αποτελείται κυρίως από πλαγιόκλαστο, ορθόκλαστο, βιοτίτη, χαλαζία, κεροστίλβη ενώ σε μικρότερη ποσότητα εντοπίζονται ο απατίτης, ο τιτανίτης και το ζirkόνιο. Περιέχει μικρά βασικά εγκλείσματα διοριτικής ως μονζοδιοριτικής σύστασης (Altherr and Siebel, 2002). Γύρω από αυτό το πυριγενές σχηματίζεται ζώνη θερμικής μεταμόρφωσης που αποτελείται από κερατίτες και κοιτάσματα skarn.

### 5.3.2 Σχηματισμός και υπάρχουντα skarn

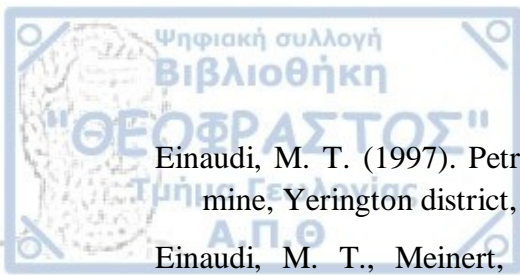
Κατά το σχηματισμό του skarn το πρώτο φαινόμενο που συμβαίνει είναι η μετασώματωση των ορυκτών που προϋπάρχουν από την επίδραση των ρευστών τα οποία αλλάζουν σύσταση όσο αυξάνεται η απόσταση από τον γρανοδιορίτη και μεταναστεύουν μέσα από τις ρωγμές και τους πόρους των πετρωμάτων. Η ζώνη της μεταμόρφωσης επαφής στην περιοχή του Λαυρίου δείχνει από την απουσία του βολλαστονίτη ότι η θερμοκρασία του γρανοδιορίτη δεν είναι τόσο υψηλή αλλά αρκεί για να σχηματιστεί πυρόξενος και γρανάτης. Επομένως η ορυκτολογία ξεκινάει με γρανάτη και πυρόξενο που αργότερα αντικαθίστανται από επίδοτο, αμφίβολο, χαλαζία, πλαγιόκλαστο και μαγνητίτη σε θερμοκρασίες 480-550°C (Taylor and O'Neill, 1977). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και στο υδροθερμικό στάδιο σχηματίζονται τα σουλφίδια (Smirnov, 1976, Economou, 1981).

Από μεταλλικά ορυκτά στα skarn του Λαυρίου το πρώτο ορυκτό που σχηματίζεται είναι ο μαγνητίτης και εμφανίζεται στρωματογραφικά σε δύο ορίζοντες. Στην επαφή της κατώτερης σειράς μαρμάρου με τον σχιστόλιθο της Καισαριανής και στην επαφή του σχιστόλιθου της Καισαριανής με την ανώτερη σειρά μαρμάρου. Στην πρώτη περίπτωση βρίσκεται με τη μορφή φακών σε ζώνη με κερατίτες κάτω από γρανοδιορίτη, πρασινίτες ή μάρμαρο. Στη δεύτερη περίπτωση βρίσκεται στην επαφή κερατιτών με την ανώτερη σειρά μάρμαρου ή με το φυλλιτικό σύστημα. Η μεταλλοφορία του μαγνητίτη συχνά συνοδεύεται από φλεβίδια σιδηροπυρίτη και μαγνητοπυρίτη (Economou, 1981, Voudouris et al., 2008).

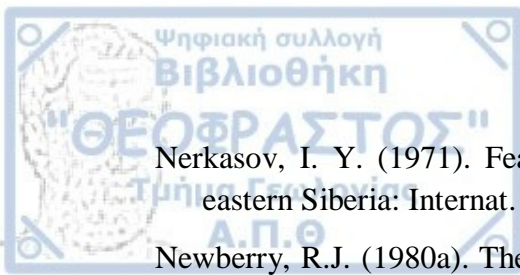
Τα ορυκτά που ακολουθούν το σχηματισμό του αρχικού skarn είναι τα εξής: σιδηροπυρίτης, μαγνητοπυρίτης, αρσеноπυρίτης, σφαλερίτης, χαλκοπυρίτης και γαληνίτης (Economou, 1981, Voudouris et al., 2008).



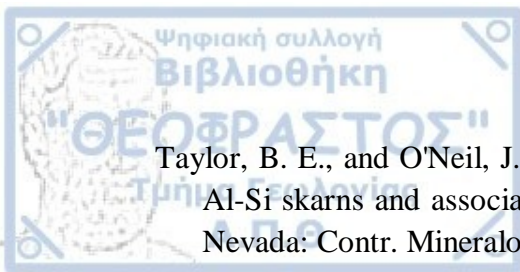
- Aleksandrov, S. M. (1974) Geochemistry of boron-tin mineralization in the magnesian skarns of the eastern Chukotka: *Geochemistry Internat.*, v. 11, p. 532-539.
- Alpers, C. N. (1980). Mineralogy, paragenesis, and zoning of the Luz vein, Uchucchacua, Peru: B. A. thesis, Harvard Univ., 138 p.
- Barrell, (1907). Geology of the Marysville mining district, Montana: U. S. Geol. Survey Prof. Paper 57, 178 p.
- Blackwell, D.D., Steele, J.L., Frohme, C.F., Priest, G.R. and Black, G.L. (1990). Heat flow in the Oregon Cascade Range and its correlation with regional gravity, Curie Point depths, and geology: *Journal of Geophysical Research*, v. 95-B12, p. 19475-19493.
- Bowers, J.R., Kerrick, D.M. and Furlong, K.P. (1990). Conduction model for the thermal evolution of the Cupsuptic aureole, Maine: *American Journal of Science*, v. 290, p. 644-665.
- Burt, D.M. (1977). Mineralogy and petrology of skarn deposits: *Soc. Italiana Mineralogia Petrologia Rendiconti*, v. 33, p. 859-873
- Burt, D.M. (1978). Tin silicate-borate-oxide equilibria in skarns and greisens-the system  $\text{CaO}-\text{SnO}_2-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{F}_2\text{O}$ : *ECON. GEOL.*, v. 73, p. 269-282.
- Cooper, J. R. (1957). Metamorphism and volume loss in carbonate rocks near Johnson Camp, Cochise County, Arizona: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 68, p. 577-610.
- Corsini, F., Cortecchi, G., Leone, G., and Tanelli, G. (1980). Sulfur isotopic study of the skarn-(Cu-Pb-Zn) sulfide deposit of Valle del Temperino, Campiglia Marittima, Tuscany, Italy: *ECON. GEOL.*, v. 75, p. 83-96.
- Dick, L. A. (1976). Metamorphism and metasomatism at the MacMillan Pass tungsten deposit, Yukon and District of MacKenzie, Canada: M.S. thesis, Queens Univ., Kingston, 226 p.
- Ducoux, M., Branquet, Y., Arbaret, L., Grasemann B., Rabillard, A., Gumiaux, C., Drufin, S. (2017). Synkinematic skarns and fluid drainage along detachments: The West Cycladic Systemon Serifos Island (Cyclades, Greece) and its related mineralization.
- Economou, M. (1981). Magnetite deposits of skarn type from the Plaka area of Laurium, Greece. *Chemie der Erde*, 40, 241-252.
- Eianudi, M.T. (1982a). Descriptions of skarns associated with porphyry copper plutons, southwestern North America, in Titley, S.R., ED., *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*: University of Arizona Press, p. 139-184.



- Einaudi, M. T. (1997). Petrogenesis of copper-bearing skarn an the Manson Valley mine, Yerington district, Nevada: ECON. GEOL., v. 72, p. 769-795.
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D. and Newberry, R. J. (1981). Skarn Deposits: Department of Applied Earth Sciences, Stanford University, Stanford, California 94305.
- Goldschmidt, V. M. (1911). Die kontakmetamorphose im Kristianiagebiet: Oslo Vidensk. Skr., I., Mat-Natur v. KI., no. 1, 483 p.
- Gray, R. F., Hofmaan, V. J., Bagan, R. J., and McKinley, H. L. (1968). Bishop tungsten district, California, in Ridge, J. D., ed., Ore deposits of the United States, 1933-1967 (Graton-Sales vol.): New York, Am. Inst. Mining Metall. Petroleum Engineers, p. 1531-1554.
- Greenwood, J.H.(1967). Wollastonite: Stability in H<sub>2</sub>O- CO<sub>2</sub> mixtures and occurrence in a contact metamorphic aureole near Salmo, British Columbia: American Mineralogist, v. 52, p. 1669-1680.
- Grigoryev, N.A., Sazanov, V.N., Murzin, V.V. and Gladkovskiy, (1990). Suflides as gold carriers in skarn magnetite deposit skarns and ores: Geochemical International, v. 27, p. 142-146.
- Haug. J. L.(1976). Geology of the Merry Widow and Kingfisher contact metasomatic skarn-magnetite deposits, Northern Vancouver Island, British Columbia: Unpub. M.S. thesis, Univ. Calgary, 117 p.
- Kerrick, D.M,( 1974). Review of Metamorphic Mixed Volatile (H<sub>2</sub>O- CO<sub>2</sub>) Equilibria: American Mineralogist, v. 59, p. 729-762.
- Kwak, T. A. P. (1987). W-Sn skarn deposits and related metamorphic skarns and granitoids: Developments in Economic Geology, No. 24, Elsevier, Amsterdam, 451 p.
- Lehman, N. E. (1978). The geology and pyrometasomatic ore deposits of the Washington Camp-Duquesne district, Santa Cruz County, Arizona: Unpub. Ph.D. thesis, Univ. Arizona, 285 p.
- Lindren, W. (1902). The character and genesis of certain contact deposits: American Institute of Mining Engineers, Transactions, v. 31, p. 226-224.
- Meinert, L.D. (1980b). Evolution of metasomatic fluids by transport over large distances: An example from the Paymaster zinc skarn, Esmeralda Co., Nevada [abs.]: Geol. Soc. America, Abstracts with Programs, v. 12, p. 482.
- Meinert, L.D. (1992). Skarns and Skarn Deposits: Department of Geology Washington State University Pullman, Washington 99164-2812 USA.
- Melfos V., Voudouris P. (2017). Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration. Ore Geology Reviews, 89, 1030-1057.



- Nerkasov, I. Y. (1971). Features of tin mineralization in carbonate deposits, as in eastern Siberia: *Internat. Geology Rev.*, v. 13, p. 1532-1542.
- Newberry, R.J. (1980a). The geology and chemistry of skarn formation and tungsten deposit in the central Sierra Nevada, California: Unpub. Ph.D. thesis, Stanford Univ., 325 p.
- Newberry, R.J. (1980b). The geochemistry of tungsten deposition in skarn deposits-a field and theoretical approach [abs.]: *Geol. Soc. Amerika, Abstracts with Programs*, v. 12, p. 492.
- Newberry, R. J., and Einaudi, M. T. (1981). Tectonic and geothermical setting of tungsten skarn deposits in the Cordillera: *Symposium on Tectonics and Ore Deposits, Tucson, Ariz. March 19-20, 1981, Proc.*
- Newberry, R.J. (1983). The formation of subcalcic garnet in scheelite-bearing skarns: *Canadian Mineralogist*, v. 21, p. 529-544.
- Norton, D. (1982). Fluid and heat transport phenomena typical of copper-bearing pluton environments, southeastern Arizona: in Titley, S.R., ed., *Advances in Geology of Porphyry Copper Deposits: Southwestern North America: University of Arizona Press, Tucson*, p. 59-72.
- Pokalov, (1977). Deposits of molybdenum, in Smirnov, V. I., ed., *Ore deposits of the USSR: London, Pittman*, v. 3, p. 125-179.
- Salemink J. and Schuiling, R.D. (1987). A two stage, transient heat and mass transfer model for the granodiorite intrusion at Seriphos, Greece, and the associated formation of contact metasomatic skarn and Fe-ore deposits, in Helgeson, H.C., ed., *Chemical transport in metasomatic processes: Department Geology and Geophysics, University of California, Berkeley, NATO Advanced Study Institutes Series C: Mathematical and Physical Sciences 218*, p. 547-575.
- Schmitt, H.A. (1939). The Pewabic mine, New Mexico: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 50, p. 777-818.
- Shimazaki, H. (1980). Characteristics of skarn deposits and related acid magmatism in Japan: *ECON. GEOL.*, v. 75, p. 173-183.
- Smirnov, V. I.(1976). *Geology of mineral deposits: Moscow, MIR Pub.*, 520 p.
- Sonnevil, R. A. (1979). Evolution of skarn at Monte Cristo, Nevada: Unpub. M. S. thesis, Stanford Univ., 83 p.
- Surles, T. L. (1978). Chemical and thermal variations accompanying formation of garnet skarns near Patagonia, Arizona: Unpub. M. S. thesis, Univ. Arizona, 54 p.
- Takahashi, M., Aramaki, S., and Ishihara, S. (1980). Magnetite-series/ilmenite-series vs. I-type/S-type granitoids: *Soc. Mining Geologists Japan Spec. Issue 8*, p. 13-28.



Taylor, B. E., and O'Neil, J. R. (1977). Stable isotope studies of metasomatic Ca-Fe-Al-Si skarns and associated metamorphic and igneous rocks, Osgood Mountains, Nevada: *Contr. Mineralogy Petrology*, v. 63, p. 1-49.

Taylor, R. G. (1979). *Geology of tin deposits*: Amsterdam, Elsevier, 543 p.

Theodoridou S., Melfos V., Voudouris P., Miskovic A. (2016). Mineralogical and Geochemical Characterization of the Kimmeria Intrusion-Related Deposit, Xanthi, NE Greece. *Geophysical Research Abstracts*, EGU General Assembly 2016, vol. 18, EGU2016-8933, Vienna International Center (17-22 April 2016).

Tsuse, A. (1961). Contact metamorphic iron and copper ore deposits of the Kamaishi mining district, northeastern Japan: *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, sec. 2, v. 13, pt.2, p.133-179.

Umpleby, J. B. (1913). *Geology and ore deposits of Lemi County, Idaho*: U. S. Geol. Survey Bull. 528, 182 p.

Voudouris P., Melfos V., Spry P.G., Bonsall T., Tarkian M., Economou-Eliopoulos M. (2008). Mineralogical and fluid inclusion constraints on the evolution of the Plaka intrusion-related ore system, Lavrion, Greece. *Mineralogy and Petrology*, 93, 79-110.

Voudouris P.C., Melfos V., Spry P.G., Baker T. (2016) *Cenozoic Porphyry-Epithermal and Other Intrusion-Related Deposits in Northeastern Greece: Geological, Mineralogical and Geochemical Constraints*. Society of Economic Geologists, Guidebook Series, 54, 43-82.

Wallmach, T. and Hatton, C.J. (1989). Extreme facies of contact metamorphism developed in calc-silicate xenoliths in the eastern Bushveld complex: *The Canadian Mineralogist*, v. 27, p. 509-523.

Yun, S. (1979). *Geology and skarn ore mineralization of the Yeonhwa-Ulchin zinc-lead mining district SE Tagbaggasan region Korea*: Unpub. Ph.D. thesis, Stanford Univ., 184 p.

Zharikov, V. A. (1970). Skarns: *Internat. Geology Rev.*, v. 12, p. 541-559, 619-647, 760-775.

Χριστοφίδης, Γ.Θ. (1977). Συμβολή εις την μελέτη των πλουτωνίων πετρωμάτων της περιοχής Ξάνθης. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.