



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ - ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΚΑΚΟΛΥΡΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Λαμπρινή Παπαδοπούλου

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2022





ΚΑΚΟΛΥΡΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Λαμπρινή Παπαδοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Α.Π.Θ.

© Κακολύρη Βασιλική, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Κακολύρη Βασιλική, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοτασματολογίας, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ – Πτυχιακή Εργασία

© Kakolyri Vasiliki, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2022

All rights reserved.

PYROMETAMORPHISM – *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.



Στον πατέρα μου



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 6 |
| ABSTRACT | 7 |
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... | 8 |
| 1. ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ..... | 9 |
| 1.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΗ..... | 11 |
| 2. ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ | 13 |
| 2.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ Ή ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ..... | 13 |
| 2.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΙΣΤΟΙ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΑ..... | 15 |
| 2.1.2 ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ | 17 |
| 2.2 ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ | 23 |
| 2.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΙΣΤΟΙ ΚΑΙ ΥΦΕΣ | 24 |
| 2.2.2 ΜΕΤΑΜΟΡΦΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ | 27 |
| 2.2.3 ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗΣ..... | 29 |
| 2.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ | 36 |
| 3. ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ | 37 |
| 3.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ | 38 |
| 3.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ | 41 |
| 3.2.1 ΠΥΡΙΓΕΝΗΣ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ | 41 |
| 3.2.2 ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΠΟ ΚΑΥΣΗ..... | 46 |
| 3.2.3 ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΠΟ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗ | 49 |
| 4. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗ..... | 52 |
| 5. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗΣ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ..... | 53 |
| ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 56 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 58 |

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης το φαινόμενο της πυρομεταμόρφωσης. Η πυρομεταμόρφωση είναι ένα είδος θερμικής μεταμόρφωσης που χαρακτηρίζεται από υψηλές έως υπερυψηλές συνθήκες θερμοκρασίας και χαμηλές πιέσεις. Έτσι η πυρομεταμόρφωση ανήκει στη σανιδινοτική φάση.

Η πυρομεταμόρφωση είναι ένα σπάνιο και δυσδιάκριτο φαινόμενο. Υπάρχουν λίγες εμφανίσεις οι οποίες περιορίζονται σε μικρές ζώνες και ξενολίθους. Περιπτώσεις πυρομεταμόρφωσης αποτελούν η πυριγενής πυρομεταμόρφωση από μαγματική δράση, η καύση ή και αυτοανάφλεξη οργανικών στρωμάτων και από πρόσκρουση κεραυνού. Ένα ακόμα είδος είναι η ανθρωπογενής πυρομεταμόρφωση, η οποία συνδέεται με την ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως η βιομηχανία.

Τέλος, στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στη Σαντορίνη, εντοπίστηκε πυρομεταμορφωμένος ξενόλιθος σε πυριγενές πέτρωμα του ηφαιστείου της.



The topic of this diploma thesis is pyrometamorphism. It is a type of thermal metamorphism characterized by high to ultra-high temperature and low-pressure conditions. Thus, pyrometamorphism belongs to the sanidinite facies.

Pyrometamorphism is a rare and hardly distinguishable phenomenon. There are only a few appearances that are limited to small zones and xenoliths. Pyrometamorphic regimes consist of igneous pyrometamorphism, related to magmas, the combustion or self-ignition of organic material and lightning strikes.

Another pyrometamorphic regime is anthropogenic pyrometamorphism, which is associated with human activity, such as industrial operations.

Finally, in Greece, a pyrometamorphosed xenolith was found in an igneous rock in Santorini's volcano.



Η διπλωματική εργασία μου ανατέθηκε από την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Λαμπρινή Παπαδοπούλου του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, η οποία πραγματεύεται το φαινόμενο της Πυρομεταμόρφωσης.

Σε περιορισμένες ζώνες καθώς και ξενόλιθους εντοπίζονται ενδείξεις Πυρομεταμόρφωσης οι οποίες σχετίζονται με υπερυψηλές θερμοκρασίες και χαμηλές πιέσεις, αποτέλεσμα είτε φυσικό είτε ανθρωπογενές. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύονται περιπτώσεις και παραγενέσεις του φαινομένου και παρατίθενται αποδείξεις μέσω παραδειγμάτων για την ύπαρξη αυτού του είδους της μεταμόρφωσης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Λαμπρινή Παπαδοπούλου για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγησή της και τη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης ευχαριστώ τη μητέρα και την αδερφή μου που με στήριξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ευχαριστώ τον μέλλοντα σύζυγό μου Βαγγέλη Σκούπρα που με την στήριξη και την αγάπη του με ωθεί να προσπαθώ περισσότερο κάθε μέρα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Νικόλαο Λύκο Κακολύρη στον οποίο και αφιερώνω αυτή την εργασία. Μου έδωσε τα εφόδια να σπουδάσω και να κάνω τα όνειρά μου πραγματικότητα και θα τον ευγνωμονώ πάντα.

1. ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

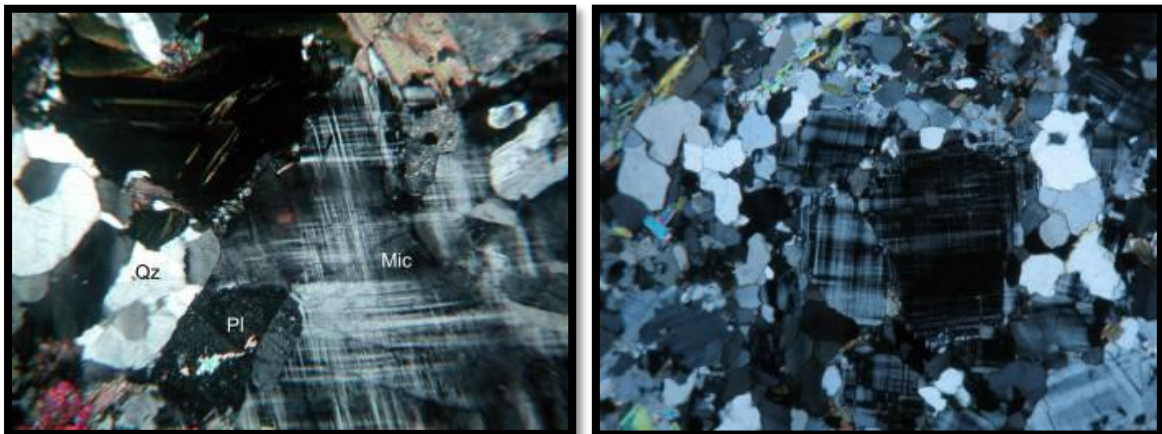
Μεταμόρφωση ονομάζεται το σύνολο των διεργασιών κατά τις οποίες ένα πέτρωμα σε στερεή κατάσταση τροποποιείται ιστολογικά, ορυκτολογικά και χημικά χωρίς να τακεί, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης κάτω από την επιφάνεια της γης. Τα πετρώματα αυτά χαρακτηρίζονται ως μεταμορφωμένα πετρώματα, εφόσον τα γεωλογικά, ορυκτολογικά και ιστολογικά τους χαρακτηριστικά δείχνουν ότι έχουν προέλθει από ένα αρχικό πέτρωμα (πυριγενές, ιζηματογενές ή και μεταμορφωμένο) (Εικ.1.1). Τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά με τα οποία αναγνωρίζουμε ένα μεταμορφωμένο πέτρωμα είναι η παράλληλη διάταξη των ορυκτών, τα πυριτικά ορυκτά που περιέχονται σε κρυσταλλικά πετρώματα, η μεταμορφική στρωμάτωση των ορυκτών, οι περιορισμένοι λιθολογικοί τύποι και τα ορυκτά δείκτες που αναγνωρίζονται με ακρίβεια μικροσκοπικά, τα οποία κρυσταλλώνονται μόνο σε συγκεκριμένες συνθήκες μεταμόρφωσης. Αυτά τα ορυκτά μαρτυρούν τις συγκεκριμένες συνθήκες σχηματισμού του πετρώματος και το προσδιορίζουν ως μεταμορφωμένο. Τα ορυκτά που χαρακτηρίζονται δείκτες είναι ο τρεμολίτης, ο χλωρίτης, ο τάλκης, ο ακτινόλιθος, οι γρανάτες, ο ζοϊσίτης, ο κλίνοζοϊσίτης, το επίδοτο, ο ανδαλουσίτης, ο σιλλιμανίτης, ο κορδιερίτης, ο κυανίτης, ο σταυρόλιθος, ο γλαυκοφανής (Δημητριάδης, 1988).

Για να χαρακτηριστεί ένα πέτρωμα μεταμορφωμένο πρέπει να έχει υποστεί τουλάχιστον μία από τις δύο θεμελιώδεις μεταμορφικές τροποποιήσεις, τη νεοορυκτογένεση ή και την ιστολογική μετάπλαση (Εικ.1.2). Κατά τη νεοορυκτογένεση εμφανίζονται νέα ορυκτά στη θέση κάποιων άλλων του αρχικού πετρώματος. Κατά την ιστολογική μετάπλαση λαμβάνει χώρα η παραμόρφωση των ορυκτών του αρχικού

πετρώματος, ο προσανατολισμός των ορυκτών που έχουν εμφανιστεί στο στάδιο της νεοορυκτογένεσης, είτε η ανακρυστάλλωση των παραμορφωμένων κρυστάλλων των ίδιων ορυκτών (Δημητριάδης, 1988).



Εικ.1.1. Αριστερά φαίνεται ένας αμεταμόρφωτος γρανίτης και δεξιά φαίνεται ένας γνεύσιος, το προϊόν μεταμόρφωσης του γρανίτη. Παρατηρείται εμφανής ιστολογική τροποποίηση (Πηγή: geologylearn.blogspot.com, geologyscience.com).



Εικ.1.2. Μικροσκοπικές εικόνες ενός γρανίτη (αριστερά) και ενός γνευσίου (δεξιά), όπου Qz = χαλαζίας, Pl = πλαγιόκλαστο και Mic = μικροκλινής. Παρατηρείται ανακρυστάλλωση και ιστολογική τροποποίηση (<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y>).

1.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η μεταμόρφωση ως ένα σύνολο διεργασιών προκαλείται από αρκετούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν το βαθμό μεταμόρφωσης του πετρώματος, το είδος του πετρώματος που θα προκύψει από τη μεταμόρφωση ενός προϋπάρχοντος πετρώματος, τα ορυκτά που θα σχηματιστούν, τον ιστό του και τις γεωχημικές του ιδιότητες. Οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν τη μεταμόρφωση, ο καθένας ξεχωριστά ή και παράλληλα είναι η θερμοκρασία, η πίεση, οι τάσεις-παραμόρφωση και η πίεση ρευστής φάσης, σε συνδυασμό με το βάθος που συμβαίνουν οι διεργασίες (Δημητριάδης, 1988).

Η θερμοκρασία, αυξάνεται παράλληλα με το βάθος του εσωτερικού της γης. Σε διάφορες ενεργές γεωτεκτονικά περιοχές, η θερμοκρασία αυξάνεται με διαφορετικό ρυθμό, οπότε και ο βαθμός και οι συνθήκες της μεταμόρφωσης ενός πετρώματος θα διαφέρουν (Δημητριάδης, 1988).

Η πίεση αυξάνεται και αυτή με το βάθος από την επιφάνεια προς το εσωτερικό της γης, λόγω των υπερκείμενων πετρωμάτων που ασκούν πίεση στα κατώτερα πετρώματα που βρίσκονται και σε μεγαλύτερο βάθος (Δημητριάδης, 1988).

Τα πετρώματα όταν δεν βρίσκονται σε μηχανική ισορροπία, δέχονται δυνάμεις, οι οποίες ονομάζονται τάσεις και μπορεί να είναι είτε εφελκυστικές, είτε συμπιεστικές. Απόρροια αυτών των δυνάμεων είναι η παραμόρφωση του πετρώματος και η αλλαγή του ιστού του (Δημητριάδης, 1988).

Η ρευστή φάση αποτελείται περισσότερο από αέρια συστατικά. Βρίσκεται είτε με τη μορφή υμένα γύρω από ορυκτά είτε μέσα σε

σπασίματα και πολλές φορές περιορίζεται η κίνησή της μέσα σε αυτά. Έχει πίεση p_f , η οποία όταν ξεπεράσει την τιμή της πίεσης που δέχεται το πέτρωμα από εξωγενείς παράγοντες προκαλεί το θραυσμό του. Κύρια συστατικά της ρευστής φάσης είναι το H_2O , που προέρχεται από μεταμορφικές αντιδράσεις ένυδρων ορυκτών, είτε από τους πόρους ενός πετρώματος μέσα στους οποίους ήταν παγιδευμένο και το CO_2 που προέρχεται από ανθρακικά ορυκτά που μπορούν να διασπαστούν και να εμπλουτίσουν τη ρευστή φάση. Άλλα συστατικά της ρευστής φάσης είναι F, Cl, O_2 , Br. Τέλος, ο σημαντικότερος παράγοντας για τη διεκπεραίωση των διεργασιών της μεταμόρφωσης των πετρωμάτων είναι ο χρόνος. Χρειάζεται πολύς χρόνος για να επιτελεστούν οι απαραίτητες διεργασίες, να μετατραπεί ένα προϋπάρχων πέτρωμα σε ένα εξ ολοκλήρου μεταμορφωμένο πέτρωμα και να βρεθεί σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισοροπίας (Δημητριάδης, 1988).



2. ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Οι παράγοντες συνδυάζονται και καθορίζουν τη μεταμόρφωση των πετρωμάτων καθώς και το είδος της μεταμόρφωσης. Τα κύρια είδη μεταμόρφωσης διακρίνονται σε Θερμική μεταμόρφωση ή μεταμόρφωση επαφής, σε Δυναμική μεταμόρφωση και σε Περιοχική μεταμόρφωση. Κάποια άλλα είδη, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία της Περιοχικής μεταμόρφωσης είναι η υδροθερμική, η ωκεάνια και η θαπτική μεταμόρφωση. Η Πυρομεταμόρφωση αποτελεί είδος θερμικής μεταμόρφωσης.

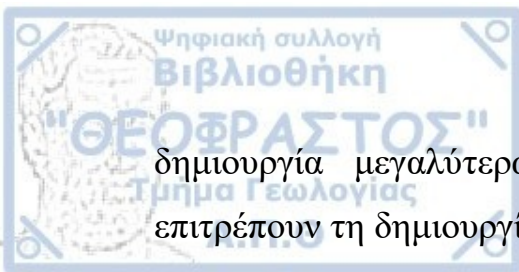
2.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ Ή ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ

Η Θερμική μεταμόρφωση ή μεταμόρφωση επαφής, παρατηρείται σε περιβάλλοντα διείσδυσης μαγματικού όγκου και έχει τοπικό χαρακτήρα. Δημιουργείται μία ζώνη μεταμόρφωσης στα περιβάλλοντα πετρώματα γύρω από το μαγματικό όγκο, τα οποία αλλάζουν ιστολογικά και ορυκτολογικά, και ονομάζεται άλως επαφής. Χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμοκρασία, χαμηλή πίεση, έλλειψη παραμορφωτικών τάσεων και επίδραση ρευστών από το μαγματικό όγκο. Το εύρος της ζώνης επαφής επηρεάζεται από κάποιους παράγοντες, οι οποίοι μεταβάλλουν το εύρος της. Οι παράγοντες αυτοί είναι η φύση και ο όγκος του πυριγενούς πετρώματος, η φύση του περιβάλλοντος πετρώματος, το βάθος της διείσδυσης και η κλίση της επιφάνειας μεταξύ πυριγενούς και περιβάλλοντος πετρώματος (Δημητριάδης, 1988).

Η φύση του πυριγενούς πετρώματος έχει να κάνει με τη θερμοκρασία του μάγματος και ο όγκος του με τη θερμική ακτινοβολία

που εκπέμπει. Το είδος του μάγματος καθορίζει και το πόσο θα θερμανθούν τα περιβάλλοντα πετρώματα από τον μαγματικό όγκο, άρα και το πλάτος της ζώνης επαφής. Τα γρανιτικά μάγματα έχουν θερμοκρασιακό εύρος 500-550°C, και εκτός από τη θερμική τους ακτινοβολία, η οποία είναι κυρίως υπεύθυνη για τη θερμική μεταμόρφωση, διαθέτουν θερμά διαλύματα, τα οποία, με τη μεταφορά τους θερμαίνουν και μεταφέρουν χημικά στοιχεία στα γύρω πετρώματα. Τα βασαλτικά μάγματα από την άλλη, δεν διαθέτουν θερμά διαλύματα, αλλά έχουν θερμοκρασιακό εύρος 650-700°C και εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία (Δημητριάδης, 1988).

Η φύση του περιβάλλοντος πετρώματος καθορίζει σημαντικά το εύρος της ζώνης επαφής. Τα συμπαγή πετρώματα δεν επιτρέπουν την κυκλοφορία ρευστών με αποτέλεσμα να μην διευρύνεται σε μεγάλη απόσταση η ζώνη επαφής. Τα πορώδη πετρώματα επιτρέπουν την κυκλοφορία νερού, το οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον του και να το απομακρύνει από τη ζώνη επαφής, καθώς και να ψύχει το μάγμα που έρχεται σε επαφή με το πέτρωμα στο οποίο κινείται. Επίσης, το βάθος της διείσδυσης του μάγματος μέσα στο φλοιό έχει σημαντικό ρόλο στην διεύρυνση της ζώνης επαφής. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος που γίνεται η διείσδυση του μάγματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία των περιβαλλόντων πετρωμάτων και τόσο λιγότερη είναι η εμφάνιση της ζώνης επαφής, αφού σε μεγάλες θερμοκρασίες τα πετρώματα έχουν αναπτύξει ορυκτά σταθερά σε αυτές τις θερμοκρασίες, άρα η επιρροή του μαγματικού θαλάμου στα γύρω πετρώματα θα είναι ελάχιστη σε αντίθεση με μικρότερα βάθη που η θερμοκρασία των περιβαλλόντων πετρωμάτων είναι τέτοια, όπου η ζώνη επαφής είναι μεγαλύτερη. Τέλος, άλλο ένα κριτήριο για το πλάτος της ζώνης επαφής είναι η κλίση της επιφάνειας επαφής του μαγματικού όγκου με το περιβάλλον πέτρωμα. Μικρές κλίσεις επιτρέπουν τη



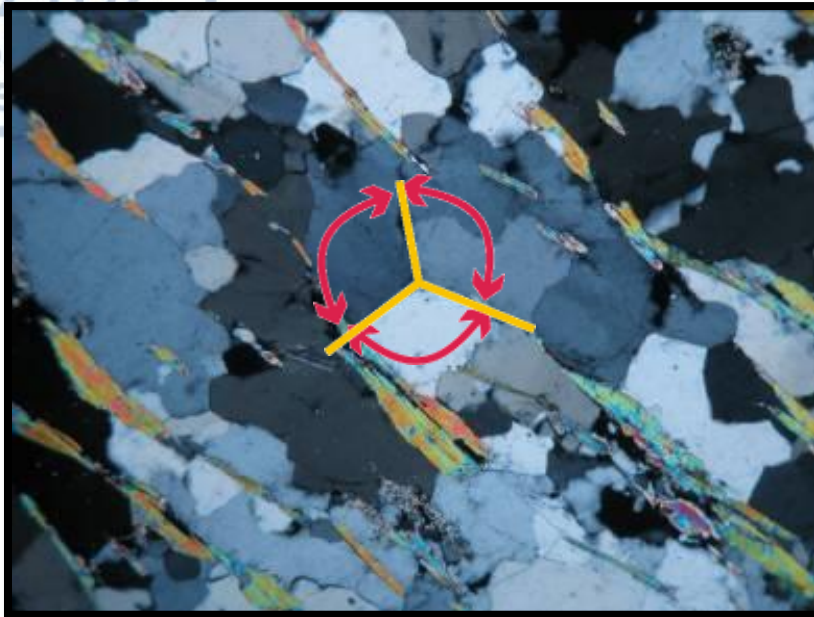
δημιουργία μεγαλύτερων σε πλάτος ζωνών ενώ μεγάλες κλίσεις επιτρέπουν τη δημιουργία στενών ζωνών επαφής (Δημητριάδης, 1988).

2.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΙΣΤΟΙ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΑ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

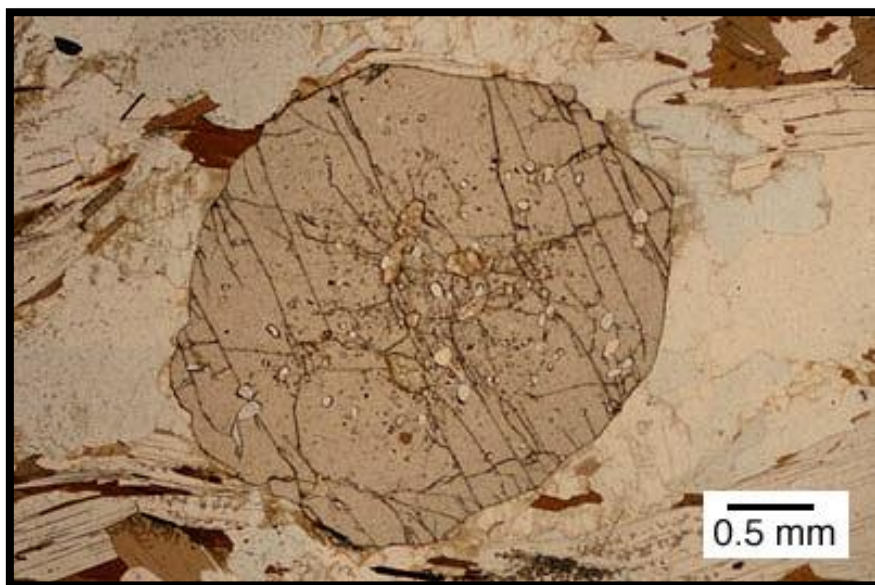
Στη θερμική μεταμόρφωση τα πετρώματα αναπτύσσουν ιστολογικά χαρακτηριστικά σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, χαμηλής πίεσης και έλλειψης παραμορφωτικών τάσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι ιστοί αυτοί είναι ο γρανοβλαστικός, ο πορφυροβλαστικός και ο ποικιλοβλαστικός (Δημητριάδης, 1988).

Ο γρανοβλαστικός ιστός χαρακτηρίζεται από ισόμετρη και πολυεδρική ανάπτυξη των κρυστάλλων του κύριου ορυκτού του πετρώματος. Όταν τυχαίνουν τριπλές συγκλίσεις των επιφανειών των κόκκων, σχηματίζονται τρεις ίσες γωνίες 120° (Εικ. 2.1.1.1). Ο γρανοβλαστικός ιστός διακρίνεται σε λοβοειδή και πολυγωνικό, ανάλογα με το σχήμα των κρυστάλλων αντίστοιχα (Δημητριάδης, 1988).

Πορφυροβλαστικός ιστός χαρακτηρίζεται ο ιστός, στον οποίο, οι κρύσταλλοι ενός ορυκτού έχουν αναπτύξει μεγαλύτερο μέγεθος από τους κρυστάλλους των υπόλοιπων ορυκτών του πετρώματος και ονομάζονται πορφυροβλάστες (Εικ. 2.1.1.2). Συχνά οι πορφυροβλάστες, ενσωματώνουν γειτονικά ορυκτά στη δομή τους, ενώ όταν τα ενσωματωμένα ορυκτά ποικίλλουν, μπορούν να χαρακτηριστούν ως ποικιλοβλάστες και ο ιστός ποικιλοβλαστικός (Δημητριάδης, 1988).



Εικ.2.1.1.1 Μικροσκοπική εικόνα γρανοβλαστικού ιστού σε παρατήρηση με αναλυτή, όπου φαίνεται ο σχηματισμός γωνιών 120° των κόκκων
(<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y>)



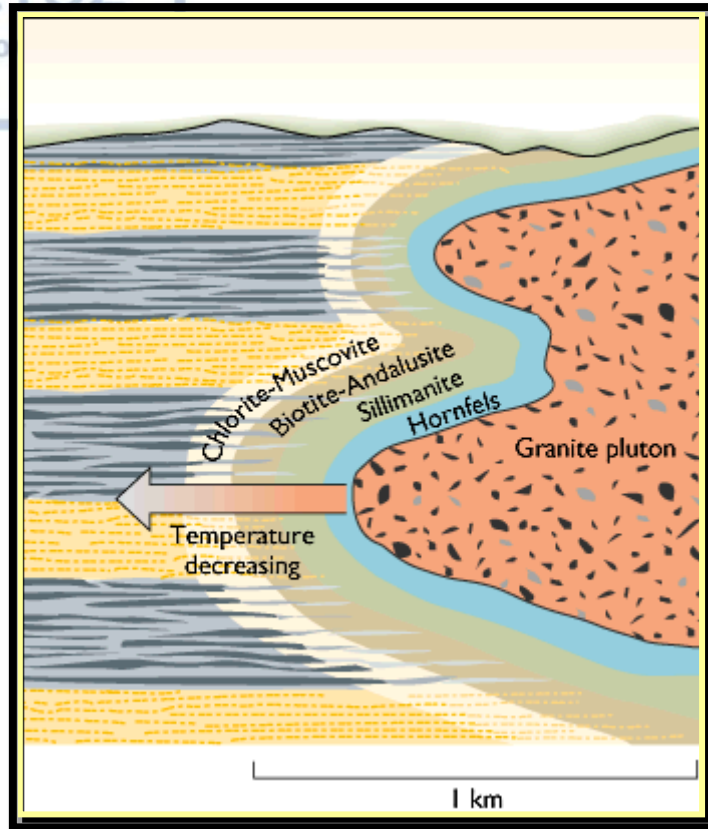
Εικ.2.1.1.2 Πορφυροβλαστικός ιστός μεταμορφωμένου πετρώματος. Διακρίνεται πορφυροβλάστης γρανάτη
(<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y>).

2.1.2 ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΓΙΛΟΠΗΛΙΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Σε μια ζώνη επαφής, μεταξύ ενός πυριγενούς και ενός αργιλοπηλιτικού πετρώματος, δημιουργείται ένα πέτρωμα που ονομάζεται κερατίτης. Ο κερατίτης είναι ένα συμπαγές, σκληρό και λεπτόκοκκο πέτρωμα που δεν εμφανίζει σχιστότητα, έχει γρανοβλαστικό ιστό και σχεδόν πάντα περιέχει κρυστάλλους βιοτίτη. Εμφανίζεται στο εσωτερικό της ζώνης επαφής και βρίσκεται σε επαφή με το πυριγενές πέτρωμα. Δίπλα στον κερατίτη δημιουργείται ένα πέτρωμα με μικρότερο βαθμό μεταμόρφωσης που ονομάζεται κηλιδωτός κερατίτης, λόγω της συγκέντρωσης γραφίτη σε κηλίδες μέσα στο πέτρωμα, στις οποίες ξεκινά η κρυστάλλωση του κορδιερίτη και του ανδαλουσίτη. Στο εξωτερικό μέρος της ζώνης παρατηρείται το αργιλοπηλιτικό πέτρωμα που μένει αμεταμόρφωτο. Η ζώνωση από το υψηλότερο θερμοκρασιακά πέτρωμα προς το χαμηλότερο είναι πλουτωνίτης – κερατίτης - κηλιδωτός κερατίτης - αργιλοπηλιτικό πέτρωμα (Σχ. 2.1.2.1) (Δημητριάδης, 1988).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι παραγενέσεις στη ζώνη επαφής, από το θερμότερο πέτρωμα που είναι ο πλουτωνίτης προς το αργιλοπηλιτικό πέτρωμα που είναι ψυχρότερο, σε γενικά πλαίσια μεταβάλλονται ως εξής:



Σχ.2.1.2.1 Ζώνες θερμικής μεταμόρφωσης αργιλοπηλιτικού πετρώματος
(<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y>).

- A. ανδαλουσίτης ± σιλλιμανίτης + κορδιερίτης + βιοτίτης + K-ούχος άστριος + χαλαζίας ± γρανάτης (κερατίτης)
- B. μοσχοβίτης ± ανδαλουσίτης ± κορδιερίτης + βιοτίτης ± γλωριτοειδής + χαλαζίας (κηλιδωτός κερατίτης)
- Γ. γλωρίτης + μοσχοβίτης + χαλαζίας ± γλωριτοειδής (αμεταμόρφωτος αργιλοπηλίτης)

Σε περίπτωση που το αργιλοπηλιτικό πέτρωμα περιέχει σημαντική ποσότητα Ca, τότε οι κερατίτες θα περιέχουν πυροξένους και η παραγένεσή τους θα χαρακτηρίζεται από **υπερσθενή + κορδιερίτη + ορθόκλαστο + βιοτίτη** (Δημητριάδης, 1988).

ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

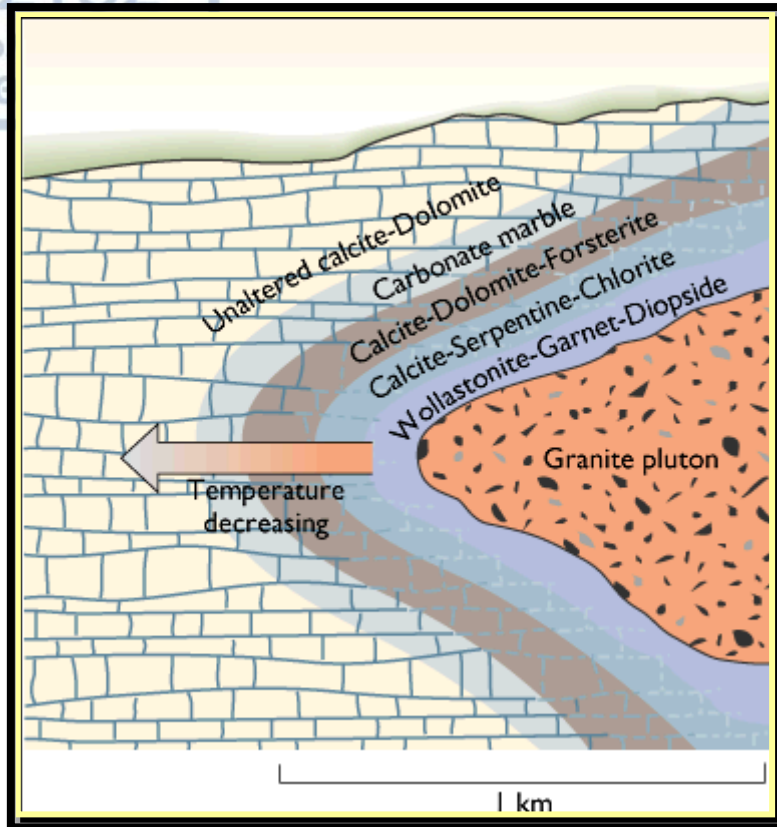
Η Θερμική μεταμόρφωση των ανθρακικών πετρωμάτων χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, στη Θερμική μεταμόρφωση αμιγών ανθρακικών πετρωμάτων και στη Θερμική μεταμόρφωση μη αμιγών ανθρακικών πετρωμάτων (Δημητριάδης, 1988).

Η Θερμική μεταμόρφωση των αμιγών ανθρακικών πετρωμάτων χαρακτηρίζει τη μεταμόρφωση επαφής καθαρά ανθρακικών πετρωμάτων και χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις, αυτή της ισοχημικής και αυτή της αλλοχημικής αντίδρασης. Η ισοχημική μεταμόρφωση που λαμβάνει μέρος στη μεταμόρφωση επαφής ανθρακικών πετρωμάτων με μάγμα υψηλής θερμοκρασίας χαρακτηρίζεται με την εξής αντίδραση:



όπου $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ο δολομίτης, CaCO_3 ο ασβεστίτης και το MgO το περίκλαστο. Σύμφωνα με την αντίδραση, το πέτρωμα αποδολομιτοποιείται και σχηματίζεται περίκλαστο, το οποίο μπορεί να ανασχηματιστεί σε βρουσίτη $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (Δημητριάδης, 1988).

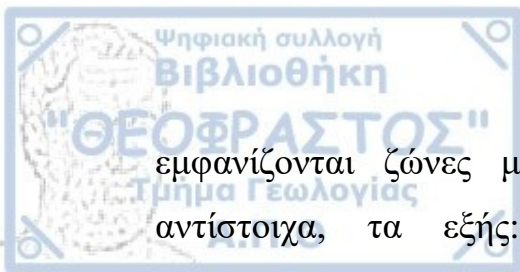
Στην περίπτωση της αλλοχημικής μεταμόρφωσης, η μεταμόρφωση επαφής μεταξύ των ανθρακικών πετρωμάτων και του μάγματος, γρανιτικής-διοριτικής συστάσεως, δημιουργεί ζώνη που ονομάζεται skarn επαφής (Σχ. 2.1.2.2). Κατά τη μεταμόρφωση αυτή, εκτός από τη θερμική δράση, η μεταμόρφωση ενισχύεται από ρευστά τα οποία κινούνται και ανταλλάσσουν συστατικά μεταξύ του μαγματικού θαλάμου και των περιβαλλόντων πετρωμάτων.



Σχ.2.1.1.2.2 Ζώνες skarn επαφής (Πηγή: Παρουσιάσεις εργαστηρίου μαθήματος Πετρολογία Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων Α.Π.Θ).

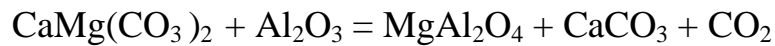
Τα ορυκτά που συμμετέχουν, πιο συχνά, στα skarn επαφής είναι ο γρανάτης, ο βολλαστονίτης, ο μελίλιθος, το επίδοτο, ο κλινοζοϊσίτης, ο ζοϊσίτης, ο τιτανίτης, ο τρεμολίτης, ο διοψίδιος, ο σκαπόλιθος, ο φορστερίτης, ο φλογοπίτης, ο βεζουβιανίτης, ο μοντισελλίτης, ο ανορθίτης, ο αιματίτης και άλλα (Δημητριάδης, 1988).

Η θερμική μεταμόρφωση των μη αμιγών ανθρακικών πετρωμάτων περιλαμβάνει και τη θερμική μεταμόρφωση των χαλαζιομιγών και των αργιλομιγών πετρωμάτων. Τα χαλαζιομιγή είναι ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν ασβεστίτη, χαλαζία και δολομίτη. Όταν υπόκεινται σε μεταμόρφωση δημιουργούνται ζώνες, στην κάθε μια από τις οποίες σχηματίζεται ένα ορυκτό. Από το περιβάλλον πέτρωμα έως το μαγματικό θάλαμο, δηλαδή προς την κατεύθυνση αύξησης της θερμοκρασίας,

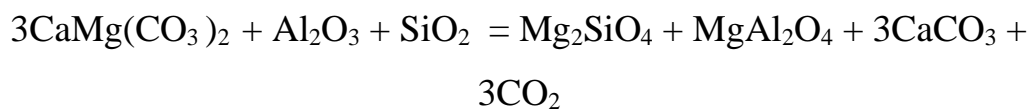


εμφανίζονται ζώνες μεταμόρφωσης που έχουν ως κύρια ορυκτά, αντίστοιχα, τα εξής: τάλκη, τρεμολίτη, διοψίδιο, φορστερίτη, βολλαστονίτη, σπάνια ορυκτά.

Τα αργιλομιγή πετρώματα κατά τη θερμική μεταμόρφωση σχηματίζουν σπινέλλιο, σύμφωνα με την αντίδραση



Όπου $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ο δολομίτης, Al_2O_3 το διάσπορο, MgAl_2O_4 ο σπινέλλιος, CaCO_3 ο ασβεστίτης. Εάν το πέτρωμα αποτελείται από χαλαζιομιγή αλλά και από αργιλομιγή σύσταση, τότε σύμφωνα με την αντίδραση, κατά τη μεταμόρφωση θα σχηματιστεί σπινέλλιος και φορστερίτης.



όπου $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ο δολομίτης, Al_2O_3 το διάσπορο, SiO_2 ο χαλαζίας, Mg_2SiO_4 ο φορστερίτης, MgAl_2O_4 ο σπινέλλιος, CaCO_3 ο ασβεστίτης (Δημητριάδης, 1988).

ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΧΑΛΑΖΙΟΑΣΤΡΙΟΥΧΩΝ ΚΛΑΣΤΙΤΩΝ

Η θερμική μεταμόρφωση των χαλαζιοαστριούχων κλαστιτών αποτελεί τη θερμική μεταμόρφωση των χαλαζιακών ψαμμιτών και αρκοζών. Στο εσωτερικό της ζώνης μεταμόρφωσης, οι κλαστίτες δεν αλλάζουν ορυκτολογική σύσταση, αλλά ο ιστός τους μετατρέπεται από ψαμμιτικός σε γρανοβλαστικός. Το αρχικό πέτρωμα μεταβάλλεται από



κλαστίτη σε χαλαζιακό κερατίτη, τα χαρακτηριστικά του οποίου είναι η πολύ συμπαγής δομή και η υαλώδης λάμψη (Δημητριάδης, 1988).

ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα πυριγενή πετρώματα διαθέτουν ορυκτά, τα οποία παραμένουν αμετάβλητα κατά την αύξηση της θερμοκρασίας, δηλαδή οι παραγενέσεις των πετρωμάτων αυτών μένουν σταθερές ακόμα και αν δεχθούν θερμότητα από τη διείσδυση ενός μαγματικού όγκου. Το ίδιο συμβαίνει και στα μεταμορφωμένα πετρώματα τα οποία έχουν προέλθει από πυριγενή πετρώματα, σε αντίθεση με τους μεταβασίτες χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης, οι παραγενέσεις των οποίων τείνουν να μεταβληθούν κατά τη δράση μαγματικής διείσδυσης σε αυτά. Οι τροποποιήσεις της παραγένεσης των μεταβασιτών χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης, από την αμετάβλητη έως την πιο επηρεασμένη από υψηλή θερμοκρασία, μέσα στη ζώνη επαφής είναι :

- A) Χλωρίτης ± ακτινόλιθος ± χαλαζίας + επίδοτο + αλβίτης
- B) πλαγιόκλαστο + κεροστίλβη + βιοτίτης ± χαλαζίας
- Γ) βιοτίτης ± κεροστίλβη ± χαλαζίας + πλαγιόκλαστο + υπερσθενής + διοψίδιος (Δημητριάδης, 1988).

ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΠΕΡΒΑΣΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα μεταϋπερβασικά πετρώματα, όπως ο σερπεντινίτης, σε ζώνες θερμικής μεταμόρφωσης χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες παραγενέσεις. Οι παραγενέσεις, προς την υψηλότερου βαθμού μεταμόρφωση, είναι :

- A) κορδιερίτης + ανθοφυλλίτης ± γρανάτης ± βιοτίτης
- B) κορδιερίτης + υπερσθενής ± πλαγιόκλαστο (Δημητριάδης, 1988).

2.2 ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η περιοχική μεταμόρφωση είναι ένα είδος μεταμόρφωσης το οποίο είναι αποτέλεσμα θερμικής δράσης, παρατηρείται σε μεγάλους όγκους πετρωμάτων και αποτελεί μεγάλης κλίμακας φαινόμενο. Δημιουργείται από την ύπαρξη υψηλής θερμοκρασίας μέσα στο φλοιό ή από την ορογενετική διαδικασία και χαρακτηρίζεται από έντονες παραμορφωτικές τάσεις με εξαίρεση τα χαμηλού βαθμού περιοχικά μεταμορφωμένα πετρώματα που συνδέονται με τη θαπτική μεταμόρφωση και τα πολύ υψηλού βαθμού, των οποίων η μεταμόρφωση πραγματοποιήθηκε πολύ βαθιά στο φλοιό. Η περιοχική μεταμόρφωση συνδέεται με την τεκτονική, αφού τα πετρώματα μέσω αυτής βυθίζονται στο φλοιό της γης, όπου οι συνθήκες είναι διαφορετικές από αυτές της επιφάνειας και τροποποιούνται ορυκτολογικά και ιστολογικά. Όταν η μεταμόρφωση λάβει τέλος, έχει περάσει δηλαδή ο χρόνος και τα πετρώματα έχουν μεταμορφωθεί, βρίσκουν ξανά το δρόμο προς την επιφάνεια με τη βοήθεια της τεκτονικής. Ανάλογα με το χρόνο που διήρκεσε η μεταμόρφωση αλλά και το βάθος στο οποίο έγινε αυτή, τα πετρώματα είναι χαμηλού βαθμού μεταμορφωμένα είτε υψηλού βαθμού μεταμορφωμένα. Ο ιστός και τα ορυκτά ενός πετρώματος μεταβάλλονται όταν αλλάζουν οι συνθήκες στις οποίες βρίσκονται, διότι τείνει να αποκαταστήσει τη θερμοδυναμική ισορροπία του. Από τον ιστό, την υφή, τα ορυκτά και τον προσανατολισμό των ορυκτών μπορεί να διαγνωσθούν οι τεκτονικές διαδικασίες που ενήργησαν πάνω στο πέτρωμα, αλλά και οι συνθήκες στις οποίες βρέθηκε το ίδιο το πέτρωμα και μεταμορφώθηκε (Δημητριάδης, 1988).

2.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΙΣΤΟΙ ΚΑΙ ΥΦΕΣ ΠΕΡΙΟΧΙΚΑ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΥΦΕΣ

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα που συνδέονται με τεκτονική δράση, διαμορφώνουν υφές, οι οποίες προκαλούνται από παραμορφωτικές τάσεις που ευνοούν τον προσανατολισμό των ορυκτών συστατικών τους. Η υφή καθορίζεται από την ορυκτολογική σύσταση και από το πόσο έδρασαν οι παραμορφωτικές τάσεις πάνω στο πέτρωμα. Οι υφές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες την ισότροπη και την ανισότροπη υφή. Η ισότροπη υφή χαρακτηρίζεται από ορυκτά που έχουν τυχαίο προσανατολισμό στο χώρο ενώ τα ορυκτά στην ανισότροπη υφή έχουν αναπτυχθεί με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Η ανισότροπη υφή αποτελείται από την επίπεδη, τη γραμμωτή και την επίπεδη – γραμμωτή υφή. Η επίπεδη υφή αποτελείται από πλακώδη ή φυλλώδη ορυκτά όπου οι κύρια αναπτυγμένες επιφάνειές τους έχουν υποπαράλληλο προσανατολισμό. Η γραμμωτή υφή αποτελείται από πρισματικούς ή βελονοειδείς κρυστάλλους ορυκτών, όπου η γράμμωσή τους ταυτίζεται με την κύρια ανάπτυξη τους και τέλος, η επίπεδη-γραμμωτή υφή αποτελείται από πρισματικούς, βελονοειδείς κρυστάλλους οι οποίοι διατάσσονται υποπαράλληλα επάνω σε μια επίπεδης υφής επιφάνεια (Δημητριάδης, 1988).



Κατά το στάδιο της νεοορυκτογένεσης και της ανακρυστάλλωσης αναπτύσσονται τα ιστολογικά χαρακτηριστικά ενός μεταμορφωμένου πετρώματος. Στο μεταμορφωμένο πέτρωμα, ανάλογα το βαθμό μεταμόρφωσης, δημιουργείται ένας καινούριος ιστός είτε δημιουργείται ένας ιστός που έχει ίχνη από τον αρχικό ιστό του πετρώματος. Οι ιστοί των περιοχικά μεταμορφωμένων πετρωμάτων διακρίνονται σε γρανοβλαστικό, λεπιδοβλαστικό, ινοβλαστικό, πορφυροβλαστικό, ποικιλοβλαστικό, διασταυρωτικό ή διαβλαστικό και ιστό «μορφής δεματιού». Ο γρανοβλαστικός ιστός, όπως και στη θερμική μεταμόρφωση, χαρακτηρίζεται από ίσου μεγέθους ορυκτά και πολυεδρική ανάπτυξη του κύριου κρυστάλλου και μπορεί να είναι λοβοειδής ή πολυγωνικός γρανοβλαστικός ιστός, ανάλογα με το αν έχει λοβοειδή ή πολυγωνικό σχήμα αντίστοιχα. Ο λεπιδοβλαστικός ιστός, αποτελείται από φυλλόμορφα ορυκτά με υποπαράλληλη ανάπτυξη ενώ ο ινοβλαστικός αποτελείται από ινόμορφα ορυκτά με υποπαράλληλη ανάπτυξη. Ο πορφυροβλαστικός ιστός χαρακτηρίζεται από κάποια ορυκτά, των οποίων οι κρύσταλλοι έχουν αναπτυχθεί περισσότερο μέσα στη μάζα του πετρώματος. Αυτοί οι κρύσταλλοι ονομάζονται πορφυροβλάστες και όταν βρίσκονται με εγλείσματα άλλων ορυκτών ονομάζονται ποικιλοβλάστες και ο ιστός ποικιλοβλαστικός. Ο διασταυρωτικός ή διαβλαστικός ιστός διαμορφώνεται από την τυχαία αλληλοδιείσδυση των κρυστάλλων του ίδιου φυλλόμορφου ή πρισματικού ορυκτού μέσα στη μάζα του πετρώματος. Τέλος, ο ιστός «μορφής δεματιού» αποτελείται από ορυκτά πρισματικά που βρίσκονται σε συσσωματώματα (Εικ. 2.2.1.1) (Δημητριάδης, 1988).



Εικ.2.2.1.1 Ιστός μορφής δεματιού με πρισματικά ορυκτά σε συσσωματώματα
(<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y>).

Σημαντικός παράγοντας που ενδέχεται να επηρεάσει τόσο τα ιστολογικά χαρακτηριστικά του πετρώματος, όσο και την υφή του, είναι η τεκτονική που δέχεται κατά τη διάρκεια, πριν ή μετά τη μεταμόρφωση. Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις η κρυστάλλωση χαρακτηρίζεται ως συντεκτονική, προτεκτονική και μετατεκτονική αντίστοιχα. Στην συντεκτονική κρυστάλλωση, τα ορυκτά διαμορφώνονται και ταυτόχρονα δέχονται την επίδραση των παραμορφωτικών τάσεων. Συχνό φαινόμενο είναι η συντεκτονική κρυστάλλωση πορφυροβλαστών, κυρίως γρανατών, οι οποίοι καθώς αναπτύσσονται και ενσωματώνουν μικρότερους κρυστάλλους, λόγω των τάσεων περιστρέφονται δημιουργώντας μια μορφή «χιονόμπαλας». Στην προτεκτονική κρυστάλλωση, τα ορυκτά έχουν ήδη αναπτυχθεί και λόγω της επίδρασης των τάσεων τα ορυκτά κάμπτονται ή σπάνε. Στη μετατεκτονική κρυστάλλωση, τα ορυκτά διαμορφώνονται μετά την επίδραση της παραμόρφωσης. Μπορεί όμως τα ορυκτά να επουλωθούν δομικά, δηλαδή να ανακρυσταλλωθούν κατά τη

διάρκεια της μετατεκτονικής κρυστάλλωσης και να εμφανίσουν γρανοβλαστικό ιστό (Δημητριάδης, 1988).

2.2.2 ΜΕΤΑΜΟΡΦΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ

Μεταμορφικές φάσεις ονομάζονται οι ομάδες εκείνες των μεταμορφωμένων πετρωμάτων που ενώ δεν προέρχονται από το ίδιο αρχικό πέτρωμα και δεν έχουν την ίδια ορυκτολογική σύσταση δημιουργήθηκαν σε περίπου ίδιες συνθήκες μεταμόρφωσης (Σχ.2.2.2.1). Πιο συγκεκριμένα, η κάθε μεταμορφική φάση αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών P, T και η κάθε μεταμορφική φάση αποτελείται από ένα σύνολο μεταμορφικών παραγενέσεων (Δημητριάδης, 1988).

Ανάλογα με τη γεωθερμική βαθμίδα σε μια περιοχή, διαφοροποιείται και ο βαθμός μεταμόρφωσης και για την περιοχική μεταμόρφωση οι μεταμορφικές φάσεις, γνωστές ως φασικές σειρές, χωρίζονται ως εξής:

α) υψηλή πίεση - χαμηλή θερμοκρασία

Σε αυτή τη φάση λείπουν τα αργιλοπυριτικά ορυκτά από τους μεταπηλίτες και οι μεταβασίτες μεταμορφώνονται στη γλαυκοφανιτική φάση και αργότερα στην εκλογιτική.

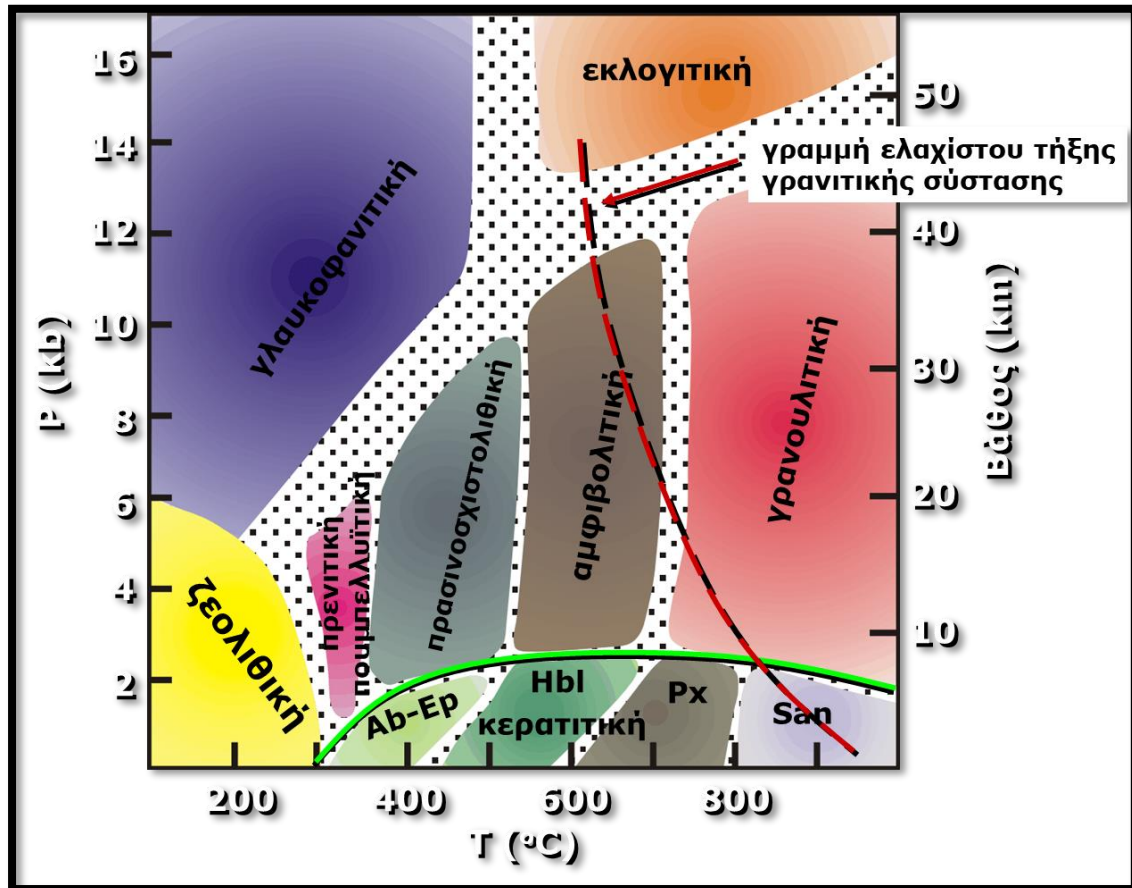
β) μέση πίεση - μέση θερμοκρασία

Οι παραγενέσεις των μεταπηλιτών αποτελούνται από κυανίτη και σιλλιμανίτη και οι μεταβασίτες μεταμορφώνονται στην πρασινοσχιστολιθική - αμφιβολιτική φάση και έπειτα στην εκλογιτική - γρανουλιτική.

γ) χαμηλή πίεση - υψηλή θερμοκρασία

Οι παραγενέσεις των μεταπηλιτών σε αυτό το εύρος τιμών P, T αποτελούνται από ανδαλουσίτη, κορδιερίτη και σιλλιμανίτη ενώ οι

μεταβάσιτες μεταμορφώνονται στην πρασινοσχιστολιθική - αμφιβολιτική φάση και αργότερα στη γρανουλιτική και όχι στην εκλογιτική φάση (Δημητριάδης, 1988).



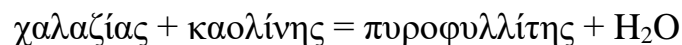
Σχ.2.2.2.1 Διάγραμμα P-T μεταμορφικών φάσεων

(<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y>).

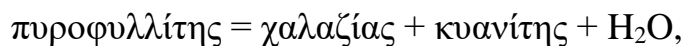
2.2.3 ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΓΙΛΟΠΗΛΙΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Οι αργιλοπηλίτες ως πρωτόλιθοι είναι ιζηματογενή πετρώματα με κύρια ορυκτά τον καολίνη, τον ιλλίτη και τον μοντμοριλλονίτη. Όταν οι συνθήκες στις οποίες βρίσκονται αλλάζουν και αρχίζει η διαδικασία της μεταμόρφωσης οι παραγενέσεις τους μεταβάλλονται. Το πρώτο στάδιο της μεταμόρφωσης, από το χαμηλότερο στον υψηλότερο βαθμό μεταμόρφωσης, είναι η μεταβολή της ισόβαθμης του Χλωρίτη. Ισόβαθμη χαρακτηρίζεται το όριο που διαχωρίζει δύο μεταμορφικές ζώνες όπου στην κάθε μία από αυτές κυριαρχεί ένα ορυκτό δείκτης. Κατά τη μεταμόρφωση, τα αρχικά αργιλικά ορυκτά μετατρέπονται σε φεγγίτη, σε πυροφυλλίτη και σε Al-ούχο χλωρίτη. Ο πυροφυλλίτης σχηματίζεται ως εξής:



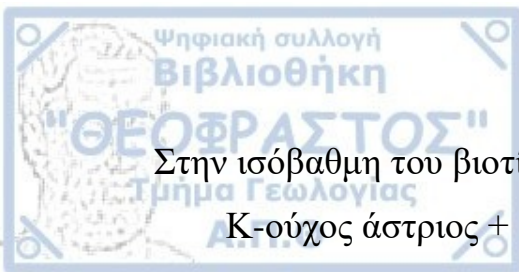
Όταν αυξάνεται ο βαθμός μεταμόρφωσης τότε ο πυροφυλλίτης διασπάται με την εξής αντίδραση:



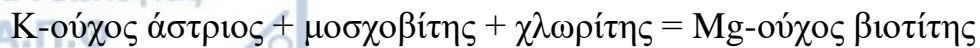
όταν η πίεση είναι μεγαλύτερη των 2,5 kb και η θερμοκρασία περίπου στους 450° C ενώ,



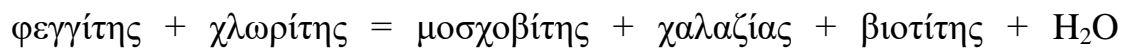
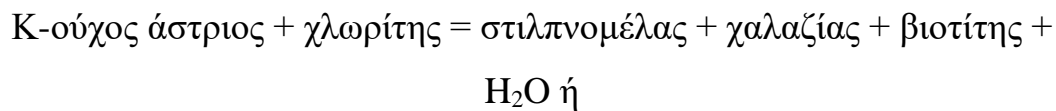
όταν η πίεση είναι μικρότερη των 2 kb και η θερμοκρασία περίπου στους 420° C.



Στην ισόβαθμη του βιοτίτη, ο βιοτίτης σχηματίζεται με την αντίδραση:



Όταν απουσιάζει ο μοσχοβίτης, ο βιοτίτης σχηματίζεται με τη βοήθεια του φεγγίτη και του χλωρίτη με τις αντιδράσεις:



(Δημητριάδης, 1988)

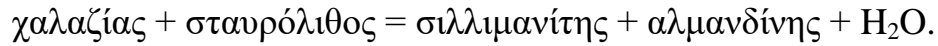
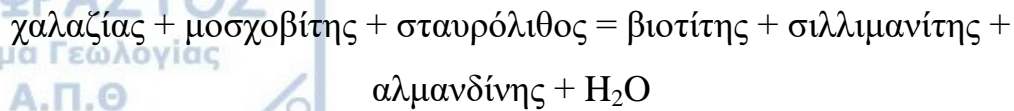
Συνεχίζοντας η μεταμόρφωση στην ισόβαθμη του γρανάτη, ο σχηματισμός του γρανάτη εκτελείται κυρίως από την αποικοδόμηση του χλωρίτη, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κρύσταλλοι που στον πυρήνα τους συγκεντρώνουν Mn και σχηματίζεται σπεςσαρτίνης, ενώ στην περιφέρεια συγκεντρώνεται το υπολειπόμενο Fe και σχηματίζεται αλμανδίνης. Στους μεταπηλίτες που η σύστασή τους περιέχει πολύ Al και Fe, σχηματίζεται αρχικά χλωριτοειδής, πριν την εμφάνιση γρανατών (Δημητριάδης, 1988).

Περνώντας στη μεταμόρφωση μέσου βαθμού χαρακτηριστική είναι η ισόβαθμη του σταυρόλιθου, στη ζώνη του οποίου απαραίτητα στοιχεία για τον σχηματισμό του είναι το Al, Fe. Με τη συμβολή του μοσχοβίτη, του χλωρίτη, του χαλαζία και την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης, μέσω αντιδράσεων ο σταυρόλιθος αντικαθίσταται από άλλα αργιλοπυριτικά ορυκτά (Δημητριάδης, 1988).

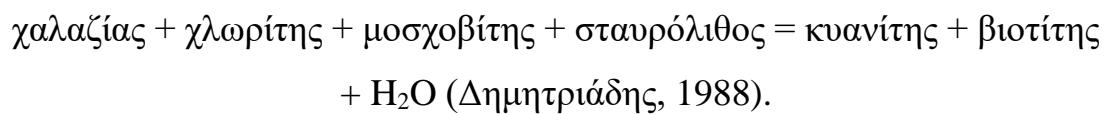
Σε συνθήκες χαμηλών πιέσεων, ο σταυρόλιθος αντικαθίσταται από κορδιερίτη και ανδαλουσίτη:



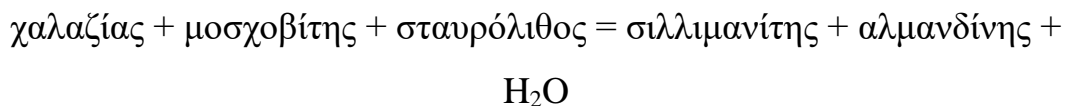
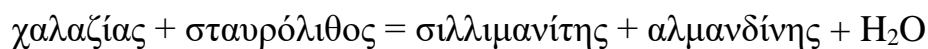
Σε μέσες πιέσεις 4-8kb, ο σταυρόλιθος αντικαθίσταται από σιλλιμανίτη σύμφωνα με την αντίδραση:



Σε υψηλές πιέσεις ο σταυρόλιθος αντικαθίσταται από κυανίτη:



Τη μετάβαση σε υψηλού βαθμού μεταμόρφωση, σηματοδοτεί η ισόβαθμη του σιλλιμανίτη. Ο σιλλιμανίτης σχηματίζεται από την αντίδραση του σταυρόλιθου με το μοσχοβίτη και το χαλαζία με τις αντιδράσεις:

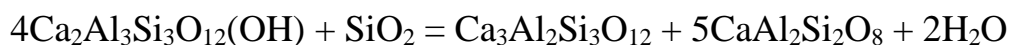


Σύμφωνα με το διάγραμμα P,T των αργιλοπυριτικών ορυκτών, ο σιλλιμανίτης σχηματίζεται επίσης από τη μετατροπή του ανδαλουσίτη σε χαμηλή πίεση ή τη μετατροπή του κυανίτη σε υψηλή πίεση (Δημητριάδης, 1988).

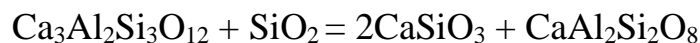
ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΣΒΕΣΤΟΥΧΩΝ ΠΗΛΙΤΩΝ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΜΙΓΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ

Όταν οι ασβεστούχοι πηλίτες και οι αργιλομιγείς ασβεστόλιθοι μεταμορφώνονται, τα ορυκτά που σχηματίζουν είναι το πλαγιόκλαστο, η

κεροσίτλη, ο ζοϊσίτης ή ο κλινοζοϊσίτης, ο βολλαστονίτης, ο μαργαρίτης και ο γροσσουλάριος. Το πλαγιόκλαστο και ο ασβεστίτης είναι τα ορυκτά που σχηματίζονται πάντα στη μεταμόρφωση αυτών των πετρωμάτων, ενώ ο μαργαρίτης σχηματίζεται μόνο σε χαμηλό βαθμό μεταμόρφωσης. Ο ζοϊσίτης σχηματίζεται σε θερμοκρασία 350-400°C και πίεση 2kb και με τη βοήθεια της ρευστής φάσης που περιέχει μόνο H₂O, ενώ αν περιέχει και CO₂ σχηματίζεται πλαγιόκλαστο. Με την αντίδραση:



όπου Ca₂Al₃Si₃O₁₂(OH) ο ζοϊσίτης, SiO₂ ο χαλαζίας, Ca₃Al₂Si₃O₁₂ ο γροσσουλάριος και CaAl₂Si₂O₈ ο ανορθίτης, σχηματίζεται γροσσουλάριος και ανορθίτης σε συνθήκες πίεσης 4 kb. Σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 600°C ο γροσσουλάριος δίνει βολλαστονίτη με την αντίδραση:

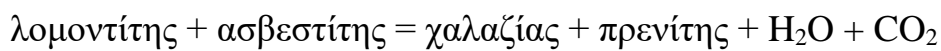


Όπου CaSiO₃ ο βολλαστονίτης. Σε περίπτωση που η ρευστή φάση περιέχει πολύ CO₂ και λείπει ο χαλαζίας από τη σύσταση του πετρώματος, τότε, αντί για γροσσουλάριο σε υψηλές θερμοκρασίες σχηματίζονται βολλαστονίτης, ανορθίτης και ασβεστίτης, ενώ σε χαμηλές, χαλαζίας, ανορθίτης και ασβεστίτης (Δημητριάδης, 1988).

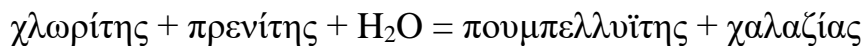
ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα βασικά πυριγενή πετρώματα αποτελούνται από άνυδρα ορυκτά και κατά τη διαδικασία της μεταμόρφωσης ενυδατώνονται. Όσο αυξάνεται ο βαθμός της μεταμόρφωσης τα ορυκτά αρχίζουν να

αφυδατώνονται μέχρι να μετατραπούν σε άνυδρα ξανά και να φτάσει η μεταμόρφωση στον υψηλότερο βαθμό μεταμόρφωσης. Η μεταμόρφωση ξεκινά από τη φάση με το χαμηλότερο βαθμό, τη ζεολιθική. Στη ζεολιθική φάση οι άστριοι μετατρέπονται στους ζεολίθους χοϊλανδίτη και ανάλκιμο, ενώ σε υψηλότερο βαθμό μετατρέπονται σε αλβίτη και λομοντίτη. Με την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης, από τη ζεολιθική φάση περνά στην πρενιτική - πουμπελλυϊτική με την αντίδραση :



και ο πουμπελλυϊτης με την αντίδραση :



(Δημητριάδης, 1988).

Η αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης συνεχίζεται με το πέρασμα στην πρασινοσχιστολιθική φάση. Στη φάση αυτή, οι ζεόλιθοι μετατρέπονται σε ακτινόλιθο, επίδοτο, χλωρίτη και αλβίτη, τα πλαγιόκλαστα αποσυνθέτονται και δημιουργούνται επίδοτα, κλινοζοϊσίτες και αλβίτες, ενώ οι πυρόξενοι τροποποιούνται σε χλωρίτη και ακτινόλιθο. Η παραγένεση σε αυτή τη φάση είναι χλωρίτης + επίδοτο + κλινοζοϊσίτης + χαλαζίας + αλβίτης + ακτινόλιθος ± βιοτίτης ± ασβεστίτης ± τιτανίτης ± στιλπνομέλας (σε υψηλές πιέσεις). Η επόμενη φάση είναι αυτή της αμφιβολιτικής στην οποία συμβαίνουν μια σειρά μεταβατικών αντιδράσεων των ορυκτών της πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Η παραγένεση της αμφιβολιτικής φάσης είναι η εξής ανδεσίνης + κεροστίλβη ± τιτανίτης ± γρανάτης ± μαγνητίτης ± χαλαζίας ± βιοτίτης ± ιλμενίτης (Δημητριάδης, 1988).

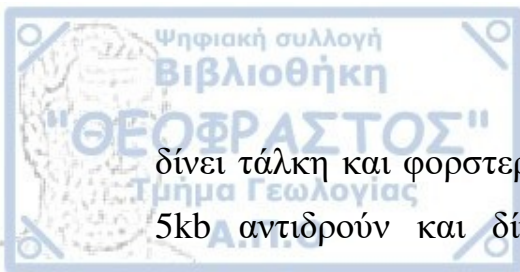
Με την αφυδάτωση της κεροστίλβης και την ολοκληρωτική, εν τέλει, αποικοδόμησή της, η μεταμόρφωση μεταβαίνει στην γρανουλιτική

φάση όπου η χαρακτηριστική παραγένεσή της αποτελείται από ορθοπυρόξενο, κλινοπυρόξενο και βασικά πλαγιόκλαστα, ενώ με την αύξηση της πίεσης η παραγένεση αλλάζει και περιλαμβάνει γρανάτη, διοσίδιο και πλαγιόκλαστα (Δημητριάδης, 1988).

Με περαιτέρω αύξηση της πίεσης, η μεταμόρφωση περνά, τέλος, στην εκλογιτική φάση με την χαρακτηριστική ορυκτολογική σύσταση ομφακίτη και γρανάτη. Οι εκλογίτες διακρίνονται σε τρεις τύπους, ανάλογα με το περιβάλλον που βρίσκονται. Οι Α τύπου έχουν δημιουργηθεί από προϊόντα μανδύα και περιέχονται στους κιμπερλίτες, οι Β τύπου βρίσκονται μέσα σε αμφιβολίτες υψηλού βαθμού με τη μορφή φακών και οι Γ τύπου σχηματίζονται σε άνυδρο περιβάλλον γλαυκοφανιτικών σχιστολίθων. Σε υψηλή πίεση αλλά χαμηλή θερμοκρασία η φάση που κυριαρχεί είναι αυτή της γλαυκοφανιτικής και η χαρακτηριστική της παραγένεση είναι ο γλαυκοφανής, ο λοσονίτης, ο αραγωνίτης και ο ιαδεϊτικός πυρόξενος (Δημητριάδης, 1988).

ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΠΕΡΒΑΣΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα υπερβασικά πετρώματα που μεταμορφώνονται περιέχουν στην αρχική ορυκτολογική τους σύσταση σπινέλιο, υπερσθενή, ολιβίνη, διοσίδιο και ενστατίτη. Όταν τα πετρώματα αυτά βρεθούν κοντά σε συνθήκες επιφανείας, τα ορυκτά τους ενυδατώνονται και η σύστασή τους αλλάζει. Όταν στο πέτρωμα κυριαρχεί ο ενστατίτης, μετά την ενυδάτωση τα ορυκτά που εμφανίζονται είναι ο σερπεντίνης και ο τάλκης, όταν κυριαρχεί ο φορστερίτης εμφανίζονται ο σερπεντίνης και ο βρουσίτης και όταν το υπερβασικό πέτρωμα έχει σύσταση φορστερίτη και ενστατίτη εμφανίζεται σερπεντίνης. Στις υψηλές θερμοκρασίες ο σερπεντίνης έχει τη μορφή του αντιγορίτη όπου σε ενδιάμεσες συστάσεις ο αντιγορίτης



δίνει τάλκη και φορστερίτη. Τα ορυκτά αυτά σε πιέσεις μικρότερες των 5kb αντιδρούν και δίνουν ανθοφυλλίτη, που με τη σειρά του ο ανθοφυλλίτης αντιδρά με το φορστερίτη και δίνει ενστατίτη. Σε πιέσεις μεγαλύτερες των 5kb, ο φορστερίτης αντιδρά με τον τάλκη σχηματίζοντας ενστατίτη. Τα υπερβασικά πετρώματα, ενώ μεταμορφώνονται καταλήγουν στο τελικό στάδιο που είναι η αφυδάτωση, με την παραγένεση ενστατίτης + φορστερίτης ± χαλαζίας (Δημητριάδης, 1988).

ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΧΑΛΑΖΙΟΜΙΓΩΝ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Κατά την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης των χαλαζιομιγών ανθρακικών πετρωμάτων, τα κύρια ορυκτά που σχηματίζονται στην κάθε ζώνη μεταμόρφωσης είναι ο τάλκης, ο τρεμολίτης, ο διοψίδιος, ο φορστερίτης και ο βολλαστονίτης (Δημητριάδης, 1988).

2.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η δυναμική μεταμόρφωση είναι το αποτέλεσμα της ολίσθησης των επιφανειών των πετρωμάτων, κατά μήκος των οποίων τα πετρώματα αλλάζουν ιστολογικά. Είναι μια τοπικής κλίμακας μεταμόρφωση η οποία παρατηρείται σε ρήγματα και εξαρτάται από το βάθος που βρίσκεται το πέτρωμα, τις μηχανικές του ιδιότητες, και από το αν υπάρχει ρευστή φάση. Τα πετρώματα που βρίσκονται σε μικρά βάθη, έως 15 km μέσα στο φλοιό, όταν βρεθούν σε συνθήκες υψηλών τάσεων ολίσθησης συνθλίβονται αφήνοντας πίσω τους θραύσματα τα οποία συσσωρεύονται και σχηματίζουν πετρώματα που ονομάζονται κατακλαστίτες. Στα μεγαλύτερα βάθη, τα πετρώματα δεν σπάνε αλλά παραμορφώνονται. Τα προϊόντα της δυναμικής μεταμόρφωσης σε αυτά τα βάθη ονομάζονται μυλωνίτες, είναι πετρώματα συμπαγή με φολίδωση και βρίσκονται στις ζώνες ολίσθησης εκεί όπου το πάχος των ζωνών αυξάνεται (Δημητριάδης, 1988).

3. ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η Πυρομεταμόρφωση χρησιμοποιήθηκε σαν όρος για πρώτη φορά από τον Brauns το 1912. Σύμφωνα με τον Brauns, πυρομεταμόρφωση ονομάζεται η διαδικασία που συμβαίνει όταν το μάγμα έρχεται σε άμεση επαφή με ένα πέτρωμα σε υψηλές θερμοκρασίες, κατά τη διάρκεια της οποίας το πέτρωμα υφίσταται αλλαγές. Στη συνέχεια ο Tyrrell το 1926 περιέγραψε την πυρομεταμόρφωση ως τη μεταμόρφωση στην υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία, χωρίς όμως να τακεί το πέτρωμα, άποψη η οποία δεν περιλαμβάνει την παρουσία γυαλιού ή πετρωμάτων που προέρχονται από τήξη, όπως οι μπουχίτες που είναι τυπικά προϊόντα πυρομεταμόρφωσης.

Εξαιτίας της φύσεως της πυρομεταμόρφωσης, η διάκριση και η μελέτη της είναι σαφώς δύσκολη και σε μεγάλο βαθμό τεκμηριώνεται από την παρουσία ξενολίθων σε βασικές λάβες και ρηχές διεισδύσεις, σε στενές ζώνες δίπλα σε βασαλτικά πετρώματα και από θραύσματα σε τόφφους και ηφαιστειακά λατυποπαγή. Το περιβάλλον που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της πυρομεταμόρφωσης κυριαρχείται από μερική τήξη καθώς και ταχείες ταχύτητες ανόργανων αντιδράσεων που οφείλονται σε σημαντική υπέρβαση της θερμοκρασίας σε συνθήκες ισορροπίας.

Η πυρομεταμόρφωση που σχετίζεται με τη διείσδυση βασικών μαγμάτων και την καύση οργανικών υλικών, από την πρόσκρουση κερανού και από ανθρωπογενή δράση, αναμένεται να προκαλέσει ανισότροπη θερμική διαστολή και συστολή κατά τη θέρμανση και ψύξη των πετρωμάτων εξαιτίας της αντίδρασης και της τήξης των ορυκτών φάσεων. Τυπικές δομές που δημιουργούνται κατά την πυρομεταμόρφωση είναι οι στηλοειδείς κατατμήσεις, μικρορωγμές που προκαλούνται από τις τάσεις των ρευστών, διαστολή από αύξηση θερμοκρασίας και η παρουσία γυαλιού που μαρτυρά συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Τοπικά

η θερμική βαθμίδα μπορεί να πάρει τιμές αρκετών εκατοντάδων βαθμών ανά λίγα μέτρα, ακόμα και ανά δεκάδες εκατοστά.

3.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

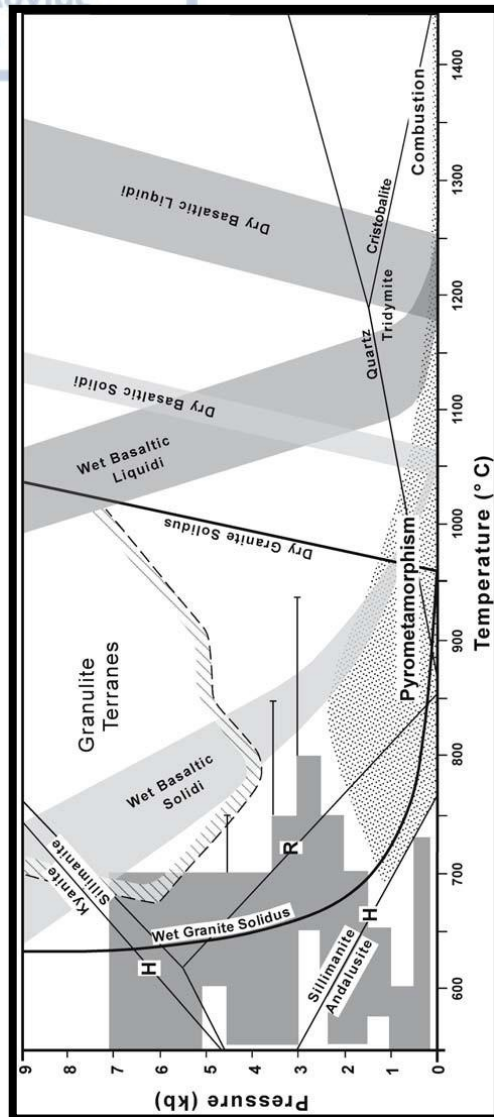
Η Πυρομεταμόρφωση συμβαίνει σε συνθήκες χαμηλής πίεσης, μέχρι 3 kb, και υψηλής έως υπέρ-υψηλής θερμοκρασίας. Έτσι η πυρομεταμόρφωση στο διάγραμμα των μεταμορφικών φάσεων ανήκει στην σανιδινιτική φάση. Συνθήκες υπέρ-υψηλής θερμοκρασίας επιτυγχάνονται κατά την ανάφλεξη των οργανικών στρωμάτων και των ανθρακικών έπειτα από διείσδυση μαγματικού όγκου.

Οι εμφανίσεις πετρωμάτων σανιδινιτικής φάσης μεταμόρφωσης είναι σημαντικά λιγότερες σε σχέση με άλλες φάσεις. Αποτελούνται από ασυνήθιστες και μοναδικές ορυκτολογικές παραγενέσεις οι οποίες υποδεικνύουν συγχώνευση με πυριγενή πετρώματα. Παρόλο που το σανίδινο, ειδικά αυτό με υψηλή περιεκτικότητα σε νάτριο είναι το κυριότερο ορυκτό για το χαρακτηρισμό της σανιδινιτικής φάσης, αντικατοπτρίζοντας το στερεό διάλυμα καλιούχων και νατριούχων αστρίων σε θερμοκρασίες $>650^{\circ}\text{C}$, συχνά απουσιάζει από την παραγένεση. Παραδείγματος χάρη, στους μπουχίτες ο καλιούχος άστριος συχνά παραμένει διαλυμένος στο γυαλί.

Οι εμφανίσεις σανιδινιτικής φάσης σε ζώνες επαφής σε πίεση $<2\text{kb}$ είναι περιορισμένες και παρουσιάζουν συγκεκριμένη παραγένεση με κύριο ορυκτό το σανίδινο, χαρακτηριστικό ορυκτό υψηλής θερμοκρασίας. Ανάλογα με το είδος του πετρώματος ξεχωρίζει η σανιδιτική φάση από τις υπόλοιπες με κριτήρια παραγένεσης. Σε χαλαζιοαστριούχα πετρώματα η σανιδινιτική φάση ξεχωρίζει από την πυροξενική κερατιτική φάση από την απουσία ανδαλουσίτη και

πυραλοπίτη ενώ στα ασβεστοπυριτικά πετρώματα απουσιάζει ο γροσσουλάριος. Σε ασβεστιτικά πετρώματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο η σανιδινιτική φάση ξεχωρίζει από το σχηματισμό του μοντισελλίτη από φορστερίτη και διοψίδιο (Turner & Verhoogen, 1960). Στα βασικά και υπερβασικά, όμως, πετρώματα η διάκριση μεταξύ σανιδινιτικής και πυροξενικής κερατιτικής φάσης μεταμόρφωσης είναι δύσκολη, καθώς έχουν τα ίδια ορυκτά, δηλαδή ορθοπυρόξενο, κλινοπυρόξενο, ολιβίνη και σπινέλλιο, αλλά και την ίδια κερατιτική υφή. Στη γρανουλιτική φάση η τήξη, οι μη ταξινομημένοι άστριοι και ο πιζονίτης μπορεί να είναι σταθεροί, αλλά κατά την αργή ψύξη ανακρυσταλλώνονται, αντιστρέφονται και απομειγνύονται, ενώ σε συνθήκες ταχείας ψύξης και χαμηλής πίεσης, όπως συμβαίνει στη σανιδινιτική φάση, παρατηρούνται πιο λεπτόκοκκα ορυκτά και έτσι ξεχωρίζουν οι δύο φάσεις.

Το σχήμα 3.1.1 αποτελεί διάγραμμα P-T στο οποίο αναγράφονται κάποιες χαρακτηριστικές ισόβαθμες και φασικές σειρές καθώς και το πεδίο σταθερότητας της πυρομεταμόρφωσης.



Σχήμα 3.1.1 Διάγραμμα P-T όπου φαίνεται το πεδίο σταθερότητας της πυρομεταμόρφωσης (διάστικτη περιοχή) και η σχέση της με τη μεταμόρφωση επαφής και τη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης. Οι σκούρες γκρι περιοχές με τις οριζόντιες γραμμές δείχνουν τις εκτιμώμενες τιμές P-T των πετρωμάτων ζωνών επαφής που σχετίζονται με ρηχές και βαθιές διεισδύσεις σύμφωνα με τον Barton et al. (1991). Το πεδίο της γρανουλιτικής φάσης είναι κατά Harley (1989). Οι βασαλτικές liquidi και solidi είναι κατά Yoder & Tilley (1962). Οι γρανιτικές solidi είναι από Tuttle & Bowen (1958). Οι ισόβαθμες κυανίτη, ανδαλουσίτη και σιλλιμανίτη είναι από Holdaway (1971) και Richardson et al. (1969). Οι ισόβαθμες χαλαζία, τριδυμίτη και χριστοβαλίτη είναι κατά Kennedy et al. (1962) και Ostrovsky (1966).

3.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

3.2.1 ΠΥΡΙΓΕΝΗΣ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η πυριγενής πυρομεταμόρφωση συνδέεται με τη διείδυση μαγμάτων βασικής έως ενδιάμεσης σύστασης. Οι συνθήκες που επικρατούν είναι χαμηλή πίεση (<3kb) και υψηλή θερμοκρασία. Ανάλογα με το είδος του πετρώματος που έρχεται σε επαφή με το μάγμα, προκύπτουν και αντίστοιχες ορυκτολογικές παραγενέσεις και υφές εφόσον διαταράσσεται η θερμική και χημική του ισορροπία. Τα φαινόμενα της πυριγενούς πυρομεταμόρφωσης περιορίζονται σε στενές ζώνες καθώς και σε ξενολίθους (Σχήμα 3.2.1.1).

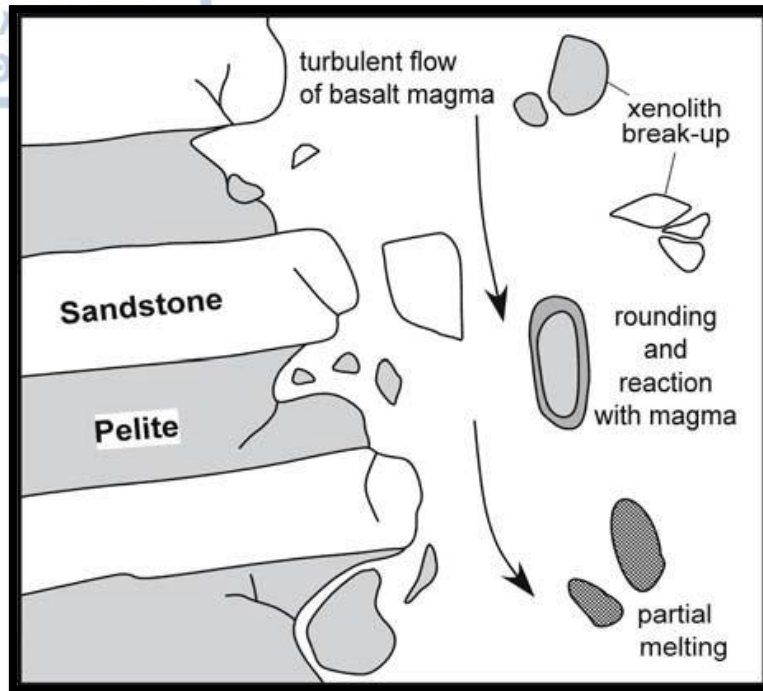
Το μέγεθος των ζωνών πυρομεταμόρφωσης φτάνει από 0,5 μέτρα από την επαφή με το μάγμα, έως 50 μέτρα τοπικά σε στηλοειδείς κατατμήσεις. Η ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών που φτάνουν τους 1200° C αποδίδεται σε εισχώρηση και ροή μάγματος μέσω διόδων, ακόμα και σε πιο περιορισμένα σε έκταση και χρόνο επεισόδια μαγματισμού. Μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με διάχυση και με συναγωγή μέσω ρευστού που κυκλοφορεί γύρω από τους κόκκους των ορυκτών που αποτελούν το πέτρωμα. Η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας του μάγματος μέσω διόδων εξαρτάται από το καθεστώς ροής του μάγματος. Τουρβιδιτικού τύπου ροή μπορεί να αυξήσει δραματικά τη θερμοκρασία των πετρωμάτων επαφής και να πλησιάσει εκείνη του μάγματος με αποτέλεσμα την τήξη και την ανάπτυξη ευρύτερης ζώνης. Πετρώματα που περιέχουν σημαντικές ποσότητες καλιούχου αστρίου, νατριούχου πλαγιокλάστου, χαλαζία και μαρμαρυγιών όπως πηλίτες, αρκόζες, γρανίτες και γρανοδιορίτες τείνουν να τήκονται ευκολότερα σε



σχέση με πιο δύστηκτες λιθολογίες όπως χαλαζίτες και παρακείμενοι βασάλτες.

Η διατήρηση πυρομεταμορφωμένων ξενολίθων που χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ορυκτολογικές παραγενέσεις μέσα σε μεμονωμένα μαγματικά σώματα υποδεικνύει μηχανική διάσπαση ποικίλων λιθολογιών μιας βαθύτερης ζώνης επαφής. Σε περιοχές όπου οι πυριγενείς επαφές είναι ακανόνιστες, μπορεί να συμβεί μηχανική απόσπαση πετρωμάτων με κατάλληλη σύσταση από τα τοιχώματα και να δημιουργηθούν ξενόλιθοι. Ξενόλιθοι επίσης δημιουργούνται κατά μήκος της επαφής ενός σωληνοειδούς σώματος με απότομη κλίση. Το μέγεθος των ξενολίθων είναι σχετικά μικρό, από μερικά εκατοστά έως αρκετές δεκάδες εκατοστά σε διάμετρο, αν και μπορεί να προκύψουν και ξενόλιθοι με μεγαλύτερες διαστάσεις σε μήκος και πλάτος. Σε πιο ομογενείς λιθολογίες, όπως ο χαλαζίτης και ο ψαμμίτης, οι ξενόλιθοι που προκύπτουν τείνουν να είναι ογκώδεις και είναι συχνά μεγαλύτεροι σε σύγκριση με αυτούς που βρίσκονται σε σχιστοποιημένα πετρώματα όπως είναι οι σχιστόλιθοι. Πολύ μεγάλα τεμάχια, δεκάδες έως εκατοντάδες μέτρα ή μεγαλύτερα σε διάμετρο, συνήθως αδρόκοκκων κρυσταλλικών πετρωμάτων, όπως είναι ο γρανίτης ή ο ομοιογενής ψαμμίτης, βρίσκονται συνήθως κοντά στα τοιχώματα του μαγματικού όγκου.

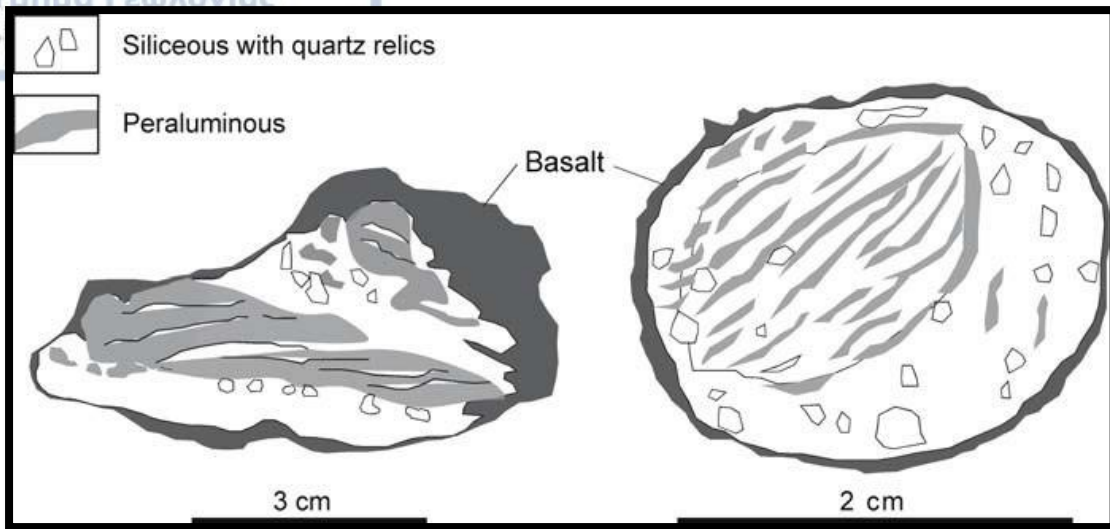
Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.1.1, το βασαλτικό μάγμα κατά τη ροή του αποκόπτει τμήματα των πετρωμάτων που βρίσκονται σε επαφή. Τα τμήματα αυτά αποστρογγυλοποιούνται μέσα στο μάγμα και αντιδρούν με αυτό. Στη συνέχεια ακολουθεί μερική τήξη των τμημάτων αυτών, καθώς και μετατροπή της αρχικής ορυκτολογικής παραγένεσης σε μία νέα, προσαρμοσμένη στις συνθήκες υψηλότερης θερμοκρασίας.



Σχ. 3.2.1.1 Δημιουργία και εξέλιξη ξενολίθων από ψαμμίτη και πηλίτη σε βασαλτικό μάγμα (Rodney, 2006).

Στα τμήματα αυτά κάποια ανθεκτικά ορυκτά παραμένουν ως έχουν. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2.1.2. από δείγματα της Αίτνας στην Ιταλία, τα ορυκτά χαλαζίας, ζirkόνιο, απατίτης και τιτανίτης διατηρούνται στο ξενόλιθο. Στους ξενολίθους αυτούς, τα χαλαζιακά τμήματα περιέχουν χριστοβαλίτη, τριδυμίτη σε πλούσιο σε αλκάλια όξινο γυαλί. Τα υπεραργιλικά περιέχουν σπινέλλιο, κορδιερίτη, βασικό πλαγιόκλαστο, μαγνητίτη-ιλμενίτη και ρουτίλιο σε υπεραργιλικό γυαλί.

Η πρώτη περιγραφή πυρομεταμορφωμένων ξενολίθων έγινε από τον Brauns το 1912, μελετώντας τους σχιστολιθικούς ξενολίθους που βρέθηκαν μέσα σε φωνολιθικό-τραχειτικό μάγμα στην περιοχή Eifel της Γερμανίας. Στην περιοχή αυτή υπάρχει το ηφαίστειο Wehr το οποίο τροφοδοτείται από μαγματικό θάλαμο σε βάθος 5 χιλιομέτρων αποτελούμενο από τραχειτικό/φωνολιθικό μάγμα.

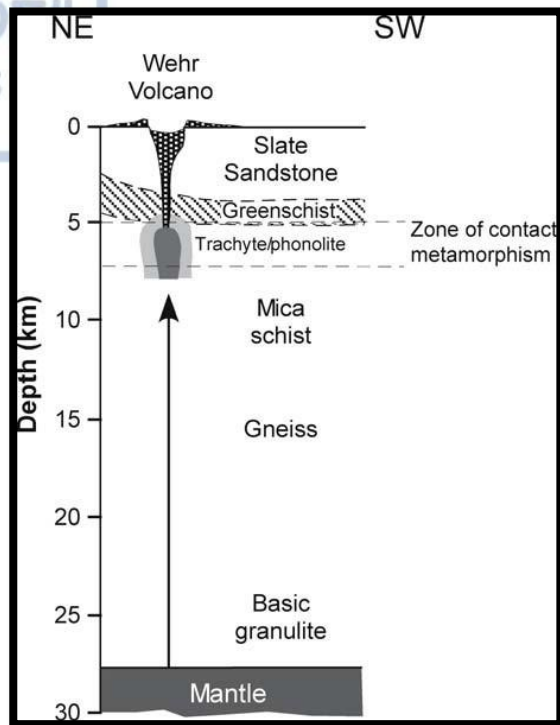


Σχ. 3.2.1.2. Σχηματική αναπαράσταση μερικώς τηγμένων ξενολίθων από την Αίτνα της Ιταλίας. Διακρίνονται πυριτικό και αργιλικό γυαλί. (Rodney, 2006).

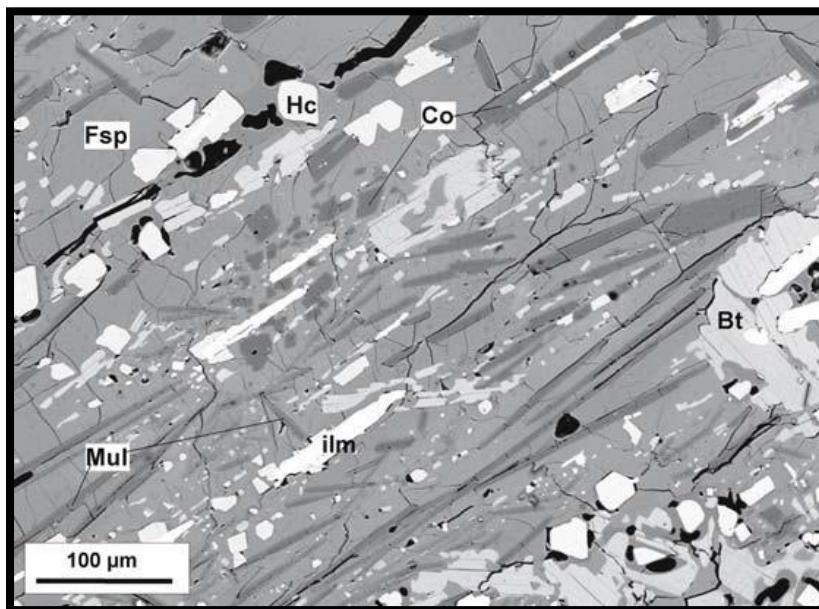
Ο θάλαμος βρίσκεται ανάμεσα σε μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους της περιοχής και δημιουργεί ζώνη μεταμόρφωσης επαφής γύρω από αυτούς (Σχ. 3.2.1.3).

Στους μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους, ενστρώσεις πλούσιες σε χαλαζία και πλαγιόκλαστα έχουν υποστεί τήξη, δημιουργώντας πυριτικούς μπουχίτες, από τους οποίους σχηματίστηκαν νέα υψηλής θερμοκρασίας ορυκτά, όπως β-χαλαζίας, κορδιερίτης, ασβεστιούχο πλαγιόκλαστο, μουλλίτης-σιλλιμανίτης, μαγνητίτης και ιλμενίτης.

Οι πλούσιες σε μαρμαρυγίες ενστρώσεις σχημάτισαν ασβεστιούχο πλαγιόκλαστο, σανίδινο ($Or_{61-83}Ab_{37-16}An_{1-2}$), σιδηρούχο μουλλίτη-σιλλιμανίτη, σιδηρούχο κορούνδιο, τιτανιούχο βιοτίτη, σπινέλλιο, μαγνητίτη, ιλμενίτη και κορδιερίτη (Σχ. 3.2.1.4).



Σχ. 3.2.1.3 Υποθετική τομή φλοιού στην περιοχή Eifel της Γερμανίας, όπου φαίνονται οι λιθολογίες, το ηφαίστειο Wehr και η ζώνη μεταμόρφωσης επαφής (Rodney, 2006).



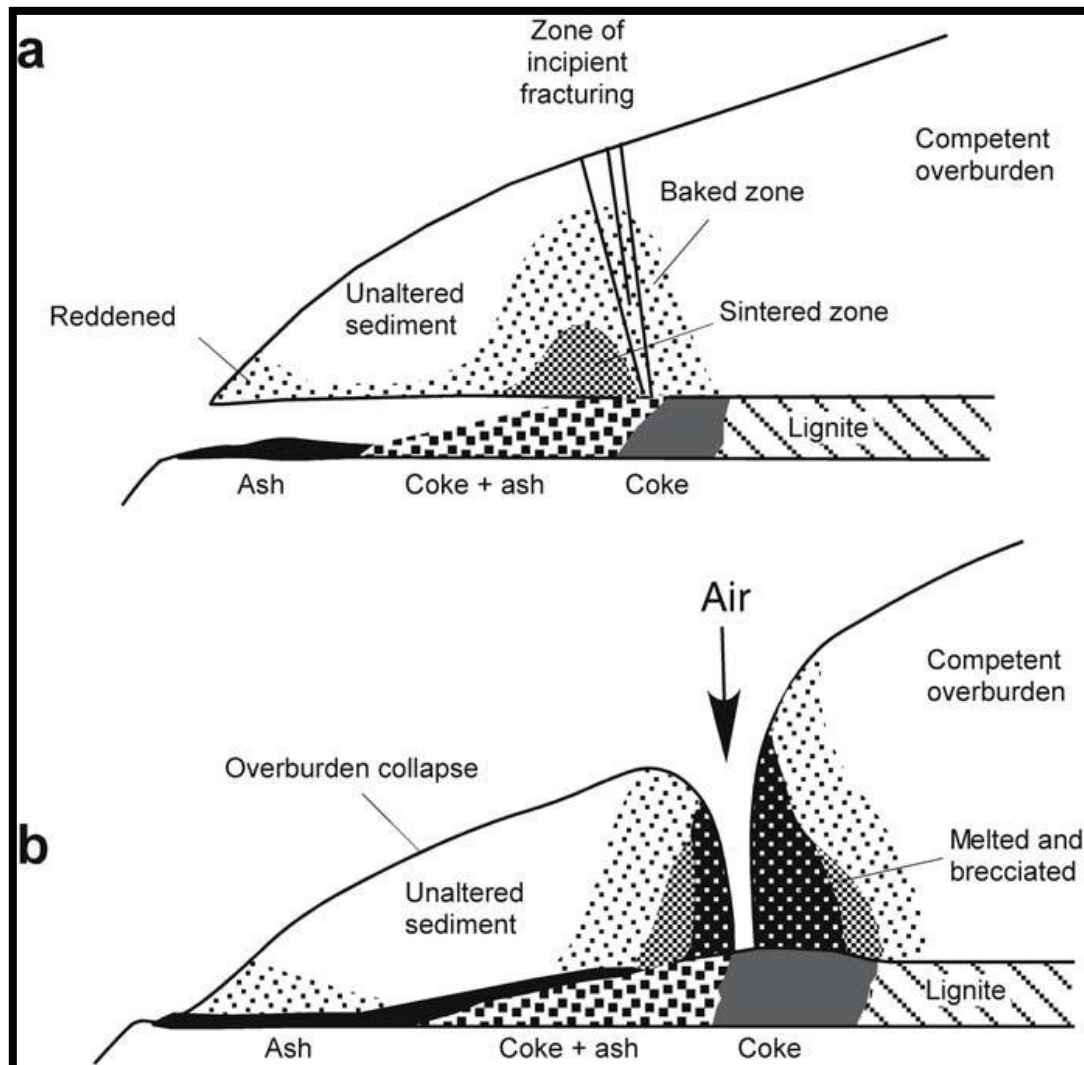
Σχ.3.2.1.4. Μικροφωτογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων πυρομεταμορφωμένου ξενολίθου μαρμαρυγιακού σχιστολίθου της περιοχής Eifel στη Γερμανία (Rodney, 2006).

3.2.2 ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΠΟ ΚΑΥΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ

Η οργανική ύλη, οι άνθρακες, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, είναι δυνατόν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες να αυτοαναφλεχθούν ή να καούν από την επίδραση εξωτερικού παράγοντα, προκαλώντας φαινόμενα πυρομεταμόρφωσης φτάνοντας θερμοκρασίες έως 1600°C περίπου. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την αυτοανάφλεξη, μέσω ρηγμάτων και διακλάσεων εισέρχεται ατμοσφαιρικό οξυγόνο και νερό μέσα στις δομές που φιλοξενούνται τα οργανικά υλικά. Το οξυγόνο αυτό οξειδώνει τα οργανικά με εξώθερμη αντίδραση εκλύοντας θερμότητα προς το περιβάλλον. Όταν η κυκλοφορία του αέρα παρεμποδίζεται η θερμότητα αυτή εγκλωβίζεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία των οργανικών. Τη στιγμή που η θερμοκρασία ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή αυτά αναφλέγονται. Μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία αυτή είναι ο βαθμός του άνθρακα, η παρουσία μαρκασίτη και σιδηροπυρίτη και το μέγεθος των σωματιδίων των ανθράκων. Όσο μικρότερος είναι ο βαθμός του άνθρακα τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση του να αυτοθερμανθεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του μαρκασίτη και του σιδηροπυρίτη στα οργανικά, τόσο περισσότερο επιταχύνεται η διαδικασία μέσω της απελευθέρωσης SO₂, από την αντίδρασή τους με το οξυγόνο. Τέλος, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των σωματιδίων τόσο μεγαλύτερη η επιφάνεια αντίδρασης για την οξείδωση.

Κατά τη διαδικασία της αυτοανάφλεξης των οργανικών απελευθερώνονται πτητικά υψηλής θερμοκρασίας τα οποία τήκουν τα περιβάλλοντα πετρώματα με τα οποία έρχονται σε επαφή, μέσω μεταφοράς θερμότητας. Από τα ίδια τα οργανικά σχηματίζεται κωκ και

τέφρα. Η τέφρα αυτή αποτελείται από τα μη αναφλέξιμα ορυκτά των οργανικών τα οποία τήκονται από την επίδραση της θερμότητας και δημιουργούν παραγενέσεις υψηλότερης θερμοκρασίας (Σχ. 3.2.2.1).

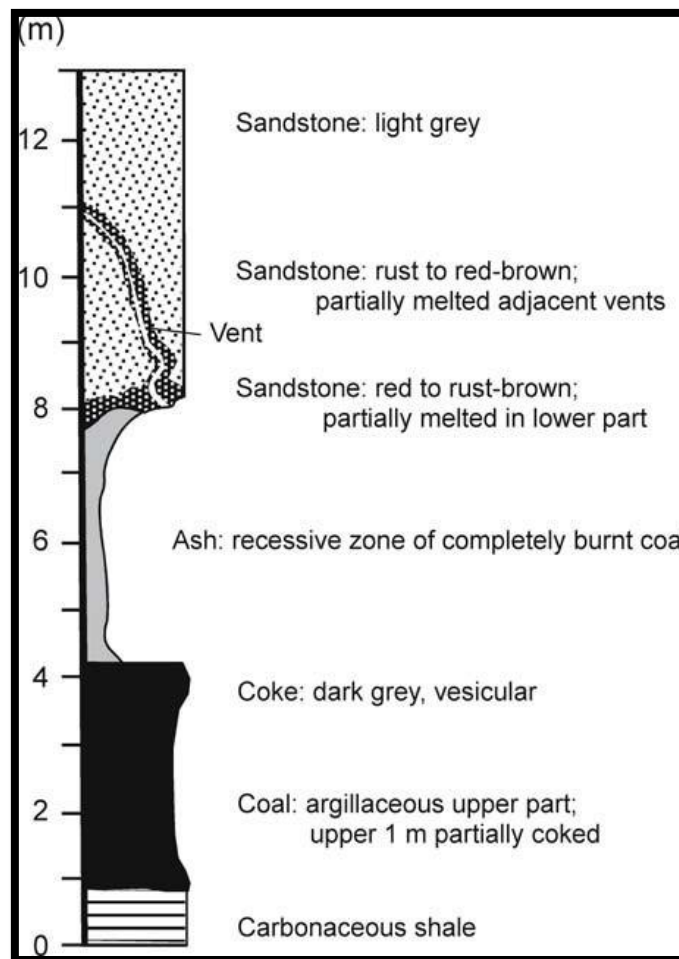


Σχ. 3.2.2.1. Σχηματικό διάγραμμα όπου φαίνονται τα αποτελέσματα της πυρομεταμόρφωσης από αυτοανάφλεξη λιγνίτη (Rodney, 2006).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα πυρομεταμόρφωσης από καύση ανθράκων είναι αυτό της περιοχής του Aldrich Creek του Καναδά. Η περιοχή αποτελείται από στρώμα άνθρακα ανάμεσα σε ανθρακικό πηλόλιθο και ψαμμίτη. Από την καύση του άνθρακα παρατηρείται μια

διαβάθμιση από τα ανώτερα στα κατώτερα που μαρτυρά μείωση του ρυθμού καύσης.

Έτσι, το ανώτερο τμήμα έχει καεί εντελώς αφήνοντας στη θέση του τέφρα, παρακάτω ο άνθρακας έχει μετατραπεί σε κωκ ενώ στο κατώτερο στρώμα βρίσκεται αναλλοίωτος. Στην επαφή της τέφρας με τον υπερκείμενο ψαμμίτη καθώς και γύρω από ρωγμές από τις οποίες διέφυγαν θερμά αέρια, ο ψαμμίτης τήκεται μερικώς (Σχ. 3.2.2.2).



Σχ. 3.2.2.2. Στρωματογραφική στήλη της περιοχής Aldrich Creek του Καναδά (Rodney, 2006).

Σύμφωνα με μαρτυρίες η καύση του άνθρακα προκλήθηκε από δασική πυρκαγιά που έπληξε την περιοχή το 1936. Από τον Αύγουστο του 1979 μέχρι το Φεβρουάριο του 1981 παρατηρούνταν θερμά αέρια να διαφεύγουν από την οροφή του ψαμμίτη.

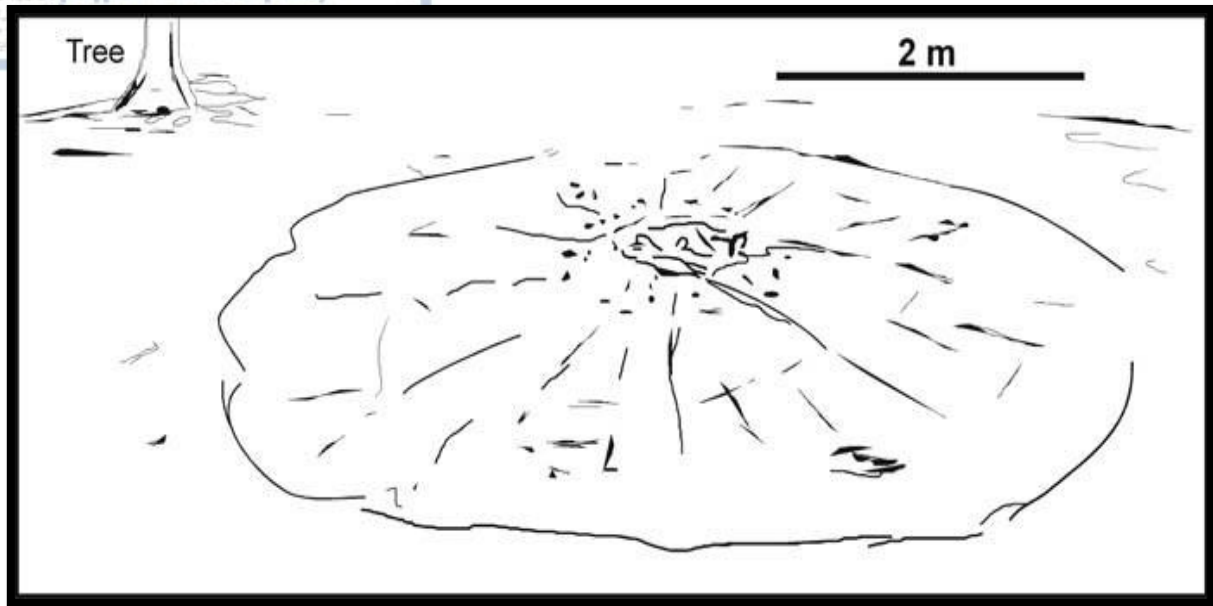
3.2.3 ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΠΟ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗ ΚΕΡΑΥΝΟΥ

Κατά την πρόσκρουση κεραυνού στην επιφάνεια της Γης προκαλείται απότομη αύξηση της θερμοκρασίας σε υπέρ-υψηλά επίπεδα καθώς και τήξη των σχηματισμών στο σημείο πρόσκρουσης μέσα σε ένα μόλις δευτερόλεπτο. Η πορεία του κεραυνού μέσα στο έδαφος ακολουθεί τις διαδρομές με τη μικρότερη αντίσταση και έτσι διακλαδώνεται ανάλογα με τη χημική σύσταση, την υγρασία, τη συμπίεση και το ύψος των στρώσεων.

Η τήξη σχηματισμών από τη δράση του κεραυνού δημιουργεί τους φουλγκουρίτες, οι οποίοι αποτελούνται από γυαλί και παρουσιάζουν ρευστική υφή. Εμφανίζουν σωληνοειδή μορφή όπου το εσωτερικό τους είναι κενό και το εξωτερικό τους είναι πορώδες και εύθραυστο. Η διάμετρός τους κυμαίνεται στην τάξη των χιλιοστών και των εκατοστών. Οι πιο επιμήκεις φουλγκουρίτες παρατηρούνται σε μη συνεκτικά υλικά όπως άμμος και έδαφος. Ο μεγαλύτερος φουλγκουρίτης που έχει καταγραφεί έχει μήκος κάτι παραπάνω από 4,9 μέτρα και εντοπίστηκε μέσα σε αμμώδες έδαφος στην περιοχή της Βόρειας Φλόριντα όπου εμφανίζονται πολύ συχνά κεραυνοί. Σε τέτοιες περιπτώσεις το όριο των φουλγκουριτών καθορίζεται από τον υδροφόρο ορίζοντα ή από κάποια στρώση ιζήματος πλούσιο σε νερό. Καθώς οι σωληνοειδείς μορφές του

εκτείνονται προς τα κάτω, η διάμετρος τους ελαττώνεται και διακλαδίζονται, ενώ χαλίκια στη πορεία της ηλεκτρικής εκκένωσης την εκτρέπουν. Εκτίναξη προς τα έξω λιωμένου πυριτικού υλικού λαμβάνει χώρα, ειδικά σε άμμους πλούσιες σε χαλαζία. Οι απολήξεις των φουλγκουριτών ποικίλουν από υαλώδες και βολβώδες μεγεθυμένο υλικό έως συσσωματώματα από χαλαρά συγκολλημένους και μερικώς τηγμένους κόκκους άμμου. Το ποσοστό της άμμου που θα λιώσει εξαρτάται από την ένταση της ηλεκτρικής εκκένωσης η οποία με τη σειρά της ελέγχει την ενέργεια που δαπανάται με τη μορφή θερμότητας. Η λιωμένη άμμος αποκτά κυλινδρικό σχήμα ως αποτέλεσμα επιφανειακής τάσης, η διάμετρος της οποίας εξαρτάται από την ποσότητα διαστολής του αέρα και της υγρασίας κατά μήκος της διαδρομής εκκένωσης. Εάν η διαστολή του αέρα ή της υγρασίας είναι μεγάλη σε αναλογία με την ποσότητα της λιωμένης άμμου σχηματίζεται σωλήνας μεγάλης διαμέτρου με λεπτό τοίχωμα.

Στην περιοχή Avoca Downs της Δυτικής Αυστραλίας έχει καταγραφεί μία θέση πρόσκρουσης κεραυνού. Κατά την πρόσκρουση σε αργιλικό έδαφος, δημιούργησε μία κωνική δομή διαμέτρου 6 μέτρων, όπου το έδαφος είναι διαταραγμένο. Στο κέντρο της δομής υπάρχει μία τρύπα διαμέτρου 50 εκατοστών, όπου ο κεραυνός προσέκρουσε και εισχώρησε στο έδαφος. Κομμάτια φουλγκουριτών και εδάφους εκτινάχτηκαν έξω από την τρύπα (Σχ. 3.2.3.1).



Σχ. 3.2.3.1. Σημείο πρόσκρουσης κεραυνού στην περιοχή Anoca Downs της Δυτικής Αυστραλίας (Rodney, 2006).

4. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ

Στο ενεργό ηφαιστειακό τόξο της Ελλάδας και πιο συγκεκριμένα στη Σαντορίνη έχουν βρεθεί ενδείξεις πυρομεταμόρφωσης. Εντοπίστηκε ένας ξενόλιθος μέσα σε δακίτη στο ηφαίστειο της Σαντορίνης, ο οποίος στο κέντρο του αποτελείται ορυκτολογικά από μελίλιθο, βολλαστονίτη και τιτανιούχο μαγνητίτη. Αυτή η παραγένεση αντικαθίσταται σε πόρους και στα περιθώρια από συμφύσεις ινώδους μελίλιθου, βολλαστονίτη και τιτανιούχου ανδραδίτη. Και οι δύο αυτές παραγενέσεις σχηματίστηκαν σε θερμοκρασίες 800-900°C και σε πίεση 1 bar.

5. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗΣ ΠΥΡΟΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ

Φαινόμενα πυρομεταμόρφωσης εντοπίζονται ακόμα και σε δραστηριότητες που συνδέονται με τον άνθρωπο. Ασχολούμενος με διάφορους τομείς και ειδικά στη βιομηχανία τροποποιεί υλικά αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους προκαλώντας φαινόμενα πυρομεταμόρφωσης.

Στη βιομηχανία παραγωγής τούβλων και κεραμικών, τα υλικά θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να αλλάζει η ορυκτολογική τους σύσταση και να θυμίζει μπουχίτη, ένα χαρακτηριστικό πυρομεταμορφωμένο πέτρωμα.

Στην κοιλάδα ανθράκων Chelyabinsk της Ρωσίας υπάρχει πλήθος σωρών άνθρακα οι οποίες εναποτέθηκαν από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και περιέχουν ιλύόλιθο, πηλόλιθο, ψαμμίτη, μάργα, συγκεντρώσεις σιδηρίτη και κομμάτια απολιθωμένου ξύλου. Με την έκθεσή τους στο ατμοσφαιρικό οξυγόνο ο άνθρακας αυτοαναφλέχθηκε και δημιουργήθηκαν φαινόμενα πυρομεταμόρφωσης.

Η ατμοποίηση ανθράκων χρησιμοποιούνταν εκτενέστερα στο παρελθόν για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οξυγόνο και νερό διοχετεύονταν στους άνθρακες με σκοπό να προκληθεί η ανάφλεξή τους και να συλλέξουν το παραγόμενο αέριο. Με την ανάφλεξη των ανθράκων προκαλούνται φαινόμενα πυρομεταμόρφωσης.

Κατά την διενέργεια γεωτρήσεων είναι πιθανόν σε μία μικρή ζώνη γύρω από την οπή της γεώτρησης, εξαιτίας της περιστροφής του γεωτρύπανου να προκληθεί μερική τήξη στους σχηματισμούς ξεπερνώντας θερμοκρασίες 1000°C δημιουργώντας ορυκτά υψηλής θερμοκρασίας.

Βιομηχανικές καύσεις υλικών, όπως προϊόντα πετρελαίου και σιδήρου, καθώς και η διαχείριση των στερεών αποβλήτων παρομοιάζουν πυρομεταμόρφωση λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών και του σχηματισμού νέων ορυκτών.

Η πυρομεταμόρφωση είναι επίσης συνυφασμένη με ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες που συνδέονται με τον τρόπο ζωής σε παλαιότερες εποχές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί εκείνο της περιοχής Ötz Valley της Αυστρίας, όπου λάμβαναν χώρα θυσίες ζώων το 450-15 π.Χ. πάνω σε έναν βράχο από βιοτιτικό γνεύσιο, ο οποίος από τη θερμότητα πυρομεταμορφώθηκε. Επίσης, στην περιοχή El Gasco της Ισπανίας έχει εντοπιστεί η μοναδική εμφάνιση σιδηρούχου ρινγκουδίτη (ringwoodite) ($[(Mg, Fe^{3+})_2SiO_4]$), μέσα σε πλούσια σε χαλαζία κίσηρη. Η κίσηρη προέκυψε από τη μερική τήξη χαλαζίτη και εκτός από ρινγκουδίτη, το πυριτικό γυαλί περιέχει ερκυνίτη και σταγονίδια σιδήρου. Η εμφάνιση αυτή πιθανότατα συνδέεται με την κατασκευή υαλοποιημένων οχυρών την εποχή του Χαλκού και του Σιδήρου στη βόρεια και δυτική Ευρώπη, με την καύση ξύλου και λίθων σε θερμοκρασίες που έφταναν τους $1.235^\circ C$. Μεταλλικά σταγονίδια σιδήρου και σφαιρουλίτες έχουν βρεθεί σε πολλά τέτοια οχυρά δηλώνοντας ισχυρές αναγωγικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της τήξης. Η ύπαρξη ξύλινων καλουπιών και η πυριτική υαλώδης επίστρωση σε κάποιους κλάστες κίσηρης στο El Gasco, καθώς και η διακύμανση της περιεκτικότητας σε φώσφορο που μπορεί να οφείλεται στην τήξη απατίτη, στην ενσωμάτωση στάχτης και οστών, ενισχύει την πιθανότητα να έχει προκύψει από ανθρωπογενή καύση.

Η τήξη χλωριτικού υλικού στο χαλαζίτη προκάλεσε τοπικά υψηλές πιέσεις πτητικών εντός της κλειστής και περιοριστικής τρισδιάστατης δομής του χαλαζία. Με την αύξηση της θερμοκρασίας και μόλις η εσωτερική πίεση έφτασε στο όριο της αντοχής του χαλαζία, η δομή του

έσπασε και φυσαλίδες διαστάθηκαν υδροδυναμικά απελευθερώνοντας τη συσσωρευμένη πίεση (Spray,1999). Ρινγκγουδίτης, ερκυνίτης και σταγονίδια μεταλλικού σιδήρου σχηματίζονται μέσα στο γυαλί δίπλα στις φυσαλίδες. Η διαστολή σταμάτησε όταν η πίεση έγινε ίση με το υψηλό ιξώδες του πλούσιου σε κλάστες γυαλιού. Επομένως το υαλοκρυσταλλικό πέτρωμα του El Gasco μπορεί να είναι ένα παράδειγμα βραχυχρόνιας ανάπτυξης υψηλών πιέσεων κατά την τήξη και εξάτμιση ορυκτών που βρίσκονται στο χαλαζίτη και που οδήγησε στο σχηματισμό κρυστάλλων ρινγκγουδίτη στο γυαλί. Οι αναγωγικές συνθήκες και οι υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατόν να επέτρεψαν να σχηματιστεί σιδηρούχος ρινγκγουδίτης σε χαμηλότερες πιέσεις από αυτές στις οποίες συνήθως σχηματίζεται (Diaz-Martínez and Ormö, 2003).

Τέλος, στην ανθρωπογενή πυρομεταμόρφωση εντάσσονται και οι περιπτώσεις δημιουργίας τεχνητού φουλγκουρίτη από πτώση καλωδίων υψηλής τάσης στο έδαφος.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η Πυρομεταμόρφωση χαρακτηρίζεται από συνθήκες σανιδινιτικής φάσης μεταμόρφωσης και συγκεκριμένα από συνθήκες υπερυψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής πίεσης. Το φαινόμενο της πυρομεταμόρφωσης είναι περιορισμένο εξαιτίας των ακραίων συνθηκών που αναπτύσσονται σε σύντομο χρονικό διάστημα και εντοπίζεται σε μικρές ζώνες καθώς και σε ξενολίθους. Μέχρι τώρα έχουν ξεχωρίσει περιπτώσεις Πυρομεταμόρφωσης από μαγματική δράση, από καύση οργανικού υλικού, από πρόσκρουση κεραυνού αλλά και ως αποτέλεσμα κάποιων ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Η Πυρομεταμόρφωση προερχόμενη από μαγματική δράση συμβαίνει σε περιοχές με διείδυση μαγμάτων βασικής έως ενδιάμεσης σύστασης και ροής τους μέσω διόδων. Η τουρβιδιτική ροή μάγματος συμβάλλει επίσης σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της θερμοκρασίας και στην τήξη των τοιχωμάτων του πετρώματος, με αποτέλεσμα την μεταμόρφωσή του. Η παρατήρηση φαινομένων Πυρομεταμόρφωσης από μαγματική δράση απαιτεί μικροσκοπική μελέτη και αναγνώριση συγκεκριμένων παραγενέσεων που τη μαρτυρούν.

Η Πυρομεταμόρφωση από καύση οργανικού υλικού συμβαίνει με την αυτοανάφλεξη αυτού. Με την εισροή οξυγόνου, οξειδώνεται το οργανικό υλικό με εξώθερμη αντίδραση. Αν αυτή η θερμότητα εγκλωβιστεί, το οργανικό αυτοαναφλέγεται και δημιουργούνται φαινόμενα Πυρομεταμόρφωσης.

Κατά την πρόσκρουση κεραυνού στο έδαφος σχηματίζονται οι φουλγκουρίτες από απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, οι οποίοι αποτελούν χαρακτηριστική δομή πυρομεταμόρφωσης.

Ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η βιομηχανία, μπορούν να οδηγήσουν τοπικά σε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας και να

πυρομεταμορφωθούν κάποια υλικά. Είναι αξιοσημείωτο το πόσο επιρρεπή στη μεταμόρφωση γίνονται αυτά τα υλικά από την αλληλεπίδρασή τους με τον άνθρωπο.

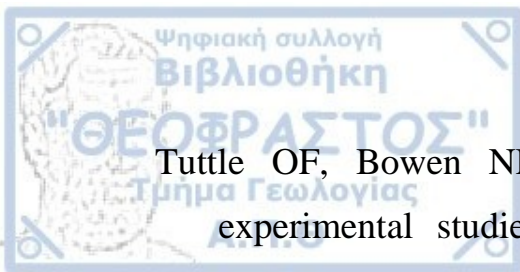
Οι περισσότερες ενδείξεις φαινομένων πυρομεταμόρφωσης εντοπίζονται σε επιφανειακά στρώματα της Γης ή και στην επιφάνειά της. Οι χαμηλές πιέσεις όταν συνδυαστούν με υπερυψηλές θερμοκρασίες ευνοούν τον σχηματισμό φαινομένων πυρομεταμόρφωσης.

Η Πυρομεταμόρφωση αποτελεί από τα πιο σπάνια είδη μεταμόρφωσης εξαιτίας της περιορισμένης έκτασής της και της συνύπαρξής της μαζί με άλλα είδη μεταμόρφωσης πιο μελετημένα και πιο διαδεδομένα. Περαιτέρω μελέτη φαινομένων Πυρομεταμόρφωσης κρίνεται απαραίτητη για την καλύτερη κατανόηση και αναγνώρισή της.



ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Barton MD, Staude J-M, Snow EA Johnson DA (1991) Aureole systematics. In: Kerrick DM (ed) Contact metamorphism. Reviews in Mineralogy 26, Mineralogical Society of America, pp 723–847
- Diaz-Martinez E, Ormö J (2003) An alternative hypothesis for the origin of ferroan ringwoodite in the pumice of El Gasco (Caceres, Spain). Lunar Planet Sci 34:1318
- Harley SL (1989) The origin of granulites: a metamorphic perspective. Geol Mag 126:215–247
- Holdaway MJ (1971) Stability of andalusite and the aluminium silicate phase diagram. Am J Sci 271:97–131
- Kennedy GC, Wasserburg FJ, Heard HC, Newton RC (1962) The upper three-phase region in the system SiO₂-H₂O. Am J Sci 260:501–521
- Ostrovsky IA (1966) P-T-diagram of the system SiO₂-H₂O. Geol J 5:127–134
- Richardson SW, Gilbert MC, Bell PM (1969) Experimental determination of kyanite-andalusite and andalusite-sillimanite equilibria: the aluminium silicate triple point. Am J Sci 267:259–272
- Rodney H.G. (2006). Pyrometamorphism. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 275.
- Spray JG (1999) Shocking rocks by cavitation and bubble implosion. Geology 27:695–698
- Turner FJ, Verhoogen J (1960) Igneous and metamorphic rocks. McGraw-Hill Book Company



Tuttle OF, Bowen NL (1958) Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_2\text{O}_8\text{-KAlSi}_2\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Geol Soc Am Mem 74

Yoder HS, Tilley CE (1962) Origin of basaltic magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. J Petrol 3:342–532

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Δημητριάδης Σ. (1988). Εισαγωγή στην πετρολογία μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη

ΙΣΤΟΧΩΡΟΙ

<http://geologylearn.blogspot.com>

<http://geologyscience.com>

<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y>