



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



**ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΠΗΛΙΤΗ ΑΠΟ ΤΗ ΝΗΣΟ
ΑΜΜΟΥΛΙΑΝΗ, Ν. ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ.**

**ΠΑΖΑΡΑΣ ΓΙΩΡΓΟΣ
ΦΟΙΤΗΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ Χ. ΛΑΜΠΡΙΝΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

I. Πρόλογος	σελ.3
II. Εισαγωγή	σελ.4
III. Γεωλογία της Περιοχής	σελ.6
II.i. Σερβομακεδονική Μάζα	σελ.6
II.ii. Αμμουλιανή	σελ.13
IV. Πετρολογία του Μεταπηλίτη	σελ.19
V. Ορυκτολογία	σελ.22
Χαλαζίας	σελ.22
Γρανάτης	σελ.23
Βιοτίτης	σελ.30
Λευκός Μαρμαρυγίας	σελ.32
Χλωρίτης	σελ.35
Άστριοι	σελ.39
Ανδαλουσίτης	σελ.44
Σταυρόλιθος	σελ.47
Ζιρκόνιο	σελ.51
Τουρμαλίνης	σελ.54
Άλλα Ορυκτά	σελ.57
VI. Συζήτηση-Συμπεράσματα	σελ.60
VII. Βιβλιογραφία-Ιστολόγιο	σελ.64

Ι. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

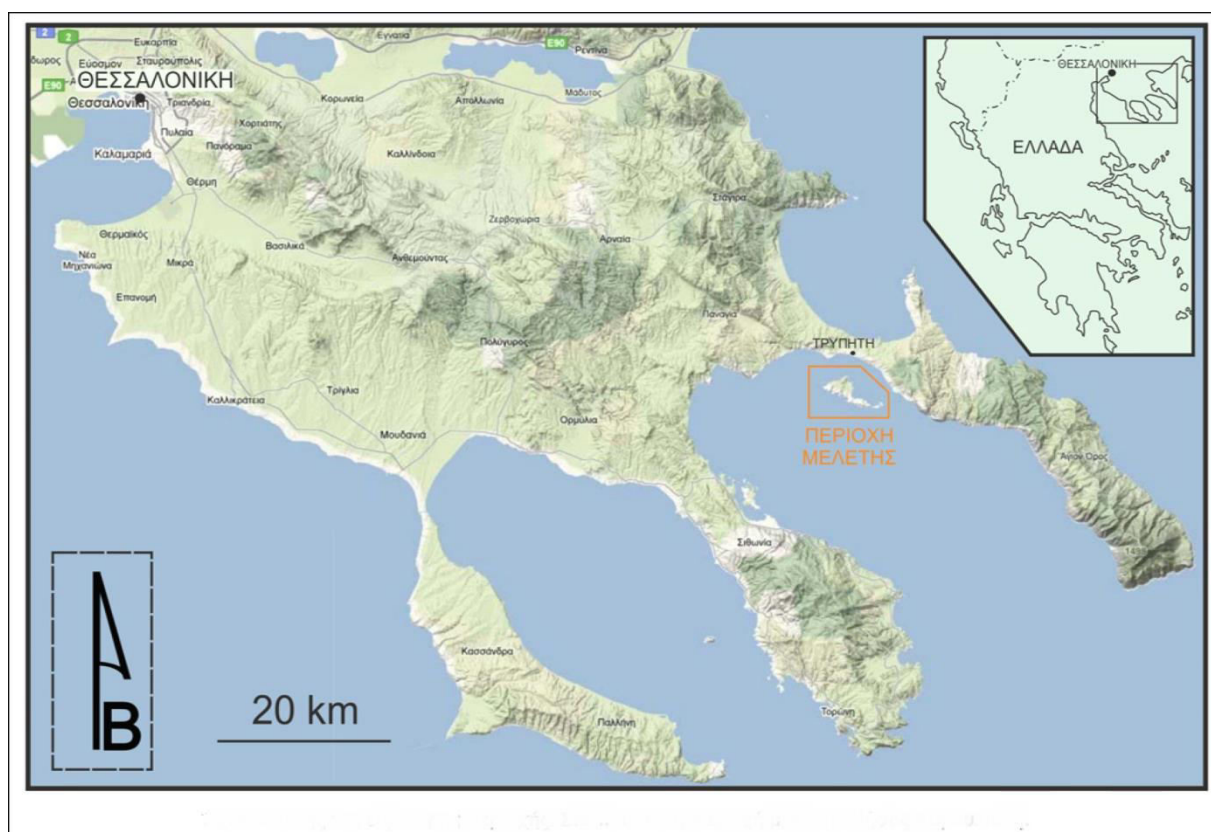
Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης Α.Π.Θ., για την απόκτηση του Γεωλογικού Διπλώματος. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση και η ανάλυση των μεταπηλιτών που βρέθηκαν στη νήσο Αμμουλιανή.

Η εκπόνηση της εργασίας περιέλαβε την εύρεση πληροφοριών για τη γεωλογία της περιοχής, το μητρικό πέτρωμα, τους μεταπηλίτες και τα ορυκτά που εντοπίστηκαν στα δείγματα, καθώς και την κατασκευή και ανάλυση τομών, σε πολωτικό μικροσκόπιο και σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope S.E.M.), τύπου JEOL JSM 840-A .

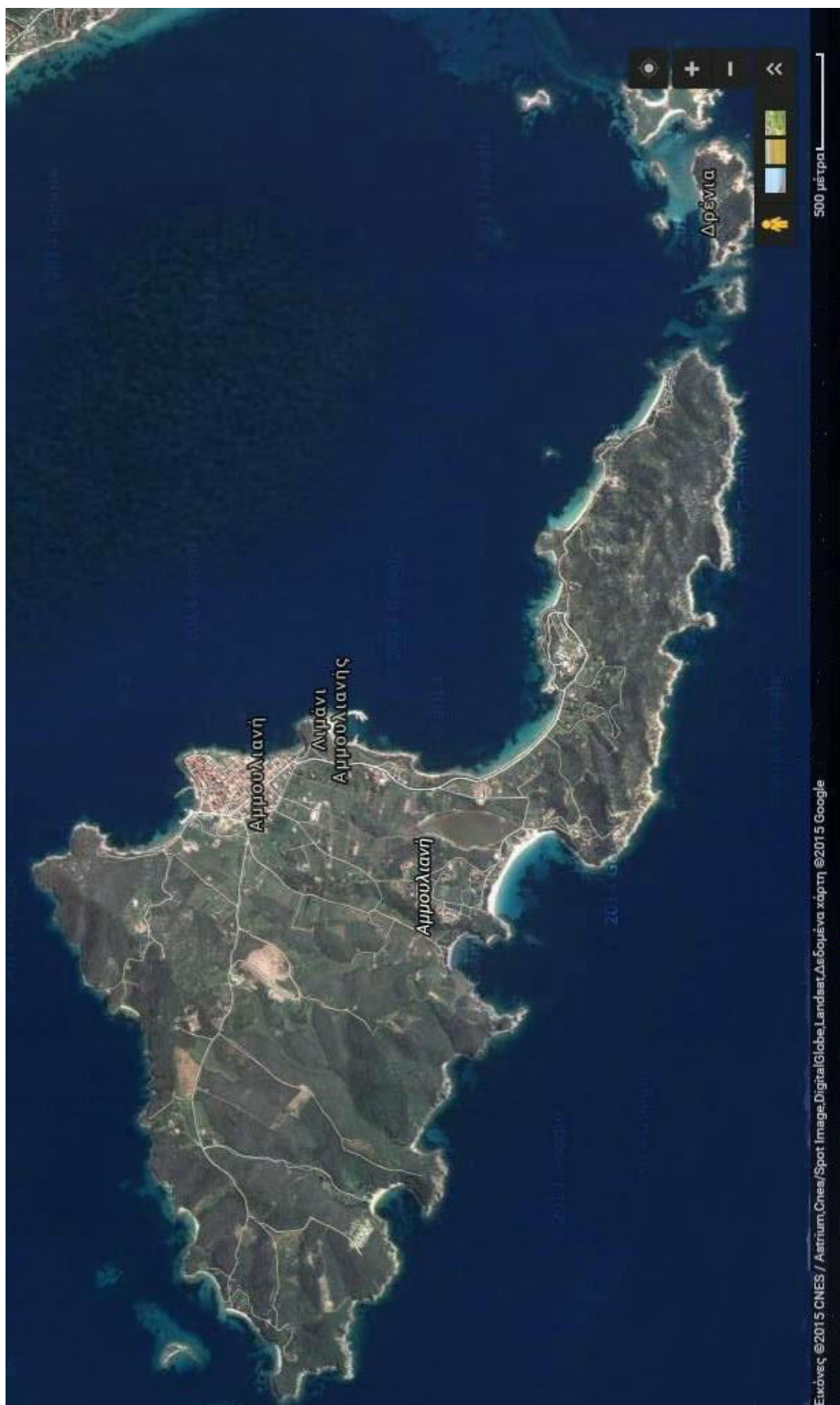
Ευχαριστώ θερμά την επίκουρη καθηγήτρια κυρία Παπαδοπούλου Λαμπρινή, για την πρόταση του θέματος, την καθοδήγηση της και την τεράστια βοήθεια της στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης θερμά ευχαριστώ όσους συνέβαλαν στην δημιουργία της και ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

II. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μεταπηλίτης βρέθηκε στο λιμάνι της νήσου Αμμουλιανή (Σχήμα 2.1 και 2.2). Το νησί βρίσκεται στον Σιγγιτικό κόλπο ή κόλπο του Αγίου Όρους, ανάμεσα από την χερσόνησο της Σιθωνίας και την χερσόνησο του Αγίου Όρους. Διοικητικά ανήκει στο Νομό Χαλκιδικής και πιο συγκεκριμένα στο δήμο Αριστοτέλη. Αποτελεί το μοναδικό κατοικημένο νησί της Χαλκιδικής, κατοικήθηκε για πρώτη φορά το 1925 από Μικρασιάτες πρόσφυγες, και ένα από τα δύο κατοικημένα νησιά της Μακεδονίας, με πεντακόσιους μόνιμους κάτοικους. Η Αμμουλιανή έχει έκταση 4,5 km² και απέχει 130 km από την Θεσσαλονίκη και 2Μ (ναυτικά μίλια) από την τρυπητή. Το νησί έχει χαμηλό λοφώδες ανάγλυφο με το υψόμετρο να μην ξεπερνά τα 100 μέτρα και χαρακτηρίζεται από θαμνώδη βλάστηση.



Σχήμα 2.1. Χάρτης της ευρύτερης περιοχής, Νήσος Αμμουλιανής (Πλούγαρης 2011)



Σχήμα 2.2. Δορυφορική εικόνα της νήσου Αμούλιανης

III. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

III.i. Σερβομακεδονική Μάζα

Το Ελληνικό ορογενές διακρίνεται σε γεωτεκτονικές ζώνες. Σε μία από αυτές ανήκει και η νήσος Αμμουλιανή, τη Σερβομακεδονική μάζα. Πρόκειται για μία στενή επιμήκης λωρίδα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης που εκτείνεται ανατολικά από το Στρυμώνα μέχρι τη ζώνη του Αξιού (Σχήμα 3.1).

Παλιότερα πίστευαν ότι η μάζα της Ροδόπης εκτείνονταν μέχρι την ζώνη Αξιού, όμως νεώτερες έρευνες διαχώρισαν το δυτικό τμήμα ανάμεσα από την ζώνη του Αξιού και τον Στρυμώνα και το ονόμασαν Σερβομακεδονική μάζα (Jaranov 1960, Kockel & Walther 1965, 1968, Mercier 1966, Dimitrievic & Ciric 1967). Το κρυσταλλοσχιστώδες της Σερβομακεδονικής χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: την κατώτερη και παλιότερη, ενότητα των Κερδυλλίων και την ανώτερη και πιο νέα, ενότητα του Βερτίσκου (Kockel & Walther 1968, Kockel et al. 1977).

◆ Η ενότητα των Κερδυλλίων

Καταλαμβάνει την Ανατολική Χαλκιδική μεταξύ των εκβολών του Στρυμώνα και του Στρατονίου και έχει συνολικό πάχος 3 km. Σύμφωνα με παλαιότερες απόψεις, αποτελεί τον βαθύτερο ορίζοντα της Σερβομακεδονικής μάζας και τα πετρώματά της αποτελούν, ίσως, τους βαθύτερους ορίζοντες πετρωμάτων σε όλη την Ελλάδα (Σακελαρίου, 1989). Υπάρχουν όμως και νεότερες απόψεις που υποστηρίζουν ότι η ενότητα των κερδυλλίων μπορεί να ανήκει στη Μάζα της Ροδόπης (Himmerkus et al., 2006). Η ενότητα είναι Προκάμβριας ηλικίας και αποτελείται κυρίως από βιοιτιτικούς γνεύσιους, αμφιβολίτες, μάρμαρα και μιγματίτες (Kockel & Walther 1968, Kockel et al. 1977)..

Οι βιοιτιτικοί γνεύσιοι επικρατούν στην ενότητα, είναι μονότονοι σκούρου καστανού χρώματος, λεπτοκρυσταλλικοί έως μεσοκρυσταλλικοί και αποτελούνται από βιοτίτη, χαλαζία, πλαγιόκλαστα και σε μικρότερη ποσότητα από καλιούχους άστριους. Έχει παρατηρηθεί σε αρκετές θέσεις, τα λευκοκρατικά ορυκτά να έχουν υποστεί μερική τήξη

δίνοντας βιοιτιτικούς μιγματιτικούς γνεύσιους ή μιγματίτες (Σακελαρίου & Durr, 1993). Στα πετρώματα αυτά παρατηρείται μερικές φορές χαλαζίας και λεπτές ταινίες μερικών εκατοστών πλούσιες σε κεροσίλβη. Σύμφωνα με τους Δημητριάδη (1974), Kockel et. al. (1977) και Σακελλαρίου (1993) οι βιοιτιτικοί γνεύσιοι προήλθαν από μεταμόρφωση κλαστικών γραουβάκων ή αρκοζών.

Οι αμφιβολίτες εμφανίζονται ως ενστρώσεις πάχους από μερικά εκατοστά μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα ή σαν φακοί μέσα στους βιοιτιτικούς γνευσίους και αποτελούνται κυρίως από κεροσίλβη και πλαγιόκλαστα. Οι αμφιβολίτες προέκυψαν από μεταμόρφωση βασικών εκχύσεων (Σακελαρίου & Durr, 1993). Στην ενότητα αυτή παρατηρούνται επίσης τρεις ορίζοντες μαρμάρων (Kockel et. al. 1977), το πάχος των οποίων μεταβάλλεται κατά θέσεις. Οι ορίζοντες αυτοί χωρίζονται σε κατώτερο, ενδιάμεσο και ανώτερο και έχουν την ίδια λιθολογία και όψη. Τα μάρμαρα αυτά αποτελούνται από ασβεστίτη, χαλαζία, λευκό μαρμαρυγία και χλωρίτη.

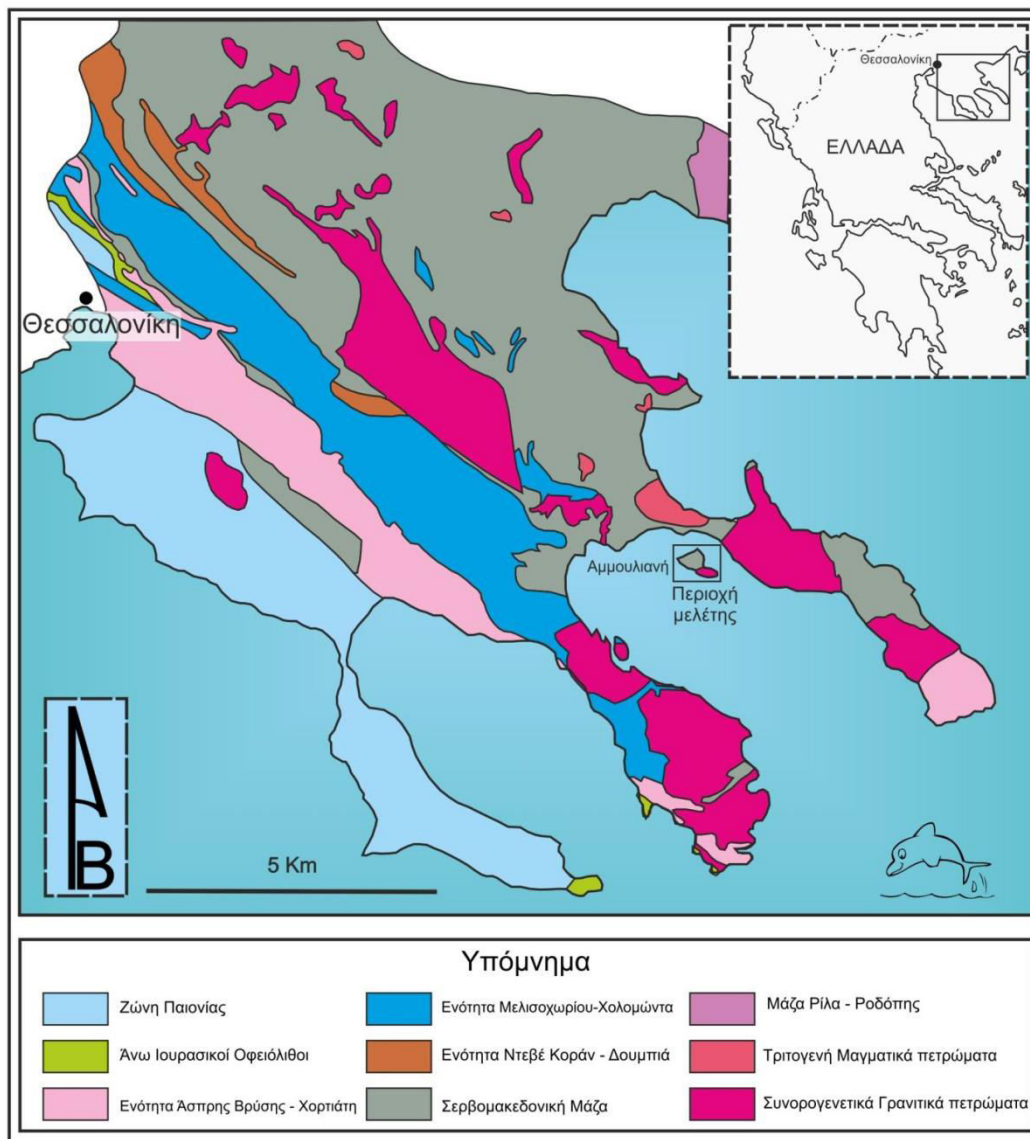
Στο δυτικό τμήμα της ενότητας παρατηρούνται ενστρώσεις μοσχοβιτικών γρανατούχων γνευσίων μέσα στους βιοιτιτικούς γνεύσιους και αποτελούνται από χαλαζία, μοσχοβίτη, πλαγιόκλαστα, γρανάτες και από μικρή ποσότητα ορθόκλαστων (Σακελαρίου & Durr, 1993). Τέλος, ιδιαίτερο γνώρισμα της ενότητας των Κερδυλλίων είναι οι πολυάριθμες απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες που διατρέχουν τα πετρώματά της.

◆ Η Ενότητα του Βερτίσκου

Η ενότητα του Βερτίσκου βρίσκεται δυτικά της ενότητας των Κερδυλλίων, κατέχει τον κορμό της χαλκιδικής και εκτείνεται προς τον Βορρά μέχρι τα σύνορα. Αποτελεί την ανώτερη ενότητα της Σερβομακεδονικής μάζας και εμφανίζει μεγαλύτερη ποικιλία λιθολογικών τύπων από την ενότητα των Κερδυλλίων. Επίσης δεν περιέχει μάρμαρα, ενώ σπάνια είναι και τα ανατηκτικά φαινόμενα (Kockel & Walther 1968, Kockel et al. 1977)..

Στην ενότητα αυτή τη μεγαλύτερη εξάπλωση παρουσιάζουν οι διμαρμαρυγικοί γνεύσιοι, είναι καστανού χρώματος και αποτελούνται από χαλαζία, πλαγιόκλαστο, μοσχοβίτη, βιοτίτη και κατά θέσεις συμμετέχει και ο γρανάτης. Επίσης σε μικρότερο ποσοστό συμμετέχουν ο χλωρίτης και το επίδοτο. Αυτοί οι γνεύσιοι εναλλάσσονται συχνά με μοσχοβιτικούς γνευσίους, χρώματος ανοιχτού καστανού-μπεζ και αποτελούνται από χαλαζία, πλαγιόκλαστο και μοσχοβίτη. Ακόμη μέσα σε αυτούς τους γνεύσιους, εμφανίζονται ενστρώσεις μοσχοβιτικών γρανατούχων γνευσίων, πάχους μερικών μέτρων

(Kockel & Walther 1968, Kockel et al. 1977)..



Σχήμα 3.1. Γεωτεκτονικός χάρτης με τις ζώνες και ενότητες της ευρύτερης περιοχής (τροποποιημένος κατά Πλούγαρη 2011, βασισμένος στο χάρτη κεντρικής Μακεδονίας του Kockel et al. 1977)

Ιδιαίτερο λιθολογικό τύπο, αλλά δύσκολα αναγνωρίσιμο, αποτελούν οι σταυρολιθικοί-κυανούχοι-γρινατούχοι γνεύσιοι που αποτελούνται ορυκτολογικά από κυανίτη, σταυρόλιθο, γρινατή, μοσχοβίτη, χαλαζία, βιοτίτη και χλωρίτη (Σακελαρίου et al. 1993). Επίσης μέσα στους διμαρμαρυγιακούς και μοσχοβιτικούς γνεύσιους εμφανίζονται φακοί, πάχους μερικών μέτρων έως μερικών δεκάδων μέτρων και μήκος μερικών χιλιομέτρων, οφθαλμοειδών γνεύσιων, οι οποίοι παρουσιάζουν κατά θέσεις χαρακτηριστικά έντονης

διάτμησης και μυλωνιτίωση. Αυτοί οι γνεύσιμοι αποτελούνται από χαλαζία, πλαγιόκλαστα, καλιούχους αστρίους, μοσχοβίτη, βιοτίτη και σε μικρότερη ποσότητα από κεροστίλβη και επίδοτο.

Τέλος, μέσα στην ενότητα του Βερτίσκου υπάρχουν μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και σε ενστρώσεις μέσα στους γνεύσιους αμφιβολίτες πάχους μερικών μέτρων έως δεκάδων μέτρων.

◆ Μεταμόρφωση Σερβομακεδονικής

Σύμφωνα με τους Kockel & Walter (1968), Kockel et al (1971) και Kockel et al (1977) τα πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας δέχτηκαν δύο μεταμορφικά επισόδια. Το πρώτο μεταμορφικό επισόδιο έλαβε χώρα κατά το Παλαιοζωικό και προκάλεσε μεταμόρφωση μέσης έως υψηλής αλμανδινικής-αμφιβολιτικής φάσης στην ενότητα των κερδυλλίων και χαμηλής αλμανδινικής-αμφιβολιτικής φάσης στην ενότητα του Βερτίσκου. Το δεύτερο μεταμορφικό επισόδιο έχει αλπική ηλικία και χαρακτηρίζεται από χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης.

Ο Δημητριάδης (1974) για την ενότητα των Κερδυλλίων, στην περιοχή της Ρεντίνας-Ασπροβάλτας-Σταυρού-Ολυμπιάδας, υποστηρίζει ότι τα πετρώματα έχουν μεταμορφωθεί σε συνθήκες κορδιεριτικής-αμφιβολιτικής φάσης.

Η Κασώλη-Φουρναράκη (1981) αναφέρει ότι οι αμφιβολίτες της ενότητας του Βερτίσκου έχουν πυριγενή προέλευση θολειτικού μάγματος και ότι πρόκειται για μεταμόρφωση χαμηλής αλμανδινικής-αμφιβολιτικής φάσης. Στην ενότητα των Κερδυλλίων τα αντίστοιχα πετρώματα σχηματίστηκαν σε σχετικά υψηλότερες συνθήκες μεταμόρφωσης μέσου έως υψηλού βαθμού αμφιβολιτικής φάσης. Επίσης από τη σύσταση των αμφιβόλων, τη σύσταση άλλων ορυκτών και τις εμφανιζόμενες παραγενέσεις υπολόγισε ότι η μεταμόρφωση των πετρωμάτων στη Σερβομακεδονική μάζα έγινε σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας από 2 έως 4 Kb και 650° έως 740°C, αντίστοιχα (Kassoli 1982).

Οι Παπαδόπουλος (1982) και Παπαδόπουλος & Κίλιας (1985) υποστηρίζουν πως έλαβαν χώρα τρία μεταμορφικά γεγονότα. Πρώτα έλαβε χώρα ,πριν από το Κρητιδικό, μία μεταμόρφωση αμφιβολιτικής φάσης. Έπειτα κατά το Κρητιδικό συνέβη μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Τέλος, έλαβε χώρα μία χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση που είτε πρόκειται για συνέχεια της προηγούμενης μεταμόρφωσης, είτε για μια ξεχωριστή

μεταμόρφωση μεταγενέστερη του Κρητιδικού.

Οι Dixon & Δημητριάδης (1984) αναφέρουν ότι τα πετρώματα του Κεντρικού και Ανατολικού τμήματος της Σερβομακεδονικής μάζας υπέστησαν περιοχική μεταμόρφωση αμφιβολιτικής φάσης κατά το Άνω Ιουρασικό με Κάτω Κρητιδικό.

Οι Chatzidimitriadis et al (1985) αναφέρουν δύο μεταμορφικά επεισόδια. Το πρώτο και κύριο μεταμορφικό επεισόδιο έλαβε χώρα μαζί με την Ερκύνια ορογένεση ενώ το δεύτερο επεισόδιο συνέβη κατά το Ιουρασικό- Κάτω Κρητιδικό και πρόκειται για ανάδρομη μεταμόρφωση. Επίσης υποστηρίζουν πως κατά το Μέσο Τριαδικό συνέβη μερική τήξη των πετρωμάτων.

Οι Dixon & Δημητριάδης (1987) αναφέρουν τρία μεταμορφικά γεγονότα. Το πρώτο είναι σύγχρονο της Ερκύνιας ορογένεσης και περιλαμβάνει την κινηματική διεύθυνση και τον σχηματισμό κυανιτικών-σιλλιμανιτικών μιγματιτών. Το δεύτερο περιλαμβάνει υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας μεταμόρφωση που έλαβε χώρα κατά τις αρχές του Μεσοζωικού. Τέλος, το τρίτο επεισόδιο αφορά μεταμόρφωση χαμηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας και έχει Τριτογενή ηλικία.

Ο Σακελλαρίου (1989) αναφέρει πέντε κύρια μεταμορφικά επεισόδια. Το πρώτο επεισόδιο είναι νεώτερο του Νεοπαλαιοζωικού και προσδιορίστηκε σε εκλογιτικής φάσης μεταμόρφωση με συνθήκες θερμοκρασίας από 700°C μέχρι 1000°C και πίεσης από 13 Kb μέχρι 14 Kb. Το δεύτερο περιλαμβάνει μέσου βαθμού μεταμόρφωση, αμφιβολιτικής φάσης, ηλικίας Κάτω Μεσοζωικού. Το τρίτο επεισόδιο είναι κατώτερης αμφιβολιτικής φάσης μεταμόρφωση, ηλικίας Μέσο-Ανώ Ιουρασικού. Το τέταρτο έχει Κάτω Κρητιδική ηλικία και ανώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης μεταμόρφωση και το πέμπτο χαρακτηρίζεται από κατώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης μεταμόρφωση Ηωκαινικής ηλικίας.

Τέλος, ο Σιδηρόπουλος (1991), επίσης πρότεινε πέντε μεταμορφικά γεγονότα. Το πρώτο γεγονός έλαβε χώρα πριν την Ερκύνια ορογένεση και με συνθήκες μεταμόρφωσης μεταξύ γλαυκοφανιτικής και εκλογιτικής φάσης σε συνθήκες πίεσης μεγαλύτερες από 9 Kb με 10 Kb και θερμοκρασίας μικρότερες ή πιθανόν μεγαλύτερες από 500°C. Το δεύτερο γεγονός είναι σύγχρονο της Ερκύνιας ορογένεσης, πρόκειται για υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας μεταμόρφωση με συνθήκες πίεσης μεγαλύτερες των 6 Kb και θερμοκρασίας από 650°C μέχρι 700°C. Σύμφωνα με τις συνθήκες αυτές η μεταμόρφωση κυμαίνεται στα όρια αμφιβολιτικής, γρανουλιτικής και εκλογιτικής φάσης. Το τρίτο γεγονός έχει ΠερμοΤριαδική ηλικία, χαρακτηρίζεται από μέσης έως υψηλής πίεσης και μέσης θερμοκρασίας μεταμόρφωση, σε συνθήκες μέσης-άνω αμφιβολιτικής φάσης, με πιέσεις

από 5 Kb έως 8Kb και θερμοκρασίες από 540°C μέχρι 690°C. Το τέταρτο γεγονός έχει Άνω Ιουρασική ηλικία και χαρακτηρίζεται από μέση έως υψηλής πίεσης και μέσης θερμοκρασίας μεταμόρφωση, στο όριο δηλαδή αμφιβολιτικής και πρασινοσχιστολιθικής φάσης, με πιέσεις από 6 Kb έως 9 Kb και θερμοκρασίες από 400°C μέχρι 520°C. Τέλος, το πέμπτο γεγονός χαρακτηρίζεται από χαμηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης, ηλικίας νεώτερης του Ιουρασικού.

◆ Μαγματισμός Σερβομακεδονικής

Σημαντικό επίσης χαρακτηριστικό της Σερβομακεδονικής μάζας είναι οι μεγάλοι όγκοι πυριγενών πετρωμάτων που κόβουν τη συνέχεια των μεταμορφωμένων πετρωμάτων και προέρχονται από 4 κύριες φάσεις μαγματικών εκδηλώσεων (Kockel et al 1977). Η πρώτη φάση μαγματισμού εκτιμάται πως είναι προαλπικής ηλικίας και έχει βασική-υπερβασική σύσταση. Η δεύτερη φάση μαγματισμού συνδέεται με την Ερκύνια ορογένεση κατά το Άνω Παλαιοζωικό και έχει γρανιτική σύσταση. Η τρίτη φάση εκτιμάται πως έλαβε χώρα κατά το Ιουρασικό και θεωρείται σύγχρονη της κύριας αλπικής ορογένεσης, καθώς εμφανίζονται συγκινηματικοί ως προς αυτήν μαγματικοί όγκοι γρανιτικής σύστασης. Αυτή η φάση οδήγησε στο σχηματισμό μεγάλων γρανιτικών όγκων, όπως αυτόν της Αρναίας, του Μονοπηγάδου, του Λαχανά και άλλων. Τέλος, η τέταρτη φάση μαγματισμού συνέβη κατά το Τριτογενές δημιουργώντας επίσης μεγάλα γρανιτικά σώματα και γενικά όξινες διεισδύσεις, όπως το γρανίτη της Ιερισσού, το γρανίτη της Σιθωνίας, το γρανίτη της Μονής Γρηγορίου του Αγίου Όρους και άλλων.

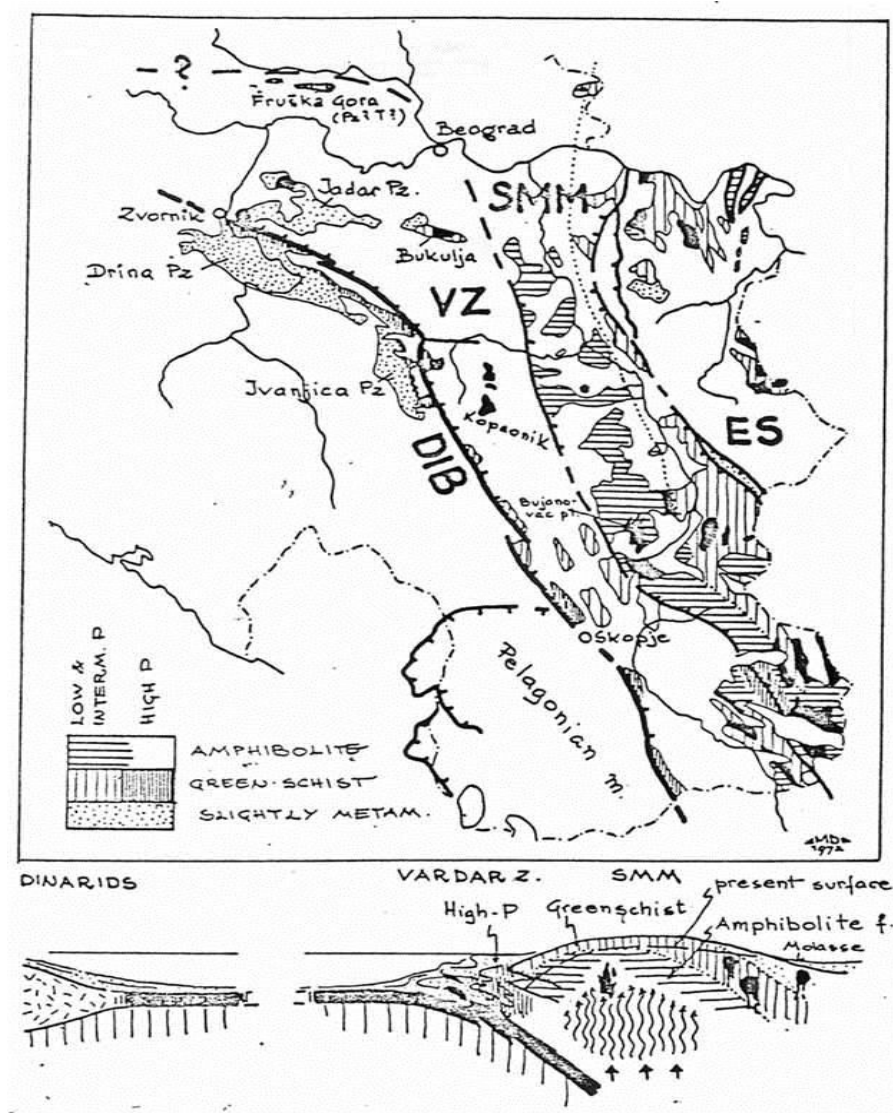
◆ Τεκτοορογενετική εξέλιξη Σερβομακεδονικής

Η Σερβομακεδονική μάζα έχει δεχτεί πολλές τεκτονικές επιδράσεις μέχρι την τελική της διαμόρφωση. Η πρώτη κύρια τεκτονική δράση ήταν πριν το Άνω Παλαιοζωικό. Πρόκειται για την Ερκύνια ορογενετική περίοδο, 300 Ma. Κατά την ορογένεση αυτή διαμορφώθηκαν ισοκλινείς πτυχές συμμεταμορφικές, οι άξονες των οποίων έχουν διεύθυνση και βύθιση προς το Βορρά. Κατά το Ιουρασικό πραγματοποιείται η δεύτερη ορογενετική περίοδος ταυτόχρονα με την αμφιβολιτική φάση μεταμόρφωσης. Η ορογένεση αυτή δημιούργησε συμμεταμορφικές ισοκλινείς πτυχές με άξονες ΒΔ-ΝΑ. Κατά το Άνω Ιουρασικό-Κάτω Κρητιδικό δημιουργήθηκαν συνθήκες μεταμόρφωσης πρασινοσχιστολιθικής φάσης που

συνοδεύτηκαν από κλειστές, υποϊσοκλινείς πτυχές (Μουντράκης 2010).

Μετά το τέλος του Κρητιδικού άρχισαν οι Τριτογενείς Αλπικές φάσεις πτυχώσεων που προκλήθηκαν από συμπιεστική τεκτονική, η οποία οφείλεται στην τελική ηπειρωτική σύγκρουση της Απουλίας πλάκας με την Ευρασιατική πλάκα. Αυτή η σύγκρουση δημιούργησε λεπιώσεις των στρωμάτων, επωθήσεις και μία αναστροφή των στρωμάτων στο δυτικό περιθώριο της ζώνης. Επίσης κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριτογενών παραμορφώσεων προκλήθηκαν ανοιχτές και τύπου knick πτυχές.

Από το Άνω Κρητιδικό μέχρι το Νέο-Τριτογενές τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Σερβομακεδονικής υπόκεινται σε μία πλαστική εκτατική τεκτονική. Συγκεκριμένα μία υπο-οριζόντια έκταση του φλοιού με διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ, που προκάλεσε μία κυρίαρχη πλαστική υφή των μεταμορφωμένων πετρωμάτων μαζί με μία διακριτή σχιστότητα και γράμμωση έκτασης, διεύθυνσης ΑΒΑ-ΔΝΔ (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2. Χάρτης και τομή της Σερβομακεδονικής μάζας

Η εκτατική τεκτονική φαίνεται να συνεχίζεται και στο τριτογενές ως ημιπλαστική, προκαλώντας πυκνές ζώνες διάτμησης, μικρής γωνίας κλίσης με κανονική κίνηση προς τα ΝΔ και τα ΒΑ. Η τεκτονική αυτή συνοδεύεται από σχιστότητα και γράμμωση, διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ. Αυτή η μεγάλη τεκτονική έκταση του Τριτογενούς ταυτίζεται γεωμετρικά και χρονολογικά με αυτή της μάζας της Ροδόπης. Η εφελκυστική τεκτονική συνεχίστηκε και κατά το Μειόκαινο-Πλειόκαινο σε θραυσιγενείς συνθήκες, δημιουργώντας κανονικά ρήγματα μεγάλων και μεσαίων κλίσεων, διαφόρων διευθύνσεων που δημιούργησαν λεκάνες, όπως αυτή του Στρυμόνα.

III.ii.Αμμουλιανή

Η νήσος της Αμμουλιανής δεν έχει μέχρι σήμερα μελετηθεί πλήρως. Ο Kockel είναι από τους πρώτους γεωλόγους που μελέτησαν την Αμμουλιανή, στα πλαίσια της γεωλογικής χαρτογράφησης της Χαλκιδικής κατασκευάζοντας το γεωλογικό χάρτη της Χαλκιδικής σε κλίμακα 1:100.000 (Kockel et. al., 1977) και το γεωλογικό χάρτη φύλλο Ιερισσός, σε κλίμακα 1:50.000 (Kockel et. al., 1978) (σχήμα 3.3). Σύμφωνα με τις χαρτογραφήσεις του Kockel η Αμμουλιανή αποτελείται από (προχωρώντας από το παλαιότερο προς το νεότερο):

i) **Βιοτιτικοί γνεύσιοι**, Παλαιοζωικής ή παλαιότερης ηλικίας, που εντάσσονται στην ενότητα των Κερδυλλίων και θεωρείται πως έχουν υποστεί κατά θέσεις ανάδρομη μεταμόρφωση σε βιοτιτικούς, χλωριτικούς και επιδοτικούς σχιστόλιθους με υπολείμματα πλαγιοκλάστων.

ii) **Ανώτερος ορίζοντας μαρμάρου**, ηλικίας Παλαιοζωικού ή παλαιότερη. Αποτελείται από κυανόχρωμα και λευκά, αδρόκκοκα, παχυστρωματώδη μάρμαρα. Εντάσσονται και αυτά στην ενότητα των Κερδυλλίων.

iii) **Διμαρμαρυγικοί γνεύσιοι** που έχουν υποστεί ανάτηξη, ηλικίας Παλαιοζωικής ή παλαιότερης. Ο Kockel στον πρώτο χάρτη δεν τους εντάσσει σε κάποια ενότητα, ενώ στο δεύτερο χάρτη τους εντάσσει στην ενότητα του Βερτίσκου.

iv) **Πλαγιοκλαστικός - μικροκλινικός γνεύσιος**, Μεσοζωικής ηλικίας, ροδόχρωμος-

υπόλευκος, μεσόκοκκος-λεπτόκοκκος, λεπτοφυλλώδης ή πιθανόν με οφθαλμοειδή ιστό. Στα περιθώρια του εναλλάσσεται με μεταζήματα.

v) **Βιοτιτικός - Διμαρμαρυγιακός γρανοδιορίτης** (τύπου Σιθωνίας), Μεσοζωικής ηλικίας, σχιστώδης και λεπτόκοκκος.

vi) **Σειρά ερυθρών αργίλων με μαρμαρυγίες και ασβεστιτικά σώματα**, ηλικίας Άνω Μειόκαινου-Κάτω Πλειόκαινου. Κατά θέσεις είναι αμμούχες με ψηφίδες, μικροκροκαλοπαγή και με ενστρώσεις ασβεστιτικών υλικών.

vii) **Ιζήματα Λιμνοθαλασσών και παράκτιων λιμνών**, Ολοκαινικής ηλικίας

viii) **Αλλουβιακές αποθέσεις**, Ολοκαινικής ηλικίας

ix) **Παράκτιες αποθέσεις** (θίνες, αναχώματα ακτών κ.α.), Ολοκαινικής ηλικίας.

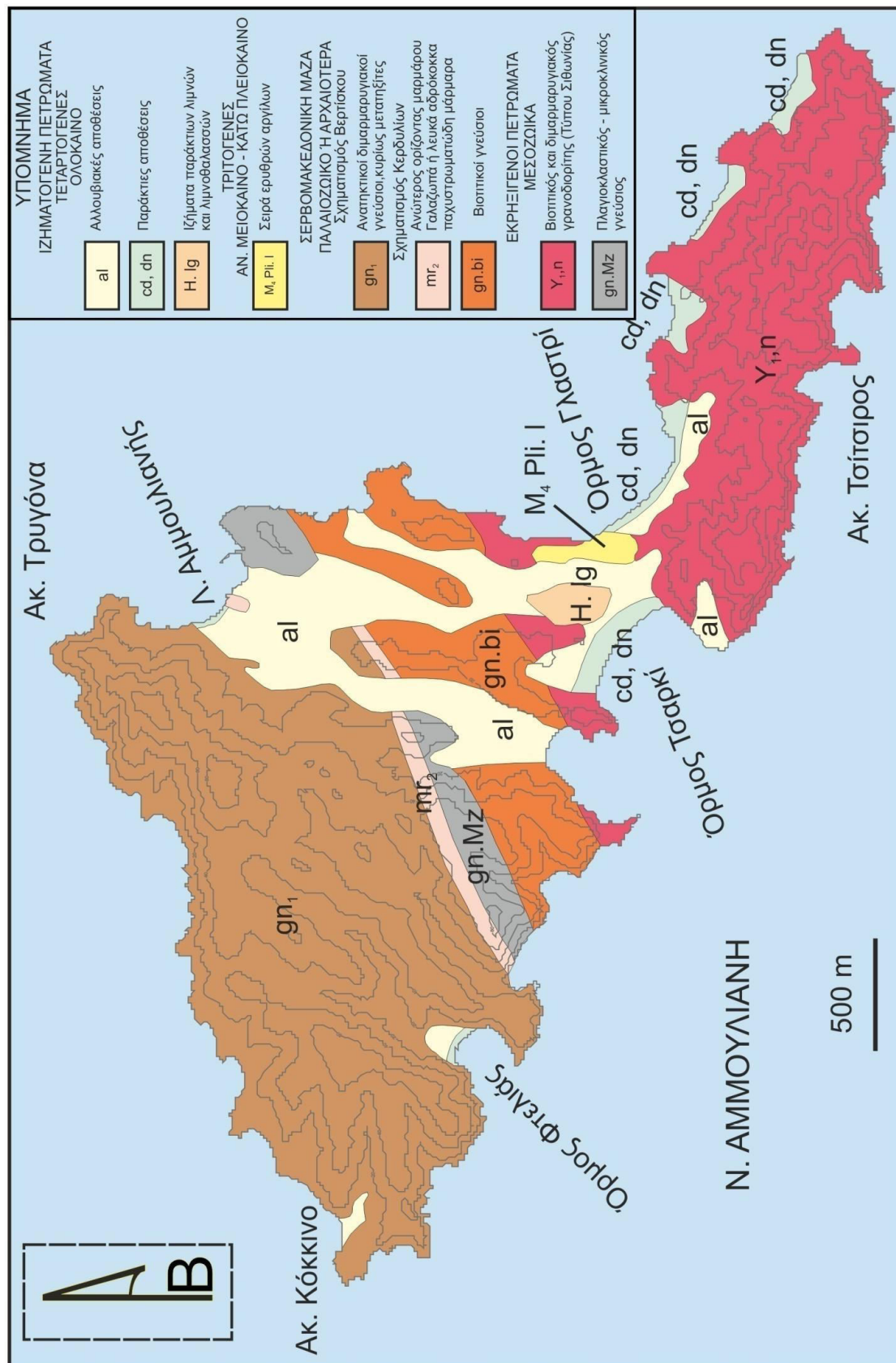
Μία πιο πρόσφατη μελέτη έγινε το 2011 από τον Πλούγαρη. Σύμφωνα με αυτήν τη μελέτη στη νήσο Αμμουλιανή απαντώνται, χωρίς να συμπεριληφθούν οι χαλαρές αποθέσεις, τα εξής πετρώματα (από το κατώτερο προς το ανώτερο):

i) **Αμφιβολίτες - Κεροστιλβικοί Γνεύσιοι**: Πράσινοι έως τεφροπράσινοι, λεπτόκοκκοι, λεπτοταϊνιώδεις γνεύσιοι με ινοβλαστικό ιστό. Αποτελούνται από κεροστίλβη, πλαγιόκλαστο, χαλαζία, βιοτίτη, γρανάτη, επίδοτο, ζοϊσίτη, ρουτίλιο με τιτανίτη, απατίτη και χλωρίτη.

ii) **Βιοτιτικοί Γνεύσιοι**: Σκουρότεφροι έως σκούροι καστανοί γνεύσιοι με λεπιδοβλαστικό ή και γρανοβλαστικό ιστό σε μερικές τομές. Αποτελούνται από χαλαζία, λευκό μαρμαρυγία, πλαγιόκλαστο, γρανάτη, βιοτίτη, αστρίους, επίδοτο, απατίτη και ζirkόνιο.

iii) **Μάρμαρα**: Μεσόκοκκα έως αδρόκοκκα, λευκού έως κυανού χρώματος μάρμαρα.

iv) **Ανατηξίτες - Γρανιτικοί Γνεύσιοι**: Λευκοί έως τεφρόλευκοι, φυλλώδεις γνεύσιοι με γρανοβλαστικό ιστό. Αποτελούνται από χαλαζία, αστρίους και σε τομές έχουν παρατηρηθεί βιοτίτης και μοσχοβίτης. Επίσης κατά θέσεις παρατηρούνται ανατηκτικά φαινόμενα.



Σχήμα 3.3. Γεωλογικός χάρτης της Νήσου Αμμουλιανή (τροποποιημένος κατά Πλούργαλη 2011, βασισμένος στο χάρτη του Kockel et al. 1978, Ι.Γ.Μ.Ε. Φύλλο Ιερισσός)

ν) Χαλαζιούχοι – Αστριούχοι – Μοσχοβιτικοί – Βιοτιτικοί - Γρανατούχοι Γνεύσιμοι:

Λευκόχρωμοι έως μπεζόχρωμοι γνεύσιμοι με γρανοβλαστικό ιστό. Αποτελούνται από χαλαζία, αστρίους, μοσχοβίτη, βιοτίτη και γρανάτη. Κατά θέσεις διακόπτονται από χαλαζιακές φλέβες που έχουν πάχος από μερικά εκατοστά μέχρι δύο μέτρα.

vi) Διμαρμαρυγικοί Γνεύσιμοι: Καστανοί έως ανοικτοκαστανοί γνεύσιμοι με λεπιδοβλαστικό ιστό. Αποτελούνται από χαλαζία, μοσχοβίτη, βιοτίτη και αστρίους.

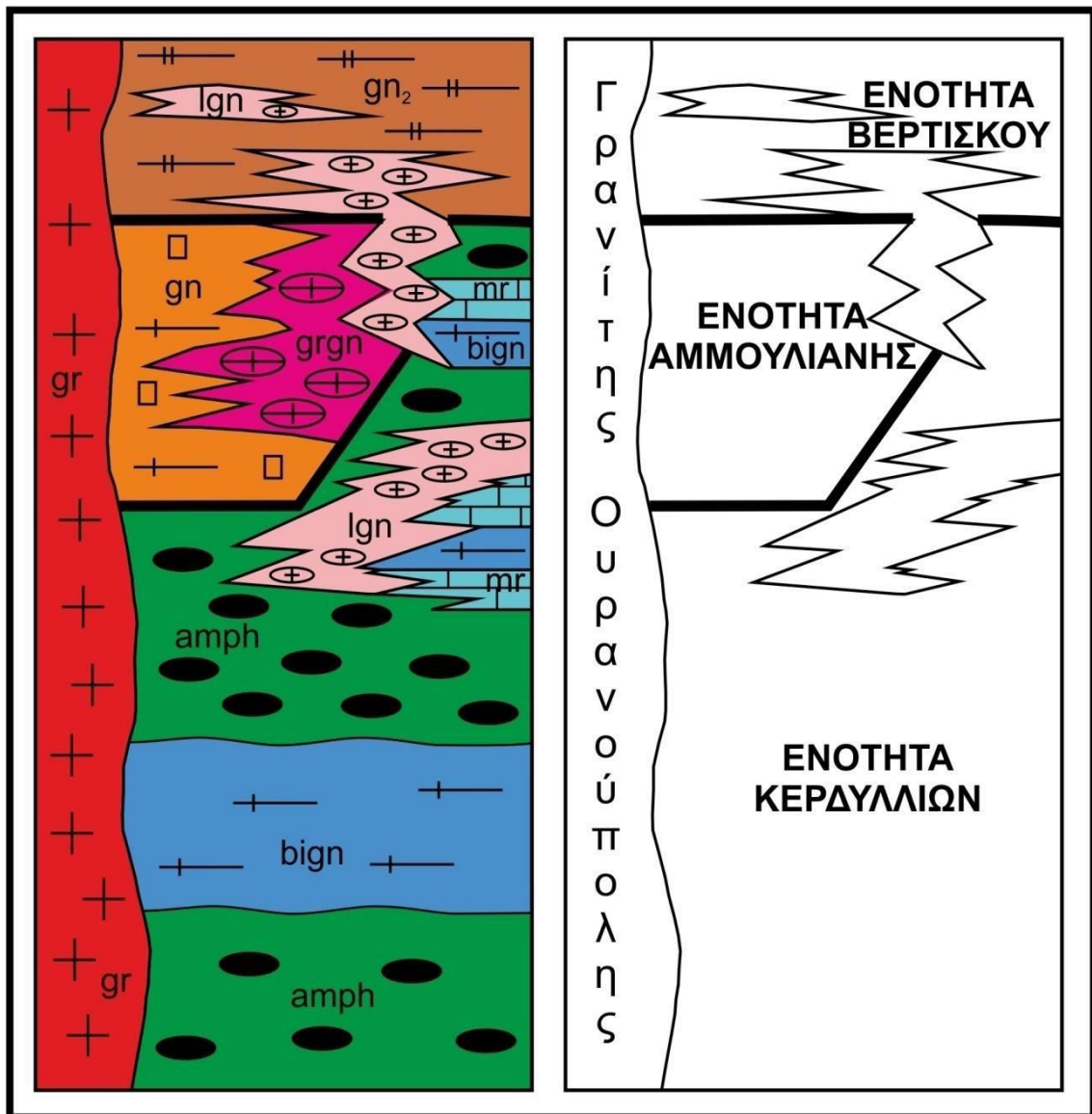
vii) Πλαγιокλαστικοί-Μικροκλινικοί Γνεύσιμοι: Μεσόκοκκοι, υπόλευκοι έως ροδόχρωμοι γνεύσιμοι με λεπιδοβλαστικό ή και γρανοβλαστικό ιστό. Αποτελούνται από χαλαζία, μοσχοβίτη, καλιούχους αστρίους, πλαγιόκλαστο με σερικιτίωση, αλλανίτη, επίδοτο, απατίτη και ζirkόνιο.

viii) Γρανίτης (Ουρανούπολης): Μεσόκοκκος έως αδρόκοκκος, υπόλευκου χρώματος γρανίτης. Αποτελείται από χαλαζία, αστρίους, βιοτίτη και μοσχοβίτη. Κατά θέσεις διακόπτεται από χαλαζιακές και πηγματιτικές φλέβες.

Σύμφωνα με τη μελέτη του Πλούγαρη (2011), η Αμμουλιανή σχηματίζεται από τα πετρώματα τριών ενότητων. Η κατώτερη ενότητα είναι αυτή των Κερδυλλίων. Εκεί εντάσσονται οι αμφιβολίτες που αποτελούν το βαθύτερο στρώμα στην περιοχή, τα μάρμαρα και οι βιοτιτικοί γνεύσιμοι που βρίσκονται σε εναλλαγές ή σε σταδιακή μετάβαση με τους αμφιβολίτες.

Τεκτονικά, επάνω στα Κερδύλλια βρίσκεται η ενότητα της Αμμουλιανής, η οποία αποτελείται από τους Χαλαζιούχους – Αστριούχους – Μοσχοβιτικούς – Βιοτιτικούς - Γρανατούχους Γνεύσιους και τους γρανιτικούς γνεύσιους. Πάνω στην ενότητα της Αμμουλιανής και στην ενότητα των Κερδυλλίων βρίσκεται τεκτονικά η ενότητα του Βερτίσκου που στην Αμμουλιανή αποτελείται από τους διμαρμαρυγικούς γνευσίους.

Οι πλαγιокλαστικοί-μικροκλινικοί γνεύσιμοι (λευκογνεύσιμοι) εμφανίζονται και στις τρεις ενότητες με τη μορφή διεισδύσεων. Τέλος, έχουμε τη διείσδυση του γρανίτη της Ουρανούπολης που επηρεάζει και τις τρεις ενότητες. Όλα τα δίνονται στην στρωματογραφική στήλη του (Σχήμα 3.4)



Σχήμα 3.4. Λιθοστρωματογραφική στήλη της Αμμουλιανής. amph: αμφιβολίτες, bign: βιοτιτικός γνεύσιος, mr: μάρμαρο, qzflbgn: χαλαζιοαστριούχος-μοσχοβιτικός-βιοτιτικός-γранаτούχος γνεύσιος, grgn: γранаτούχος γνεύσιος, gn²: διμαρμαρυγιακός γνεύσιος, leucogn: λευκογνεύσιος, gr: γρανίτης Ουρανούπολης (Πλούγαρης 2011).

Στην παραμορφωτική εξέλιξη του νησιού διαπιστώνεται μια ισχυρή διάτμηση, κατά το Κρητιδικό (Kiliias et al. 1999), που γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στην Αμμουλιανή και συνδέεται με ανάτση, μυλωνιτίωση και ισοκλινής πτύχωση. Μέσω αυτής της διάτμησης η ενότητα των Κερδυλλίων υπέρκειται της ενότητας του Βερτίσκου και πιθανόν σε αυτήν να οφείλεται ο σχηματισμός της Αμμουλιανής. Στο Μεσοζωικό η περιοχή δέχεται πτύχωση που συνδέεται είτε με την πρώιμη ορογένεση της Σερβομακεδονικής είτε είναι σχετικά μεταγενέστερή της, στο Κρητιδικό. Πρόκειται για F1-πτύχωση με άξονα διεύθυνσης ABA-ΔΝΔ έως Α-Δ και επηρεάζει όλες τις ενότητες της Σερβομακεδονικής μάζας σχηματίζοντας μία S2 κύρια σχιστότητα. Έπειτα η περιοχή πτυχώνεται από μία F2-πτύχωση με άξονα διεύθυνσης ABA-ΔΝΔ που επαναπτυχώνει την F1-πτύχωση. Παράλληλα σε αυτή διεισδύει ο γρανίτης της Ουρανούπολης, του οποίου η τοποθέτηση χρονολογείται στο Ηώκαινο και σύμφωνα με αυτόν χρονολογείται και η F2-πτύχωση στο Κρητιδικό με Ηώκαινο. Αργότερα η παραμόρφωση συνεχίζεται, στο Άνω Ολιγόκαινο με Κάτω Μειόκαινο, σε συνθήκες χαμηλότερων θερμοκρασιών με θραυσιγενείς και ημιθραυσιγενείς ζώνες μεγάλης γωνίας κλίσης, που προσδιορίζουν μία transpression - pure compression παραμόρφωση και σμίκρυνση του χώρου σε διεύθυνση B-N (Πλούγαρης 2011).

IV. ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΠΗΛΙΤΗ

Οι μεταπηλίτες ανήκουν στα μεταμορφωμένα πετρώματα και σχηματίζονται από την μεταμόρφωση ιζηματογενών αργιλικών πετρωμάτων. Οι πρωτόλιθοι των μεταπηλιτών είναι ιδιαίτερα πλούσιοι στα αργιλικά ορυκτά (ιλλίτης, μοντμοριλονίτης, καολινίτης), όπως και σε χαλαζία, χλωρίτη και μοσχοβίτη. Ως εκ τούτου οι μεταπηλίτες είναι πλούσιοι σε αργίλιο (Al), πυρίτιο (Si) και κάλιο (K). Πολλές φορές μπορεί να περιέχουν και μικρές ποσότητες ασβεστίτη.

Οι πρωτόλιθοι των μεταπηλιτών έχουν παραγενέσεις σταθερές στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στην επιφάνεια της γης, για το λόγο αυτό η μεταμόρφωσή τους ακολουθεί όλα τα στάδια μίας κανονικής προϊούσας πορείας, σε περίπτωση περιοχικής μεταμόρφωσης, ενώ σε περίπτωση θερμικής μεταμόρφωσης σχηματίζονται κερατίτες.

Σε μία γενικευμένη μορφή θερμικής μεταμόρφωσης, καθαρά αργιλοπηλιτικών πετρωμάτων, μπορούμε να περιγράψουμε την εξής διαδοχή παραγενέσεων: Στην αρχή οι αμεταμόρφωτοι αργιλοπηλίτες με παραγένεση χλωρίτη + μοσχοβίτη + χαλαζία ± χλωριτοειδής. Μετά σε χαμηλού βαθμού θερμική μεταμόρφωση, όπου σχηματίζονται κηλιδωτοί κερατίτες με παραγένεση βιοτίτη + μοσχοβίτη + χαλαζία ± χλωριτοειδής ± ανδαλουσίτη ± κορδιερίτη. Τέλος σε υψηλού βαθμού θερμική μεταμόρφωση, όπου σχηματίζονται κερατίτες με παραγένεση κορδιερίτη + ανδαλουσίτη + βιοτίτη + χαλαζία ± γρανάτη ± σιλλιμανίτη ± καλιούχος άστριος.

Στην περιοχική μεταμόρφωση η διαδικασία ξεκινάει από την ισόβαθμη του χλωρίτη και το στάδιο της αγχιμεταμόρφωσης όπου οι πλακώδεις άργιλοι μετατρέπονται σε αργιλικούς σχιστόλιθους και στη συνέχεια σε φυλλίτες. Κατά την αγχιμεταμόρφωση τα ορυκτά της αργίλου μετατρέπονται σε φεγγιτικό μαρμαρυγία, σε πλούσιο σε αργίλιο χλωρίτη και σε μερικές περιπτώσεις σε πυροφυλλίτη ή παραγωνίτη. Αν στο αρχικό ίζημα συμμετείχε γλαυκονίτης, μπορεί να σχηματιστεί στιλπνομέλας. Με αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης προκαλείται η διάσπαση του πυροφυλλίτη σε ανδαλουσίτη ($P > 2\text{kb}$ και $T \sim 420^\circ\text{C}$) ή κυανίτη (P λίγο πάνω από $2,5\text{kb}$ και $T \sim 450^\circ\text{C}$) και χαλαζία.

Έπειτα καθώς αυξάνεται ο βαθμός μεταμόρφωσης η διαδικασία προχωράει στην ισόβαθμη του βιοτίτη που είναι η πρώτη εμφανής ισόβαθμη. Ο βιοτίτης μπορεί να

σχηματιστεί με διάφορες αντιδράσεις, τις πιο πολλές φορές όμως σχηματίζεται από τη διάσπαση μοσχοβίτη, χλωρίτη και καλιούχου αστρίου. Επίσης μαζί με το βιοτίτη πολύ πιθανή είναι και η δημιουργία σιλιπνομέλα. Η επόμενη εμφανής ορυκτολογική μεταβολή είναι η ισόβαθμη του γρανάτη, όπου οι γρανάτες σχηματίζονται από διάφορες αντιδράσεις αποικοδόμησης του χλωρίτη. Οι πρώτοι γρανάτες που σχηματίζονται εξαντλούν σχηματίζοντας τον πυρήνα τους το μαγγάνιο (Mn), για το λόγο αυτό οι κρύσταλλοι των γρανατών στους μεταπηλίτες είναι εμπλουτισμένοι σε σπесσαρτίνη στον πυρήνα τους και σε αλμανδίνη στην περιφέρειά τους. Εάν υπήρχε σε χαμηλότερο βαθμό μεταμόρφωσης σιλιπνομέλας, εξαφανίζεται πριν την εμφάνιση του γρανάτη. Σε μεταπηλίτες πλούσιους σε σίδηρο (Fe) και σε αργίλιο (Al) μπορεί πριν την εμφάνιση των γρανατών να σχηματιστεί χλωριτοειδής.

Μετά την ισόβαθμη του γρανάτη είναι η ισόβαθμη του σταυρόλιθου και από χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση, το πέτρωμα, περνάει σε μέσου βαθμού μεταμόρφωση. Ο σταυρόλιθος αρχίζει να σχηματίζεται στους 500-550°C και χρειάζεται αρκετό σίδηρο (Fe) και αργίλιο (Al) για το σχηματισμό του. Αν η σύσταση του πετρώματος δεν είναι κατάλληλη μπορεί να μην σχηματιστεί καθόλου. Έπειτα, καθώς αυξάνει ο βαθμός μεταμόρφωσης ο σταυρόλιθος γίνεται ασταθής και αντικαθίσταται από κάποιο από τα αργιλοπυριτικά ορυκτά (κυανίτης, ανδαλουσίτης, σιλλιμανίτης) αντιδρώντας με το χαλαζία, το χλωρίτη και το μοσχοβίτη.

Σε υψηλές πιέσεις (>8kbar) οι αντιδράσεις μπορεί να είναι:

A) σταυρόλιθος + χαλαζίας = αλμανδίνης + κυανίτης + H₂O

B) σταυρόλιθος + χαλαζίας + χλωρίτης + μοσχοβίτης = βιοτίτης + κυανίτης + H₂O

Σε μεσαίες πιέσεις (4-8kbar):

A) σταυρόλιθος + χαλαζίας = αλμανδίνης + σιλλιμανίτης + H₂O

B) σταυρόλιθος + χαλαζίας + μοσχοβίτης = βιοτίτης + σιλλιμανίτης + αλμανδίνης + H₂O

Σε χαμηλές πιέσεις (<4kbar):

A) σταυρόλιθος + χαλαζίας = κορδιερίτης + ανδαλουσίτης (ή σιλλιμανίτης) + H₂O

Κατά την κλασική διαδοχή Barrow ο κυανίτης σχηματίζεται μετά τον σταυρόλιθο, μπορεί όμως σε ειδική περίπτωση πετρωμάτων πλούσιων σε νάτριο (Na) και αργίλιο (Al), ο σχηματισμός του κυανίτη να γίνει πριν από το σχηματισμό του σταυρόλιθου. Αξίζει να

σημειωθεί πως σε συνθήκες χαμηλών πιέσεων μπορεί να σχηματιστεί κορδιερίτης στην περιοχή θερμοκρασιών 500-550°C. Ο σχηματισμός του γίνεται στη θέση του γρανάτη και ευνοείται από την περίσσεια χλωρίτη.

Στο τελικό στάδιο είναι η ισόβαθμη του σιλλιμανίτη, ο οποίος σηματοδοτεί και το πέρασμα από μέσου βαθμού μεταμόρφωση σε υψηλού βαθμού μεταμόρφωση. Ο σχηματισμός του σιλλιμανίτη μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους, για το λόγο αυτό αναφέρεται πως ο σιλλιμανίτης έχει τρεις ισόβαθμες. Ο πρώτος τρόπος είναι με τη μετατροπή του κυανίτη σε σιλλιμανίτη σε συνθήκες υψηλών πιέσεων ή του ανδαλουσίτη σε σιλλιμανίτη σε συνθήκες χαμηλών πιέσεων. Ο δεύτερος τρόπος είναι με το μερικό ή ολικό αφανισμό του σταυρόλιθου και τον ταυτόχρονο σχηματισμό αλμανδίνη (γρανάτη), γι' αυτό και η ισόβαθμη αυτή ονομάζεται και ισόβαθμη σιλλιμανίτη-αλμανδίνη. Ο τρίτος τρόπος είναι όταν αυξάνει ο βαθμός μεταμόρφωσης προκαλώντας αστάθεια στη συνύπαρξη χαλαζία και μοσχοβίτη, με αποτέλεσμα την αντίδραση των δύο και το σχηματισμό σιλλιμανίτη και καλιούχου αστρίου. Λόγω της ύπαρξης του καλιούχου αστρίου η ισόβαθμη αυτή αναφέρεται ως ισόβαθμη σιλλιμανίτη-καλιούχου αστρίου.

Τέλος, πέρα από την προϊούσα μεταμόρφωση των μεταπηλιτών πρέπει να τονιστεί και η ανάδρομη μεταμόρφωση. Σ' αυτή την περίπτωση τα αργιλοπυριτικά ορυκτά μετατρέπονται σε μείγμα λεπτομερούς μοσχοβίτη και χαλαζία και οι γρανάτες μετατρέπονται σε βιοτίτη και χλωρίτη.

V. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ

Ο μεταπηλίτης της Αμμουλιανής διαπιστώθηκε μακροσκοπικά ότι αποτελείται κυρίως από γρανάτη, σταυρόλιθο, ανδαλουσίτη και μαρμαρυγίες. Από τα μακροσκοπικά δείγματα του μεταπηλίτη κατασκευάστηκαν λεπτές-στιλπνές τομές για μελέτη στο πολωτικό μικροσκόπιο και για χημικές αναλύσεις ορυκτών στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM-EDS) (σχήματα 5.25, 5.26, 5.27, 5.28 και 5.29 στη σελίδα 58). Οι μικροσκοπικές εικόνες έχουν ληφθεί με μεγεθυντικό φακό x4 (η μεγάλη διάσταση της εικόνας είναι 2,8 mm). Τα ορυκτά που εντοπίστηκαν και με τις δύο μεθόδους είναι τα εξής:

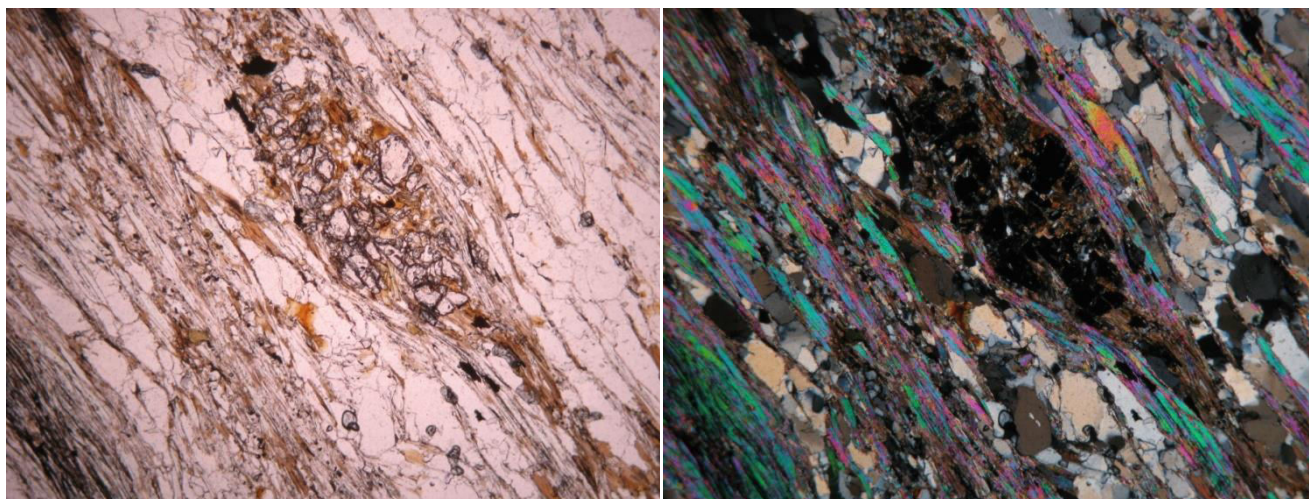
◆ ΧΑΛΑΖΙΑΣ (Qtz)

Ο χαλαζίας (σχήμα 5.1) είναι πολύ κοινό και διαδεδομένο ορυκτό που βρίσκεται σε ένα μεγάλο φάσμα γεωλογικού περιβάλλοντος. Συναντάται σε πολλά πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα όπως και σε ιζηματογενή πετρώματα λόγω της ανθεκτικότητάς του σε χημική και μηχανική διάβρωση. Ο χαλαζίας είναι τεκτοπυριτικό ορυκτό με χημική σύσταση SiO_2 , κρυσταλλώνεται στο τριγωνικό σύστημα σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας (β-χαλαζίας) και στο εξαγωνικό σύστημα σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (α-χαλαζίας). Ο κρύσταλλος έχει πρισματική, ρομβοεδρική μορφή που μοιάζει με πυραμидική. Επίσης βρίσκεται συχνά και σε γεώδη. Ο χαλαζίας έχει σκληρότητα 7 στην κλίμακα Mohs, ενώ ειδικό βάρος $2,65 \text{ gr/cm}^3$, που μπορεί να είναι $<2,6 \text{ gr/cm}^3$ σε κρυπτοκρυσταλλικές ποικιλίες.



Σχήμα 5.1 . Εικόνα διαυγή κρύσταλλου χαλαζία (Qtz)

Εμφανίζει κογχώδη θραυσμό και έχει υαλώδη λάμψη, ενώ σε κρυπτοκρυσταλλικές ποικιλίες είναι αλαμπής ή στεατώδης. Το χρώμα του είναι συνήθως λευκό ή είναι άχρωμος, όμως σε αρκετές περιπτώσεις παρουσιάζεται χρωματισμένος όταν συμμετέχουν διάφορα ιχνοστοιχεία στη χημική σύστασή του (π.χ. αμέθυστος-μωβ, καπνίας-κίτρινο έως μαύρο κ.α.). Επίσης ο χαλαζίας είναι ισχυρά πιεζοηλεκτρικός. Ο χαλαζίας του μεταπηλήτη της Αμμουλιανής είναι μικρόκοκκος και εντοπίζεται εύκολα σε μικροσκοπικές αναλύσεις (σχήμα 5.2).



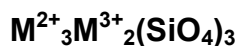
(α)

(β)

Σχήμα 5.2 . (α) Μικροσκοπικές εικόνες χαλαζιών με παράλληλα Nicols. (β) Μικροσκοπικές εικόνες χαλαζιών με διασταυρωμένα Nicols.

◆ ΓΡΑΝΑΤΗΣ (Grt)

Οι γρανάτες είναι μία σημαντική ομάδα νησοπυριτικών ορυκτών. Εμφανίζονται κυρίως στα μεταμορφωμένα πετρώματα, έχουν όμως βρεθεί και σε μερικά πυριγενή πετρώματα σε μικρές ποσότητες. Ο γενικός δομικός τύπος των γρανατών μπορεί να εκφρασθεί ως:



όπου το δισθενές κατιόν $\mathbf{M}^{2+}$ είναι $\mathbf{Ca}^{2+}$, $\mathbf{Mg}^{2+}$, $\mathbf{Fe}^{2+}$ και $\mathbf{Mn}^{2+}$, ενώ το τρισθενές κατιόν $\mathbf{M}^{3+}$ είναι $\mathbf{Al}^{3+}$, $\mathbf{Fe}^{3+}$ και $\mathbf{Cr}^{3+}$. Όλα τα μέλη των γρανατών κρυσταλλώνονται στο κυβικό σύστημα. Η κρυσταλλική δομή των γρανατών παρουσιάζει σημαντική χημική διαμόρφωση

με αποτέλεσμα στη χημική τους σύσταση να συμμετέχουν μεγάλη ποικιλία στοιχείων. Στο κυβικό σύστημα κρυσταλλώνονται τουλάχιστον 15 μέλη, όμως η χημική σύστασή τους δεν μπορεί να εκφραστεί πλήρως μόνο με αυτά. Η ταξινόμηση των γρανατών βασίζεται στη χημική σύσταση των ακραίων μελών διαφόρων ισόμορφων παραμειξιών, αν και στη φύση δεν παρατηρούνται γρανάτες με καθαρή χημική σύσταση κάποιου ακραίου μέλους.

Στη σύσταση των γρανατών συμμετέχουν, εκτός από αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα ακόλουθα στοιχεία H, O, F, Na, Sc, Ti, V, Mn, Y, Zr και Sn. Εκτός όμως από αυτά μπορούν να συμμετέχουν και άλλα χημικά στοιχεία σε μικρότερη ποσότητα ως ιχνοστοιχεία όπως Li, P, S, Cl, K, Ni, Zn, As, Sr, Nb, Te, Ba, REE, Hf, W και Th.

Η χημική πολυπλοκότητα των γρανατών μπορεί να περιγραφεί με βάση 15 ακραία μέλη. Από τους δομικούς τύπους των ορυκτών της ομάδας των γρανατών οι πιο γνωστοί είναι τα παρακάτω 6 ακραία μέλη:

- Ουβαροβίτης $\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (Uv)
- Ανδραδίτης $\text{Ca}_3\text{Fe}_2^{+3}\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (And)
- Γροσσουάριος $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (Gro)
- Πυρωπό $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (Py)
- Σπεςσαρτίνης $\text{MnO}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (Sp)
- Αλμανδίνης $\text{Fe}^{+2}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (Alm)

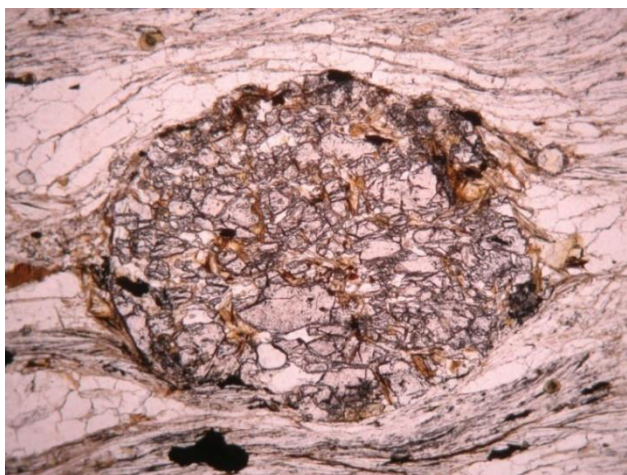
Από τα παραπάνω τα πρώτα τρία μέλη αποτελούν τη σειρά ουγρανδίτη, ενώ τα τρία τελευταία αποτελούν τη σειρά πυραλσπίτη. Οι γρανάτες έχουν μορφή ρομβοδωδεκαεδρική εικοσιτετραεδρική, ή και συνδυασμό των δύο. Συνήθως βρίσκονται σε διακριτούς κρυστάλλους. Οι γρανάτες έχουν σκληρότητα από 6,5 μέχρι 7,5 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος από 3,5-4,3 gr/cm^3 . Το χρώμα τους είναι κυρίως κόκκινο κοκκινοκαστάνινο, κάποια όμως μέλη έχουν πράσινο, κίτρινο, λευκό ή και μαύρο χρώμα. Η λάμψη τους είναι υαλώδης ή ρητινώδης. Οι γρανάτες του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (σχήμα 5.3) εμφανίζονται ως πορφυροβλάστες, θραυσμένοι και να αποστομώνουν την σχιστότητα του πετρώματος.

Οι γρανάτες, όπως προκύπτει από χημικές αναλύσεις (πίνακας 5.1), παρουσιάζουν ζώνωση. Από τις χημικές αναλύσεις αυτές, προέκυψε και η μέση σύσταση των γρανατών, οι οποίοι αποτελούνται από 37,25% SiO_2 , 19,88% Al_2O_3 , 33,09% FeO , 4,77% CaO , 2,66% MgO , 1,78% MnO , 0,21% TiO_2 , 0,15% Na_2O , 0,08% Cr_2O_3 και 0,04% K_2O ενώ ως προς τα

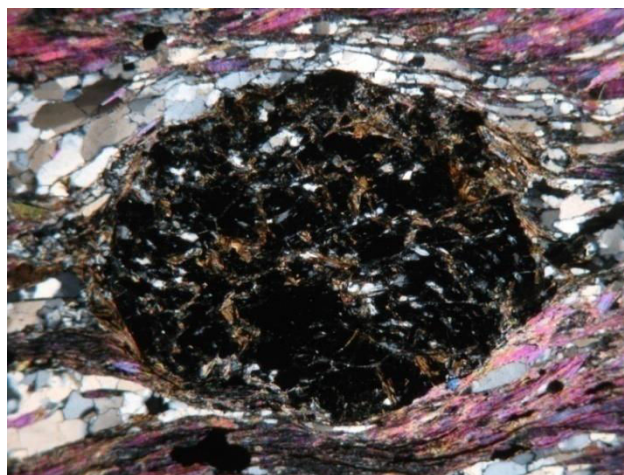
ακραία μέλη αποτελούνται από 70,52% Αλμανδίνη, 10,66% Πυρωπό, 6,87% Γροσσουλάριο, 6,69% Ανδραδίτη, 4,07% Σπεςσαρτίνη και 0,26% Ουβαροβίτη.

Στους κρυστάλλους του γρανάτη που αναλύθηκαν παρατηρήθηκε ότι από τον πυρήνα προς την περιφέρεια το μαγγάνιο (Mn) μειώνεται, το μαγνήσιο (Mg) αυξάνει, ενώ το τιτάνιο (Ti), το ασβέστιο (Ca) και ο σίδηρος (Fe) παρουσιάζουν διακύμανση. Στον πυρήνα των γρανατών εντοπίζεται μικρό ποσοστό χρωμίου (Cr), το οποίο απουσιάζει από την περιφέρεια. Επίσης το κάλιο (K) και το νάτριο (Na) φαίνεται να συμμετέχουν σε μικρό ποσοστό.

Αντίστοιχα, μεταβολές από τον πυρήνα προς την περιφέρεια, εμφανίζονται και στα μέλη που συμμετέχουν στη δομή των γρανάτων. Η σύσταση σε πυρωπό αυξάνει από 2,6% μέχρι και 11,9%. Η σύσταση σε αλμανδίνη σε κάποιους γρανάτες αυξάνεται, με μέγιστη παρατηρούμενη αύξηση 4,1%, ενώ σε κάποιους μειώνεται με μέγιστη παρατηρούμενη μείωση 7,1%. Η σύσταση σε γροσσουλάριο σε κάποιους γρανάτες αυξάνει, με μέγιστη παρατηρούμενη αύξηση 3,2% και σε κάποιους μειώνεται με μέγιστη παρατηρούμενη μείωση 3,7%. Το ίδιο συμβαίνει και με τον ανδραδίτη, όπου παρατηρείται μέγιστη μείωση 6,6% και μέγιστη αύξηση 2,1%, όπως και με τον σπεςσαρτίνη με μέγιστη μείωση 9,4% και μέγιστη αύξηση 2,7%. Επίσης παρατηρήθηκε ότι στον πυρήνα συμμετέχει ουβαροβίτης από 0,5% μέχρι 1,0%, ενώ απουσιάζει τελείως από την περιφέρεια των γρανατών.



(α)



(β)

Σχήμα 5.3 . (α) Μικροσκοπική εικόνα γρανάτη με παράλληλα Nicols . (β) Μικροσκοπική εικόνα γρανάτη με διασταυρωμένα Nicols.

Πίνακας 5.1. Μικροαναλύσεις γρανατών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Γρανάτης										
(%κβ)	T1-3α-1	T1-3α-2	T1-3α-3	T1-3α-4	T1-5α-7	T1-5α-8	T1-6α-1	T1-6α-2	T1-6α-3	T1-7α-1
Θέση	Πε	Ε	Πυ	Ε			Πε	Ε	Πυ	Πυ
Na ₂ O	0,17	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,31	0,08	0,00	0,00
MgO	4,04	2,51	1,06	3,94	3,72	5,09	3,41	2,74	2,70	1,06
Al ₂ O ₃	21,19	20,36	20,70	20,33	20,91	20,69	19,08	19,39	20,29	20,01
SiO ₂	37,53	36,68	36,68	35,73	37,61	38,33	39,11	37,41	37,65	37,24
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
CaO	4,77	7,03	5,04	4,96	2,98	2,84	4,78	5,41	5,32	5,28
TiO ₂	0,00	0,14	0,00	0,13	0,00	0,00	0,19	0,34	0,73	0,10
Cr ₂ O ₃	0,00	0,03	0,20	0,00	0,53	0,01	0,00	0,04	0,06	0,16
MnO	2,23	2,74	3,36	2,32	3,72	0,36	1,76	1,23	1,11	5,10
FeO	29,83	29,31	32,78	31,37	33,46	33,12	31,56	33,37	32,62	31,16
Σύνολο	99,76	99,02	99,81	99,19	100,26	100,44	100,30	100,01	100,48	100,12
Χημικός τύπος (12 Ο)										
Si	2,978	2,977	2,980	2,860	3,001	3,025	3,111	3,007	3,006	3,020
Al	0,022	0,023	0,020	0,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Z	3,000	3,000	3,000	3,000	3,001	3,025	3,111	3,007	3,006	3,020
Al	1,961	1,914	1,963	1,777	1,966	1,925	1,789	1,837	1,910	1,912
Cr	0,000	0,002	0,013	0,000	0,033	0,001	0,000	0,003	0,004	0,011
Fe ³⁺	0,087	0,090	0,044	0,411	0,000	0,024	0,023	0,118	0,000	0,025
Ti	0,000	0,009	0,000	0,008	0,000	0,000	0,011	0,021	0,044	0,006
Y	2,048	2,014	2,020	2,196	1,999	1,950	1,824	1,978	1,957	1,954
Mg	0,478	0,303	0,128	0,470	0,443	0,599	0,404	0,328	0,321	0,128
Fe ²⁺	1,893	1,888	2,183	1,688	2,233	2,162	2,076	2,124	2,178	2,088
Mn	0,150	0,187	0,231	0,157	0,070	0,024	0,119	0,084	0,075	0,351
Ca	0,405	0,608	0,438	0,425	0,255	0,240	0,407	0,466	0,455	0,459
Na	0,026	0,000	0,000	0,063	0,000	0,000	0,048	0,012	0,000	0,000
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000
X	2,952	2,980	2,980	2,804	3,001	3,025	3,065	3,015	3,030	3,026
Fe ₂ O ₃	1,46	1,48	0,72	6,82	0,00	0,41	0,39	1,96	0,00	0,41
FeO	28,52	27,98	32,13	25,23	33,46	32,75	31,21	31,61	32,62	30,79
Δομή Γρανατών										
Py	16,2	10,1	9,3	16,8	14,8	19,8	13,2	10,9	10,6	4,2
Alm	64,1	63,2	73,2	60,2	74,4	71,5	67,7	70,5	71,9	69,0
Gro	9,5	15,4	11,9	-3,9	6,8	6,7	11,4	8,3	12,6	13,0
And	4,3	4,9	2,2	19,1	0,0	1,2	1,9	7,0	2,2	1,6
Uv	0,0	0,1	0,6	0,0	1,7	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5
Sp	5,1	6,3	7,8	5,6	2,3	0,8	3,9	2,8	2,5	11,6
Σύνολο	99,1	100,0	100,0	97,7	100,0	100,0	98,1	99,6	100,0	100,0

Πίνακας 5.1 (συνέχεια). Μικροαναλύσεις γρανατών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Γρανάτης										
(%κβ)	T1-7α-2	T1-7α-3	T1-7α-4	T1-7α-5	T1-9α-1	T1-9α-2	T2-2α-1	T2-2α-2	T2-2α-3	T2-2α-4
Θέση	E	E	Πε	Πε			Πυ	E	E	Πε
Na ₂ O	0,20	0,48	0,38	0,44	0,28	0,00	0,01	0,08	0,37	0,00
MgO	1,09	1,99	3,00	2,63	2,90	2,64	1,93	1,54	1,81	2,90
Al ₂ O ₃	19,80	19,94	19,46	19,67	20,43	20,47	20,26	19,58	20,27	20,51
SiO ₂	37,14	37,70	38,24	37,91	37,45	37,83	36,61	37,50	37,35	37,61
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
CaO	5,87	4,76	5,19	4,37	4,75	5,26	5,01	4,75	5,30	5,42
TiO ₂	0,23	0,79	0,62	0,76	0,01	0,00	0,36	0,19	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00	0,03	0,00	0,00	0,07	0,00	0,15	0,00	0,13	0,00
MnO	3,98	2,89	0,98	1,69	1,85	1,88	3,25	3,04	2,00	0,66
FeO	31,66	31,10	31,76	32,09	32,57	32,18	32,29	32,78	32,88	33,06
Σύνολο	99,97	99,69	99,62	99,57	100,31	100,27	99,86	99,45	100,13	100,27
Χημικός τύπος (12 O)										
Si	3,007	3,038	3,065	3,051	2,986	3,025	2,962	3,054	2,999	3,001
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,000	0,038	0,000	0,001	0,000
Z	3,007	3,038	3,065	3,051	3,000	3,025	3,000	3,054	3,000	3,001
Al	1,890	1,894	1,838	1,866	1,905	1,929	1,893	1,879	1,917	1,929
Cr	0,000	0,002	0,000	0,000	0,004	0,000	0,009	0,000	0,008	0,000
Fe ³⁺	0,099	0,008	0,014	0,010	0,146	0,021	0,094	0,003	0,134	0,078
Ti	0,014	0,048	0,038	0,046	0,001	0,000	0,022	0,012	0,000	0,000
Y	2,002	1,952	1,890	1,921	2,056	1,951	2,018	1,894	2,059	2,007
Mg	0,132	0,240	0,359	0,316	0,345	0,315	0,232	0,186	0,217	0,345
Fe ²⁺	2,045	2,088	2,115	2,150	2,025	2,131	2,091	2,229	2,074	2,128
Mn	0,273	0,197	0,066	0,116	0,125	0,127	0,223	0,210	0,136	0,044
Ca	0,509	0,411	0,446	0,377	0,406	0,451	0,435	0,414	0,456	0,464
Na	0,031	0,075	0,059	0,069	0,043	0,000	0,002	0,013	0,058	0,000
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010
X	2,990	3,011	3,044	3,028	2,944	3,025	2,982	3,053	2,941	2,991
Fe ₂ O ₃	1,62	0,13	0,23	0,16	2,44	0,35	1,54	0,05	2,22	1,30
FeO	30,20	30,99	31,55	31,95	30,38	31,87	30,91	32,74	30,89	31,89
Δομή Γρανατών										
Py	4,4	8,0	11,8	10,4	11,7	10,4	7,8	6,1	7,4	11,5
Alm	68,4	69,4	69,5	71,0	68,8	70,5	70,1	73,0	70,5	71,1
Gro	11,4	10,7	11,9	9,6	6,4	13,8	8,4	12,8	8,6	11,6
And	5,6	2,9	2,7	2,9	7,1	1,1	5,7	0,8	6,5	3,9
Uv	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,5	0,0	0,4	0,0
Sp	9,1	6,5	2,2	3,8	4,2	4,2	7,5	6,9	4,6	1,5
Σύνολο	99,0	97,5	98,1	97,7	98,5	100,0	99,9	99,6	98,0	99,7

Πίνακας 5.1 (συνέχεια). Μικροαναλύσεις γρανατών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

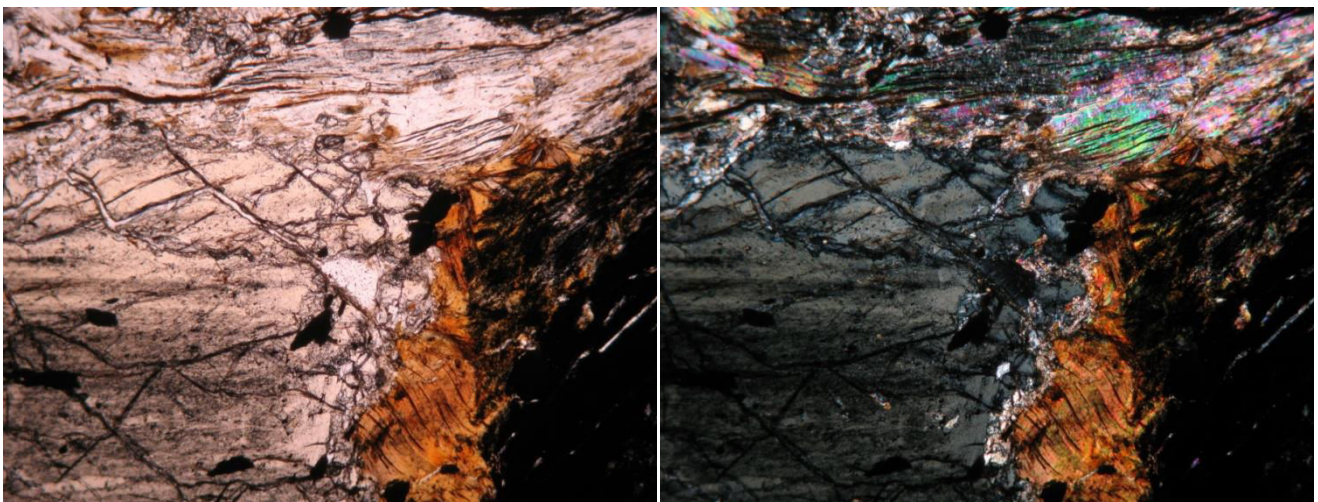
Γρανάτης										
(%κβ)	T2-3α-1	T2-3α-2	T2-3α-3	T2-3α-4	T2-3α-5	T2-3α-6	T3-1α-4	T3-1α-5	T2_1-1α-1	T2_1-1α-2
Θέση	Πε	E	E	E	E	Πυ				
Na ₂ O	0,00	0,07	0,00	0,00	0,18	0,00	0,18	0,00	0,47	0,00
MgO	4,31	3,23	2,43	2,28	2,28	1,82	3,63	4,45	2,98	1,16
Al ₂ O ₃	21,27	19,66	20,91	20,22	19,23	20,98	21,63	21,03	18,43	14,50
SiO ₂	37,70	37,96	36,37	36,77	37,06	36,79	37,35	37,22	37,31	34,90
K ₂ O	0,00	0,00	0,35	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,14	0,14
CaO	3,59	4,55	4,39	4,58	5,48	5,11	2,35	3,01	4,97	5,44
TiO ₂	0,36	0,00	0,87	0,00	0,39	0,20	0,02	0,00	0,12	0,28
Cr ₂ O ₃	0,00	0,32	0,04	0,01	0,00	0,32	0,00	0,00	0,07	0,00
MnO	0,49	0,50	1,00	1,59	2,49	2,82	0,96	0,69	1,58	1,71
FeO	32,36	33,63	33,33	34,12	32,87	31,64	33,54	33,13	33,66	41,25
Σύνολο	100,08	99,91	99,68	99,57	100,16	99,66	99,67	99,53	99,74	99,38
Χημικός τύπος (12 O)										
Si	2,990	3,044	2,933	2,978	2,981	2,987	2,987	2,973	2,998	2,912
Al	0,010	0,000	0,067	0,022	0,019	0,013	0,013	0,027	0,002	0,088
Z	3,000	3,044	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Al	1,979	1,858	1,921	1,907	1,804	1,973	2,027	1,953	1,744	1,337
Cr	0,000	0,020	0,003	0,001	0,000	0,020	0,000	0,000	0,004	0,000
Fe ³⁺	0,000	0,044	0,074	0,115	0,215	0,008	0,011	0,074	0,326	0,731
Ti	0,021	0,000	0,053	0,000	0,024	0,012	0,001	0,000	0,007	0,018
Y	2,000	1,922	2,050	2,022	2,042	2,014	2,040	2,027	2,082	2,086
Mg	0,510	0,386	0,292	0,275	0,273	0,219	0,433	0,530	0,357	0,144
Fe ²⁺	2,146	2,212	2,175	2,195	1,996	2,132	2,233	2,139	1,937	0,147
Mn	0,033	0,034	0,068	0,109	0,170	0,193	0,065	0,046	0,108	0,121
Ca	0,305	0,391	0,379	0,398	0,472	0,442	0,201	0,258	0,428	0,487
Na	0,000	0,011	0,000	0,000	0,028	0,000	0,028	0,000	0,074	0,000
K	0,000	0,000	0,036	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,014	0,015
X	2,994	3,033	2,950	2,978	2,958	2,986	2,960	2,973	2,918	2,914
Fe ₂ O ₃	0,00	0,73	1,21	1,88	3,55	0,13	0,19	1,23	5,39	11,65
FeO	32,36	32,97	32,24	32,42	29,67	31,52	33,38	32,02	28,81	30,77
Δομή Γρανατών										
Py	17,0	12,7	9,9	9,2	9,2	7,3	14,6	17,8	12,2	4,9
Alm	71,7	72,9	73,7	73,7	67,5	71,4	75,4	71,9	66,4	73,7
Gro	9,1	9,5	6,6	7,7	4,3	12,8	6,2	5,0	-1,6	-19,2
And	1,1	2,3	6,2	5,7	11,7	1,0	0,6	3,7	16,0	35,9
Uv	0,0	1,0	0,1	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Sp	1,1	1,1	2,3	3,7	5,7	6,5	2,2	1,6	3,7	4,2
Σύνολο	100,0	99,6	98,8	100,0	98,4	100,0	99,0	100,0	97,0	99,5

Πίνακας 5.1 (συνέχεια). Μικροαναλύσεις γρανατών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Γρανάτης										
(%κβ)	T2_1- 1α-3	T2_1- 1α-4	T2_1- 1α-5	T2_1- 1α-6	T2_1- 1α-15	T2_2- 1α-1	T2_2- 1α-2	T2_2- 1α-3	T2_2- 1α-4	M.O.
Θέση	E					E		Πυ		Πε
Na ₂ O	0,42	0,22	0,31	0,19	0,10	0,39	0,00	0,17	0,13	0,15
MgO	3,50	2,24	2,31	2,24	1,80	2,54	1,75	2,28	3,61	2,66
Al ₂ O ₃	18,27	19,06	21,07	21,85	18,48	18,77	17,96	19,44	19,26	19,88
SiO ₂	37,39	37,14	37,30	37,30	36,14	38,56	35,20	36,77	38,05	37,25
K ₂ O	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07	0,13	0,00	0,04
CaO	5,68	5,23	3,35	5,08	4,61	5,21	5,37	5,58	3,46	4,77
TiO ₂	0,31	0,16	0,00	0,00	0,40	0,23	0,26	0,04	0,11	0,21
Cr ₂ O ₃	0,06	0,05	0,14	0,06	0,14	0,14	0,27	0,22	0,00	0,08
MnO	1,80	1,91	2,98	0,44	1,68	0,75	1,14	0,96	0,27	1,78
FeO	32,40	34,27	32,99	32,79	36,71	33,38	37,98	34,18	35,22	33,09
Σύνολο	99,88	100,34	100,44	99,96	100,06	100,00	100,00	99,77	100,11	99,91
Χημικός τύπος (12 O)										
Si	2,991	2,987	2,985	2,982	2,942	3,095	2,875	2,967	3,048	2,994
Al	0,009	0,013	0,015	0,018	0,058	0,000	0,125	0,033	0,000	0,006
Z	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,095	3,000	3,000	3,048	3,000
Al	1,713	1,793	1,972	2,042	1,715	1,775	1,603	1,815	1,819	1,877
Cr	0,004	0,003	0,009	0,004	0,009	0,009	0,017	0,014	0,000	0,005
Fe ³⁺	0,325	0,238	0,083	0,003	0,301	0,062	0,480	0,239	0,092	0,124
Ti	0,018	0,010	0,000	0,000	0,024	0,014	0,016	0,003	0,007	0,013
Y	2,061	2,044	2,063	2,048	2,049	1,860	2,117	2,070	1,917	2,019
Mg	0,418	0,268	0,275	0,267	0,218	0,304	0,213	0,274	0,431	0,317
Fe ²⁺	1,842	2,066	2,125	2,190	2,199	2,178	2,114	2,068	2,268	2,101
Mn	0,122	0,130	0,202	0,030	0,116	0,051	0,079	0,066	0,018	0,121
Ca	0,486	0,450	0,287	0,435	0,402	0,448	0,470	0,482	0,297	0,411
Na	0,065	0,034	0,048	0,030	0,016	0,061	0,000	0,026	0,020	0,024
K	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,003	0,007	0,013	0,000	0,004
Z	2,939	2,956	2,937	2,952	2,951	3,045	2,883	2,930	3,035	2,978
Fe ₂ O ₃	5,41	3,94	1,37	0,04	4,91	1,03	7,80	3,94	1,52	2,04
FeO	27,53	30,73	31,75	32,75	32,29	32,45	30,96	30,64	33,85	31,25
Δομή Γρανατών										
Py	14,2	9,1	9,4	9,1	7,4	10,0	7,4	9,4	14,2	10,7
Alm	62,7	69,9	72,3	74,2	74,5	71,5	73,3	70,6	74,7	70,5
Gro	-0,3	3,0	5,3	14,4	-2,7	10,1	-7,9	4,1	4,7	6,9
And	16,7	12,1	4,0	0,1	15,9	4,1	23,4	11,7	5,1	6,7
Uv	0,2	0,2	0,4	0,2	0,4	0,5	0,8	0,7	0,0	0,3
Sp	4,2	4,4	6,9	1,0	3,9	1,7	2,7	2,2	0,6	4,1
Σύνολο	97,6	98,6	98,4	99,0	99,5	97,9	99,7	98,7	99,3	99,2
Πε-Περιφέρεια / Ε-Ενδιάμεσα / Πυ-Πυρήνας										

◆ ΒΙΟΤΙΤΗΣ (bi)

Ο βιοτίτης (σχήμα 5.5) είναι ορυκτό της ομάδας των μαρμαρυγιών, ανήκει στα φυλλοπυριτικά ορυκτά και έχει χημικό τύπο $K(Mg,Fe)_3(OH)_2AlSi_3O_{10}$. Σχηματίζεται μέσα σε ένα μεγάλο φάσμα γεωλογικών συνθηκών και για το λόγο αυτό είναι πολύ διαδεδομένος. Επίσης αποτελεί προϊόν αλλοίωσης σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών. Κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα, εμφανίζεται σε πινακοειδείς κατά (001) ή βραχυπρισματικούς κρύσταλλους με ψευδοεξαγωνικό περίγραμμα και συνήθως βρίσκεται σε λέπια ή λεπιοειδή συσσωματώματα και σε φυλλώδεις μάζες. Ο βιοτίτης έχει σκληρότητα 2,5-3 στην κλίμακα Mohs, ειδικό βάρος από $2,8 \text{ gr/cm}^3$ μέχρι $3,2 \text{ gr/cm}^3$, λάμψη υαλώδη και χρώμα που ποικίλει από σκούρο πράσινο, υποπράσινο, καστανό μέχρι μαύρο.



(α)

(β)

Σχήμα 5.4 . (α) Μικροσκοπική εικόνα βιοτίτη με παράλληλα Nicols. (β) Μικροσκοπική εικόνα βιοτίτη με διασταυρωμένα Nicols.



Σχήμα 5.5. Μακροσκοπική εικόνα Βιοτίτη

Ο βιοτίτης στο μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (Σχήμα 5.4) έχει μεγάλη εμφάνιση και παίζει σημαντικό ρόλο. Αποτελείται, κατά μέσο όρο, από 39,36% SiO₂, 9,49% MgO, 0,79% CaO, 17,8% Al₂O₃, 0,41% NaO, 7,9% K₂O, 1,9% TiO₂, 0,27% MnO, 18,81% FeO και 0,06% Cr₂O₃. Οι μετρήσεις στους βιοτίτες της Αμμουλιανής παρατίθενται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2. Μικροαναλύσεις βιοτιτών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Βιοτίτης					
(%κβ)	T2-2α-5	T2_2-2α-1	T2_2-2α-2	T2_2-2α-3	M.O.
SiO ₂	39,27	39,93	39,28	38,97	39,36
MgO	9,87	9,68	9,21	9,18	9,49
Al ₂ O ₃	17,76	17,26	19,93	16,23	17,80
Na ₂ O	0,49	0,55	0,32	0,29	0,41
K ₂ O	8,64	7,69	7,50	7,78	7,90
CaO	0,07	1,02	1,07	1,01	0,79
TiO ₂	1,77	1,89	1,66	2,28	1,90
MnO	0,83	0,15	0,00	0,11	0,27
FeO	17,20	17,15	20,42	20,46	18,81
Cr ₂ O ₃	0,00	0,24	0,00	0,00	0,06
Σύνολο	95,89	95,58	96,39	96,31	96,79
Χημικός τύπος (22 O)					
Si	5,820	5,898	5,838	5,822	5,845
Al	2,180	2,102	2,162	2,178	2,155
Z	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al	0,922	0,903	0,803	0,679	0,827
Ti	0,197	0,210	0,186	0,256	0,212
Fe ²⁺	2,131	2,118	2,538	2,556	2,336
Mg	2,179	2,132	2,040	2,044	2,099
Mn	0,104	0,019	0,000	0,013	0,034
Cr	0,000	0,028	0,000	0,000	0,007
Y	5,534	5,410	5,567	5,549	5,515
Ca	0,011	0,162	0,170	0,162	0,126
Na	0,141	0,159	0,092	0,084	0,119
K	1,633	1,450	1,421	1,484	1,497
X	1,784	1,770	1,683	1,729	1,742
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,506	0,502	0,446	0,444	0,475

◆ ΛΕΥΚΟΣ ΜΑΡΜΑΡΥΓΙΑΣ

Οι μαρμαρυγίες (σχήμα 5.6) αποτελούν μία από τις σπουδαιότερες ομάδες πετρογενετικών ορυκτών και ανήκουν στα φυλλοπυριτικά ορυκτά. Λευκοί μαρμαρυγίες είναι οι μαρμαρυγίες που είναι άχρωμοι και διαφανείς. Το κυριότερο ορυκτό των λευκών μαρμαρυγιών είναι ο μοσχοβίτης.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις στο μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (πίνακας 5.3), υπάρχει η εμφάνιση ενός λευκού μαρμαρυγία, του μοσχοβίτη (Mu). Ο μοσχοβίτης έχει χημικό τύπο $KAl_2(OH)_2AlSi_3O_{10}$, κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα κρυστάλλωσης και εμφανίζεται σε φυλλώδεις μάζες ή μικρά πετάλια. Οι κρύσταλλοι είναι πινακοειδείς με ψευδοεξαγωνικό περίγραμμα.

Ο μοσχοβίτης έχει σκληρότητα 2 με 2,5 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος $2,7 \text{ gr/cm}^3$ με $2,9 \text{ gr/cm}^3$. Έχει υαλώδη λάμψη και είναι άχρωμος ή διαφανής, μερικές φορές τα συσσωματώματα εμφανίζουν ασημόλευκο χρώμα.



Σχήμα 5.6. Μακροσκοπική εικόνα μοσχοβίτη.

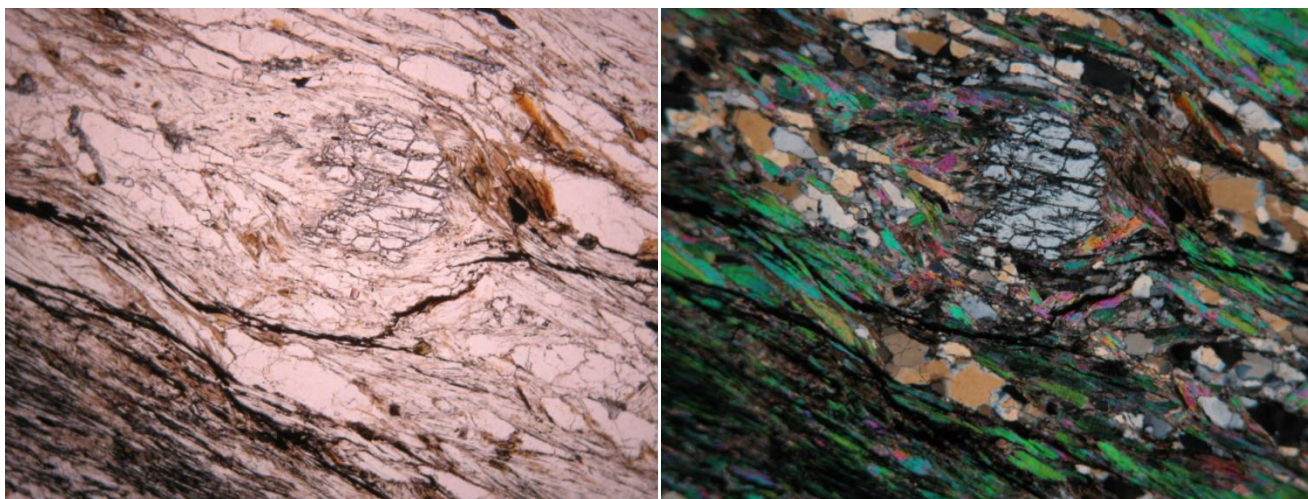
Ο Μοσχοβίτης του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (σχήμα 5.7) αποτελείται, κατά μέσο όρο, από 47,31% SiO_2 , 0,58% MgO , 0,11% CaO , 35,57% Al_2O_3 , 1,21% NaO , 9,47% K_2O , 0,37% TiO_2 , 0,05% MnO , 1,27% FeO και 0,11% Cr_2O_3 . Αξίζει να σημειωθεί επίσης πως στον μεταπηλίτη, ο μοσχοβίτης εμφανίζεται μαζί με τους χαλαζίες προσανατολισμένοι και σε υποπαράλληλη ανάπτυξη, γεγονός που δείχνει πως το πέτρωμα έχει λεπιδοβλαστικό ιστό.

Πίνακας 5.3. Μικροαναλύσεις Λευκών Μαρμαρυγιών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Λευκός Μαρμαρυγίας										
(%κβ)	T1-1α-2	T1-1α-4	T1-4α-2	T1-4α-5	T1-4α-5	T1-6α-6	T1-6α-7	T1-8α-2	T1-8α-3	T1-8α-4
SiO ₂	46,01	45,88	46,53	48,06	47,88	48,01	47,92	45,12	45,91	47,23
MgO	0,42	0,18	0,00	0,00	0,92	1,11	1,35	0,27	0,14	0,85
Al ₂ O ₃	35,81	36,23	39,00	39,77	34,63	33,59	29,96	36,54	37,36	36,14
Na ₂ O	0,98	0,89	1,66	1,51	0,99	0,98	0,57	0,85	1,58	0,78
K ₂ O	9,72	10,18	9,21	9,31	10,02	10,45	10,38	10,39	9,63	10,31
CaO	0,17	0,14	0,00	0,00	0,57	0,26	0,28	0,13	0,18	0,00
TiO ₂	0,86	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,50	0,22	0,40
Cr ₂ O ₃	0,13	0,03	0,00	0,00	0,11	0,00	0,09	0,00	0,39	0,00
MnO	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,03
FeO	1,06	1,16	0,00	0,00	1,81	2,78	4,04	0,81	0,99	0,40
Σύνολο	95,17	95,48	96,40	98,66	96,93	97,17	94,96	94,62	96,46	96,14
Χημικός τύπος (22 O)										
Si	6,111	6,094	6,040	6,083	6,272	6,315	6,494	6,043	6,026	6,188
Al	1,889	1,906	1,960	1,917	1,728	1,685	1,506	1,957	1,974	1,812
Z	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al	3,718	3,765	4,006	4,015	3,618	3,521	3,280	3,811	3,806	3,769
Ti	0,086	0,059	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,050	0,022	0,039
Fe ²⁺	0,118	0,129	0,000	0,000	0,198	0,305	0,457	0,091	0,109	0,044
Mn	0,000	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,003
Cr	0,013	0,003	0,000	0,000	0,011	0,000	0,009	0,000	0,041	0,000
Mg	0,084	0,036	0,000	0,000	0,180	0,218	0,272	0,054	0,027	0,166
Y	4,019	4,014	4,006	4,015	4,007	4,045	4,057	4,006	4,010	4,021
Ca	0,024	0,019	0,000	0,000	0,080	0,036	0,041	0,019	0,025	0,000
Na	0,253	0,230	0,418	0,370	0,251	0,249	0,150	0,221	0,402	0,198
K	1,648	1,724	1,526	1,504	1,674	1,753	1,795	1,775	1,612	1,724
X	1,924	1,973	1,944	1,874	2,005	2,038	1,986	2,015	2,040	1,922
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,414	0,217			0,475	0,417	0,373	0,373	0,201	0,791

Πίνακας 5.3 (συνέχεια). Μικροαναλύσεις Λευκών Μαρμαρυγιών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Λευκός Μαρμαρυγίας										
(%κβ)	T1-9α-4	T1-9α-5	T1-9α-6	T2-1α-3	T2-1α-6	T2-1α-7	T2-2α-6	T3-3α-6	T3-3α-7	M.O.
SiO ₂	46,90	45,20	46,53	47,88	48,47	47,15	45,55	49,90	50,61	47,31
MgO	0,60	0,27	0,42	0,83	0,68	0,56	0,28	0,91	1,27	0,58
Al ₂ O ₃	35,92	36,02	36,20	34,38	35,19	36,47	36,39	34,11	32,14	35,57
Na ₂ O	1,10	2,00	1,38	1,04	1,68	1,26	1,37	1,02	1,39	1,21
K ₂ O	9,76	8,92	8,59	9,67	8,45	9,45	9,31	7,88	8,34	9,47
CaO	0,00	0,01	0,00	0,21	0,00	0,02	0,00	0,11	0,05	0,11
TiO ₂	0,50	0,72	0,39	0,00	0,22	0,73	0,93	0,33	0,36	0,37
Cr ₂ O ₃	0,00	0,46	0,23	0,07	0,33	0,00	0,31	0,00	0,00	0,11
MnO	0,37	0,00	0,00	0,00	0,19	0,04	0,00	0,00	0,00	0,05
FeO	0,74	1,36	1,06	1,50	0,67	0,46	0,82	1,65	2,82	1,27
Σύνολο	97,80	92,79	97,03	95,57	95,89	96,14	94,95	95,90	96,97	96,05
Χημικός τύπος (22 O)										
Si	6,172	6,031	6,284	6,327	6,323	6,160	6,053	6,478	6,567	6,214
Al	1,828	1,969	1,716	1,673	1,677	1,840	1,947	1,522	1,433	1,786
Z	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al	3,744	3,696	3,782	3,680	3,734	3,776	3,752	3,697	3,482	3,718
Ti	0,072	0,072	0,038	0,000	0,022	0,071	0,093	0,032	0,035	0,037
Fe ²⁺	0,081	0,152	0,115	0,166	0,073	0,050	0,091	0,179	0,306	0,140
Mn	0,042	0,000	0,000	0,000	0,021	0,004	0,000	0,000	0,000	0,005
Cr	0,000	0,048	0,024	0,007	0,035	0,000	0,032	0,000	0,000	0,012
Mg	0,118	0,054	0,080	0,163	0,132	0,109	0,055	0,175	0,245	0,114
Y	4,034	4,022	4,038	4,016	4,016	4,010	4,023	4,084	4,068	4,026
Ca	0,000	0,001	0,000	0,029	0,000	0,003	0,000	0,016	0,007	0,016
Na	0,281	0,517	0,346	0,267	0,426	0,320	0,353	0,256	0,351	0,308
K	1,638	1,518	1,412	1,629	1,406	1,575	1,579	1,305	1,380	1,588
X	1,919	2,036	1,758	1,925	1,832	1,898	1,932	1,577	1,738	1,912
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,593	0,261	0,411	0,495	0,644	0,684	0,376	0,494	0,445	0,449



(α)

(β)

Σχήμα 5.7. Μικροσκοπική εικόνα, όπου δείχνει προσανατολισμένους μοσχοβίτες και χαλαζίες με παράλληλα Nicols. (β) Η ίδια μικροσκοπική εικόνα με διασταυρωμένα Nicols.

◆ ΧΛΩΡΙΤΗΣ (Chl)

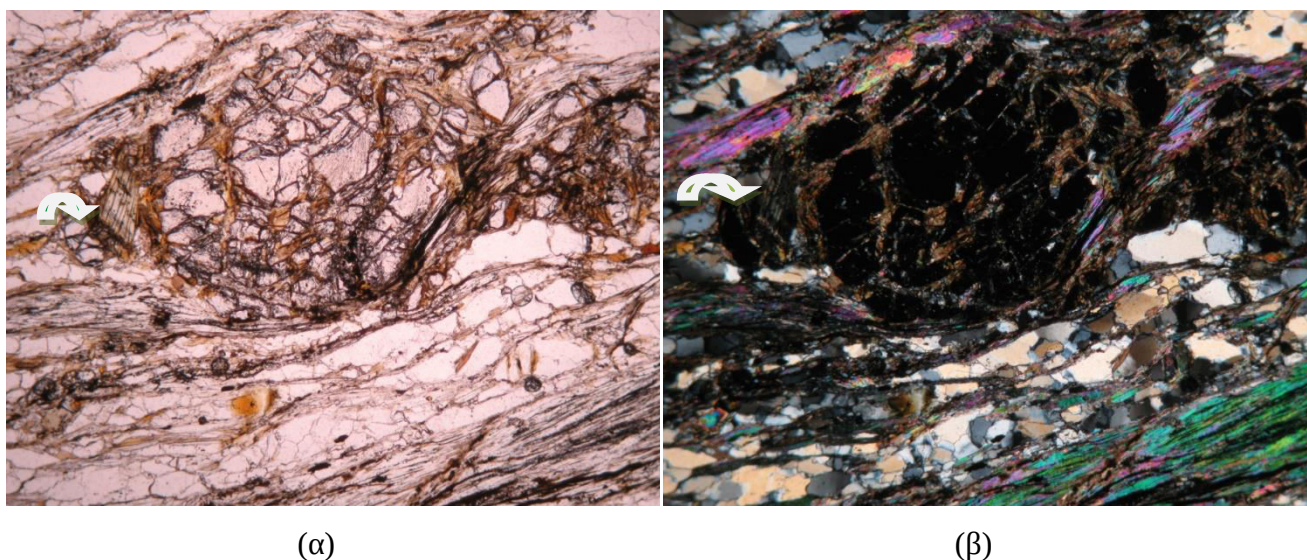
Ο χλωρίτης (σχήμα 5.8) αποτελεί χαρακτηριστικό ορυκτό της χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης των σχιστολίθων. Βρίσκεται επίσης στα ιζηματογενή πετρώματα μαζί με ορυκτά της αργίλου, όπως και στα πυριγενή πετρώματα σαν προϊόν αλλοίωσης των βιοτιτών και άλλων σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών. Η υδροθερμική αλλοίωση προϋπαρχόντων ορυκτών, όπως βιοτίτη και κεροστίλβης, έχει συχνά ως αποτέλεσμα το σχηματισμό χλωρίτη.



Σχήμα 5.8. Μακροσκοπική εικόνα χλωρίτη.

Οι χλωρίτες κρυσταλλώνονται στο μονοκλινές σύστημα κρυσταλλώσεως, είναι ψευδοεξαγωνικοί κρύσταλλοι, φυλλώδεις κατά (001). Συνήθως εμφανίζονται σε λεπιοειδή και μικροκοκκώδη συσσωματώματα.

Ο χλωρίτης έχει σκληρότητα 2 με 2,5 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος από 2,6 gr/cm³ μέχρι 3,3 gr/cm³, το οποίο αυξάνεται με την αύξηση του σιδήρου στη δομή του. Έχει λάμψη υαλώδη, μαργαριταρώδη και χρώμα πράσινο διαφόρων αποχρώσεων. Ο χημικός τύπος του χλωρίτη είναι $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{OH})_8(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}$.



Σχήμα 5.9 . (α) Μικροσκοπική εικόνα του χλωρίτη (βέλος) με παράλληλα Nicols. (β) Μικροσκοπική εικόνα του χλωρίτη (βέλος) με διασταυρωμένα Nicols.

Ο χλωρίτης του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (σχήμα 5.9) έχει μικρή εμφάνιση. Από τις αναλύσεις (πίνακας 5.4), στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) προκύπτει ότι τα ορυκτά της ομάδας των χλωριτών που συμμετέχουν στο πέτρωμα είναι ο πυκνοχλωρίτης και ο ριπιδόλιθος. Από τις μετρήσεις διαπιστώνεται πως οι χλωρίτες του μεταπηλίτη αποτελούνται, κατά μέσο όρο, από 27,75% SiO₂, 13,88% MgO, 0,14% CaO, 21,1% Al₂O₃, 0,16% NaO, 0,36% K₂O, 0,2% TiO₂, 0,29% MnO, 23,95% FeO και 0,16% Cr₂O₃.

Πίνακας 5.4. Μικροαναλύσεις Χλωριτών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Χλωρίτης							
(%κβ)	T1-1α-5	T1-4α-1	T1-4α-4	T1-5α-5	T1-5α-6	T1-6α-4	T1-6α-5
SiO ₂	31,79	30,78	31,04	27,43	25,32	28,90	26,69
TiO ₂	0,90	0,01	0,00	0,00	0,24	0,11	0,31
Al ₂ O ₃	18,43	20,01	18,82	22,73	23,26	20,63	22,73
Cr ₂ O ₃	0,12	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,33
FeO	20,61	21,23	23,30	21,17	22,38	23,89	22,80
MnO	0,85	0,32	0,01	0,37	0,15	0,58	0,22
MgO	13,31	14,51	13,75	15,55	15,09	13,89	14,39
CaO	0,35	0,20	0,22	0,16	0,00	0,35	0,11
Na ₂ O	0,00	0,35	0,31	0,10	0,09	0,00	0,00
K ₂ O	1,74	0,00	1,14	0,72	0,17	0,07	0,04
Σύνολο	88,03	87,41	88,57	88,23	87,15	88,43	87,62
Χημικός τύπος (28 O)							
Si	6,493	6,284	6,363	5,608	5,283	5,949	5,524
Al	1,507	1,716	1,637	2,392	2,717	2,051	2,476
Z	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al	2,937	3,097	2,909	3,085	3,002	2,952	3,069
Ti	0,139	0,001	0,000	0,000	0,038	0,018	0,048
Cr	0,020	0,000	0,000	0,000	0,076	0,000	0,054
Fe ²⁺	3,528	3,625	3,994	3,618	3,905	4,111	3,947
Mn	0,145	0,056	0,002	0,064	0,026	0,101	0,038
Mg	4,062	4,417	4,202	4,738	4,693	4,263	4,441
Ca	0,077	0,043	0,048	0,035	0,000	0,078	0,025
Na	0,000	0,137	0,121	0,038	0,035	0,000	0,000
K	0,454	0,000	0,297	0,188	0,046	0,018	0,012
X	11,363	11,377	11,573	11,767	11,822	11,541	11,634

Πίνακας 5.4 (συνέχεια). Μικροαναλύσεις Χλωριτών από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Χλωρίτης						
(%κβ)	T2-1α-4	T2-1α-5	T2_1-1α-9	T2_1-1α-10	T2_1-1α-11	M.O.
SiO ₂	29,50	28,47	25,11	25,26	22,82	27,75
TiO ₂	0,00	0,00	0,16	0,23	0,39	0,20
Al ₂ O ₃	21,67	23,45	21,50	20,50	19,47	21,10
Cr ₂ O ₃	0,00	0,03	0,17	0,34	0,47	0,16
FeO	21,32	20,36	28,38	29,26	32,74	23,95
MnO	0,57	0,00	0,28	0,04	0,07	0,29
MgO	14,40	15,18	12,22	12,59	11,63	13,88
CaO	0,27	0,00	0,03	0,00	0,02	0,14
Na ₂ O	0,24	0,15	0,42	0,18	0,05	0,16
K ₂ O	0,00	0,44	0,00	0,00	0,00	0,36
Σύνολο	87,96	88,08	88,27	88,39	87,65	87,99
Χημικός τύπος (28 O)						
Si	6,005	5,755	5,355	5,401	5,069	5,757
Al	1,995	2,245	2,645	2,599	2,931	2,243
Z	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al	3,201	3,342	2,759	2,566	2,166	2,924
Ti	0,000	0,000	0,026	0,037	0,065	0,031
Cr	0,000	0,004	0,028	0,058	0,083	0,027
Fe ²⁺	3,627	3,442	5,061	5,232	6,082	4,181
Mn	0,098	0,000	0,051	0,006	0,013	0,050
Mg	4,367	4,575	3,884	4,013	3,851	4,292
Ca	0,059	0,000	0,006	0,000	0,004	0,031
Na	0,093	0,058	0,175	0,073	0,023	0,062
K	0,000	0,113	0,000	0,000	0,000	0,094
X	11,445	11,535	11,991	11,987	12,287	11,692

◆ ΑΣΤΡΙΟΙ

Τα μέλη της ομάδας των αστρίων αποτελούν τα πιο διαδεδομένα και πιο σπουδαία πετρογενετικά ορυκτά. Τα συναντάμε σε όλες τις κατηγορίες πετρωμάτων και αποτελούν το 58% του προσιτού σε εμάς τμήμα του στερεού φλοιού της γης. Οι άστριοι είναι αφθονότεροι στα πυριγενή πετρώματα, αφού τα συναντάμε σε όλα τα είδη των πυριγενών πετρωμάτων, εκτός από τα υπερβασικά. Επίσης έχουν σημαντικό ρόλο στην ταξινόμηση των πυριγενών. Οι κρύσταλλοι των αστρίων είναι γενικά βραχυπρισματικοί, κάπως πεπλατυσμένοι κατά (010) ή επιμηκυσμένοι παράλληλα στον *a* και σχηματίζουν χαρακτηριστικές διδυμίες. Είναι άχρωμοι, λεκωποί ή τεφροί, κρυσταλλώνονται στο μονοκλινές ή στο τρικλινές σύστημα και έχουν υαλώδη λάμψη. Η σκληρότητά τους είναι κοντά στο 6 της κλίμακας Mohs και το ειδικό βάρος τους κυμαίνεται από 2,55 gr/cm³ μέχρι 2,76 gr/cm³.



Σχήμα 5.10 . Τριαδικό σύστημα Ορθόκλαστου-Αλβίτη-Ανορθίτη (Or-Ab-An) υψηλής θερμοκρασίας σχηματισμού.

Οι άστριοι αποτελούνται από την ομάδα των πλαγιόκλαστων, τους καλιούχους αστρίους και τους βαριούχους αστρίους, που είναι και πιο σπάνιοι (σχήμα 5.13). Οι καλιούχοι άστριοι αποτελούνται από το ορθόκλαστο, το σανίδινο, που εντοπίζεται μόνο στα ηφαιστειακά πετρώματα, και το μικροκλινή. Οι καλιούχοι άστριοι έχουν τον ίδιο χημικό τύπο $KAlSi_3O_8$.

Γενικά, η διαφοροποίηση των καλιούχων αστρίων οφείλεται στη θερμοκρασία σχηματισμού τους. Έτσι οι καλιούχοι άστριοι διακρίνονται στο σανίδινο που είναι υψηλής θερμοκρασίας, στο ορθόκλαστο που είναι ενδιάμεσης θερμοκρασίας και στο μικροκλινή που είναι χαμηλής θερμοκρασίας. Για τον προσδιορισμό του ονόματος των ορυκτών της ομάδας των πλαγιόκλαστων και των καλιούχων αστρίων, έχουν δημιουργηθεί τριγωνικά διαγράμματα που διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θερμοκρασία σχηματισμού (σχήματα 5.10, 5.11 και 5.12).



Σχήμα 5.11 . Τριαδικό σύστημα Ορθόκλαστου-Αλβίτη-Ανορθίτη (Or-Ab-An) ενδιάμεσης θερμοκρασίας σχηματισμού.

Στο μεταπηλίτη της Αμμουλιανής έχουν εντοπισθεί ορυκτά της ομάδας των πλαγιόκλαστων (Pl) και ορθόκλαστα (Or). Το ορθόκλαστο συναντάται σε όξινα και

ενδιάμεσα πλουτωνικά πετρώματα, καθώς και σε πολλά μεταμορφωμένα. Κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα, έχει βραχυπρισματικούς κρυστάλλους επιμηκυσμένους παράλληλα στον *a* ή παράλληλα στο *c* και πλατιούς κατά (010) και υαλώδη λάμψη. Επίσης σχηματίζει διδυμία στον άξονα *a* ή στον άξονα *c*, που είναι γνωστή ως Carlsbad. Το ορθόκλαστο είναι άχρωμο ή έχει χρώμα λευκό, έχει σκληρότητα 6 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος από 2,56 gr/cm³ μέχρι 2,59 gr/cm³.



Σχήμα 5.12 . Τριαδικό σύστημα Ορθόκλαστου-Αλβίτη-Ανορθίτη (Or-Ab-An) χαμηλής θερμοκρασίας σχηματισμού.

Τα πλαγιόκλαστα είναι πλήρης σειρά στερεών διαλύμάτων από τον καθαρό αλβίτη (Ab) έως τον καθαρό ανορθίτη (An). Η διαίρεση της σειράς των στερεών διαλυμάτων έγινε αυθαίρετα σε έξι τμήματα. Τα έξι αυτά τμήματα είναι ο αλβίτης (0-10 An), το ολιγόκλαστο (10-30 An), ο ανδεσίτης (30-50 An), το λαβραδόριο (50-70 An), ο βυτωβνίτης (70-90 An) και ο ανορθίτης (90-100 An). Χαρακτηρίζουμε όξινα τα πλαγιόκλαστα που περιέχουν αλβίτη από 50% μέχρι 100% και βασικά τα πλαγιόκλαστα που περιέχουν αλβίτη από 0% μέχρι 50%. Τα πλαγιόκλαστα είναι περισσότερο άφθονα από τους καλιούχους αστρίους

και απαντώνται στα πυριγενή και στα μεταμορφωμένα πετρώματα, ενώ είναι πιο σπάνια στα ιζηματογενή πετρώματα. Τα πλαγιόκλαστα έχουν χημικό τύπο $(Ca,Na)(Al,Si)AlSi_2O_8$, που προκύπτει από τα δύο ακραία μέλη της ισόμορφης παράμιξης, τον αλβίτη ($NaAlSi_3O_8$) και τον ανορθίτη ($CaAl_2Si_2O_8$).

Τα μέλη της ομάδας των πλαγιοκλάστων κρυσταλλώνονται στο τρικλινές σύστημα και έχουν πλακώδεις κρύσταλλους κατά (010), ενώ μερικές φορές είναι επιμήκεις παράλληλα στον b. Πολύ συχνά εντοπίζονται σε ακανόνιστους κόκκους και σχισμογενείς μάζες. Τα πλαγιόκλαστα εμφανίζουν χαρακτηριστικές διδυμίες, οι πιο γνωστές είναι η αλβιτική πολυδυμία, η περικλινική πολυδυμία και η Carlsbad. Έχουν χρώμα λευκό, άχρωμο, τεφρό και λάμψη υαλώδη, μαργαριταρώδη. Τα πλαγιόκλαστα έχουν σκληρότητα 6 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος $2,62 \text{ gr/cm}^3$ μέχρι $2,76 \text{ gr/cm}^3$. Τα όξινα μέλη είναι πιο ανθεκτικά στην αλλοίωση από ότι τα βασικά μέλη. Τα πλαγιόκλαστα αλλοιώνονται σε σερίκίτη, καολίνη και σε ένα μείγμα ζοϊσίτη, ασβεστίτη, σερίκίτη και αλβίτη (σωσσυριτίωση).



(α)



(β)

Σχήμα 4.13. (α) Μακροσκοπική εικόνα ορθόκλαστου. (β) Μακροσκοπική εικόνα πλαγιόκλαστου (ολιγόκλαστο)

Σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις (πίνακας 5.5), όπου έγιναν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) παρατηρήθηκε ότι τα ορθόκλαστα αποτελούνται από 62,8% SiO_2 , 18,64% Al_2O_3 , 12,98% K_2O , 1,74% Na_2O , 1,72% Fe_2O_3 , 0,94% BaO και 0,9% CaO . Επίσης, στο μεταπηλίτη της Αμμουλιανής τα πλαγιοκλάστα έχουν σύσταση, ανδεσίνη

(An30-50) και ολιγοκλαστου (An 10-30) και χαρακτηρίζονται ως όξινα πλαγιόκλαστα. Τα πλαγιόκλαστα του μεταπηλίτη δεν παρουσιάζουν ζώνωση και σε μια μέση χημική σύσταση αποτελούνται από 60,27% SiO₂, 24,83% Al₂O₃, 0,08% K₂O, 7,70% Na₂O, 0,39% Fe₂O₃, 0,14% BaO και 6,72% CaO.

Πίνακας 5.5. Μικροαναλύσεις αστρίων από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Αστρίοι						
(%κβ)	T1-8α-1	T1-9α-3	T2-1α-8	T2_1-1α-12	T2_1-1α-13	T2_1-1α-14
SiO ₂	59,73	62,18	60,83	61,59	62,55	64,27
Al ₂ O ₃	25,62	23,99	24,85	20,15	19,02	16,76
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	1,48	1,71	1,99
BaO	0,00	0,00	0,55	0,80	0,90	1,11
CaO	7,15	5,77	6,00	1,69	0,56	0,44
Na ₂ O	7,61	8,21	7,90	2,25	1,91	1,07
K ₂ O	0,00	0,09	0,24	11,77	13,11	14,04
Σύνολο	100,11	100,23	100,37	99,73	99,76	99,68
Χημικός τύπος (8 O)						
Si	2,658	2,749	2,703	2,857	2,909	2,997
Al	1,343	1,250	1,301	1,101	1,042	0,921
Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,057	0,067	0,077
Z	4,001	3,999	4,004	4,016	4,018	3,996
Ca	0,341	0,273	0,286	0,084	0,028	0,022
Na	0,657	0,704	0,681	0,202	0,172	0,097
K	0,000	0,005	0,013	0,697	0,778	0,835
Ba	0,000	0,000	0,010	0,015	0,016	0,020
X	0,998	0,982	0,989	0,997	0,995	0,974
Or (K)	0,0	0,5	1,4	69,9	78,2	85,7
Ab (Na)	65,8	71,7	68,8	20,3	17,3	9,9
An (Ca)	34,2	27,8	28,9	8,4	2,8	2,2
Cn (Ba)	0,0	0,0	1,0	1,5	1,6	2,1

Πίνακας 5.5 (συνέχεια). Μικροαναλύσεις αστρίων από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Άστριοι							
(%κβ)	T2_2-2α-4	T2_2-2α-5	T2_2-2α-6	T2_2-2α-7	T2_2-2α-8	M.O. (Or)	M.O. (Pl)
SiO ₂	61,96	58,20	56,55	62,22	60,48	62,80	60,27
Al ₂ O ₃	23,27	25,70	26,95	23,28	24,96	18,64	24,83
Fe ₂ O ₃	0,51	1,12	0,85	0,23	0,45	1,72	0,39
BaO	0,00	0,00	0,42	0,07	0,12	0,94	0,14
CaO	5,33	8,65	9,12	5,54	6,23	0,90	6,72
Na ₂ O	8,63	6,35	6,38	8,37	8,18	1,74	7,70
K ₂ O	0,00	0,12	0,00	0,17	0,00	12,98	0,08
Σύνολο	99,69	100,15	100,27	99,87	100,42	99,72	100,13
Χημικός τύπος (8 O)							
Si	2,757	2,605	2,543	2,764	2,683	2,921	2,683
Al	1,221	1,356	1,428	1,219	1,305	1,021	1,303
Fe ³⁺	0,019	0,042	0,032	0,009	0,017	0,067	0,015
Z	3,997	4,002	4,003	3,992	4,005	4,009	4,001
Ca	0,254	0,415	0,439	0,264	0,296	0,045	0,321
Na	0,744	0,551	0,556	0,721	0,704	0,157	0,665
K	0,000	0,007	0,000	0,009	0,000	0,770	0,004
Ba	0,000	0,000	0,007	0,001	0,002	0,017	0,003
X	0,998	0,973	1,003	0,995	1,002	0,989	0,993
Or (K)	0,0	0,7	0,0	0,9	0,0	78,0	0,4
Ab (Na)	74,6	56,6	55,5	72,4	70,2	15,8	67,0
An (Ca)	25,4	42,6	43,8	26,5	29,6	4,5	32,4
Cn (Ba)	0,0	0,0	0,7	0,1	0,2	1,7	0,3

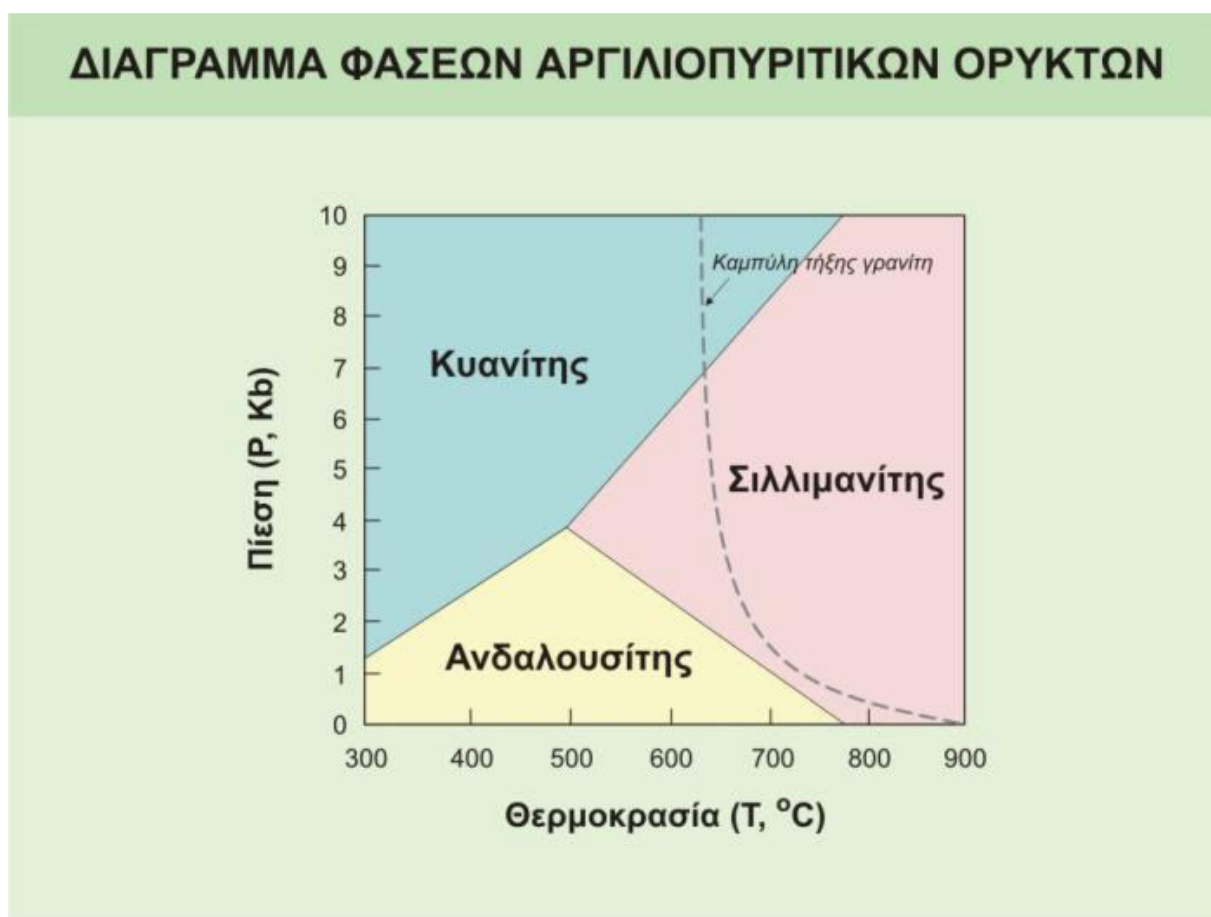
◆ ΑΝΔΑΛΟΥΣΙΤΗΣ (And)

Ο ανδalousίτης είναι ορυκτό μεταμορφωμένων πετρωμάτων, αποτελεί τυπικό ορυκτό περιοχικής και θερμικής μεταμόρφωσης σε αργιλικά πετρώματα, όπου βρίσκεται συνήθως

μαζί με κορδιερίτη. Μπορεί όμως να τον συναντήσουμε πιο σπάνια και σε πυριγενή πετρώματα όπου προκύπτει από την αφομοίωση αργιλούχων υλικών από το μάγμα.

Ο ανδαλουσίτης αποτελεί σημαντικό ορυκτό των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, μαζί με το σιλλιμανίτη και τον κυανίτη, γιατί ανάλογα με την παρουσία κάποιου από αυτά τα ορυκτά μπορούν να προσδιοριστούν πιο εύκολα οι συνθήκες μεταμόρφωσης ενός μεταμορφωμένου πετρώματος (σχήμα 5.14).

Ο Ανδαλουσίτης ανήκει στα νησοπυριτικά ορυκτά και κρυσταλλώνεται στο ρομβικό. Ο χημικός του τύπος είναι Al_2SiO_5 . Οι κρύσταλλοι του ανδαλουσίτη είναι πρισματικοί και μερικές φορές κυλινδρικοί. Μπορεί να βρεθεί σε ινώδη, στηλοειδή και κοκκώδη συσσωματώματα. Επίσης μερικοί κρύσταλλοι έχουν εσωτερικά διατεταγμένα οργανικά εγκλείσματα (ανθρακικά) σε σχήμα Χ (χιαστόλιθος) (σχήμα 5.17).



Σχήμα 5.14. Διάγραμμα φάσεων των αργιλοπυριτικών ορυκτών

Ο ανδαλουσίτης έχει σκληρότητα 7,5 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος από 3,15 gr/cm^3 μέχρι 3,20 gr/cm^3 . Το χρώμα του είναι από σαρκόχρωμο, κοκκινοκαστάνινο, ελαιοπράσινο μέχρι τεφρό ή λευκό και έχει υαλώδη λάμψη, ενώ συχνά είναι αλαμπής.

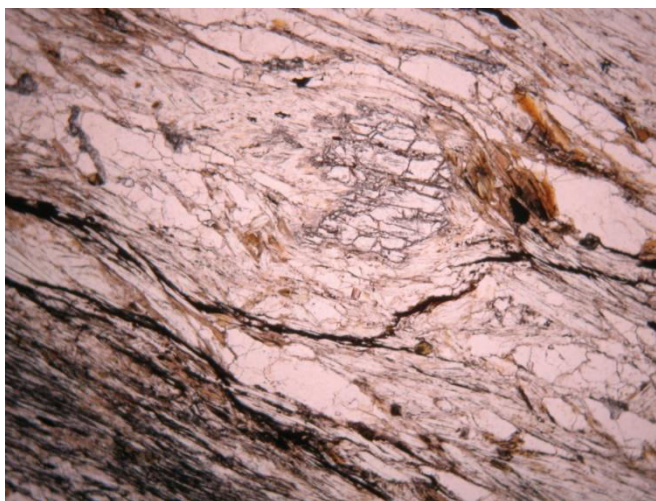
Αλλοιώνεται εύκολα σε σερικήτη και καολίνη, ενώ μετατρέπεται στα πολύμορφα του, σιλλιμανίτη και κυανίτη, με μεταβολή των συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης.

Ο ανδαλουσίτης του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (σχήματα 5.15 και 5.16) είναι ιδιοβλαστικός και έχει ανεπτυγμένους κρυστάλλους, οι περισσότεροι στο ίδιο μέγεθος με τους κρυστάλλους του γρανάτη, ενώ εντοπίζονται και πορφυροβλάστες. Επίσης ο ανδαλουσίτης εντοπίζεται και μακροσκοπικά.

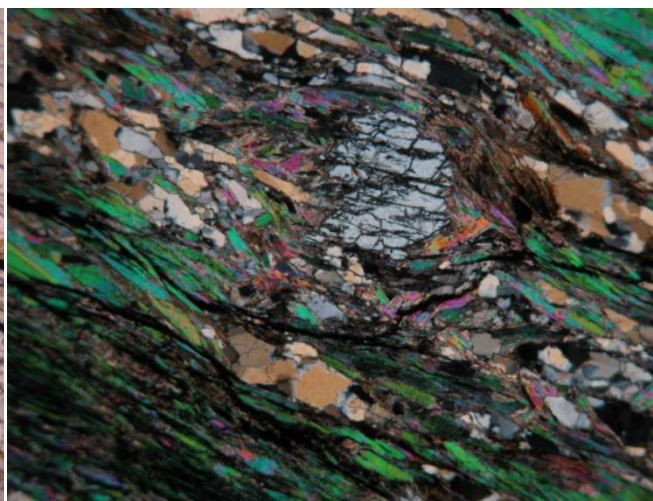
Στον πίνακα 5.6 παρατίθενται οι χημικές αναλύσεις από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Οι ανδαλουσίτες του πετρώματος κατά μέσο όρο αποτελούνται από 38,4% SiO_2 και από 61,6% Al_2O_3 .

Πίνακας 5.6. Οι ποσοστιαίες μονάδες των οξειδίων του ανδαλουσίτη του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, από τις αναλύσεις στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Ανδαλουσίτης							
(%κβ)	T1-5α-1	T1-5α-2	T1-5α-3	T3-1α	T3-1α	T3-1α	M.O.
SiO_2	37,57	38,48	37,36	38,17	39,11	39,72	38,40
Al_2O_3	62,43	61,52	62,64	61,83	60,89	60,28	61,60
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

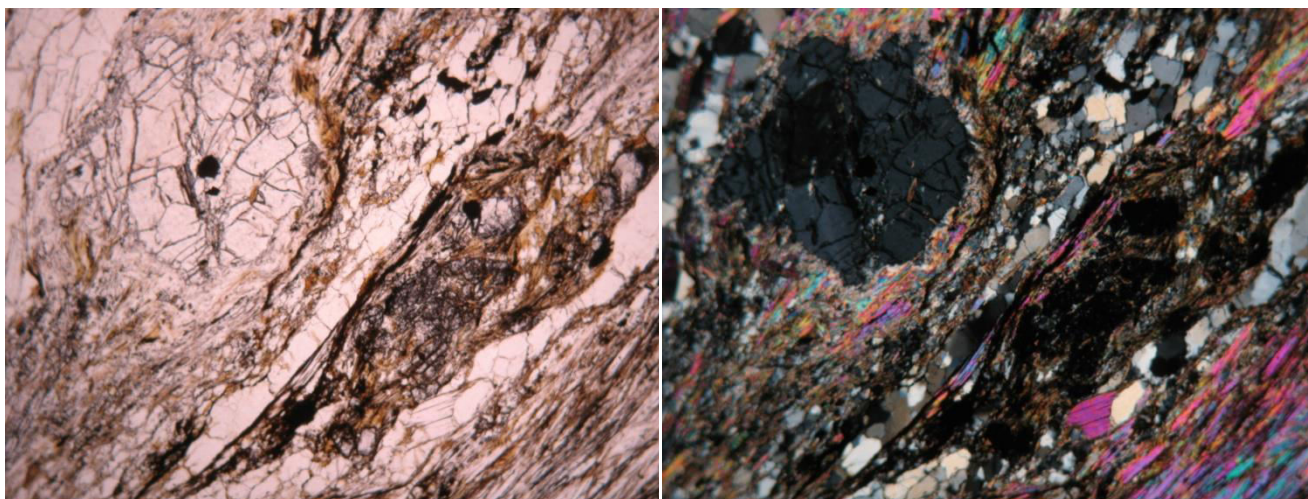


(α)



(β)

Σχήμα 5.15. (α) Μικροσκοπική εικόνα κατακερματισμένου ανδαλουσίτη με παράλληλα Nicols. (β) Μικροσκοπική εικόνα του κατακερματισμένου ανδαλουσίτη με διασταυρωμένα Nicols.



(α)

(β)

Σχήμα 5.16. (α) Μικροσκοπική εικόνα κατακερματισμένου γρανάτη και πιο πάνω ο ανδαλουσίτης με παράλληλα Nicols. (β) Μικροσκοπική εικόνα του κατακερματισμένου γρανάτη και του ανδαλουσίτη με διασταυρωμένα Nicols .



(α)



(β)

Σχήμα 5.17. (α) μακροσκοπική εικόνα ανδαλουσίτη. (β) Μακροσκοπική εικόνα χιαστόλιθου.

◆ ΣΤΑΥΡΟΛΙΘΟΣ (St)

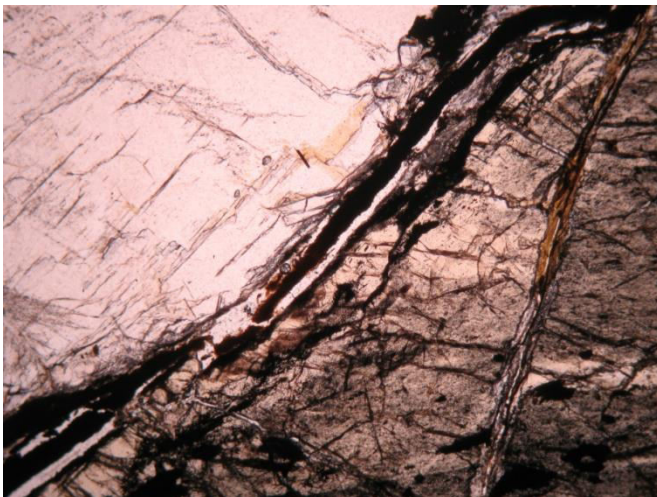
Ο σταυρόλιθος σχηματίζεται κατά την περιοχική μεταμόρφωση πλούσιων σε αργίλιο πετρωμάτων και βρίσκεται σε σχιστόλιθους και γνευσίους. Ο σταυρόλιθος συνυπάρχει με γρανάτες, ανδαλουσίτες και κυανίτες σε πετρώματα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης, ενώ σε κάποια πετρώματα χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης συναντάται με χλωριτοειδή.

Αποτελεί χαρακτηριστικό ορυκτό μεταμορφωμένων πετρωμάτων που σηματοδοτεί το πέρασμα από χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση σε μέσου βαθμού μεταμόρφωση και χρησιμοποιείται συχνά σαν δείκτης μέσου βαθμού μεταμόρφωσης.

Ο σταυρόλιθος ανήκει στα νησοπηριτικά ορυκτά και κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα, ενώ εμφανίζεται συχνά ως ψευδορομβικός. Ο γενικός χημικός τύπος του σταυρόλιθου είναι $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{O},\text{OH})_2(\text{SiO}_4)_4$, ενώ ένας πληρέστερος χημικός τύπος είναι $(\text{Fe}^{2+},\text{Mg},\text{Zn})_2(\text{Al},\text{Fe}^{3+},\text{Ti})_9\text{O}_6(\text{O},\text{OH})_2[(\text{Si},\text{Al})\text{O}_4]$. Οι κρύσταλλοι είναι συνήθως πρισματικοί, σπάνια πλακώδεις και σπάνια εμφανίζεται σε συμπαγή συσσωματώματα. Επίσης σχηματίζει χαρακτηριστικές συνδιαβλασάνουσες διδυμίες σε σχήμα σταυρού κατά δύο τρόπους. Ο πρώτος με επίπεδο διδυμίας το (031) και σχηματισμό ορθογώνιου σταυρού, ενώ ο δεύτερος με τα δύο μέλη να τέμνονται σε γωνία 60° και επίπεδο διδυμίας το (231) (σχήμα 5.20).

Ο σταυρόλιθος έχει σκληρότητα 7 με 7,5 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος από $3,7 \text{ gr/cm}^3$ μέχρι $3,8 \text{ gr/cm}^3$. Το χρώμα του κυμαίνεται από λευκό, ανοιχτό κίτρινο έως κοκκινοκαστάνινο και υποκαστανόμαυρο, έχει λάμψη ρητινώδη μέχρι υαλώδη και μερικές φορές είναι αλαμπής.

Ο σταυρόλιθος του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (σχήματα 5.18 και 5.19) εμφανίζεται ως πορφυροβλάστης, ενώ έχει εντοπιστεί και κρύσταλλος μεγαλύτερος από τους κρυστάλλους του ανδαλουσίτη και του γρανάτη, ο οποίος εντοπίζεται και μακροσκοπικά.

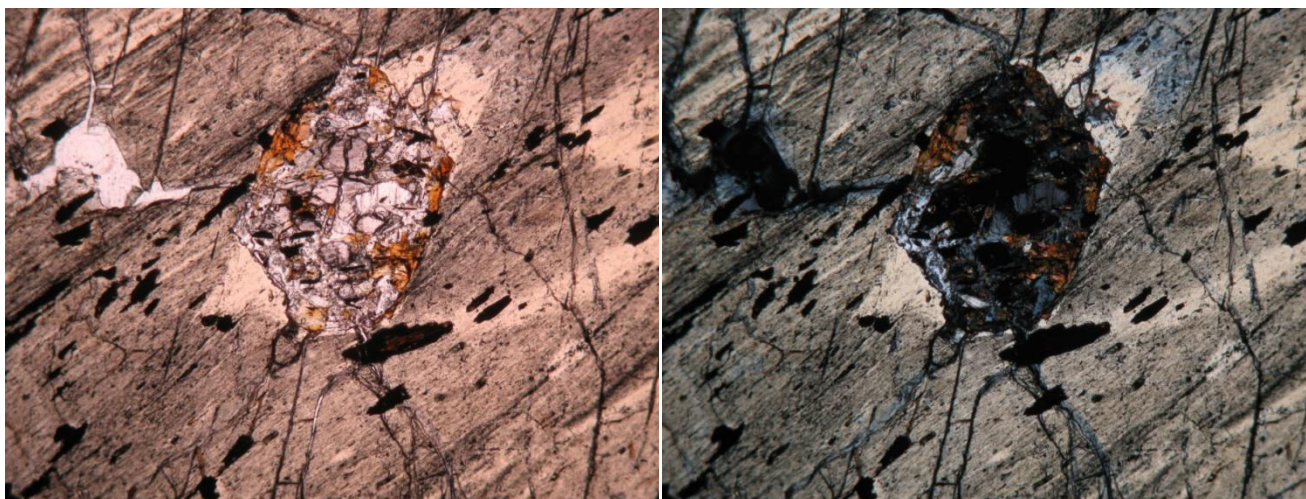


(α)



(β)

Σχήμα 5.18. (α) Μικροσκοπική εικόνα σταυρόλιθου σε επαφή με ανδαλουσίτη με παράλληλα Nicols. (β) Πορφυροβλάστης σταυρόλιθου στο στερεοσκόπιο.



(α)

(β)

Σχήμα 5.19. (α) Μικροσκοπική εικόνα σταυρόλιθου να εγκλείει τον κατακερματισμένο γρανάτη, με παράλληλα Nicols. (β) Η ίδια μικροσκοπική εικόνα του σταυρόλιθου που εγκλείει τον γρανάτη με διασταυρωμένα Nicols.



(α)



(α)

Σχήμα 5.20. (α) Μακροσκοπική εικόνα σταυρόλιθων με τις χαρακτηριστικές διδυμίες. (β) Μακροσκοπική εικόνα σταυρόλιθων πρισματικών, χωρίς διδυμίες.

Στο μικροσκόπιο εμφανίζονται ελάχιστα σπασμένοι και εντοπίστηκε και κρύσταλλος ο οποίος έχει αναπτυχθεί γύρω από έναν γρανάτη και κραστάλλους χαλαζία, ενώ βρίσκεται και σε επαφή με ανδαλουσίτη. Στον ίδιο κρύσταλλο παρατηρήθηκαν και εγκλείσματα άνθρακα, τα οποία παρουσιάζουν προσανατολισμό που δεν ακολουθεί τη γενική διάταξη του πετρώματος. Στον πίνακα 5.7 παρατίθενται οι χημικές αναλύσεις από τις οποίες διαπιστώθηκε πως ο σταυρόλιθος έχει στη δομή του αρκετό ψευδάργυρο (Zn) και

μαγνήσιο (Mg). Από τις μετρήσεις παρατηρήθηκε πως ο σταυρόλιθος του μεταπηλίτη αποτελείται, κατά μέσο όρο από 27,55% SiO₂, 1,48% MgO, 0,08% CaO, 55,48% Al₂O₃, 1,28% ZnO, 0,48% TiO₂, 0,16% MnO, 12,94% FeO και 0,14% Cr₂O₃.

Πίνακας 5.7. Μικροαναλύσεις σταυρόλιθων από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Σταυρόλιθος										
(%κβ)	T1-1α-3	T3-1α-6	T3-4α-1	T3-4α-2	T3-4α-3	T2_5-3α-5	T2_5-3α-10	T2_5-5α-1	T2_5-5α-2	T2_5-5α-3
SiO ₂	26,06	26,67	27,22	28,00	28,02	27,76	28,52	28,56	28,56	27,27
TiO ₂	0,61	0,35	0,36	0,10	0,38	0,32	0,19	0,38	0,37	0,60
Al ₂ O ₃	57,09	54,75	51,55	56,56	56,41	55,99	55,87	55,08	54,83	56,13
Cr ₂ O ₃	0,00	0,24	0,38	0,06	0,00	0,22	0,00	0,27	0,18	0,00
FeO	12,90	13,68	14,43	12,41	12,14	12,42	11,61	12,67	13,14	13,18
MnO	0,00	0,17	0,43	0,04	0,25	0,00	0,19	0,22	0,07	0,00
MgO	1,21	1,95	4,24	1,68	0,91	1,16	0,70	1,11	1,82	1,06
CaO	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,08
ZnO	0,00	0,51	0,27	0,89	0,28	2,55	2,60	1,26	0,74	2,01
Σύνολο	97,86	97,72	98,24	98,79	98,12	97,65	97,07	98,03	98,95	98,32
Χημικός τύπος (22 O)										
Si	7,198	7,392	7,563	7,586	7,658	7,544	7,767	7,785	7,760	7,431
Al	0,126	0,608	0,437	0,414	0,342	0,456	0,233	0,215	0,240	0,569
Z	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al	17,782	17,276	16,448	17,645	17,834	17,480	17,697	17,480	17,315	17,453
Ti	0,126	0,074	0,076	0,021	0,079	0,065	0,038	0,078	0,075	0,123
Mg	0,092	0,650	1,476	0,334	0,087	0,455	0,265	0,442	0,608	0,425
Cr	0,000	0,053	0,084	0,013	0,000	0,048	0,000	0,058	0,038	0,000
Zn	0,000	0,105	0,056	0,177	0,057	0,511	0,523	0,254	0,149	0,403
Y	18,000	18,158	18,140	18,190	18,057	18,558	18,523	18,312	18,175	18,404
Fe ²⁺	2,979	3,171	3,353	2,811	2,776	2,824	2,644	2,889	2,985	3,004
Mn	0,000	0,039	0,102	0,009	0,058	0,000	0,043	0,051	0,016	0,000
Mg	0,405	0,155	0,281	0,345	0,283	0,016	0,020	0,009	0,130	0,005
Ca	0,000	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,049	0,023
X	3,384	3,409	3,736	3,166	3,118	2,840	2,707	2,949	3,180	3,032

Πίνακας 5.7 (συνέχεια). Μικροανάλυσεις σταυρόλιθων από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Σταυρόλιθος									
(%κβ)	T2_5-5α-4	T2_5-5α-5	T2_5-5α-6	T2_6-1α-1	T2_6-1α-2	T2_6-1α-3	T2_6-1α-4	T2_6-1α-5	M.O.
SiO ₂	27,51	27,89	27,63	26,71	27,83	27,32	27,15	27,28	27,55
Ti ₂ O ₃	0,83	0,66	0,97	0,30	0,68	0,64	0,27	0,67	0,48
Al ₂ O ₃	55,60	56,34	55,52	56,16	55,50	55,62	54,80	54,80	55,48
Cr ₂ O ₃	0,00	0,14	0,25	0,22	0,08	0,06	0,13	0,28	0,14
FeO	13,04	12,60	12,48	12,98	12,47	13,33	13,67	13,77	12,94
MnO	0,16	0,22	0,07	0,01	0,79	0,00	0,15	0,03	0,16
MgO	1,12	0,94	1,21	1,28	1,06	1,69	1,64	1,80	1,48
CaO	0,01	0,00	0,12	0,15	0,00	0,20	0,20	0,06	0,08
ZnO	1,85	0,91	1,85	2,22	1,38	1,36	1,07	1,29	1,28
Σύνολο	98,27	98,64	98,01	97,59	98,33	98,80	97,88	98,42	99,59
Χημικός τύπος (22O)									
Si	7,502	7,576	7,522	7,315	7,593	7,441	7,490	7,468	7,533
Al	0,498	0,424	0,478	0,685	0,407	0,559	0,510	0,532	0,467
Z	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al	17,376	17,615	17,336	17,437	17,441	17,296	17,308	17,150	17,409
Ti	0,171	0,135	0,199	0,062	0,140	0,131	0,056	0,139	0,099
Mg	0,453	0,250	0,465	0,502	0,420	0,573	0,637	0,711	0,491
Cr	0,000	0,030	0,053	0,049	0,017	0,013	0,028	0,061	0,030
Zn	0,373	0,182	0,373	0,450	0,278	0,273	0,217	0,260	0,137
Y	18,373	18,192	18,426	18,500	18,296	18,286	18,246	18,321	18,166
Fe ²⁺	2,973	2,862	2,842	2,972	2,845	3,036	3,153	3,153	2,960
Mn	0,038	0,051	0,017	0,002	0,183	0,000	0,035	0,007	0,036
Mg	0,003	0,130	0,026	0,022	0,011	0,113	0,037	0,022	0,112
Ca	0,003	0,000	0,036	0,044	0,000	0,058	0,060	0,018	0,019
X	3,017	3,043	2,920	3,040	3,039	3,208	3,286	3,200	3,127

◆ ZIPKONIO (Zir)

Το ζirkόνιο (σχήμα 5.21) είναι ένα κοινό και διαδεδομένο, επουσιώδες ορυκτό σε όλους τους τύπους των πυριγενών πετρωμάτων, κυρίως όμως των όξινων. Επίσης παρατηρείται σε μεταμορφωμένα πετρώματα και συγκεκριμένα σε κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, γνεύσιους και σχιστόλιθους. Εμφανίζεται πολλές φορές σαν έγκλεισμα σε βιοτίτες, όπου λόγω της ακτινοβολίας που δημιουργείται κατά τη διάσπαση ραδιενεργών στοιχείων που περιέχονται στο ζirkόνιο, παρουσιάζει μία πλεοχροϊκή άλw γύρω του. Επειδή είναι ανθεκτικό στη χημική και στη μηχανική αποσάθρωση βρίσκεται και σε πολλά ιζηματογενή πετρώματα σαν επουσιώδες ορυκτό, μαζί με άλλα βαριά μέταλλα σε ποτάμια και θαλάσσιες άμμους. Το ζirkόνιο ανήκει στα νησοπυριτικά ορυκτά.



(α)



(β)

Σχήμα 5.21. Μακροσκοπικές εικόνες ζirkονίων.

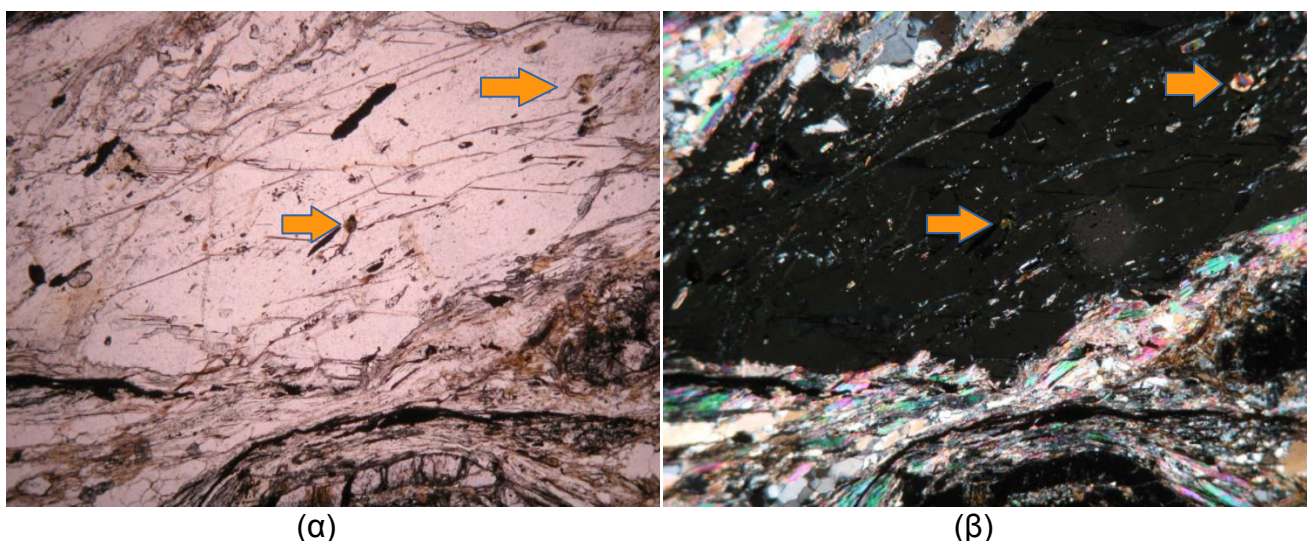
Το ζirkόνιο κρυσταλλώνεται στο τετραγωνικό σύστημα και έχει χημικό τύπο $ZrSiO_4$, ενώ περιέχει πάντα μικρά ποσά χαφνίου (Hf) από 1% μέχρι 4% και πολλές φορές περιέχει ουράνιο (U), φώσφορο (P), Θόριο (Th) και σπάνιες γαίες. Η μορφή του είναι πρισματική, πυραμιδική. Βρίσκεται σε ακανόνιστους ή αποστρογγυλεμένους κόκκους, ενώ πολλές φορές εμφανίζεται σε καλοσχηματισμένους κρυστάλλους, με ανεπτυγμένες κυρίως τις έδρες (100) και (101). Εμφανίζει σπάνια διδυμία με άξονα τον (112). Το ζirkόνιο έχει σκληρότητα 7,5 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος από 4,6 gr/cm^3 μέχρι 4,7 gr/cm^3 . Οι κρύσταλλοι έχουν χρώμα πράσινο, πορτοκαλί, ερυθρό, καστανό, κίτρινο, κιτρινοπράσινο,

τεφρό και λάμψη αδαμαντώδη, υαλώδη.

Τα ζirkόνια του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (σχήμα 5.22), εμφανίζονται ως μικροί κρύσταλλοι εγκλεισμένα κυρίως σε κρυστάλλους βιοτίτη. Από τη χημική ανάλυση (πίνακας 5.8), προκύπτει πως εκτός από το ζirkόνιο (Zr) και το πυρίτιο (Si), συμμετέχει και χάφνιο (Hf) στη δομή του. Τα ζirkόνια του μεταπηλίτη, κατά μέσο όρο, αποτελούνται από 32,51% SiO₂, 65,94% ZrO₂ και 1,73% HfO₂.

Πίνακας 5.8. Μικροαναλύσεις ζirkονίων από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

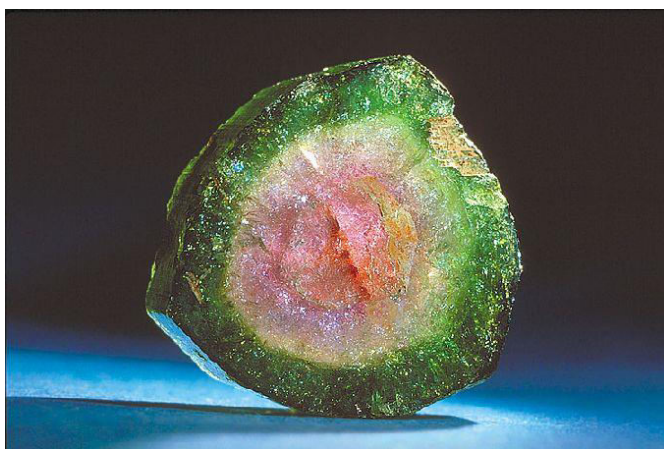
Ζirkόνιο					
(%κβ)	T1-1α-1	T1-2α-3	T2_1-2α-2	T2_1-2α-3	M.O.
SiO ₂	31,70	31,99	31,44	34,89	32,51
ZrO ₂	66,29	68,68	65,30	63,48	65,94
HfO ₂	2,02	0,00	3,27	1,62	1,73
Σύνολο	100,01	100,67	100,01	99,99	100,18
Χημικός τύπος (16O)					
Si	3,926	3,908	3,917	4,210	3,990
Z	3,926	3,908	3,917	4,210	3,990
Zr	4,003	4,092	3,967	3,735	3,949
Hf	0,071	0,000	0,116	0,056	0,061
X	4,074	4,092	4,083	3,790	4,010



Σχήμα 5.22. (α) Μικροσκοπική εικόνα ζirkονίων (βέλη) με παράλληλα Nicols. (β) Μικροσκοπική εικόνα των ζirkονίων (βέλη) με διασταυρωμένα Nicols

◆ ΤΟΥΡΜΑΛΙΝΗΣ (Tourm)

Ο τουρμαλίνης (σχήμα 5.23) είναι ορυκτό που βρίσκεται σε πηγματίτες, σε υδροθερμικές φλεβες, καθώς και σαν επουσιώδες ορυκτό σε γνευσίους και σχιστόλιθους. Επίσης εντοπίζεται και σε θερμικά μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους. Ο τουρμαλίνης ανήκει στα κυκλοπυριτικά ορυκτά και έχει χημικό τύπο $(\text{Na,Ca})(\text{Li,Mg,Al})_3(\text{Al,Fe,Mn})_6(\text{OH})_4(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}$. Στη δομή του τουρμαλίνης γίνονται πολλές αντικαταστάσεις, το ασβέστιο (Ca) αντικαθιστά το νάτριο (Na), το μαγνήσιο (Mg) και το αργίλιο (Al) αντικαθιστούν το λίθιο (Li), ο τρισθενής σίδηρος (Fe^{3+}) και το τρισθενές μαγγάνιο (Mn^{3+}) αντικαθιστούν το αργίλιο (Al) και το φθόριο (F) αντικαθιστά το υδροξείδιο (OH). Το σύστημα κρυστάλλωσης του τουρμαλίνης είναι το τριγωνικό. Ο τουρμαλίνης συνήθως απαντάται σε μακροπρισματικούς κρυστάλλους, που αποτελούνται κυρίως από ένα τριγωνικό πρίσμα και λιγότερο ανεπτυγμένα εξαγωνικά πρίσματα δευτέρας τάξεως. Οι πρισματικές έδρες φέρουν συχνά κατακόρυφες ραβδώσεις. Επίσης εντοπίζεται σε λεπτοστηλοειδείς ή χονδροστηλοειδείς κρυστάλλους παράλληλα ή ακτινωτά διατεταγμένους και σε συμπαγή συσσωματώματα.



(α)



(β)

Σχήμα 5.23. (α) Μακροσκοπική εικόνα τουρμαλίνης που παρουσιάζει ζωνώδη χρωματισμό. (β) Μακροσκοπική εικόνα μαύρου, σιδηρούχου τουρμαλίνης.

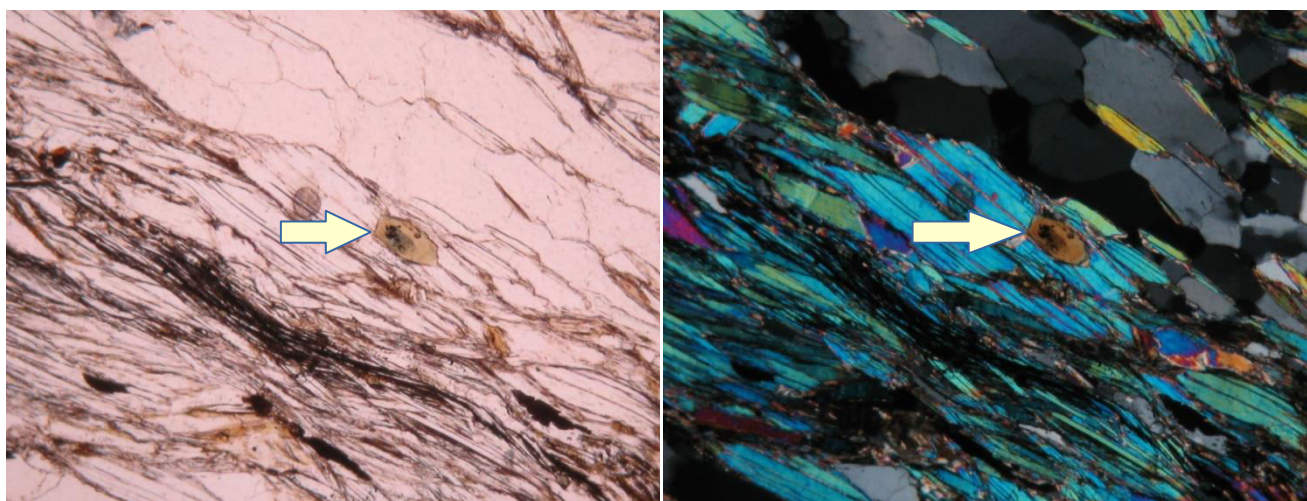
Ο τουρμαλίνης έχει σκληρότητα 7 με 7,5 στην κλίμακα Mohs και ειδικό βάρος από 3,0 gr/cm^3 μέχρι 3,25 gr/cm^3 . Το χρώμα του ποικίλει ανάλογα με τη σύσταση. Έχει χρώμα μαύρο όταν ο τουρμαλίνης είναι σιδηρούχος, καστανό όταν είναι μαγνησιούχος, άχρωμο

όταν δεν περιέχει σίδηρο στη σύστασή του και σε λιθιούχες ποικιλίες έχει ρόδινο, πράσινο ή κυανό χρώμα. Επίσης πολύ συνηθισμένος είναι ο ζωνώδης χρωματισμός.

Ο τουρμαλίνης έχει λάμψη υαλώδη μέχρι ρητινώδη και παρουσιάζει ισχυρό πιεζοηλεκτρισμό και πυροηλεκτρισμό. Αλλοιώνεται σε βιοτίτη, μοσχοβίτη και χλωρίτη. Επίσης ανάλογα με τη σύσταση διαφέρει και ο βαθμός τήξης του ορυκτού. Ο μαγνησιούχος τήκεται πιο εύκολα από το σιδηρούχο, ενώ ο λιθιούχος τήκεται πιο δύσκολα από όλους, γι' αυτόν χαρακτηρίζεται και άτηκτος.

Ο τουρμαλίνης του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής (σχήμα 5.24) είναι μικροκρυσταλλικός. Από τις αναλύσεις που έγιναν (πίνακας 5.9) διαπιστώθηκε πως ο τουρμαλίνης που συμμετέχει στπ πέτρωμα παρουσιάζει ζώνωση, με πυρήνα πρασινωπό και περιφέρεια κίτρινου-καστανού χρώματος. Επίσης διαπιστώθηκε πως έχει σύσταση δραβίτη. Ο τουρμαλίνης αποτελείται, κατά μέσο όρο, από 36,22% SiO_2 , 6,46% MgO , 0,32% CaO , 33,94% Al_2O_3 , 1,89% Na_2O , 0,34% TiO_2 , 0,13% MnO , 7,72% FeO , 0,06% K_2O , 10,74% B_2O_3 , 0,04% Li_2O και 3,71% H_2O (τα τελευταία τρία υπολογίσθηκαν από τη στοιχειομετρία).

Σύμφωνα με τις αναλύσεις παρατηρήθηκε από τον πυρήνα προς την περιφέρεια, αισθητή αύξηση του Ti, του Al, του Mg και του Ca, ενώ παρατηρήθηκε μείωση στο Fe, το Na και το K.



(α)

(β)

Σχήμα 5.24. (α) Μικροσκοπική εικόνα μικροκρυσταλλικού τουρμαλίνης (βέλος), με παράλληλα Nicols. (β) Μικροσκοπική εικόνα του μικροκρυσταλλικού τουρμαλίνης (βέλος), με διασταυρωμένα Nicols.

Πίνακας 5.9. Μικροαναλύσεις Τουρμαλίνη από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Τουρμαλίνης							
(%κβ)	T3-2α-1	T3-3α-1	T3-3α-2	T3-3α-3	T3-3α-4	T3-3α-8	M.O.
	Πυρήνας	Ενδιάμεσα	Ενδιάμεσα	Περιφέρεια			
SiO ₂	35,45	36,40	36,02	36,59	36,60	36,27	36,22
TiO ₂	0,49	0,22	0,23	0,61	0,49	0,00	0,34
Al ₂ O ₃	34,84	32,66	33,28	34,06	34,55	34,25	33,94
FeO	9,42	9,75	9,02	5,25	4,94	7,94	7,72
MnO	0,22	0,11	0,05	0,26	0,14	0,00	0,13
MgO	5,39	6,02	5,85	7,68	7,74	6,08	6,46
CaO	0,03	0,22	0,29	0,54	0,74	0,08	0,32
Na ₂ O	1,79	1,92	2,28	1,88	1,60	1,85	1,89
K ₂ O	0,00	0,16	0,00	0,00	0,02	0,16	0,06
B ₂ O ₃ *	10,72	10,66	10,65	10,85	10,88	10,70	10,74
Li ₂ O*	0,00	0,00	0,05	0,10	0,10	0,00	0,04
H ₂ O*	3,70	3,68	3,68	3,74	3,75	3,69	3,71
Σύνολο	102,04	101,80	101,40	101,58	101,56	101,02	101,57
Χημικός τύπος (31O)							
Si	5,748	5,933	5,877	5,860	5,846	5,894	5,860
Al	0,252	0,067	0,123	0,140	0,154	0,106	0,140
T	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Al	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Z	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Al	0,407	0,208	0,278	0,288	0,351	0,453	0,331
Ti	0,059	0,027	0,029	0,074	0,059	0,000	0,041
Fe	1,277	1,329	1,230	0,703	0,660	1,079	1,046
Mn	0,030	0,015	0,006	0,036	0,019	0,000	0,018
Mg	1,303	1,463	1,424	1,834	1,843	1,472	1,557
Li*	0,000	0,000	0,034	0,065	0,067	0,000	0,028
Y	3,076	3,042	3,001	3,000	2,999	3,004	3,021
Ca	0,005	0,039	0,051	0,092	0,126	0,014	0,055
Na	0,563	0,608	0,720	0,584	0,494	0,583	0,592
K	0,000	0,033	0,000	0,000	0,004	0,032	0,012
X	0,568	0,680	0,771	0,676	0,624	0,629	0,659
Ca/(Ca+Na)	0,009	0,060	0,066	0,136	0,203	0,023	0,085
Fe/(Fe+Mg)	0,495	0,475	0,463	0,277	0,264	0,423	0,402
B*	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
H ₂ O*	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Τα B ₂ O ₃ *, Li ₂ O* και H ₂ O* δεν μπόρεσαν να μετρηθούν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και υπολογίστηκαν από τη στοιχειομετρία.							

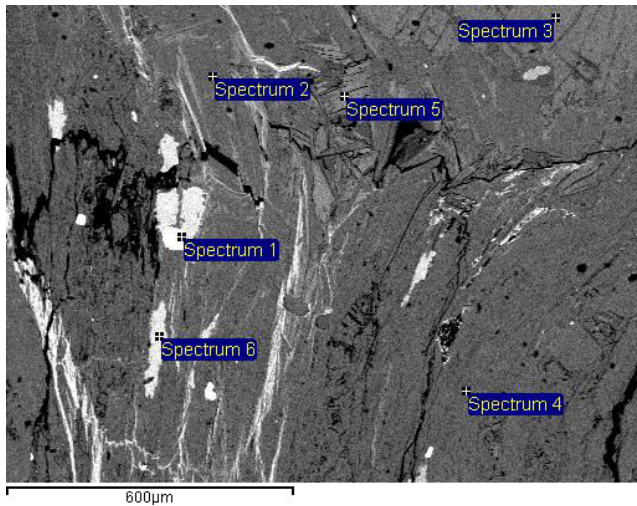
◆ ΑΛΛΑ ΟΡΥΚΤΑ

Εκτός από τα παραπάνω ορυκτά που εντοπίσθηκαν και αναλύθηκαν, βρέθηκαν και κάποια άλλα τα οποία έχουν πολύ μικρότερη συμμετοχή και δεν χρειάζεται να αναλυθούν πλήρως. Τα ορυκτά τα οποία βρέθηκαν αποτελούνται κυρίως από οξειδία του σιδήρου (Fe) και πιθανόν να πρόκειται για κρυστάλλους ιλμενίτη και κρυστάλλους μαγνητίτη.

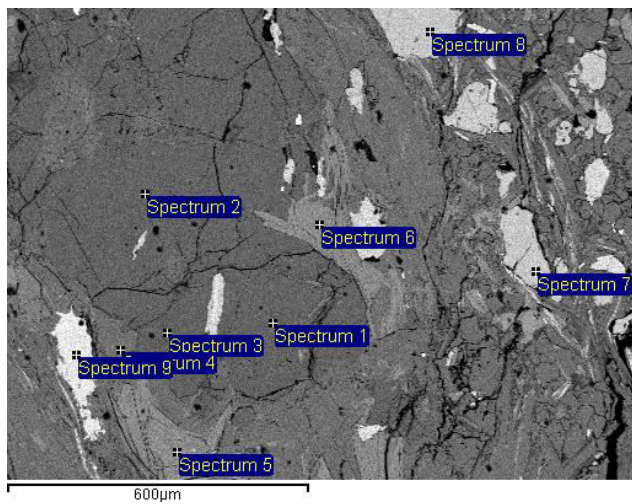
Επίσης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης βρέθηκαν κρύσταλλοι μοναζίτη ορυκτά πλούσια σε σπάνιες γαίες, οι οποίοι περιέχουν επιπλέον θόριο (Th) και ουράνιο (U). Αυτές οι αναλύσεις παρατίθενται στον πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10. Μικροαναλύσεις κρυστάλλων μοναζίτη από τον μεταπηλίτη της Αμμουλιανής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

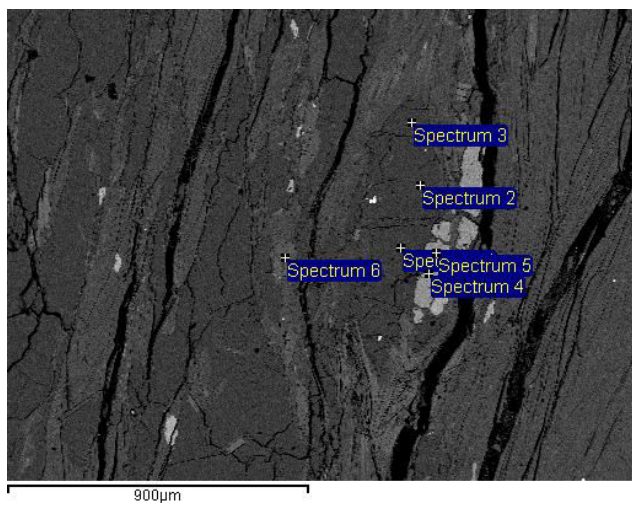
Κρύσταλλοι Μοναζίτη											
(%κβ)	T2_1- 1α-16	T2_1- 2α-1	T2_2- 3α-1	T2_2- 3α-2	T2_5- 2α-3	T2_5- 7α-11	T3_2- 1α-12	(%κβ)	T2_2- 3α-3	(%κβ)	T2_2- 3α-4
SiO ₂	1,58	3,50	2,75	2,48	3,71	1,97	2,38	P ₂ O ₅	37,71	P ₂ O ₅	37,46
P ₂ O ₅	33,04	32,95	22,04	24,06	21,37	35,11	32,67	FeO	1,82	FeO	1,62
Al ₂ O ₃	0,00	2,76	1,68	2,46	0,00	0,00	0,00	Y ₂ O ₃	46,11	Y ₂ O ₃	48,14
FeO	0,00	0,00	1,75	0,00	0,00	0,00	0,00	Gd ₂ O ₃	2,22	CoO	1,21
CaO	1,67	2,17	0,93	1,09	1,05	1,24	1,01	Dy ₂ O ₃	7,52	Dy ₂ O ₃	4,18
La ₂ O ₃	15,55	12,95	17,53	17,46	18,43	15,56	16,17	Yb ₂ O ₃	4,61	Yb ₂ O ₃	4,62
Ce ₂ O ₃	30,52	25,67	37,90	34,96	40,49	32,32	30,51	Σύνολο	99,99	UO ₃	2,9
Nd ₂ O ₃	10,17	7,73	11,32	12,21	12,89	9,87	11,42			Σύνολο	100,02
ThO ₂	7,47	12,29	4,10	5,29	2,06	3,91	5,84				
Σύνολο	100,00	100,02	100,00	100,01	100,00	100,01	100,00				



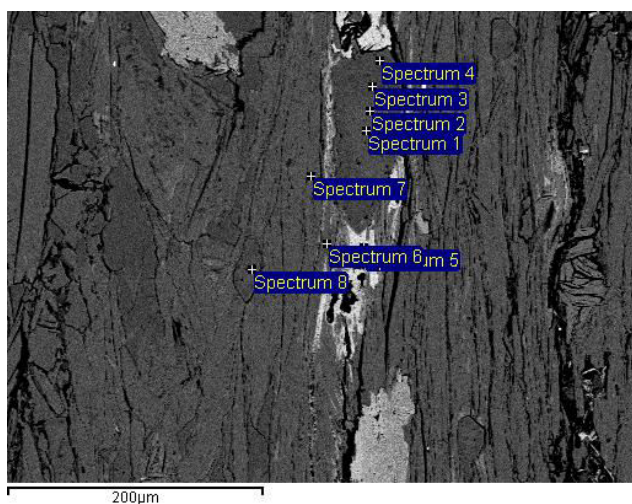
Σχήμα 5.25. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Spectrum 1 Ζirkόνιο. Spectrum 2&4 Μοσχοβίτης. Spectrum 3 Σταυρόλιθος. Spectrum 5 Χλωρίτης και Spectrum 6 Ιλμενίτης



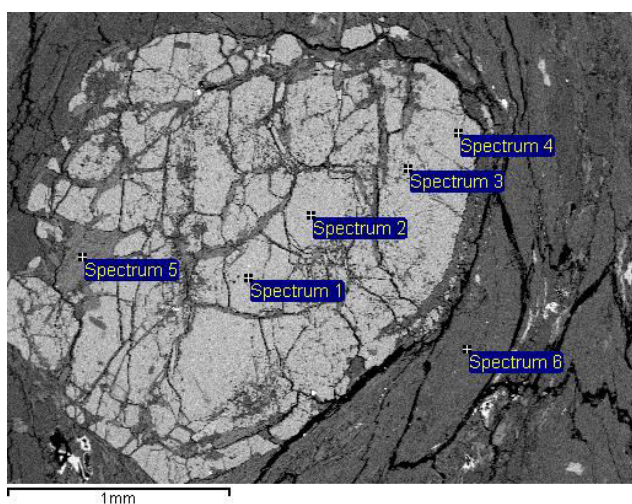
Σχήμα 5.26. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Spectrum 1,2&3 Ανδαλουσίτης. Spectrum 4 Μοσχοβίτης. Spectrum 5&6 Χλωρίτης. Spectrum 7&8 Γρανάτης και Spectrum 9 Ιλμενίτης



Σχήμα 5.27. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Spectrum 1,2&3 Ανδαλουσίτης, Spectrum 4&5 Γρανάτης και Spectrum 6 Σταυρόλιθος



Σχήμα 528. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Spectrum 1,2,3,4&8 Τουρμαλίνης, Spectrum 5 Μαγνητίτης και Spectrum 6&7 Μοσχοβίτης



Σχήμα 5.29. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Spectrum 1,2,3&4 Γρανάτης, Spectrum 5 Βιοτίτης και Spectrum 6 Μοσχοβίτης

VI. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και σε πολωτικό μικροσκόπιο, προκύπτει πως τα ορυκτά που συμμετέχουν κυρίως, στην παραγένεση του μεταπηλίτη είναι ο σταυρόλιθος (st), ο ανδαλουσίτης (and), ο βιοτίτης (bi), ο γρανάτης (grt), ο μοσχοβίτης (mu) και ο χαλαζίας (qtz). Σύμφωνα με τις υπάρχουσες μελέτες, αυτή η παραγένεση μπορεί να δημιουργήθηκε με διάφορες αντιδράσεις.

Χάρη στις μακροσκοπικές και τις μικροσκοπικές παρατηρήσεις, συμπεράναμε πως ο μεταπηλίτης της Αμμουλιανής είναι ένας γρανατούχος-σταυρολιθικός-ανδαλουσιτικός σχιστόλιθος.

Παρατηρώντας τη μικροσκοπική εικόνα του πετρώματος και των ορυκτών διαπιστώσαμε πως το πέτρωμα έχει υποστεί δύο τουλάχιστον παραμορφωτικά επεισόδια. Η πρώτη σχιστότητα S1 υποδεικνύεται από εγκλείσματα άνθρακα που εντοπίστηκαν μέσα σε πορφυροβλάστη σταυρόλιθου. Η δεύτερη σχιστότητα S2 ορίζεται από τον προσανατολισμό των υπολοίπων ορυκτών της παραγένεσης..

Οι μοσχοβίτες και οι χαλαζίες στο πέτρωμα εμφανίζονται προσανατολισμένοι, ακολουθώντας τη σχιστότητα S2 του πετρώματος. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι ο σχηματισμός τους έγινε πριν ή και ταυτόχρονα με τη δεύτερη παραμόρφωση. Οι γρανάτες εμφανίζονται κατακερματισμένοι και περιβάλλονται από κρυστάλλους χαλαζία και λευκών μαρμαρυγιών. Αυτό μας δείχνει πως οι γρανάτες είναι προγενέστεροι της δεύτερης παραμόρφωσης.

Ο βιοτίτης εμφανίζεται να ακολουθεί τη σχιστότητα S2 του πετρώματος ενώ εντοπίζεται, μαζί με το μοσχοβίτη, στις σκιές πίεσης των πορφυροβλαστών. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι είναι προγενέστερος ή ταυτόχρονος με το δεύτερο παραμορφωτικό γεγονός. Στο πέτρωμα εντοπίζεται χλωρίτης, σε πολύ μικρό όμως ποσοστό και πιθανόν να βρισκόταν σε περίσσεια σε κάποια αντίδραση σχηματισμού.

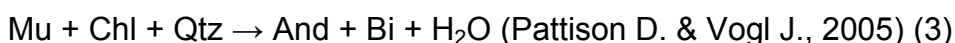
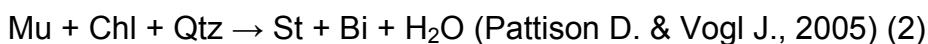
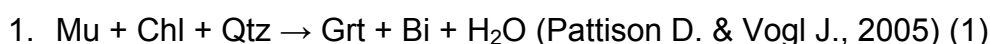
Ο σταυρόλιθος εμφανίζεται ως πορφυροβλάστης, με μεγάλο μέγεθος. Στο πέτρωμα εντοπίζεται κρύσταλλος που εγκλείει κρυστάλλους άνθρακα και κρύσταλλο γρανάτη. Αυτό μας δείχνει πως ο σταυρόλιθος σχηματίστηκε ταυτόχρονα ή μεταγενέστερα του γρανάτη και πριν από το δεύτερο παραμορφωτικό γεγονός. Επίσης ο ίδιος κρύσταλλος εντοπίζεται σε επαφή με κρύσταλλο ανδαλουσίτη.

Ο ανδαλουσίτης εμφανίζεται ως ιδιοβλαστικός, κατά θέσεις σπασμένος, και ως μεγάλος πορφυροβλάστης. Ο ανδαλουσίτης δεν φαίνεται να προκύπτει από το σταυρόλιθο, αλλά να συνυπάρχει με αυτόν, καθώς εντοπίστηκαν κρύσταλλοι ανδαλουσίτη και σταυρόλιθου σε επαφή μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει πως πιθανόν σχηματίστηκαν ταυτόχρονα. Από την άλλη, υπάρχουν μικρότεροι κρύσταλλοι ανδαλουσίτη κατά θέσεις θραυσμένοι, οι οποίοι περιβάλλονται από λευκούς μαρμαρυγίες και χαλαζία. Οι κρύσταλλοι αυτοί φαίνεται πως ακολουθούν τη σχιστότητα S2. Άρα ο σχηματισμός του ανδαλουσίτη ξεκίνησε μαζί με το σχηματισμό του σταυρόλιθου, συνεχίστηκε όμως και μετά από αυτόν.

Αξίζει να σημειωθεί πως από το πέτρωμα απουσιάζει ο χλωριτοειδής, που σημαίνει ότι ο σταυρόλιθος και ο ανδαλουσίτης δεν σχηματίστηκαν από διάσπαση του χλωριτοειδή.

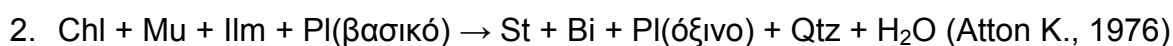
Άλλα ορυκτά που διαπιστώθηκαν είναι ιλμενίτης (ilm), μαγνητίτης (Mt) και μοναζίτης, καθώς και κρύσταλλοι ζirkονίου και τουρμαλίνη. Ο τουρμαλίνης ακολουθεί τη σχιστότητα S2 και θεωρείται ότι έχει προκύψει από κάποιο διάλυμα κατά το δεύτερο παραμορφωτικό επεισόδιο.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις και με τις υπάρχουσες μελέτες, καταλήξαμε στις εξής αντιδράσεις σχηματισμού της παραγένεσης:



Η αντίδραση (1) έλαβε χώρα αρχικά δίνοντας ως προϊόν γρανάτη ο οποίος όπως διαπιστώνεται από τη μικροσκοπική παρατήρηση σχηματίζεται πριν από τα άλλα δύο ορυκτά. Οι δύο τελευταίες αντιδράσεις (2 και 3), λόγω των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας που επέδρασαν στο πέτρωμα, μπορεί να έλαβαν χώρα σε διαφορετικό χρόνο ή και ταυτόχρονα, εξηγώντας την ταυτόχρονη παρουσία του σταυρόλιθου και του ανδαλουσίτη.

Άλλη αντίδραση σχηματισμού σταυρόλιθου είναι η παρακάτω:



Με αυτή την αντίδραση ευνοείται ο σχηματισμός του σταυρόλιθου και περιορίζεται ο σχηματισμός του γρανάτη ενώ το πλαγιόκλαστο που προκύπτει

είναι όξινο. Αυτό συμφωνεί με τις συστάσεις του πλαγιοκλάστου όπως βρέθηκαν από τις μικροαναλύσεις.

Η ύπαρξη του σταυρόλιθου και του ανδαλουσίτη δείχνουν ότι το πέτρωμα είναι χαμηλού έως μέσου βαθμού μεταμόρφωσης, με συνθήκες μέσων θερμοκρασιών και χαμηλών πιέσεων. Οι Martinez F., Reche J. & Arbolea M. (2001), μελετώντας γραφιτικούς μεταπηλίτες με υψηλή περιεκτικότητα σε Al, στο ορογενές Variscan, εντόπισαν ζώνη με ανδαλουσίτη και σταυρόλιθο, την οποία προσδιόρισαν σε χαμηλές συνθήκες πίεσης και μέσες συνθήκες θερμοκρασίας.

Οι Dymoke P. & Sandiford M. (1992), μελετώντας τους μεταπηλίτες στο Όρος Lofty στην Αυστραλία, εντόπισαν ζώνη με παραγένεση ανδαλουσίτη, βιοτίτη, μοσχοβίτη, σταυρόλιθου, χαλαζία και γρανάτη, τα δείγματα της οποίας μετρήθηκαν και έδωσαν, θερμοκρασίες 540 ± 40 °C και 606 ± 42 °C και πιέσεις $3,8 \pm 1,0$ kbar και $4,6 \pm 0,9$ kbar αντίστοιχα. Ενώ θεωρούν ότι η συνύπαρξη ανδαλουσίτη και σταυρόλιθου δεν είναι σταθερή κάτω από 560 °C στα $4,0$ kbar και κάτω από 570 °C στα $4,5$ kbar.

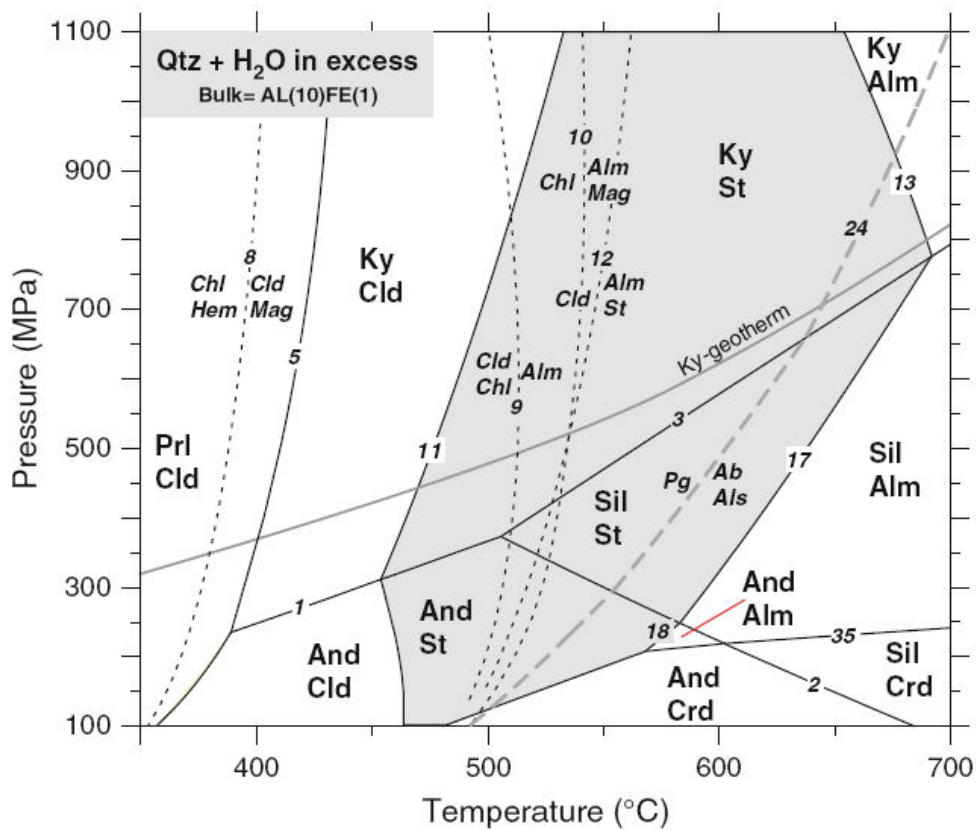
Οι Monfaredi B., Hauzenberger C., Neubauer F., Shakerardakani F. & Halama R. (2015), μελετώντας πηλιτικούς σχιστόλιθους στη ζώνη Sanandaj-Sirjan στο δυτικό Ιράν, εντόπισαν ανδαλουσιτικό σταυρολιθικό σχιστόλιθο, του οποίου οι αναλύσεις δείχνουν μέγιστες θερμοκρασίες 580 ± 20 °C και πιέσεις $4,5 \pm 1,0$ kbar.

Οι Pattison D. & Vogl J. (2005), μελετώντας τις σειρές μεταπηλιτικών ορυκτών στο βαθύλιθο Nelson της Βρετανική Κολούμπια, εντόπισαν μεταπηλίτη με παραγένεση μοσχοβίτη, βιοτίτη, χαλαζία, γρανάτη πλούσιο σε Mn, σταυρόλιθο και ανδαλουσίτη, τα δείγματα του οποίου οι μετρήσεις έδωσαν, θερμοκρασίες μεταξύ $525 (\pm 91)$ °C και $602 (\pm 30)$ °C σε πιέσεις μεταξύ $3,5$ και $5,0$ kbar, αντίστοιχα.

Οι Bucher K. & Grapes R. (2011) αναφέρουν ότι ο σταυρόλιθος αρχίζει να σχηματίζεται στους 500 °C, ενώ οι Pattison D., Spear F. & Cheney J. (1999) αναφέρουν πως ο σταυρόλιθος μπορεί να βρεθεί σε συνθήκες υψηλών πιέσεων και πως συχνά σε μεταπηλίτες με ανάδρομη μεταμόρφωση μπορεί να βρεθεί σταυρόλιθος με ανδαλουσίτη και χλωρίτη σε συνθήκες μέσων πιέσεων, ενώ περαιτέρω μείωση της πίεσης οδηγεί σε σχηματισμό κορδιερίτη.

Σύμφωνα με τις παραπάνω μελέτες παρόμοιων παραγενέσεων και τα διαγράμματα των πεδίων σταθερότητας των ορυκτών του μεταπηλίτη (Σχήμα 6.1), μπορούμε να προσδιορίσουμε τις συνθήκες σχηματισμού του μεταπηλίτη της Αμμουλιανής σε μέσες πιέσεις και μέσες θερμοκρασίες. Ο σταυρόλιθος και ο γρανάτης σχηματίστηκαν αρχικά σε

υψηλότερες πιέσεις και στη συνέχεια είχαμε πτώση της πίεσης και σχηματισμό του ανδαλουσίτη. Συγκεκριμένα θεωρούμε πως οι πιέσεις κυμαίνονται από 3,5 μέχρι 5,0 και οι θερμοκρασίες από 500 μέχρι 600 °C.



Σχημα 6.1. Πεδίο σταθερότητας ορυκτών του μεταπηλίτη, με παρουσία νερού (H_2O) και χαλαζία. (Butcher K. & Grapes R. 2011)

VII. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Δημητριάδης Σ. (1974). Πετρολογική μελέτη των μιγματιτικών γνευσίων και αμφιβολιτών της περιοχής Ρεντίνας, Ασπροβάλτας, Σταυρού, Ολυμπιάδος. Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ.
- Δημητριάδης Σ. (1988). Εισαγωγή στην πετρολογία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη. σελ. 62-65, 147-160
- Θεοδωρίκας Σ. (2002). Ορυκτολογία-Πετρολογία, 2η Έκδοση. Χρυσούλα Σαούλη Ο.Ε., Γραφικές Τέχνες “Μέλισσα” (Ανατύπωση), Θεσσαλονίκη
- Κασώλη-Φουρναράκη Α. (1981). Συμβολή στην Ορυκτολογική και Πετρολογική μελέτη αμφιβολιτικών πετρωμάτων της Σερβομακεδονικής Μάζας. Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ., pp 231
- Μουντράκης Δ. (2010). Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. University Studio Press, Θεσσαλονίκη. σελ. 49-61
- Παπαδοπούλου Μ.-Α. (2014). Ορυκτολογική και Γεωχημική μελέτη του μιγματισμού Skarn του πλουτωνίτη του Πανοράματος, Ν.Δράμας. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης (Μ.Δ.Ε)
- Πετίκα Ε. (2014). Μελέτη της σύστασης του Τουρμαλίνη σε πηγματιτικές φλέβες στη Γερακινή Χαλκιδικής. Διπλωματική Εργασία
- Πλούγαρης Α. (2011). Γεωλογική και τεκτονική δομή της νήσου Αμμουλιανής (Χερσόνησος Χαλκιδικής). Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης (Μ.Δ.Ε).
- Σακελαρίου Δ. (1989). Γεωλογία της Σερβομακεδονικής μάζας στη βορειοανατολική Χαλκιδική, Β. Ελλάδα –Παραμόρφωση και Μεταμόρφωση. Διδακτορική Διατριβή Ε.Κ.Π.Α., p 177
- Σακελαρίου Δ. & Durr S. (1993). Γεωλογική δομή της Σερβομακεδονικής μάζας στην ΒΑ Χαλκιδική. Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ. Τομ. XXVIII/1, σελ. 179-193, Αθήνα 1993
- Σαπουντζής Η. & Χριστοφίδης Γ. (1985). Ορυκτοδιαγνωστική. University Studio Press, Θεσσαλονίκη
- Σιδηρόπουλος Ν. (1991). Λιθολογία, γεωχημεία, τεκτονική και μεταμόρφωση του βορειοανατολικού τμήματος της ομάδας Βερτίσκου. Η περιοχή του Όρους Δύσωρο (Κρουσιά), Βόρεια από το Κιλκίς. Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ.

- Τσιραμπίδης Α. (2008). Ιζηματογενή Πετρώματα. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη. σελ.102-105
- Attoh K. (1976). Stoichiometric consequences of metamorphic mineral-forming reactions in pelitic rocks. *Lithos* 9, 75-84
- Butcher K. & Grapes R (2011). *Petrogenesis of metamorphic Rocks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Chatzidimitriadis E., Kiliass A. & Staikopoulos G. (1985). Nouvi aspetti petrologici e tettonici del massiccio Serbomacedonne e delle regioni adiacenti, della Grecia del Nord. *Boll. Soc. Geol. It.* 104: 515-526
- Dimitrijevic M. & Ciric B. (1967). Essai sur l'evolution de la masse SerboMacedoniene. *Acta Geol. Acad. Sci. Hung.*, 11: 35-47
- Dixon J.E. & Dimitriadis S. (1984). Metamorphosed ophiolitic rocks from the Serbo-Macedonian massif, near lake Volvi, North-east Greece. In: Dixon J.E. & Robertson A.H.F. (Eds), *The Geological Evolution of the eastern Mediterranean*. *Geol. Soc. London special publ.*, vol. 17, pp 603-618
- Dixon J.E. & Dimitriadis S. (1987). The metamorphic evolution of the Serbo-Macedonian massif in Greece. 4th EUG Meeting, Strasbourg, *Terra Cognita*, 7, Nr 2-3, 107
- Dymoke P. & Sandiford M. (1992). Phase relationships in Buchan facies series pelitic assemblages: calculations with application to Andalusite-Staurolite parageneses in Mount Lofty Ranges, South Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Springer-Verlag
- Himmerkus F., Reischmann T. & Kostopoulos D. (2006). Late Proterozoic and Silurian basement units within the Serbomacedonian massif, northern Greece: the significance of terrane accretion in the Hellenides. *Geol. Soc. London, sp. Publ.* 260, 35-50
- Jaranov D. (1960). *La tectonique de la Bulgarie*. Maison d'edition d'Etat, Sofia
- Kassoli-Fournaraki A. (1982). The origin of the Kerdyllia series amphibolites (eastern Serbomacedonian mass). *Greece N. Jb. Miner. Mh.* 6, 272-278
- Kiliass A., Falalakis G. & Mountrakis D. (1999). Cretaceous-Tertiary structures and kinematics of the Serbomacedonian metamorphic rocks and their relation to the exhumation of the Hellenic hinterland (Macedonia, Greece). *Inst. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)* 88 (3), 513-531
- Kockel F., Mollat H. & Walther H. (1971). *Geologie des Serbo-Mazedonischen massivs*

- und seines mesozoischen Rahmens (Nord Griechenland). Geol. Jb, 89: 529-551
- Kockel F., Mollat H. & Walther H. (1977). Erläuterungen zur Geologischen Karte der Chalkidiki und angrenzender Gebiete 1:100.000 (Nord-Griechenland). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, pp.119
- Kockel F., Mollat H. & Andoniadis P. (1978). Geological Map of Greece, Ierissos sheet. Institute of Geology and Mineral Exploration of Greece, scale 1:50.000
- Kockel F. & Walther H. (1965). Die Strimonlinie als Grehze zwischen Serbo-Mazedonischen und Rila-Rhodope massivs in Ost Mazedonien. Geol. Jahrb 83: 575-602
- Kockel F. & Walther H. (1968). Zur Geologischen Entwicklung des subalpinen Serbo-Mazedonischen massivs (Nord-Griechenland). Bull. of the Geol. Inst. ser geotact. strat. lithol. 17, 133-142
- Martinez F., Reche J. & Arboleya (2001). P-T modeling of the Andalusite-kyanite-Andalusite sequence and related assemblages in high-Al graphitic pelites. Prograde and retrograde paths in late kyanite belt in Variscan Iberia. Journal Metamorphic Geology, vol19, pp. 661-677
- Mercier J. (1966). 'Etude géologique des zones internes des Hellenides en Macédoine centrale. Ann. Geol. des Pays Hell., 20, 1-793
- Monfaredi B., Hauzenberger C., Neubauer F., Shakerardakani F. & Halama R. (2015). Quantitative determination of the prograde P-T path by garnet zonation pattern from the Buchan-type pelitic schists of the Hamadian crystalline basement, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. Geophysical Research Abstracts, vol. 17, EGU 2015-6240-1
- Papadopoulos C. (1982). Geologie des Serbomazedonischen massivs nördlich des Volvi sees (Nord Griechenland). Dissertation, Univ. Wien, p. 176
- Papadopoulos C. & Kiliadis A. (1985). Altersbeziehungen zwischen Metamorphose und Deformation im zentralen Teil des Serbomazedonischen massivs (Vertiskos Gerige, Nord-Griechenland). Geol. Rundsch 74: 77-85
- Pattison D., Spear F. & Cheney J. (1999). Polymetamorphic origin of Muscovite + Cordierite + Straurolite + Biotite assemblages implications for the metapelitic petrogenetic grid and for P-T paths. J. metamorphic Geol., 1999, 17, 685-703
- Pattison D. & Vogl J. (2005). Contrasting sequences of metapelitic mineral-assemblages in the aureole of the titled Nelson Batholith, British Columbia: Implications for phase

equilibria and pressure determination in Andalusite-Sillimanite-type settings. The Canadian Mineralogist, vol. 43, pp 51-88

Sakellariou D. (1993). Tectonometamorphic evolution of the geotectonic units of the Chalkidiki peninsula. Bull. Geol. Soc. Greece, vol. XXVIII/1 pag. 165-177, Athens 1993

ΙΣΤΟΛΟΓΙΟ

- <http://www.geo.auth.gr>
- <http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo212y/>
- <http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo106y/>
- <http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y/>
- <http://www.google.gr/maps/@40.324966,23.92609,4853m/data=!3m1!1e3!>