

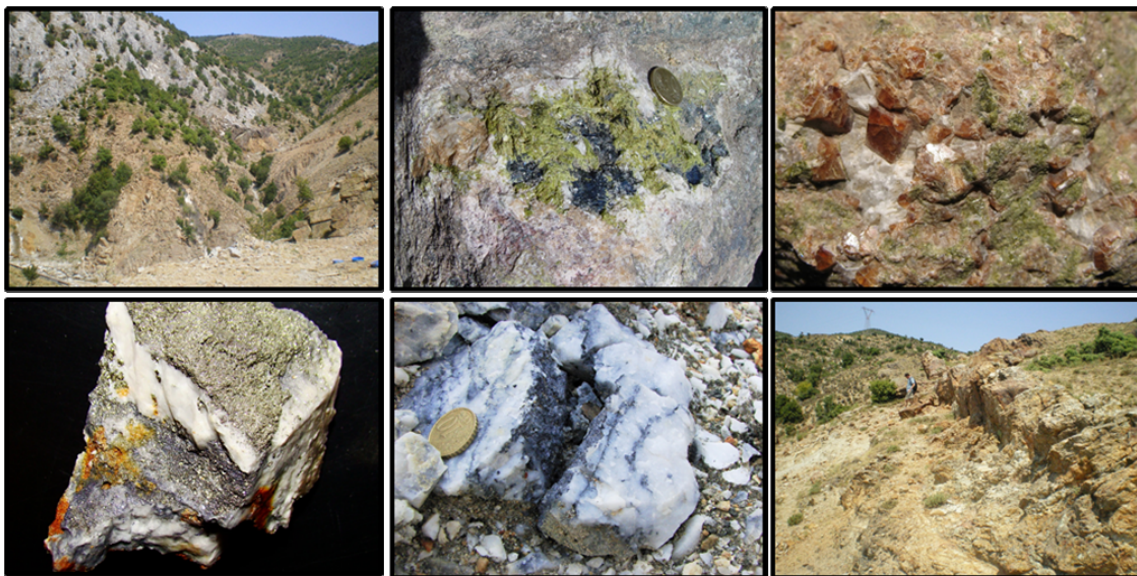


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

---

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

## **ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΕΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΜΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΣΤΑ ΚΙΜΜΕΡΙΑ ΞΑΝΘΗΣ**



**Παρασκευή Κοξένογλου**

**A.E.M. 4672**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Μέλφος**

Θεσσαλονίκη 2015

ΚΟΞΕΝΟΓΛΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ  
ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΕΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΜΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΣΤΑ ΚΙΜΜΕΡΙΑ ΞΑΝΘΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας  
Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Μέλφος

**Θεσσαλονίκη 2015**

© Παρασκευή Κοξένογλου, Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας,  
2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ  
ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΕΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΜΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΣΤΑ ΚΙΜΜΕΡΙΑ ΞΑΝΘΗΣ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

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

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....                                                                   | 5  |
| ABSTRACT .....                                                                   | 6  |
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....                                                                    | 8  |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                                                | 9  |
| 2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....                           | 11 |
| 2.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ .....                                                       | 11 |
| 2.2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΗΣ.....                                         | 12 |
| 2.3. ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ .....                                                    | 13 |
| 2.3.1 ΕΝΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΝΕΡΟΥ.....                                                   | 13 |
| 2.3.2 ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΑΓΓΑΙΟΥ .....                                                     | 14 |
| 2.4. ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΜΑΓΜΑΤΙΣΜΟΣ .....                                                | 15 |
| 2.5. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ .....                                   | 17 |
| 2.6. ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ .....                                                  | 19 |
| 2.7. ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΩΝ ΣΤΗ ΜΑΖΑ ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΗΣ .....                         | 20 |
| 2.7.1. ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ .....                                               | 22 |
| 2.7.2. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ Cu – Mo .....                                      | 23 |
| 3. Ο ΠΛΟΥΤΩΝΙΤΗΣ ΤΗΣ ΞΑΝΘΗΣ.....                                                 | 25 |
| 4. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΜΕ ΜΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΕΙΣ (INTRUSION-RELATED) ..... | 28 |
| 4.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ INTRUSION – RELATED SYSTEMS .....                        | 29 |
| 4.2. ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΩΝ INTRUSION – RELATED SYSTEMS .....               | 30 |
| 4.3. ΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ, ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ .....                  | 34 |
| 5. ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....                                       | 38 |
| 5.1. ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΤΥΠΟΥ SKARN .....                                              | 43 |
| 5.2. ΠΝΕΥΜΑΤΟΛΥΤΙΚΕΣ – ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΕΣ ΧΑΛΑΖΙΑΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ Mo-Cu-Bi-W .....           | 46 |
| 6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ.....                                                          | 48 |
| 7. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΚΙΜΜΕΡΙΑ ΞΑΝΘΗΣ .....               | 49 |
| 7.1. ΣΤΙΛΠΝΕΣ ΤΟΜΕΣ – SEM .....                                                  | 49 |
| 7.1.1. ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΤΥΠΟΥ SKARN .....                                            | 49 |
| 7.1.2. ΧΑΛΑΖΙΑΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ Mo-Cu-Bi-W .....                                        | 51 |
| 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....                                                            | 54 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....                                                               | 56 |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στην κοιτασματολογική και ορυκτολογική μελέτη των μεταλλοφοριών που συνδέονται με μαγματική διείσδυση (intrusion-related) στα Κιμμέρια Ξάνθης. Τα πετρώματα της περιοχής έρευνας ανήκουν στη γεωτεκτονική μάζα της Ροδόπης και αποτελούνται από γνευσίους, αμφιβολίτες, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και μάρμαρα. Οι μεταλλοφορίες που εντοπίζονται στη περιοχή σχετίζονται με τον έντονο Τριτογενή συνορογενετικό μαγματισμό της μάζας της Ροδόπης στον οποίο οφείλεται ο σχηματισμός του πλουτωνίτη της Ξάνθης. Το πλουτωνικό αυτό πέτρωμα αποτελείται από βιοτιτικό-κεροσιλβικό γρανοδιорίτη στο μεγαλύτερο ποσοστό αλλά και από μονζονίτη, χαλαζιακό μονζοδιорίτη, μονζογάββρο και γάββρο. Στην περιοχή εντοπίζονται δύο τύποι μεταλλοφοριών: η μεταλλοφορία Fe-Cu-W-Bi τύπου skarn στην επαφή του γρανοδιорίτη με τα γειτονικά μάρμαρα και η μεταλλοφορία που συνδέεται με πνευματολυτικές-υδροθερμικές χαλαζιακές φλέβες πλούσιες σε Mo-Cu-Bi-W, που διαπερνούν τον γρανοδιорίτη. Η μεταλλοφορία τύπου skarn είναι πλούσια σε μαγνητίτη, σεελίτη, βολφραμίτη και σουλφίδια, όπως μαγνητοπυρίτη, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη και σφαλερίτη, και έχει αποτελέσει αντικείμενο εκμετάλλευσης κατά το παρελθόν για την εξόρυξη μαγνητίτη και μαγνητοπυρίτη. Στην μεταλλοφορία αυτή εντοπίζεται και αυτοφυής χρυσός μέσα στον χαλκοπυρίτη και τον σιδηροπυρίτη, ενώ προσχωματικός χρυσός διαπιστώθηκε και στις προσχώσεις των γειτονικών ρεμάτων. Η φλεβική μεταλλοφορία αποτελείται ορυκτολογικά από σιδηροπυρίτη, μολυβδαινίτη, βολφραμίτη και χαλκοπυρίτη εκ των οποίων ο χαλκοπυρίτης και ο μολυβδαινίτης ήταν τα μεταλλεύματα που εκμεταλλεύονταν ως επί το πλείστον κατά τα παλαιότερα χρόνια, όπως διαπιστώνεται από τις υπόγειες στοές και τις υπαίθριες εξορύξεις. Η παρούσα μελέτη σε συνδυασμό με τα δεδομένα από την υπάρχουσα βιβλιογραφία έδειξαν ότι οι μεταλλοφορίες που εμφανίζονται στα Κιμμέρια της Ξάνθης είναι αποτέλεσμα της δράσης της μαγματικής διείσδυσης και την ανάπτυξη υδροθερμικού συστήματος μετά την κρυστάλλωση και στερεοποίηση του μάγματος από το οποίο σχηματίστηκε ο πλουτωνίτης της Ξάνθης, κατά το Ολιγόκαινο.

## **ABSTRACT**

### **MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL STUDY OF THE ORE MINERALIZATION ASSOCIATED WITH THE MAGMATIC INTRUSION OF XANTHI IN KIMMERIA, NE GREECE**

The present work refers to the study of the mineralogy and geochemistry of the ore mineralization which is associated with the magmatic intrusion of Xanthi in Kimmeria, Thrace. The rocks of the area belong at the geotectonic belt known as Rodope massif and consist of gneisses, amphibolites, mica schists and marbles. The mineralization which was identified in the study area is spatially and temporally associated Xanthi pluton. During Oligocene-Miocene the intense synorogenic magmatism at the Rodope and Serbomacedonian massifs was responsible for the formation of numerous plutonic and volcanic rocks in the region. The Xanthi pluton is composed of biotite-hornblende granodiorite covering the greatest part of the intrusive rock, but also of monzonite, quartz monzodiorite, monzogabbro and gabbro. In the area two types of mineralization were identified: an Fe-Cu-W-Bi-bearing skarn type in contact with the granodiorite adjacent with the marbles and a mineralization rich in Mo-Cu-Bi-W associated with pneumatolitic-hydrothermal quartz veins crosscutting the granodiorite. The skarn-type mineralization is rich in magnetite, scheelite, wolframite and sulfides (pyrrhotite, pyrite, chalcopyrite and sphalerite) and has been exploited in the past to producing magnetite and pyrrhotite. Gold was also identified at the skarn type mineralization within chalcopyrite and pyrite, while alluvial gold grains were also found at the local stream sediments. The vein type mineralization consists of pyrite, molybdenite, wolframite and chalcopyrite. Chalcopyrite and molybdenite were the ores exploited in the past, as evidenced by the underground galleries and the restricted surface mining. The present study in combination with the data obtained from the literature, shows that the ore mineralization in Kimmeria Xanthi is associated with the magmatic intrusion and the development of a hydrothermal system which followed the crystallization and solidification of the magma from which the pluton of Xanthi was formed during the Oligocene.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Κοιτασματολογική και Ορυκτολογική μελέτη της μεταλλοφορίας που συνδέεται με τη μαγματική διείσδυση, στα Κιμμέρια Ξάνθης», εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-15, στον Τομέα Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης. Αντικείμενο αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των μεταλλοφοριών που εμφανίζονται στα Κιμμέρια της Ξάνθης.

Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή γίνεται αναφορά στη γεωλογία της ευρύτερης περιοχής μελέτης και ειδικότερα στην εμφάνιση των τύπων μεταλλοφοριών. Με βάση τη μελέτη και τα δεδομένα από διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους έρευνας, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κοιτάσματος. Στόχος της εργασίας είναι ο προβληματισμός σχετικά με την πιθανότητα οι μεταλλοφορίες στην περιοχή μελέτης να ανήκουν στην ομάδα κοιτασμάτων που συνδέονται με μαγματικές διεισδύσεις (intrusion-related systems).

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου πρώτα από όλους, στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Βασίλη Μέλφο για την εμπιστοσύνη και την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, για την αμέριστη υπομονή και το ενδιαφέρον που μου έδειξε, καθώς και για όλες τις επιστημονικές υποδείξεις και καθοδηγήσεις που μου προσέφερε απλόχερα καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου που με στήριξε πρώτα ηθικά και στη συνέχεια οικονομικά καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με ιστορικά κείμενα και αρχαιολογικά ευρήματα η χρήση των μετάλλων αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στην εξέλιξη της ανθρωπότητας και της τεχνολογίας. Η χρήση μετάλλων, άλλωστε, έδωσε τα χαρακτηριστικά ονόματα στις εποχές του Χαλκού και του Σιδήρου, εποχές ορόσημα στην ιστορία της ανθρωπότητας. Τα πιο γνωστά μέταλλα στην αρχαιότητα ήταν ο χρυσός, ο άργυρος, ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο κασσίτερος, ο ψευδάργυρος, ο σίδηρος, και τρία τεχνητά κράματα: ο μπρούντζος (χαλκός και κασσίτερος), ο ορείχαλκος (χαλκός και ψευδάργυρος) και ο χάλυβας (σίδηρος και άνθρακας). Αναφέρεται επίσης το ήλεκτρο, που αποτελεί φυσικό κράμα χρυσού με άργυρο (έως 25 % Ag). Αυτά τα μέταλλα αποτέλεσαν βασικό υλικό για την κατασκευή διάφορων χρηστικών αντικειμένων και εργαλείων αλλά και σημαντικό παράγοντα για τη διακίνηση εμπορίου. Οδήγησαν σταδιακά στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και της οικονομίας και συνέβαλαν στην αλλαγή του τρόπου σκέψης των ανθρώπων αλλά και των σχέσεων μεταξύ τους.

Στην Ελλάδα τα σημαντικότερα αρχαία μεταλλευτικά κέντρα υπήρξαν το Λαύριο και η ΒΑ Χαλκιδική, αλλά και το Παγγαίο, η Σκαπτή Ύλη (Παλιά Καβάλα), η Θάσος και η Σίφνος (Βαβελίδης κ.ά. 1996, 1997, Vavelidis et al. 1997). Αυτά τα κέντρα από την αρχαιότητα έως και σήμερα έχουν μελετηθεί και έχουν υποστεί εκμετάλλευση σε μεγάλο βαθμό. Γίνεται αντιληπτό, ότι από την αρχαιότητα ακόμη η περιοχή της Βόρειας Ελλάδας, αποτέλεσε σημαντικό χώρο έρευνας, ανακάλυψης και εκμετάλλευσης μεταλλικών ορυκτών. Η αναζήτηση όμως και η έρευνα για νέες μεταλλοφόρες περιοχές δεν σταμάτησε ποτέ, εφόσον θεμελιώδους σημασίας για την ανάπτυξη του πολιτισμού αποτέλεσαν και αποτελούν οι ορυκτές πρώτες ύλες, δηλαδή τα μεταλλικά και μη μεταλλικά ορυκτά και πετρώματα.

Η γεωτεκτονική θέση της Ελλάδας αλλά και η γεωλογική δομή της παρουσιάζει ένα μεγάλο αριθμό εμφανίσεων και κοιτασμάτων. Στην Β. Ελλάδα συγκεκριμένα κατά το ορογενές των Ελληνίδων και με την εξέλιξη του ωκεανού της Νεοτουθής δημιουργήθηκαν μαγματικές διαδικασίες που οδήγησαν στο σχηματισμό κοιτασμάτων. Τα πολυάριθμα κοιτάσματα που σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια του Τριτογενούς μαγματισμού στη νότια βαλκανική χερσόνησο ανήκουν μεταξύ άλλων σε δύο σημαντικές μεταλλογενετικές

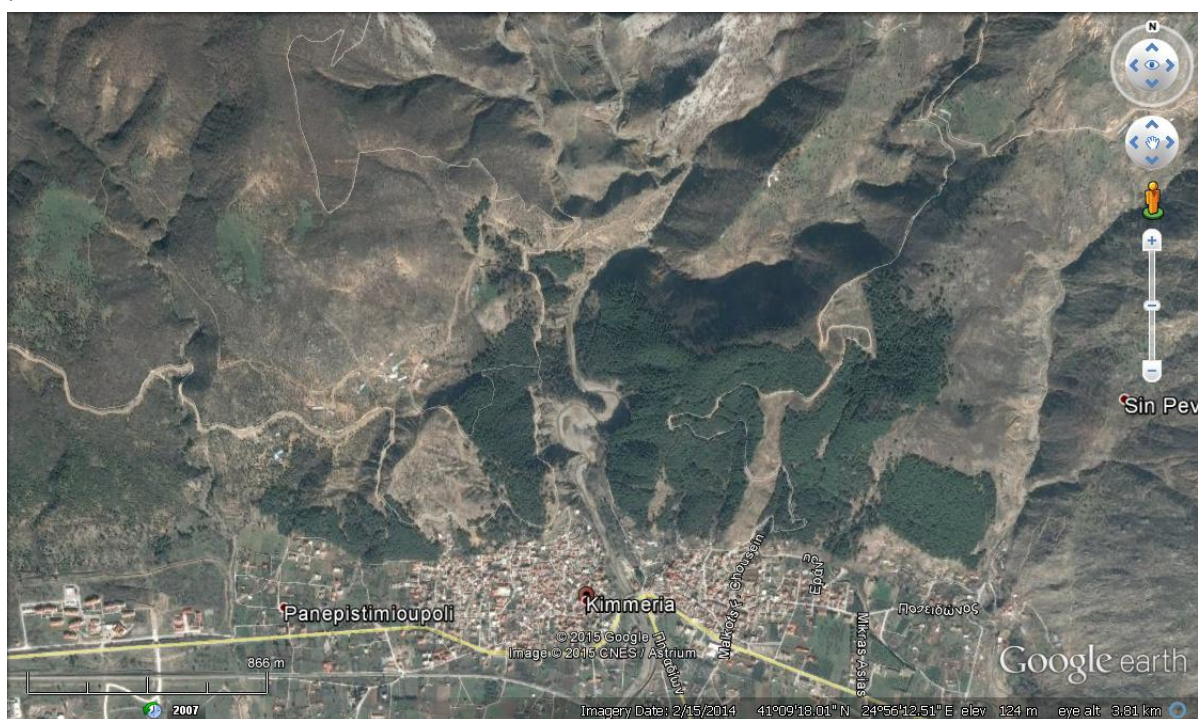
επαρχίες, της Ροδόπης και της Σερβομακεδονικής. Οι τύποι μεταλλοφορίας που εντοπίζονται στη Μακεδονία και τη Θράκη είναι μεταλλοφορίες που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις (intrusion-related), αλλά κυρίως πορφυριτικού και επιθερμικού τύπου, τύπου skarn καθώς και στρωματόμορφες ηφαιστειο-ιζηματογενείς μεταλλοφορίες καθώς και συστήματα φλεβών με σημαντικές περιεκτικότητες σε χρυσό ή/και άργυρο. Σχετίζονται με τον ηφαιστειακό και πλουτωνικό μαγματισμό και χαρακτηρίζονται από την παρουσία σημαντικών περιεκτικότητων σε Pb-Zn, Sb, Bi, Cu και Mo, ενώ σε μικρότερες ποσότητες συμμετέχουν Fe και Sn και σε ακόμη μικρότερο ποσοστό εμφανίζονται Au, Ag, U, W, Te, Bi και As (Melfos et al. 2002, Voudouris et al. 2006, Melfos and Voudouris 2012).

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη μελέτη των μεταλλοφοριών που εμφανίζονται στα Κιμμέρια του Νομού Ξάνθης στην Θράκη. Πρόκειται για δύο ξεχωριστές μεταλλοφορίες, μια μεταλλοφορία τύπου skarn και μία μεταλλοφορία χαλαζιακών φλεβών Mo-Cu-Bi-W, που σχετίζονται με την διείσδυση του γρανοδιορίτη της Ξάνθης και ταξινομούνται στην ευρύτερη μάδα μεταλλοφοριών που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.

## 2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

Η περιοχή μελέτης ανήκει στα Κιμμέρια, κωμόπολη της περιφερειακής ενότητας Ξάνθης, του δήμου Ξάνθης, στο γεωγραφικό διαμέρισμα Θράκης στη Βόρεια Ελλάδα. Βρίσκεται ανατολικά της Ξάνθης, σε απόσταση 5 χιλιομέτρων και την κωμόπολη διασχίζει ο χείμαρρος Κυδωνέας, παραπόταμος του Κόσυνθου. Επίσημα ο πληθυσμός της κωμόπολης των Κιμμερίων είναι 3.222 κάτοικοι (πηγή: ΕΣΥΕ, ελληνική απογραφή 2011) και βρίσκεται στο υψόμετρο των 76m (Σχ. 2.1).



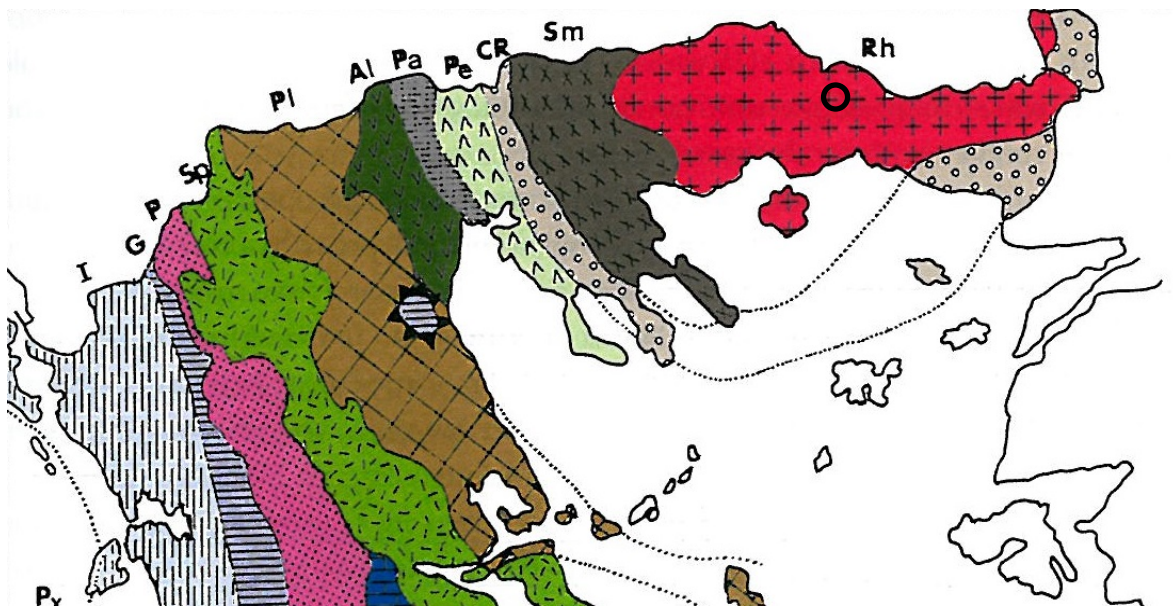
**Σχήμα 2. 1.** Χάρτης της ευρύτερης περιοχής της κωμόπολης Κιμμερίων, της περιφερειακής ενότητας Ξάνθης (πηγή: Google Earth).

Ο νομός Ξάνθης με πρωτεύουσα την Ξάνθη ανήκει στη Θράκη και έχει έκταση 1793 Km<sup>2</sup>. Προς βορρά συνορεύει με τη Βουλγαρία, ανατολικά με το νομό Ροδόπης, δυτικά με τους νομούς Καβάλας και Δράμας και προς νότο βρέχεται από το Θρακικό πέλαγος. Το έδαφος στα βορινά του νομού είναι εξ' ολοκλήρου ορεινό, με υψηλότερο το βουνό Κούλα (1827 μ.) στα σύνορα με τη Βουλγαρία, ενώ το νότιο τμήμα του νομού καταλαμβάνεται από την κοιλάδα της Ξάνθης. Υπάρχουν δύο ποταμοί, ο Νέστος που είναι

ο μεγαλύτερος και αποτελεί το φυσικό όριο με το Νομό Καβάλας και ο Ξάνθης ή Ξανθίας που είναι μικρότερος.

## 2.2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΗΣ

Η μάζα της Ροδόπης ανήκει στις Εσωτερικές Ελληνίδες (Σχ. 2.2), είναι ο πυρήνας του Ελληνικού ορογενούς και περιβάλλεται από όλες τις άλλες τις ζώνες των Ελληνικών οροσειρών.



Σχήμα 2.2 Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών και η περιοχή έρευνας (σε κύκλο). Rh:μάζα Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιροδοπική ζώνη, (Pe: Υποζώνη Παιονίας, Pa: Υποζώνη Πάικου, Al: Υποζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αξιού, Pl: Πελαγονική Ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη (Μουντράκης 2010)

Στον ελλαδικό χώρο τοποθετείται γεωγραφικά στην περιοχή της Θράκης και της ανατολικής Μακεδονίας. Δυτικά το όριο με τη Σερβομακεδονική μάζα βρίσκεται στην “γραμμή” του Στρυμόνα ποταμού, όπως επίσης και στη νήσο Θάσο (Μουντράκης 2010). Το όριο αυτό είναι ορατό σε ορισμένα σημεία μόνο διότι καλύπτεται από τα ιζήματα της λεκάνης του Στρυμόνα.

Σύμφωνα με τα πιο σύγχρονα γεωλογικά μοντέλα, ο γεωτεκτονικός χαρακτήρας της μάζας της Ροδόπης στην εξέλιξη της Μεσογείου ορίζεται ως ηπειρωτικός. Σύμφωνα με τον Μουντράκη (2010) δύο είναι οι επικρατέστερες θεωρίες για την προέλευση της μάζας. Η πρώτη υποστηρίζει ότι η μάζα της Ροδόπης είναι τμήμα της πλάκας της Ευρασίας ενώ η δεύτερη υπόθεση υποστηρίζει ότι η μάζα αυτή προήλθε από τα Κιμμερικά ηπειρωτικά

τεμάχια που αποσπάστηκαν από την Gondwana, ενσωματώθηκαν στην Ευρασία με κίνηση προς τα βορειοανατολικά.

## **2.3. ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ**

Λιθολογικά η μάζα της Ροδόπης συγκροτείται κυρίως από κρυσταλλωσχιστώδη πετρώματα (γνευσίους, αμφιβολίτες, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και μάρμαρα), ενώ πολύ σημαντική είναι και η παρουσία όξινων και ενδιάμεσων πυριγενών πετρωμάτων (πλουτωνιτών και ηφαιστιτών). Το πάχος των μεταμορφωμένων πετρωμάτων υπολογίζεται 10 με 20 km περίπου (Σχ. 2.3). Δύο βασικές λιθοστρωματογραφικές ενότητες διακρίνονται στη μάζα αυτή, η υπερκείμενη ενότητα του Σιδηρόνερου στα βόρεια κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων και η υποκείμενη ενότητα του Παγγαίου στα δυτικά νοτιοδυτικά της μάζας της Ροδόπης (Μουντράκης 2010). Οι ενότητες αυτές διαχωρίζονται από το ρήγμα του Νέστου, BBA-NNΔ διεύθυνσης.

### **2.3.1 ΕΝΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΝΕΡΟΥ**

Η ενότητα Σιδηρόνερου αποτελείται κυρίως από ορθογνευσίους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και αμφιβολίτες με λεπτές ενστρώσεις μαρμάρων και μιγματίτες. Αν και η ενότητα Σιδηρόνερου είναι τεκτονικά υπερκείμενη της ενότητας Παγγαίου, ωστόσο η ηλικία των πετρωμάτων δείχνει ότι είναι παλαιότερη από αυτήν. Η ενότητα αυτή έχει χωριστεί από τους Mposkos and Krohe (2000) και Krohe and Mposkos (2002) σε τέσσερις επιμέρους μικρότερες ενότητες με βάση πετρολογικά και μεταμορφικά κριτήρια. Οι υποενότητες αυτές (Σχ. 2.4) από τα δυτικά προς τα ανατολικά είναι οι εξής:

- Η «υποενότητα Σιδηρόνερου» η οποία αποτελείται από μιγματίτες, ορθογνευσίους, παραγνευσίους, αμφιβολίτες, μεταπηλίτες και εκλογίτες. Αυτή η υποενότητα εντοπίζεται στην περιοχή βόρεια της Δράμας και της Ξάνθης.
- Η «υποενότητα Καρδάμου» που αποτελείται από αλβιτικούς γνευσίους, μεταπηλίτες, παραγνευσίους, μιγματιτικούς και πηλιτικούς γνευσίους, μεταβασίτες και ενστρώσεις μαρμάρων. Η υποενότητα αυτή βρίσκεται βόρεια στην περιοχή της Κομοτηνής.
- Η «υποενότητα Κεχρίου» αποτελούμενη από ορθογνευσίους, πηλιτικούς γνευσίους, μεταπηλίτες, μιγματίτες, εκλογίτες - αμφιβολίτες και υπερβασικά

πετρώματα που παρεμβάλλονται τεκτονικά. Εντοπίζεται στην ανατολική Ροδόπη στην περιοχή του χωριού Κεχρί μέχρι τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα.

- Η «υποενότητα Κύμης» η οποία αποτελείται από μετα – ιζήματα και μετα – πυριγενή πετρώματα πολύ υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης, με πιέσεις 25 Kb, αμφιβολιτωμένους εκλογίτες, γρανιτικούς ορθογνευσίους και υπερβασικά πετρώματα (περιδοτίτες και πυροξενίτες). Εντοπίζεται στην περιοχή Έβρου – Ορεστιάδας καθώς και σε μία μικρή εμφάνιση στην κεντρική Ροδόπη, ΒΔ της Κομοτηνής.

### 2.3.2 ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΑΓΓΑΙΟΥ

Στην ενότητα του Παγγαίου, σύμφωνα με τον Μουντράκη (2010), διακρίνονται ευκρινώς τρεις λιθοστρωματογραφικοί ορίζοντες (Σχ. 2.2 και 2.3). Ο κατώτερος ορίζοντας αποτελείται από ορθογνευσίους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες ενώ ο μεγάλου πάχους μεσαίος ορίζοντας και ο ανώτερος ορίζοντας αποτελούνται από εναλλαγές σχιστολίθων και μαρμάρων. Τα μάρμαρα εμφανίζονται παχυστρωματώδη στα ανώτερα στρώματα ενώ πιο λεπτοστρωματώδη στα κατώτερα στρώματα. Το χρώμα τους κυμαίνεται από ανοιχτότεφρα έως σκοτεινότεφρα. Κατά θέσεις εναλλάσσονται με σχιστόλιθους ή μεταβαίνουν πλευρικά σε αυτούς. Η ενότητα αυτή θεωρείται νεότερη από την ενότητα Σιδηρόνερου.



**Σχήμα 2.4** Γεωτεκτονικές ενότητες όπου απεικονίζονται οι δύο ενότητες Σιδηρόνερου και Παγγαίου της μάζας της Ροδόπης (Krohe and Mposkos 2002).

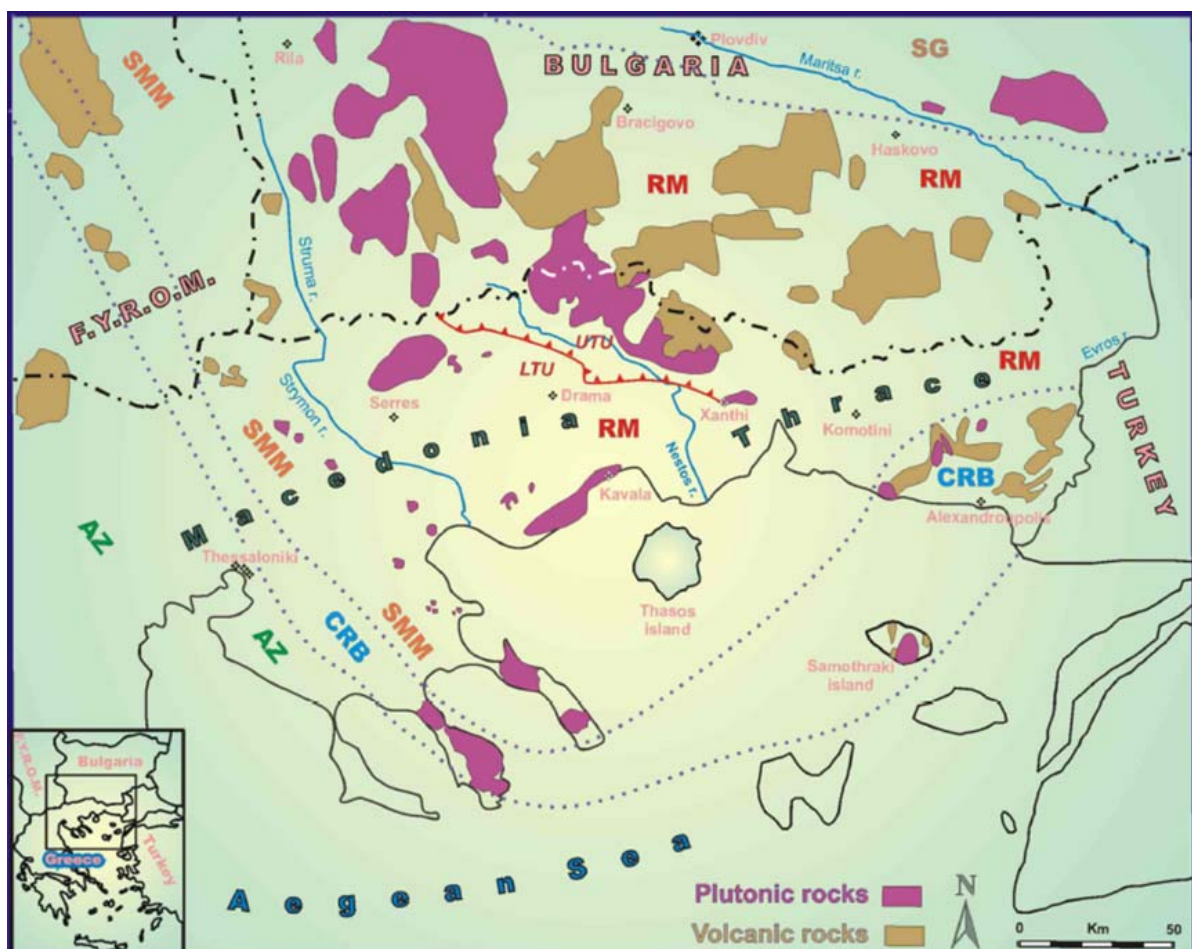
## 2.4. ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΜΑΓΜΑΤΙΣΜΟΣ

Στη μάζα της Ροδόπης εντοπίζονται πολλές μικρές και μεγάλες πυριγενείς εμφανίσεις που διεισδύουν στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο. Οι πυριγενείς αυτές εμφανίσεις είναι πλουτωνικά ή ηφαιστειακά πετρώματα. Λόγω αυτών των διεισδύσεων παρατηρούνται σε πολλές περιπτώσεις εκτεταμένα φαινόμενα μεταμόρφωσης επαφής.

Τα πλουτωνικά πετρώματα είναι κυρίως γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες, χαλαζιακοί μονζονίτες, τοναλίτες και διορίτες (Christofides et al. 1998). Χρονολογούνται σύμφωνα με ραδιοχρονολογήσεις στο Τριτογενές (Ολιγόκαινο – Μειόκαινο, 50-14 Ma) και συνδέονται με την εφελκυστική τεκτονική που έλαβε χώρα κατά την εξέλιξη της υποβύθισης της Νέο-Τηθύος κάτω από την Ελληνική Ενδοχώρα (Μάζα της Ροδόπης και

της Σερβομακεδονικής). Οι σημαντικότερες Τριτογενείς πλουτωνικές διεισδύσεις της Ελληνικής Ροδόπης είναι του Παγγαίου, του Συμβόλου ή Καβάλας, της Βροντούς, του Παρανεστίου, της Ξάνθης και τους Πανοράματος (Christofides et al. 1998). Επίσης, σημαντικός είναι και ο πλουτωνικός όγκος του γρανίτη της Ελατιάς που βρίσκεται μέσα στην ενότητα Σιδηρόνερου και χρονολογείται στο Άνω Κρητιδικό (87 Ma).

Τα ηφαιστειακά πετρώματα στη μάζα της Ροδόπης (Σχ. 2.5) εντοπίζονται κυρίως σε δύο περιοχές, στην περιοχή Φερρών – Σαπών και βόρεια της Ξάνθης – Κομοτηνής στα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα (Μουντράκης 2010). Τα ηφαιστειακά αυτά πετρώματα ανήκουν σε ασβεσταλκαλικές και σοσονιτικές σειρές που σχηματίστηκαν κατά την Τριτογενή εφελκυστική τεκτονική, δεδομένου ότι η ηλικία των ηφαιστειακών προέκυψε κυρίως Ολιγοκαινική (35-25 Ma). Η σύστασή τους κυμαίνεται από βασαλτική έως ρυολιθική, με εμφάνιση πετρολογικών τύπων όπως βασάλτες, ανδεσίτες, λατίτες, δακίτες, τραχύτες και ρυόλιθοι (Soldatos et al. 2001).



**Σχήμα 2.5** Ολιγοκαινικός-Μειοκαινικός μαγματισμός στη Ροδόπη. Με ιώδες χρώμα αναπαρίστανται τα πλουτωνικά πετρώματα ενώ με καστανό χρώμα τα ηφαιστειακά πετρώματα (Soldatos et al. 2001).

Τόσο τα πλουτώνια σώματα όσο και τα ηφαιστειακά πετρώματα του Ελληνικού χώρου που έχουν Τριτογενή ηλικία, αποτελούν τη νέα μετά-αλπική ηφαιστειότητα που συνδέεται με το σύγχρονο γεωτεκτονικό καθεστώς της υποβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική στο χώρο του Αιγαίου. Σύμφωνα με τους Fytikas et al. (1985) η ηφαιστειότητα αυτή εκδηλώθηκε σε συνεχείς διαδοχικές φάσεις από το Ολιγόκαινο μέχρι και σήμερα. Επίσης, η ηφαιστειότητα του Τριτογενούς στη Ροδόπη δημιουργήθηκε σε τεκτονικά βυθίσματα, μέσα στα οποία αποτέθηκαν κυρίως ηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα (Foosse and Manheim 1975).

Ο σχηματισμός των τεκτονικών βυθισμάτων στον χώρο της Θράκης, είναι αποτέλεσμα των τεκτονικών κινήσεων που έλαβαν χώρα στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου από το Ηώκαινο μέχρι το Μειόκαινο, λόγω της σύγκρουσης της Αφρικανικής πλάκας με την Ευρασιατική (Dewey et al. 1979). Η βύθιση της Αφρικανικής πλάκας προκάλεσε στα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα η οποία χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση χρονολογείται στο Ηώκαινο και αποτελείται από ηφαιστειακά και πυροκλαστικά πετρώματα ενδιάμεσης σύστασης. Η δεύτερη φάση, με ηφαιστειακά και πυροκλαστικά πετρώματα ενδιάμεσης και όξινης σύστασης έχει ηλικία Κατώτερο – Μέσο Ολιγόκαινο έως Μειόκαινο. Τα παραπάνω πετρώματα συνοδεύονται από υποηφαιστειακά και πλουτώνια σώματα. Τέλος, η τρίτη φάση χρονολογείται στο Πλειστόκαινο και εκδηλώνεται με ηφαιστειακή δραστηριότητα και περιλαμβάνει όξινα ιγνιμβριτικά πετρώματα. Σε κάθε λεκάνη ή ακόμη και σε γειτονικές λεκάνες τα παραπάνω χαρακτηριστικά, ηφαιστειακής και ιζηματολογικής φύσεως, μπορεί να έχουν διαφοροποιήσεις (Innocenti et al. 1984).

## **2.5. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ**

Κατά την ορογενετική εξέλιξη της μάζας της Ροδόπης οι πετρογραφικοί σχηματισμοί έχουν υποστεί τρεις φάσεις πτυχώσεων. Η πρώτη φάση προκάλεσε ισοκλινείς πτυχές, συμμεταμορφικές της πρώτης κύριας μεταμόρφωσης του Παλαιοζωϊκού, γενικής διεύθυνσης Β-Ν. Η δεύτερη φάση, που έλαβε χώρα κατά το Τριτογενές, δημιούργησε πτυχές υποίσοκλινείς, με άξονες διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ έως ΑΒΑ-ΔΝΔ. Η φάση αυτή συνοδεύεται από μία πολύ εμφανή γράμμωση που προέρχεται από την τομή της Παλαιοζωϊκής φύλλωσης και μιας σύγχρονης σχιστότητας. Στους πυρήνες μεγα-αντικλίνων αυτής της φάσης τοποθετήθηκαν τα περισσότερα πυριγενή πετρώματα (Kiliass & Mountrakis, 1998). Τέλος παρατηρήθηκε και τρίτη τεκτονική φάση η οποία

χαρακτηρίζεται από ανοιχτές πτυχές με διεύθυνση αξόνων ΒΔ-ΝΑ, που επαναπτυχώνουν τις προγενέστερες και σχηματίστηκαν πιθανότατα κατά το Άνω Ηώκαινο - Ολιγόκαινο. Τέλος, ρήγματα μεγάλης γωνίας κλίσης, Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας, διαμόρφωσαν το σημερινό ανάγλυφο.

Σύμφωνα με τον Μουντράκη (2010) οι παραπάνω φάσεις σχηματιστήκαν λόγω της συμπίεστικής τεκτονικής που προκλήθηκε από την σύγκρουση της Απουλίας μικροπλάκας με την Ευρασία. Αντίθετα, η εφελκυστική τεκτονική που εμφανίστηκε στο Τριτογενές, ακολουθώντας την συμπίεση, σχημάτισε κανονικά ρήγματα αποκόλλησης μικρής γωνίας κλίσης (Kilias and Mountrakis 1990, Dinter and Royden 1993, Brun and Sokoutis 2007). Τα ρήγματα αυτά συνοδεύονται από ισχυρές διατμητικές κινήσεις προς τα κάτω που προκάλεσαν την κατάρρευση της διογκωμένης συμπίεσμένης μάζας των τεκτονικών καλυμμάτων και λεπίων.

Η Ροδόπη αποτελεί μία πολυμεταμορφωμένη μάζα κρυσταλλοσχιστωδών πετρωμάτων που υπέστη κατά την εξέλιξή της τέσσερις διαδοχικές φάσεις μεταμόρφωσης. Παρατηρείται αρχικά μεταμόρφωση αμφιβολιτικής φάσης κατά το Παλαιοζωικό, ενώ η δεύτερη μεταμόρφωση έλαβε χώρα κατά το Κρητιδικό - Τριτογενές λόγω της Αλπικής ορογενετικής παραμόρφωσης. Κατά το Κρητιδικό, έλαβε χώρα μια εκλογιτικής φάσης μεταμόρφωση και τέλος κατά το Ηώκαινο τα πετρώματα της μάζας της Ροδόπης υπέστησαν μια εκ νέου μεταμόρφωση αμφιβολιτικής φάσης, που εξάλειψε στο μεγαλύτερο μέρος τις προηγούμενες μεταμορφικές παραγενέσεις. Η τελευταία μεταμόρφωση της μάζας της Ροδόπης αποτελεί σήμερα την επικρατούσα μεταμόρφωση των σχηματισμών της μάζας αυτής. Οι συνθήκες μεταμόρφωσης αυτής της φάσης έχουν υπολογιστεί στην ενότητα Παγγαίου,  $T = 480^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 4 - 7 \text{ kbars}$  και στην ενότητα Σιδηρόνερου  $T = 480 - 550^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 8 \text{ kbars}$  (Mposkos 2002, Liati & Seidel 1996).

Πιο συγκεκριμένα, στην ενότητα Σιδηρόνερου διακρίθηκαν τρία μεταμορφικά γεγονότα: αρχικά παρατηρείται μεταμόρφωση εκλογιτικής φάσης σε συνθήκες υψηλής πίεσης ( $P \leq 19 \text{ kbar}$  και  $T \geq 700^{\circ}\text{C}$ ) (Liati & Seidel 1996). Ακολούθως τα πετρώματα υπέστησαν ανάδρομη μεταμόρφωση αμφιβολιτικής φάσης ( $P \sim 8,5 \text{ kbar}$  και  $T = 600^{\circ}\text{C}$  έως  $740^{\circ}\text{C}$ ). Τα προϊόντα των παραπάνω γεγονότων επηρεάστηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις από πρασινοσχιστολιθική μεταμόρφωση χαμηλής πίεσης.

Η ενότητα Παγγαίου κυριαρχείται από μνλωνιτική και πρασινοσχιστολιθικής φάσης μεταμόρφωση, που επέδρασε κατά το Ολιγόκαινο – Μειόκαινο (Kilias & Mountrakis 1990).

## 2.6. ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Ολόκληρη η περιοχή όπου σήμερα βρίσκεται η Ελλάδα, πιστεύεται ότι ακολούθησε την πολύπλοκη εξελικτική πορεία του αλπικού συστήματος από το Μεσοζωικό έως το Καινοζωικό. Την περίοδο του Τριτογενούς στον ελλαδικό χώρο λαμβάνει χώρα η Αλπική ορογένεση με έντονες τεκτονικές παραμορφώσεις. Σύμφωνα με τον Μουντράκη (2010) η Αλπική τεκτονική χωρίζεται σε δύο περιόδους τεκτονικών κύκλων. Συνοπτικά, η πρώτη περίοδος ξεκινά στο Άνω Ιουρασικό με την ενδοωκεάνια υποβύθιση που συντελείται στο φλοιό του ωκεανού της Τυθής. Ακολούθως, λόγω μεταβολής των συνθηκών καταστροφής του ωκεανού, αυτός βυθίζεται κάτω από την Κιμμερική – Ευρασιατική πλάκα στο Κάτω Κρητιδικό περίπου. Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται η σταδιακή τοποθέτηση των οφιολίθων στην περιοχή της σημερινής Πελαγονικής γεωτεκτονικής ζώνης.

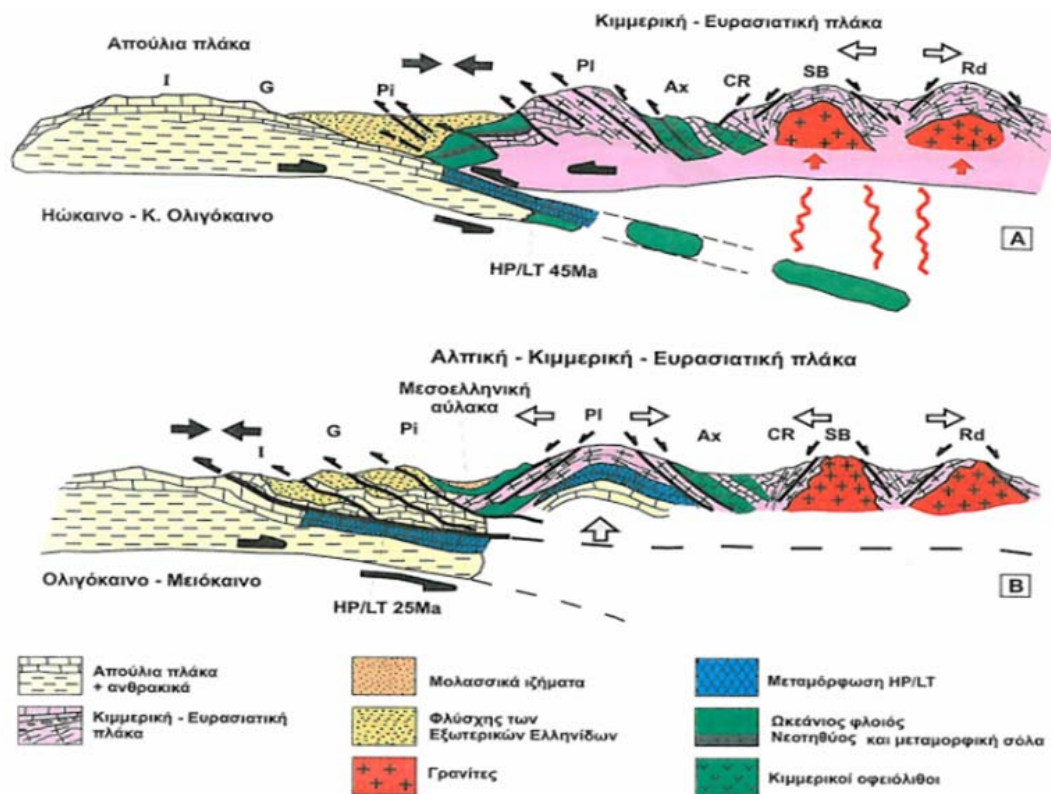
Η δεύτερη περίοδος αρχίζει στο Ηώκαινο με την τελική ηπειρωτική σύγκρουση μεταξύ Απουλίας πλάκας και Κιμμερικού ηπειρωτικού περιθωρίου. Η σύγκρουση αυτή ακολουθεί το οριστικό κλείσιμο του ωκεανού της Νεοτυθής.

Κατά το Ολιγόκαινο – Μειόκαινο, η συνέχεια της σύγκρουσης είχε ως αποτέλεσμα την υποβύθιση της μικρόπλακας της Απουλίας κάτω από την Κιμμερική – Ευρασιατική. Έτσι, οι ισχυρές συνθήκες υποβύθισης πτυχώνουν και αυξάνουν το πάχος των σχηματισμών του ηπειρωτικού περιθωρίου (Πελαγονική ζώνη) ενώ εντός της Ευρασιατικής πλάκας (μάζα Ροδόπης και Σερβομακεδονική ζώνη) δημιουργούνται συνθήκες εφελκυσμού και κατ' επέκταση λέπτυνση του φλοιού.

Στο Ολιγόκαινο τμήμα της Νεοτυθής (De Boorder et al. 1998, Μουντράκης 2010) κατά τη βύθισή του (Σχ. 2.6Α) προκάλεσε ενυδάτωση της μανδυακής σφήνας της υπερκείμενης Κιμμερικής – Ευρασιατικής πλάκας με αποτέλεσμα τη δημιουργία μαγμάτων τα οποία διεισδύουν στους σχηματισμούς της Σερβομακεδονικής μάζας και της μάζας της Ροδόπης. Στο Ολιγόκαινο – Μειόκαινο αυτά τα μάγματα λόγω των παραπάνω ευνοϊκών συνθηκών ανυψώνουν και αναθολώνουν τον φλοιό και διεισδύουν στα μεταμορφωμένα πετρώματα της μάζας της Ροδόπης. Η γεωτεκτονική εξέλιξη των ζωνών του Ελληνικού χώρου συνεχίζεται με τις διαδικασίες της υποβύθισης, της συμπίεσης, της αναθόλωσης και του εφελκυσμού προς τις Εξωτερικές Ελληνίδες ζώνες (ζώνη Ιονίου).

Η Ροδόπη σήμερα κυριαρχείται από ένα σύμπλεγμα τεκτονικών καλυμμάτων. Το σύμπλεγμα αυτό αποτελεί τμήμα του τελικά διαμορφωμένου κατά το Κρητιδικό – Τριτογενές, Ελληνικού Ορογενούς, το οποίο προκλήθηκε από την σύγκρουση της

Απουλίας μικροπλάκας και της Ευρασίας. Με τον επακόλουθο εφελκυσμό του Τριτογενούς έλαβε χώρα η κατάρρευση των τεκτονικών αυτών καλυμμάτων και λεπίων, με κανονικά ρήγματα μικρής γωνίας κλίσης (detachment faults), και η εκταφή βαθύτερων μεταμορφικών οριζόντων (Kiliass and Mountrakis 1990, Dinter and Royden 1993, Brun and Sokoutis 2007). Η διαδικασία της εκταφής των βαθύτερων οριζόντων έγινε σε διαδοχικά στάδια στο Τριτογενές στα 65 Ma (εκταφή της ενότητας Κύμης), 42-36 Ma (εκταφή των ενότητων Σιδηρονερίου, Καρδάμου και Κέχρου) και 23-12 Ma (εκταφή της ενότητας Παγγαίου) (Krohe and Mposkos 2002).



**Σχήμα 2.6** Σχηματικές τομές κατά μήκος των γεωτεκτονικών ενότητων των Ελληνίδων κατά την περίοδο της Αλπικής ορογένεσης. Πάνω (Α) η υποβύθιση του ωκεανού της Νέο-Τηθύος κάτω από την Κιμμερική-Ευρασιατική πλάκα όπου λαμβάνουν χώρα συμπιεστικά γεγονότα και κάτω (Β) η συνέχεια της σύγκρουσης αυτής και τα εφελκυστικά γεγονότα που ακολούθησαν (Μουντράκης 2010).

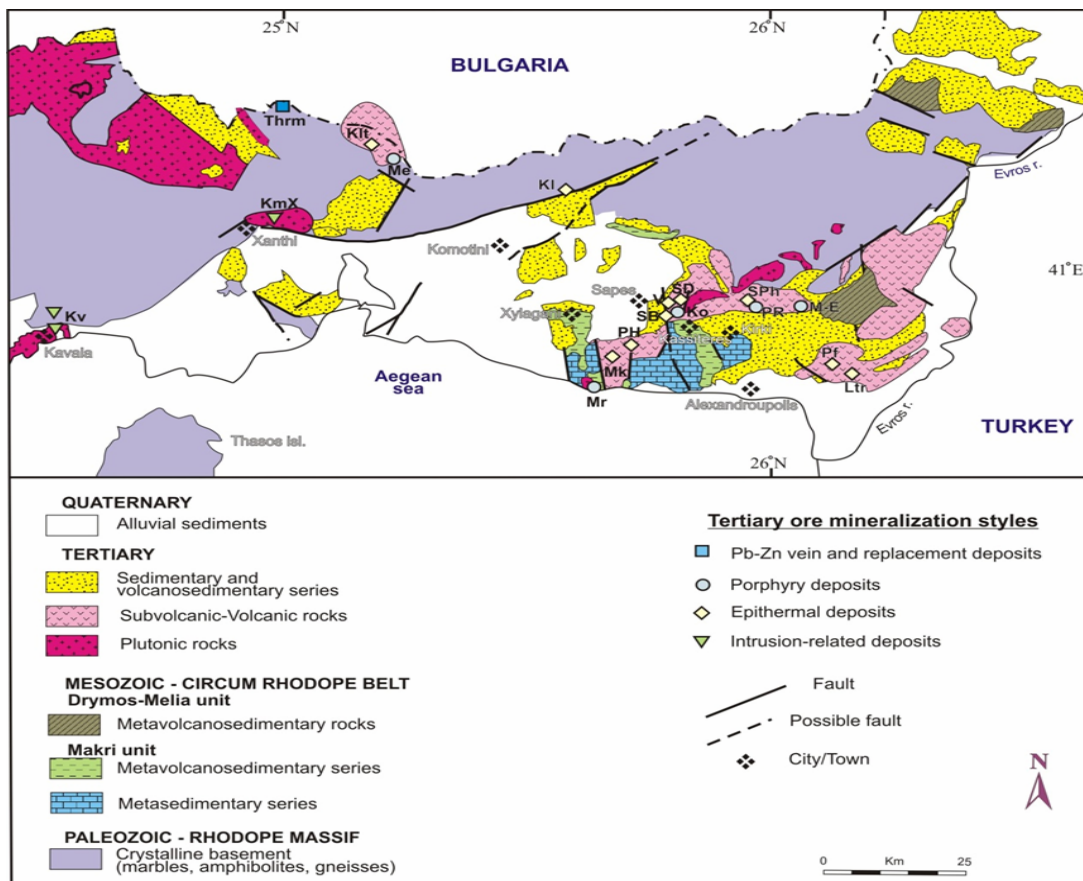
## 2.7. ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΩΝ ΣΤΗ ΜΑΖΑ ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΗΣ

Η μεταλλοφορία στις ορογενετικές ζώνες εμφανίζεται συνήθως μετά την ολοκλήρωση της σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών στις εκτατικές δομές, που δημιουργούνται από την κατάρρευση του ορογενούς (De Boorder et al. 1998). Η μανδυακή σφήνα, η οποία βρίσκεται πάνω από τον φλοιό που βυθίζεται, είναι αυτή που

παίζει καθοριστικό ρόλο, διότι συμβάλει στη μεταφορά των μεταλλοφόρων ρευστών στα ρηχότερα επίπεδα του φλοιού.

Όπως προαναφέρθηκε, παρόμοιο γεωτεκτονικό περιβάλλον επικρατούσε κατά το Τριτογενές στην Ροδόπη όπου τοποθετείται και ο σχηματισμός των μεταλλοφοριών της μάζας της Ροδόπης. Σύμφωνα με τους Μουντράκη (2010) και Pe-Piper (2004) η υποβύθιση της Απουλίας μικροπλάκας προκάλεσε την εκταφή βαθύτερων μεταμορφικών οριζόντων, μέσω της δράσης κανονικών ρηγμάτων μικρής γωνίας κλίσης (detachment faults) και δημιούργησε συμπλέγματα μεταμορφικών πυρήνων (metamorphic core complexes), με ταυτόχρονη διείσδυση μαγμάτων και το σχηματισμό πλουτωνικών όγκων. Επομένως, η μάζα της Ροδόπης κατά το Ολιγόκαινο – Μειόκαινο χαρακτηρίζεται από έντονο συνορογενετικό μαγματισμό. Τα πλουτωνικά πετρώματα (μονζονίτες, μονζοδιορίτες και γρανοδιορίτες), τα υποηφαιστειακά πετρώματα (μικρογρανίτες και πορφυριτικοί χαλαζιακοί μονζοδιορίτες) και τα ηφαιστειακά πετρώματα (ανδεσίτες και αδακίτες) της μάζας της Ροδόπης ανήκαν σε ασβεσταλκαλικές έως υψηλού Κ-ασβεσταλκαλικές σειρές (Eleftheriadis 1990, Christofides et al. 1998).

Στη μάζα της Ροδόπης έχουν μελετηθεί πολυάριθμες μεταλλοφορίες πορφυριτικού και επιθερμικού τύπου που σχετίζονται με τον Τριτογενή μαγματισμό (Σχ. 2.7)



Σχήμα 2.7 Χάρτης με τα κοιτάσματα και τις εμφανίσεις μεταλλευμάτων στην περιοχή της Ροδόπης (Melfos and Voudouris 2013).

### 2.7.1. ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Τα επιθερμικά κοιτάσματα συναντώνται σε σχετικά μικρά βάθη, μέχρι 1000 m και η θερμοκρασία σχηματισμού τους κυμαίνεται μεταξύ 50° C και 300° C. Τα κοιτάσματα αυτά συνδέονται συνήθως με μεταλλοφορίες χρυσού.

Στη μάζα της Ροδόπης εντοπίζονται σημαντικά επιθερμικά κοιτάσματα χρυσού που δημιουργήθηκαν κατά το Τριτογενές (Arikas and Voudouris 1998, Melfos et al. 2003). Τα κοιτάσματα αυτά χαρακτηρίζονται ως χαμηλής και υψηλής θείωσης επιθερμικά πολυμεταλλικά κοιτάσματα σουλφιδίων με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις μεταλλοφορίες στις περιοχές Σάπες, Πέραμα και Πεύκα Έβρου.

Οι Σάπες βρίσκονται περίπου 25 km βορειοδυτικά της Αλεξανδρούπολης στη Θράκη. Στο κοιτάσμα αυτό απαντώνται τρεις επιθερμικές μεταλλοφορίες υψηλής θείωσης, του «Αγίου Δημητρίου», του “Viper” και του “Scarp”. Την περιοχή δομούν Τριτογενή διαβρωμένα ηφαιστειακά και πυροκλαστικά πετρώματα ανδεσιτικής και ρυοδακτιτικής σύστασης που βρίσκονται πάνω σε μία ιζηματογενή ακολουθία ηλικίας Μέσου - Ανώτερου Ηωκαίνου που ασύμφωνα καλύπτει το μεταμορφωμένο υπόβαθρο (Melfos et al. 2003). Κατά τους Arikas and Voudouris (1998), Michael et al. (1995) οι κύριες υδροθερμικές εξαλλοιώσεις που εμφανίζονται είναι η πυριτική, προχωρημένη αργιλική και η σερικιτική. Είναι ακόμη πιθανό να εμφανίζεται και μια ζώνη αδουλάριου. Η μεταλλοφορία χρυσού, σχετίζεται με χαλαζία και χαλκηδόνιο, αμέθυστο και σύμπλεγμα φλεβιδίων (stockwork) βαρύτη και απαντάται στην πυριτική, αργιλική και σερικιτική ζώνη. Αυτοφυής χρυσός σε σημαντικές ποσότητες εντοπίζονται στο επάνω μέρος του κοιτάσματος, όπου ο χρυσός σχετίζεται με φλέβες χαλαζία – βαρύτη, καθώς και στα βαθύτερα σημεία. Οι κόκκοι του αυτοφυούς χρυσού συμφύονται με σιδηροπυρίτη ή εγκλείονται στον κοβελλίτη, τον χαλαζία και τον τετραεδρίτη. Οι περιεκτικότητες σε Ag και Cu είναι χαμηλές (0,69 wt% και 0,81 wt% αντίστοιχα). Η μέση χημική σύσταση του χρυσού του κοιτάσματος των Σαπών σύμφωνα με τους Voudouris (1993) και Melfos et al. (2003)  $Au_{0.96}Ag_{0.01}Cu_{0.02}$ .

Το κοιτάσμα του Περάματος βρίσκεται στο Ν. Έβρο και αποτελεί μια επιθερμική μεταλλοφορία που εντοπίζεται μέσα σε ψαμμίτες και ανδεσιτικά κροκαλοπαγή πετρώματα (Voudouris et al. 2011). Οι υδροθερμικές εξαλλοιώσεις που εμφανίζονται είναι η αργιλική, η πυριτική και η προχωρημένη σερικιτική. Η μεταλλοφορία περιέχει υψηλές περιεκτικότητες σε χρυσό και άργυρο, με μέσο όρο 3.5 g/t Au και 8.3 g/t Ag (Voudouris et

al. 2011) ενώ ο χαλκός βρίσκεται κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας. Η μέση χημική σύσταση του χρυσού είναι  $Au_{0.89}Ag_{0.11}$  (Melfos et al. 2003).

Η υψηλής θείωσης επιθερμική μεταλλοφορία βορειοανατολικά της Αλεξανδρούπολης στα Πεύκα, συνδέεται με φλέβες υψηλού βαθμού πυριτίωσης που φιλοξενούνται μέσα σε ανδεσιτικά και δακτιτικά ηφαιστειακά πετρώματα (Arikas and Voudouris 1998). Ο χρυσός εντοπίζεται κυρίως στη χαλκούχα μεταλλοφορία και σχηματίζει μικρά εγκλείσματα και φλεβίδια μέσα στον τετραεδρίτη, τενναντίτη, εναργίτη, λουζονίτη και χαλαζία. Οι περιεκτικότητες των κόκκων χρυσού σε Ag και Cu κυμαίνονται από 1,09 έως 1,86 wt% και από 1,25 έως 1,96 wt% αντίστοιχα. Το τελλούριο είναι κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας και η μέση χημική σύστασή τους είναι  $Au_{0.93}Ag_{0.03}Cu_{0.04}$ .

## **2.7.2. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ Cu – Mo**

Σύμφωνα με τους Voudouris et al. (2013) για τον σχηματισμό των κοιτασμάτων πορφυριτικού τύπου δεν έλαβε χώρα ουσιαστικός εκτοπισμός των ορυκτών των πετρωμάτων, στα οποία θερμά διαλύματα επιδρούν, αλλά πραγματοποιήθηκε απόθεση του περιεχομένου τους μέσα στους πόρους ή στα διάκενα των κόκκων των ορυκτών των γειτονικών πετρωμάτων. Τα σημαντικότερα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu – Mo της μάζας της Ροδόπης εντοπίζονται στη Μαρώνεια, στη Παγώνη Ράχη Κίρκης και στη Μελίταινα.

Μέσα στον πορφυριτικό μικρογρανίτη της Μαρώνειας, νότια της Κομοτηνής, εντοπίζεται μεταλλοφορία πορφυριτικού τύπου Cu – Mo (Melfos et al. 2002). Τρεις είναι οι ζώνες εξαλλοίωσης που εντοπίζονται στην περιοχή, η αργιλική, η σερικιτική και η προπυλιτική. Ο εξαλλοιωμένος μικρογρανίτης περιέχει 7.600 g/t Mo, 5.460 g/t Cu και 1 g/t Au. Σύμφωνα με τους Melfos et al. (2002) οι περιεκτικότητες σε χρυσό σε συνδυασμό με τα θειοάλατα που συναντώνται (τετραεδρίτης, τενναντίτης, ζινκενίτης, χαλκοστιμπίτης και φαματινίτης) καθώς και σε συνδυασμό με την παρουσία πυροφυλλίτη δείχνουν πιθανόν μια ύστερη επιθερμική υψηλής θείωσης μεταλλοφορία που υπερκάλυψε το πορφυριτικό σύστημα. Η κύρια αιτία σχηματισμού της πορφυριτικής μεταλλοφορίας Cu – Mo της Μαρώνειας ήταν ο βρασμός των μεταλλοφόρων ρευστών.

Το κοιτάσμα πορφυριτικού Cu – Mo στην Παγώνη Ράχη της Κίρκης εντοπίζεται μέσα σε ηφαιστειακά δακτιτικά και ανδεσιτικά πετρώματα. Η μεταλλοφορία σχετίζεται με μια Κ-ούχο πυριτική ζώνη εξαλλοίωσης η οποία προς τα εξωτερικά τμήματα μεταπίπτει σε

προπυλιτική ζώνη εξαλλοίωσης (Arikas and Voudouris 1998, Voudouris et al. 2013). Οι υψηλότερες περιεκτικότητες σε Mo και Au είναι 1.400 g/t και 0,5 g/t αντίστοιχα.

Στην περιοχή της Μελίταινας μέσα στα δακτιικά πετρώματα εντοπίζεται ακόμη μία μεταλλοφορία Cu – Mo. Ο δακίτης έχει υποστεί εκτεταμένου βαθμού σερικιτική και αργιλική εξαλλοίωση και προς το πάνω μέρος του υδροθερμικού συστήματος εντοπίζεται πυριτική ζώνη με υψηλού καλίου αλουνίτη (Arikas and Voudouris 1998). Επίσης οι Voudouris et al. (2003) αναφέρουν σημαντικές περιεκτικότητες σε Cu (400 g/t), Zn(500 g/t), Mo (6000 g/t) και Au (0,3 g/t).

### 3. Ο ΠΛΟΥΤΩΝΙΤΗΣ ΤΗΣ ΞΑΝΘΗΣ

Στην περιοχή της Θράκης υπάρχουν αρκετά τριτογενή πλουτωνικά πυριγενή σώματα που διεισδύουν τόσο στην Περιοδοπική ζώνη όσο και στη μάζα της Ροδόπης. Πολλοί συγγραφείς (Χριστοφίδης 1977, Soldatos and Christofides 1986, Κυριακόπουλος 1987, Del Moro et al. 1988, Maltezou and Brooks 1989, Christofides 1990, Christofides et al. 1990, Δορυφόρου 1990, Koukouvelas and Pe-Piper 1991, Christofides et al. 1998) έχουν μελετήσει τις πλουτωνικές αυτές διεισδύσεις που εντοπίζονται στην Ξάνθη, στην Ελατιά, στη Μαρώνεια, στη Λεπτοκαρυά-Κίρκη, στις Τρείς Βρύσες, στα Χαλάσματα, στο Παρανέστι, στα Κασσιτερά και στη Σαμοθράκη. Οι Del Moro et al. (1988), που συσχέτισαν μερικά από τα παραπάνω πυριγενή σώματα, διαπίστωσαν μία ποικιλία στη σύστασή τους, από χαλαζιακούς γάββρους έως γρανοδιορίτες με τους χαλαζιακούς μονζονίτες να υπερτερούν. Οι παραπάνω συγγραφείς προσδιόρισαν με ραδιοχρονολογήσεις τις ηλικίες των πλουτωνιτών που κυμαίνονται από 28 έως 32 Ma, δηλαδή στο Άνω Ολιγόκαινο και συνδέονται με μία εφελκυστική τεκτονική που έλαβε χώρα κατά την εξέλιξη της υποβύθισης της Νεοτηθούς κάτω από την Ελληνική Ενδοχώρα.

Η περιοχή της Ξάνθης γεωλογικά ανήκει στη μάζα της Ροδόπης. Λιθολογικά η ζώνη της Ροδόπης αποτελείται κυρίως από μεταμορφωμένα πετρώματα που διακόπτονται από πυριγενείς διεισδύσεις, πλουτωνικές και ηφαιστειακές.

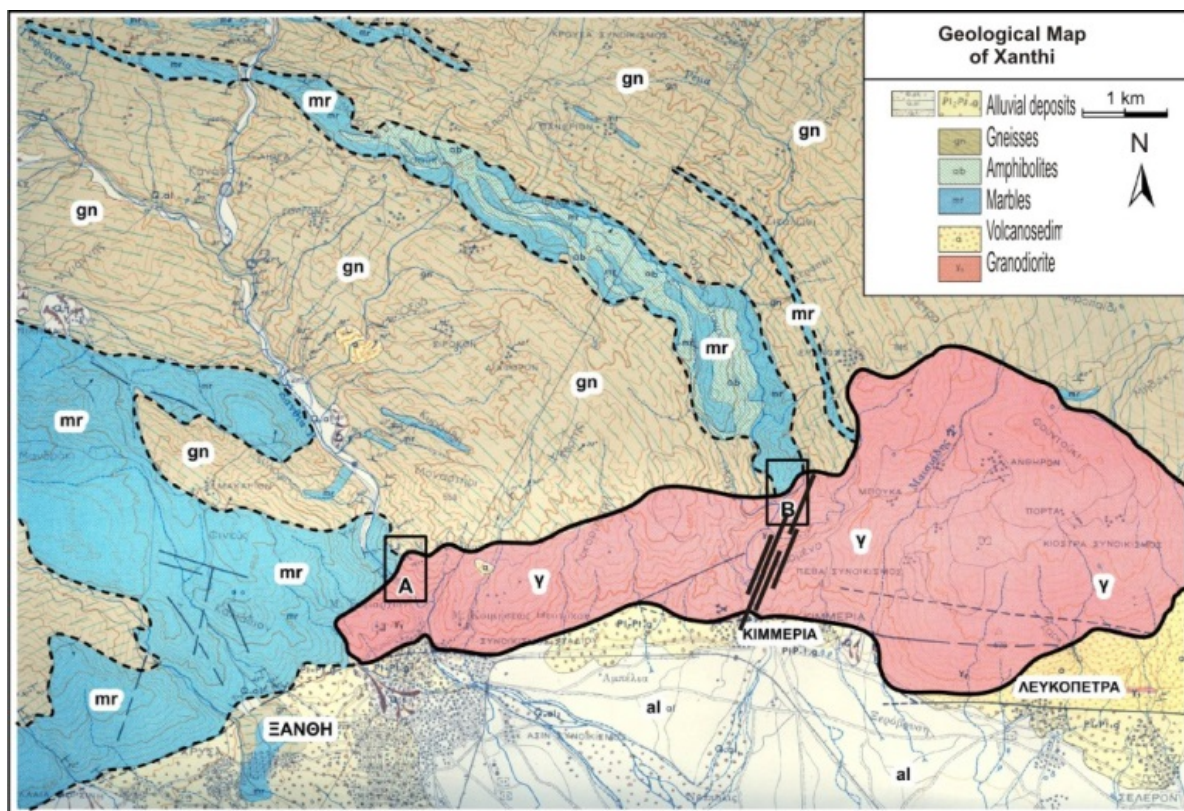
Ο πλουτωνίτης της Ξάνθης έχει φακοειδές σχήμα με κατεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ και καταλαμβάνει επιφανειακή έκταση 40 km<sup>2</sup> περίπου (Σχ. 3.1). Διεισδύει μέσα στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της μάζας της Ροδόπης και η ηλικία του έχει υπολογιστεί 27 με 28 Ma (Κυριακόπουλος 1987, Christofides et al. 1998). Ο Ολιγοκαινικός πλουτωνίτης της Ξάνθης χαρακτηρίζεται από διάφορους πετρογραφικούς τύπους. Ο βιοιτιτικός-κεροστιλβικός γρανοδιορίτης καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού του πλουτωνίτη. Σε μικρότερο ποσοστό εντοπίζονται ακόμη μονζονίτης, χαλαζιακός μονζοδιορίτης, μονζογάββρος και γάββρος (Χριστοφίδης 1977). Σημαντική είναι η παρουσία εγκλεισμάτων καθώς επίσης και απλιτικών και πηγματιτικών φλεβών μέσα στους παραπάνω πετρογραφικούς τύπους. Τα κύρια ορυκτά συστατικά των παραπάνω πετρογραφικών τύπων είναι:

- Γρανοδιορίτης: χαλαζίας και άστριοι (πλαγιόκλαστα και K-άστριοι) ως σαλικά και, κεροστίλβη και βιοτίτης ως φεμικά ορυκτά

- Μονζονίτης: άστριοι (πλαγιόκλαστα και K-άστριοι) και λίγος χαλαζίας ως σαλικά και, βιοτίτης και πυρόξενος ως φεμικά ορυκτά
- Γάββρος: πλαγιόκλαστα, πυρόξενοι και λίγος ολιβίνης

Ως επουσιώδη ορυκτά υπάρχουν το επίδοτο, ο απατίτης, το ζirkόνιο, ο μαγνητίτης, ο χλωρίτης και ο ασβεστίτης.

Κατά τη διείσδυση του πλουτωνίτη στην επαφή με τα μάρμαρα, τους γνευσίους και τους αμφιβολίτες δημιουργήθηκε μια ζώνη θερμομεταμόρφωσης λόγω επαφής με το θερμό μάγμα. Έτσι, στην κατώτερη και στην ανώτερη τεκτονική ενότητα της μάζας της Ροδόπης σχηματίστηκαν κερατιτικά και μεταλλοφόρα skarn.



Σχήμα 3.1 Ο πλουτωνίτης της Ξάνθης, εμφανίσεις skarn (A, B) και το σύστημα φλεβών που διασχίζουν το πέτρωμα.

Σύμφωνα με τον Christofides (1996) η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου του πλουτωνίτη της Ξάνθης κυμαίνεται μεταξύ 44 και 78 κ.β. %. Η διάκριση των πετρωμάτων σε μία γαββρική-μονζονιτική ομάδα και σε μία γρανοδιοριτική είναι εμφανής σε όλα τα διαγράμματα των στοιχείων. Κάποια από τα στοιχεία όπως το βάριο και το ζirkόνιο συμπεριφέρονται ως ασυμβίβαστα στην πρώτη ομάδα ενώ στη συνέχεια γίνονται συμβατά μεταπίπτοντας στην γαββρική ομάδα. Το  $\text{K}_2\text{O}$  και το Rb αυξάνονται με το  $\text{SiO}_2$ ,

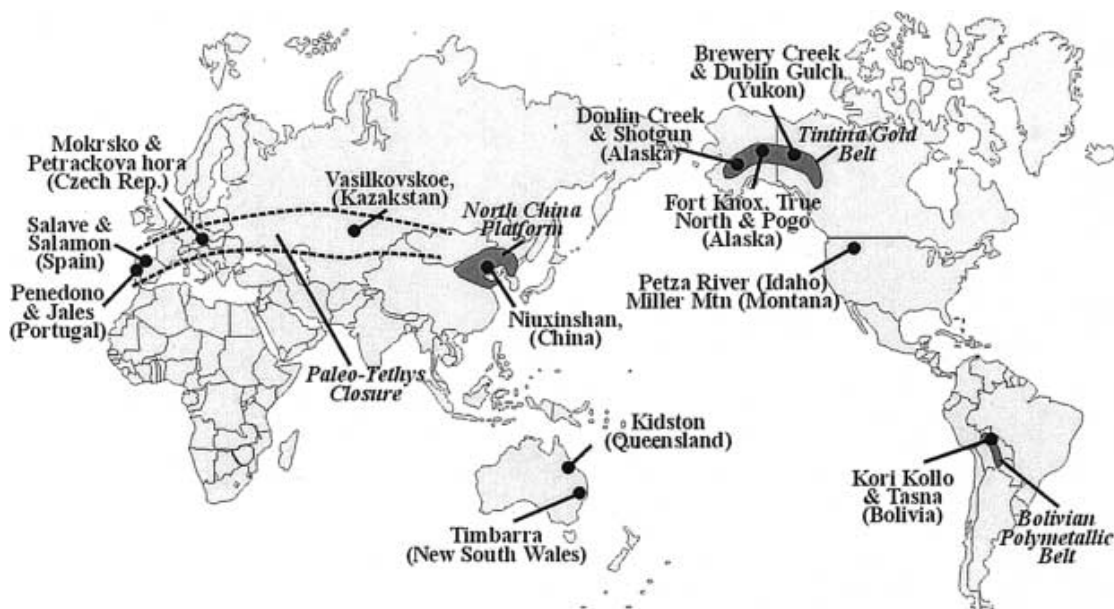
αλλά με διαφορετικές τάσεις. Στα γραβρο-μονζονιτικά πετρώματα είναι πιο απότομη η τάση. Οι ελαφριές σπάνιες γαίες (LREE) είναι εμπλουτισμένες και η ανωμαλία Eu είναι διακριτά αρνητική. Ο πλουτωνίτης της Ξάνθης θεωρείται ότι έχει χαρακτηριστικά γρανιτών ηφαιστειακού τόξου (VAG: volcanic arc granites) (Koukouvelas and Pe-Piper 1989). Αρχικοί λόγοι  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  από 0.7045-0.7075 (Kyriakopoulos 1987, Christofides 1989) δείχνουν τη συμμετοχή ανώτερου μανδύα/κατώτερου φλοιού για την εξέλιξη των πυριγενών πετρωμάτων της Ξάνθης.

Εκείνο που χαρακτηρίζει τον πλουτωνίτη της Ξάνθης είναι η μεταλλοφορία της περιοχής που συνδέεται με τη μαγματική διείσδυση συγκεντρώνεται κυρίως στην περιοχή του χωριού Κιμμέρια όπου έχουμε εμφανίσεις Mo – Cu φλεβικού τύπου και Fe – Cu – W – Au τύπου skarn.

#### 4. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΜΕ ΜΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΕΙΣ (INTRUSION-RELATED)

Ο όρος intrusion-related systems, δηλαδή συστήματα που συνδέονται με διεισδύσεις, αναφέρεται σε μια ομάδα μεταλλοφοριών ή κοιτάσμάτων τα οποία φιλοξενούνται στο εσωτερικό πυριγενών πετρωμάτων και εκτείνονται στα γειτονικά πετρώματα. Λόγω της τοποθέτησής τους και της σχετικά σπάνιας εμφάνισής τους έχουν προταθεί να αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία μαγματικών-υδροθερμικών συστημάτων. Τα περισσότερα intrusion-related systems αναφέρονται σε κοιτάσματα χρυσού κι έτσι συχνά αποκαλούνται ως intrusion-related gold systems.

Όσον αφορά την ονομασία τους αυτά τα κοιτάσματα ονομάζονταν παλιότερα, «πορφυριτικά κοιτάσματα χρυσού» (Hollister 1992, Bakke 1995), «φλεβικά διεισδυτικά κοιτάσματα» (“intrusion-related stockwork-disseminated deposits”) (Sillitoe 1991), «πλουτωνικά κοιτάσματα χρυσού» (Newberry et al. 1988, McCoy et al. 1997) και «διεισδυτικά κοιτάσματα χρυσού» (Thompson et al. 1999). Σύμφωνα με τους Lang et al. (2000) ο καταλληλότερος όρος για αυτά τα κοιτάσματα είναι intrusion-related gold systems διότι αντικατοπτρίζει μια κοινή τάση σε όλα τα μαγματικά-υδροθερμικά περιβάλλοντα να σχηματίζουν κοιτάσματα τα οποία εμφανίζουν ποικίλες μορφές, μεταλλικές συγκεντρώσεις και χωρικές σχέσεις με τα σχετιζόμενα κέντρα διείσδυσης.



**Σχήμα 4.1** Τοποθεσία των περισσότερων αναγνωρισμένων intrusion-related systems και των σχετικών πλουτωνικών επαρχιών. Διάγραμμα κατά Thompson et al. (1999) και Lang et al. (2000)

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη μελέτη και στην έρευνα αυτών των κοιτασμάτων λόγω της παγκόσμιας κατανομής τους και του μεγάλου αριθμού των αποθεμάτων τους, κυρίως σε χρυσό αλλά και σε σπάνια μέταλλα (Te, Bi, W κ.α). Σημαντικά παραδείγματα τέτοιων κοιτασμάτων αποτελούν τα Fort Knox (~210t Au), Donlin Creek (~315t Au), Pogo (~160t Au), Dublin Gulch, True North and Brewery Creek (~40t Au το καθένα) στο Yukon του Καναδά και στην Alaska των ΗΠΑ, καθώς και το Mokrsko στην Τσεχία (~120t Au), το Vasilkovskoe στο Καζακστάν (~300t Au), το Salave στην Ισπανία (~30t Au), Korri Kollo στη Βολιβία (~160t Au) και το Kidston στην Αυστραλία (~140t Au) (Σχ. 4.1).

#### **4.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ INTRUSION – RELATED SYSTEMS**

Από παλιότερες μελέτες δεν υπάρχουν λεπτομερείς περιγραφές για τα intrusion-related systems και κατ' επέκταση ούτε για τις πλουτωνικές επαρχίες που φιλοξενούν αυτά τα συστήματα, αλλά ούτε και για τις γενετικές διεργασίες που είναι απαραίτητες για τον σχηματισμό τους. Αυτή η ανεπάρκεια δεδομένων των συστημάτων αυτών οριοθετούν άμεσα την ικανότητα είτε να αναπτυχθούν συγκεκριμένα κριτήρια για τον ορισμό τους, είτε να διατυπωθούν οριοθετημένα γεωλογικά και ερευνητικά μοντέλα.

Ωστόσο μελέτες δείχνουν (Lang and Baker 2001) ότι υπάρχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά που διαχωρίζουν περισσότερα κοιτάσματα και επαρχίες των intrusion-related συστήματα από άλλους τύπους κοιτασμάτων και είναι τα εξής:

- Διεισδύσεις μεταργλικές, υποαλκαλικές ενδιάμεσης έως όξινης σύστασης που βρίσκονται κοντά στο όριο μεταξύ της σειράς ιλμενίτη και της σειράς μαγνητίτη
- ανθρακικά υδροθερμικά διαλύματα
- συγκέντρωση μετάλλων κυρίως Au με αυξημένες περιεκτικότητες Bi, W, As, Mo, Te, Sb και γενικά χαμηλές συγκεντρώσεις σε βασικά μέταλλα
- χαμηλή περιεκτικότητα σε θειούχα ορυκτά, συνήθως <5 κ.ο.%, με μειωμένη συγκέντρωση μεταλλεύματος που τυπικά περιλαμβάνει αρσеноπυρίτη, μαγνητοπυρίτη και σιδηροπυρίτη με απουσία μαγνητίτη ή αιματίτη

- περιορισμένη, συνήθως ασθενή υδροθερμική εξαλλοίωση των συστημάτων αυτών, με εξαίρεση τα συστήματα που σχηματίζονται σε μικρότερα βάθη
- γεωτεκτονικό περιβάλλον στα όρια σύγκλισης λιθοσφαιρικών πλακών, όπου ηπειρωτικός μαγματισμός συνήθως περιλαμβάνει διεισδύσεις αλκαλικής, μεταργιλικής ασβεσταλκαλικής και υπεραργιλικής σύστασης
- τα συστήματα αυτά εντοπίζονται σε μαγματικές επαρχίες που ήταν παλαιότερα γνωστές για κοιτάσματα βολφραμίου ή κασσίτερου

Γενικά, έχει προσδιοριστεί ότι ο σχηματισμός των κοιτασμάτων αυτών έχει γίνει κατά το Φανεροζωϊκό αν και κάποια από αυτά έχουν δημιουργηθεί κατά τη διάρκεια του Προτεροζωϊκού ή και ακόμη του Αρχαϊκού αιώνα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χρυσοφόρος ζώνη Tintina της ανατολικής Αλάσκας και του κεντρικού Yukon στο βορειότερο τμήμα της Βόρειας Αμερικανικής Κορδιλιέρας είναι μέχρι στιγμής η πιο εκτεταμένα μελετημένη επαρχία των intrusion-related systems. Αυτή η ζώνη έχει μήκος περίπου 1000 km και περιέχει μεταλλοφορίες χρυσού που σχηματίστηκαν από τις αρχές του Κρητιδικού μέχρι το Ηώκαινο και ως εκ τούτου, η ζώνη χρυσού Tintina αποτελεί σήμερα το κύριο πρότυπο των intrusion-related systems (Newberry et al. 1995, McCoy et al. 1997, Goldfarb et al. 2000, Lang et al. 2000).

## **4.2. ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΩΝ INTRUSION – RELATED SYSTEMS**

Το γεωλογικό μοντέλο που έχει προταθεί για τα intrusion-related systems βασίζεται στη μελέτη της ζώνης χρυσού Tintina αλλά επίσης αφορά και κοιτάσματα που βρέθηκαν σε άλλες επαρχίες (McCoy et al. 1997, Thompson et al. 1999, Hart et al. 2000, Lang et al. 2000, Newberry 2000). Το βασικό χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι η κατακόρυφη και πλευρική ζώνωση που παρατηρείται στα μεταλλικά στοιχεία, στην μορφή και τον τύπο των μεταλλοφοριών και στα χαρακτηριστικά των υδροθερμικών διαλυμάτων.

Σύμφωνα με τους Thompson et al. (1999) το γεωτεκτονικό περιβάλλον στο οποίο έχουν σχηματιστεί πλουτωνικές διεισδύσεις που φιλοξενούν intrusion-related systems ποικίλει αφού έχουν προταθεί περιβάλλοντα όπως η οπισθοτόξια λεκάνη (back-arc), η περιοχή μπροστά από το τόξο τάφρος (foreland), πτυχωμένα περιβάλλοντα σύγκρουσης και μετά τη σύγκρουση καθώς και περιβάλλοντα μαγματικού τόξου. Επιπλέον, οι Goldfarb et al. (2000) εξέτασαν το γεωτεκτονικό περιβάλλον πολλών πλουτωνικών επαρχιών τα

οποία φιλοξενούν intrusion-related systems και συμπεράνε ότι περιβάλλοντα σύγκρουσης και υποβύθισης που σχετίζονται με ορογενή ίσως είναι το πιο ευνοϊκό περιβάλλον. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτού του τύπου περιβάλλοντος που σχετίζονται με μεγάλα, intrusion-related κοιτάσματα είναι τα Μεσοζωικά πετρώματα στη Βόρεια πλατφόρμα της Κίνας που έχουν υποστεί πολλαπλά επεισόδια τεκτονικών γεγονότων και το Παλαιοζωικό ορογενές Βαρίσκειας ηλικίας που εκτείνεται στο μεγαλύτερο μέρος της κεντρικής Ασίας και στη βόρεια Κίνα. Η φύση του θερμού φλοιού και πιθανά επεισόδια ελασματοποίησης σε περιβάλλοντα σύγκρουσης έχουν επίσης προταθεί από τους Goldfarb et al. (2000) και εν μέρει δίνουν μία εξήγηση όσον αφορά τον χαρακτήρα του μαγματισμού και τις συγκεκριμένες θέσεις καταβύθισης σε πολλές επαρχίες που φιλοξενούν intrusion-related συστήματα.

Σύμφωνα με μελέτη στη ζώνη χρυσού Tintina από τον Flanigan et al. (2000) έδειξε ότι τα intrusion-related συστήματα μπορούν να σχηματιστούν σε ένα τεκτονικό περιβάλλον του οποίου η μορφή μεταβάλλεται σε όλη την έκταση τόσο σε χρόνο όσο και σε χώρο. Οι παρόμοιες μορφές των intrusion-related συστημάτων σε ένα ευρύ φάσμα τεκτονικών περιβαλλόντων υποδηλώνει ότι δεν απαιτείται μόνο ένα τεκτονικό καθεστώς για τον σχηματισμό τους.

Οι πυριγενείς εστίες που συνδέονται με τα intrusion-related συστήματα σχηματίζουν συμπλέγματα πολλαπλών φάσεων, τα οποία αναπτύσσονται και ψύχονται ραγδαία. Τα συμπλέγματα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν βαθύλιθους<sup>1</sup>, μεγάλους ή μικρούς πλουτωνίτες, συμπλέγματα δόμων, ή φλέβες (εγκάρσιες φλέβες ή φλέβες λάβας) και στρωματοειδής διεισδύσεις. Τα πυριγενή πετρώματα περιβάλλονται από μεταμορφωμένες ωρεόλες<sup>2</sup> που κυμαίνονται σε μέγεθος. Για παράδειγμα στο Yukon και την Alaska οι σχηματισμοί αυτοί μπορούν να φτάσουν σε πλάτος αρκετά χιλιόμετρα και συνήθως περικλείουν αρκετά διακριτά διεισδυτικά σώματα εντός μιας περιοχής ενώ στο βόρειο τμήμα της Iberia η μεταμόρφωση λόγω επαφής είναι πολύ περιορισμένη. Ηφαιστειακά πετρώματα που είναι σύγχρονα με τις διεισδύσεις εντοπίζονται στα συστήματα που δεν έχουν υποστεί βαθιά διάβρωση, όπως για παράδειγμα στο Kori Kollo, στη Βολιβία και στο Kidston της Αυστραλίας. Η σύσταση των πυριγενών πετρωμάτων σε

---

<sup>1</sup> Πρόκειται για ασύμφωνο πλουτωνίτη μεγάλων διαστάσεων που μπορεί να σχηματίζει τον πυρήνα πολλών μεγάλων οροσειρών. Οι περισσότεροι βαθύλιθοι αποτελούνται από γρανιτικά πετρώματα. Γύρω από το βαθύλιθο στα πετρώματα που έχει εισχωρήσει δημιουργείται ζώνη μεταμορφώσεως επαφής

<sup>2</sup> όρος αυτός χαρακτηρίζει τη μεταμόρφωση επαφής των πετρωμάτων στην περιφέρεια μιας μαγματικής διεισδύσεως. Αναφέρεται στη ζωνώδη ορυκτολογική και ιστολογική κατανομή που παρατηρείται από την εστία μεταμορφώσεως όπου και η μέγιστη θερμοκρασία προς το μη μεταμορφωμένο υλικό δια μέσου πετρωμάτων χαμηλού βαθμού μεταμορφώσεως

αυτά τα μαγματικά κέντρα ποικίλει σημαντικά με τα πιο κοινά είδη πετρωμάτων να είναι μεταργιλικής, υποαλκαλικής ενδιάμεσης έως φελσικής/όξινης συστάσης.

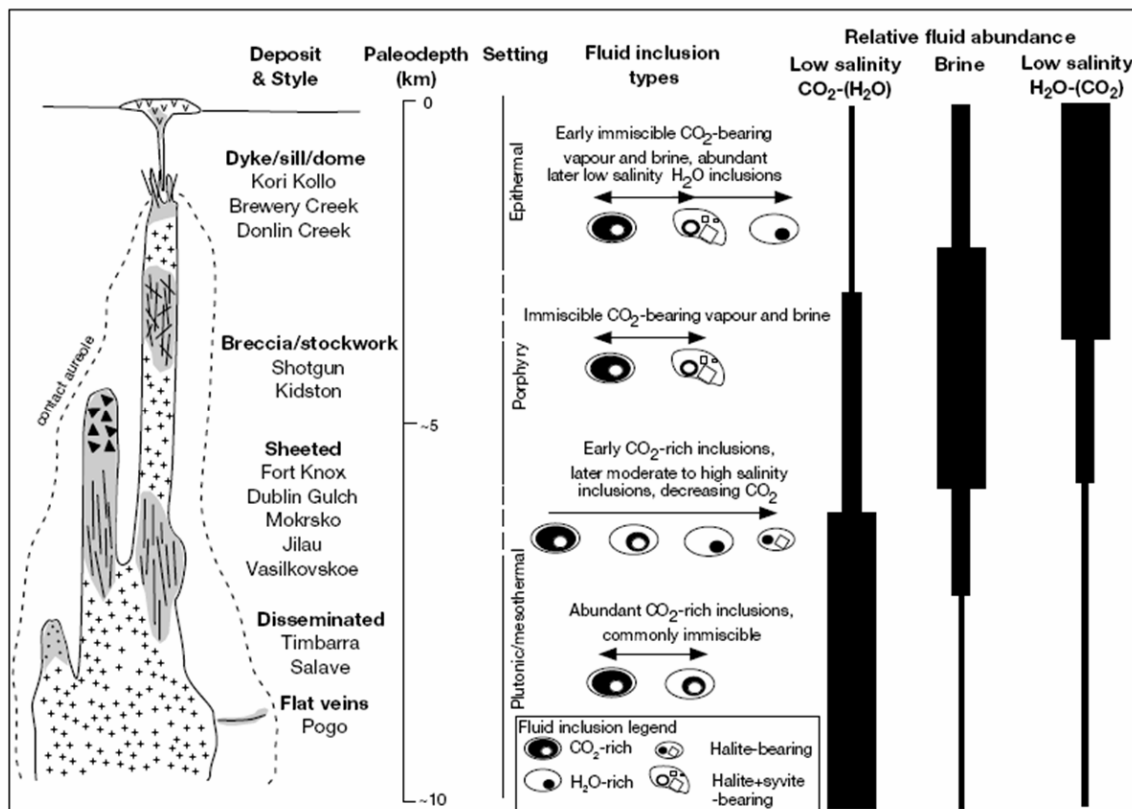
Η σχετική κατάσταση οξείδωσης των διεισδύσεων σε αυτά τα συστήματα έχει συζητηθεί από διάφορους συγγραφείς (Thompson et al.1999). Αν και αυτή η παράμετρος ποικίλει σημαντικά μεταξύ των συστημάτων, οι περισσότερες διεισδύσεις μπορούν να ταξινομηθούν ως υποαλκαλικές, μεταργιλικές, I-τύπου. Η ταξινόμηση βασίζεται τόσο στη γεωχημική σύσταση όσο και στην παρουσία ιλμενίτη χωρίς ή με ίχνη μαγνητίτη. Αρκετές διεισδύσεις περιέχουν σημαντικές ποσότητες μαγνητίτη και ιλμενίτη που φανερώνουν σχετικά πιο οξειδωτικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η εμφάνιση τέτοιων διεισδύσεων στη Timbarga ίσως υποδηλώνει την τοποθέτηση των μαγμάτων μέσα σε ένα προϋπάρχοντα βαθύλιθο και όχι μέσα σε περιορισμένης έκτασης μεταϊζηματογενή πετρώματα. Οι αλκαλικές διεισδύσεις έχουν μαγνητίτη-τιτανίτη, ενώ οι μεταργιλικές διεισδύσεις είναι κατά κανόνα πλούσιες σε ιλμενίτη. Εμπειρικά γεωχημικά μοντέλα, όπως αυτό που προτάθηκε από τους Leveille et al. (1988) και Newberry et al. (1995), στα οποία χρησιμοποιούνται δείκτες που σχετίζονται με την αλκαλικότητα και την κατάσταση οξείδωσης, προσπάθησαν να αξιοποιήσουν αυτές τις σχέσεις προκειμένου να γίνει διάκριση των διεισδύσεων των οποίων οι συνθήκες μπορεί να είναι ευνοϊκές για το σχηματισμό κοιτασμάτων χρυσού.

Ο ρόλος των μαγματικών διεργασιών κατά το σχηματισμό των intrusion-related συστημάτων είναι ελάχιστα κατανοητός, αλλά ίσως ο πιο κρίσιμος παράγοντας για την απόλυτη κατανόησή των κοιτασμάτων αυτών. Οι σημαντικότερες μαγματικές διεργασίες που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής είναι η πηγή του μάγματος, η διαφοροποίηση του μάγματος, η σύσταση των πτητικών και ο διαχωρισμός τους. Ισοτοπικά δεδομένα των μαγματικών πετρωμάτων δείχνουν μία πηγή από τον παλαιό ηπειρωτικό φλοιό, αν και δεν μπορεί να αποκλειστεί μια μικρή, αλλά ενδεχομένως σημαντική προσφορά υλικού από τον ασθενοσφαιρικό μανδύα. Οι Keith et al. (1998) πρότειναν ότι η επίδραση βασικών αλκαλικών τηγμάτων μπορεί είτε να παρέχει πτητικά ή/και μεταλλικά στοιχεία στο ασβεσταλκαλικό τήγμα, είτε να συμπεριφέρεται ως καταλύτης στη συνεχή ροή των πτητικών και στη μεταφορά των μεταλλικών στοιχείων εντός αυτών των τηγμάτων. Κάθε μια από τις δύο αυτές διεργασίες θα μπορούσε να είναι σημαντική για τη μεταλλογένεση στα intrusion-related συστήματα.

Η κλασματική κρυστάλλωση αποτελεί επίσης μια σημαντική διαδικασία για τον σχηματισμό των intrusion-related συστημάτων. Σε πολλές περιπτώσεις η μεταλλοφορία χρυσού είναι χωρικά και χρονικά συνδεδεμένη με τις πιο εξελιγμένες φάσεις των

μαγματικών συμπλεγμάτων. Η σημασία του προχωρημένου σταδίου της κλασματικής κρυστάλλωσης και η ταυτόχρονη μετάβαση από το μαγματικό στο υδροθερμικό στάδιο διακρίνεται σε πολλά συστήματα του Yukon και στο προχωρημένο στάδιο της Timbarra, όπου σχηματίστηκαν απλίτες και πηγματίτες, καθώς και χρυσοφόρες φλέβες χαλαζία. Αυτό δείχνει ότι τα μεταλλοφόρα ρευστά συγκεντρώθηκαν στην τελική φάση κρυστάλλωσης των διεισδύσεων.

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι άφθονο στα ρευστά εγκλείσματα των υδροθερμικών φλεβών των intrusion-related συστημάτων. Οι McCoy et al. (1997),



**Σχήμα 4.2** Σχηματικό γεωλογικό μοντέλο που δείχνει τη σχέση μεταξύ των intrusion-related gold systems, των παλαιοεδαφών και των τύπων των υδροθερμικών ρευστών (προέρχεται από ένα συνδυασμό των Lang et al, 2000, Baker and Lang 2001, Lang and Baker 2001).

Thompson et al. (1999) και Baker and Lang (2001) έχουν υποστηρίξει την ύπαρξη μιας μαγματικής πηγής για τα ρευστά αυτά. Το αυξημένο διοξείδιο του άνθρακα στα μάγματα έχει μεγάλη επίδραση τόσο για την παραγωγή μάγματος, όσο και για την κρυστάλλωση. Πειραματικές μελέτες από τους Kaszuba and Wandlandt (2000) προτείνουν ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι ζωτικής σημασίας για την δημιουργία αλκαλικού μάγματος στον ηπειρωτικό φλοιό. Ο Touret (1992) επίσης υποστηρίζει ότι το διοξείδιο του άνθρακα παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στη δημιουργία μαγμάτων του μανδύα, όσο και στην μετανάστευση και συσσώρευσή τους στο εσωτερικό του φλοιού. Η επίδραση του

διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια των διαδικασιών κρυστάλλωσης στα ενδιάμεσα τήγματα εξαρτάται κυρίως από την πολύ χαμηλή διαλυτότητά του, συγκριτικά με το νερό, η οποία οδηγεί σε διαχωρισμό των ανθρακικών ρευστών πριν από την μείωση των ένυδρων υγρών σε υψηλότερες πιέσεις. Αυτό μπορεί να εξηγήσει την παρουσία των intrusion-related συστημάτων σε ένα ευρύ φάσμα βάθους, συγκριτικά με τα φτωχά σε διοξείδιο του άνθρακα κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού. Συνεπώς, η παρουσία του άφθονου διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να αποτελεί μια σημαντική επίδραση σε όλα τα στάδια της εξέλιξης των intrusion-related συστημάτων, από τον αρχικό σχηματισμό μάγματος έως το προχωρημένο στάδιο κλασματικής κρυστάλλωσης και τον πτητικό διαχωρισμό.

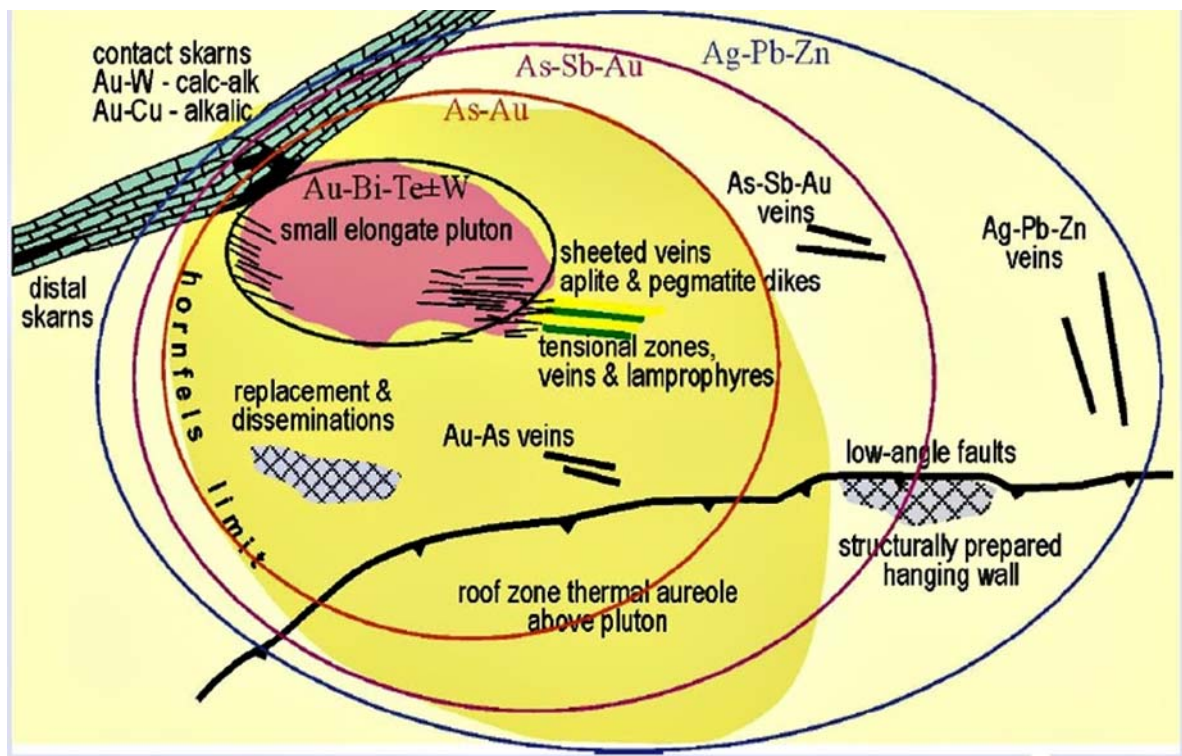
Στα intrusion-related κοιτάσματα παρατηρείται μια διαφοροποίηση των υδροθερμικών ρευστών σε σχέση με το βάθος. Τα κοιτάσματα που σχηματίζονται σε μικρού βάθους περιβάλλοντα συνήθως χαρακτηρίζονται υψηλές θερμοκρασίες ( $>350^{\circ}\text{C}$ ), και από τη μη αναμειξιμότητα δύο διαλυμάτων ενός υδατικού με υψηλή αλατότητα ( $>30\text{ wt\% NaCl}$ ) και ενός χαμηλής αλατότητας ( $<5\text{ wt\% NaCl}$ ), με διοξείδιο του άνθρακα (Σχ. 4.2). Τα κοιτάσματα βαθύτερων περιβαλλόντων περιέχουν άφθονα ρευστά υδάτινης φάσης χαμηλής αλατότητας, πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα ( $<10\text{ wt\% NaCl}$ ), τα οποία σε κάποια κοιτάσματα χαρακτηρίζονται από μέτρια έως υψηλή αλατότητα.

#### **4.3. ΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ, ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ**

Τα μεταλλοφόρα intrusion-related κοιτάσματα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, όσον αφορά τη μορφή και τη θέση τους σε σχέση με τα κέντρα διείσδυσης. Οι McCoy et al. (1997), Thompson et al. (1999), Hart et al. (2000), Lang et al. (2000) και ο Newberry (2000) έχουν περιγράψει τα διάφορα μοντέλα ζώνωσης.

Οι Hart et al. (2000) διέκριναν τρεις κατηγορίες κοιτασμάτων που δημιουργούν χαρακτηριστική ζώνωση ανάλογα με τη χωρική τους σχέση με τις διεισδύσεις: αυτά που βρίσκονται μέσα στους πλουτωνίτες, αυτά που εντοπίζονται σε μικρή απόσταση από αυτούς (proximal) και τα απομακρυσμένα (distal) κοιτάσματα (Σχ. 4.3). Τα κοιτάσματα μέσα στους πλουτωνίτες είναι συχνά χρυσοφόρα, αναπτύσσονται σε συστήματα φλεβών και χαρακτηρίζονται από μεταλλικές συγκεντρώσεις  $\text{Au-Bi}\pm\text{Te}\pm\text{As}\pm\text{Mo}\pm\text{W}$ . Ο χρυσός και τα μεταλλικά ορυκτά μπορεί επίσης να βρεθούν σε κοιλότητες εντός των πλουτωνιτών, καθώς και μέσα σε πηγματίτες ή/και απλίτες που διαπερνούν μαγματικές διεισδύσεις. Τα

κοιτάσματα σε μικρή απόσταση από τους πλουτωνίτες βρίσκονται στα γειτονικά πετρώματα που φιλοξενούν τις διεισδύσεις και μέσα στην άλω της θερμικής μεταμόρφωσης. Κοινοί τύποι μεταλλοφορίας είναι τα Skarn  $W\pm Cu\pm Au$  και  $Cu-Bi-Au\pm W$ , υψηλής έως χαμηλής αντικατάστασης του θείου στα ανθρακικά πετρώματα, τα λατυποπαγή που φέρουν κασσίτερο και είναι πλούσια σε χαλκό, τα φλεβικά κοιτάσματα και οι διασπορές μέσα σε μεταϊζηματογενή πετρώματα ξενιστές. Οι περιφερειακές απομακρυσμένες μεταλλοφορίες βρίσκονται πέρα από το εξωτερικό όριο του skarn. Αυτά περιλαμβάνουν χρυσοφόρες, μεσοθερμικού έως επιθερμικού τύπου χαλαζιακές-θειούχες φλέβες κατά μήκος ρηγμάτων συχνά με μεγάλη κλίση, υδροθερμικά λατυποπαγή και μεταλλικές φλέβες πλούσιες σε  $Ag\pm Au$ , διασπορές με  $Au$  σε ποικίλα ανθρακικά και μεταϊζηματογενή πετρώματα ξενιστές (Poulsen 1996). Τα περιφερειακά κοιτάσματα έχουν ένα τυπικό χαρακτήρα με  $Au-As-Sb\pm Hg$ . Οι κατακόρυφες μεταβολές στις μορφές των κοιτασμάτων αποτελούν λιγότερο χαρακτηριστικό γνώρισμα στα intrusion-related συστήματα, αλλά περιλαμβάνουν διαφορές όσον αφορά τη σπουδαιότητα των πλαστικών και θραυστιγενών δομών, το βαθμό της πλευρικής διασποράς ή της συγκέντρωσης των υδροθερμικών ρευστών, το χαρακτήρα των μετάλλων και την σύσταση των υδροθερμικών ρευστών (Lang et al. 2000, Newberry 2000). Προσχωματικά κοιτάσματα χρυσού και πιο σπάνια βολφραμίου ή κασσίτερου, συνήθως προέρχονται από intrusion-related συστήματα και αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα για αναζήτηση και έρευνα για πιθανά κοιτάσματα χρυσού σε πολλές μεταλλογενετικές επαρχίες (Goldfarb et al. 2000).



**Σχήμα 4.3** Γενικό μοντέλο των intrusion-related gold systems από την επαρχία χρυσού Tintina. Παρουσιάζεται ευρύ φάσμα των ορυκτολογικών μορφών και των γεωχημικών μεταβολών που ποικίλει προς την περιφέρεια (Hart et al. 2002).

Η υδροθερμική εξαλλοίωση των intrusion-related συστημάτων είναι περιορισμένη και μπορεί να περιλαμβάνει αστρίους, σερεκίτη, πυριτιώσεις, greisen<sup>3</sup>, ασβεστοπυριτικές ή/και αργλικές παραγενέσεις (Malloof et al. 2001). Η εξαλλοίωση των αστρίων σε αλβίτη ή/και K-άστρο επικρατεί ενώ η πυριτική αλλοίωση αναγνωρίζεται μόνο τοπικά. Η ασβεστοπυριτική εξαλλοίωση περιορίζεται στο skarn κοντά στις μαγματικές διεισδύσεις. Η αλλοίωση μέσα στις διεισδύσεις είναι συνήθως περιορισμένη περιφερειακά των φλεβών, δείχνοντας μία πολύ περιορισμένη ροή των ρευστών. Η κατανομή της αλλοίωσης στα γειτονικά πετρώματα στις περισσότερες περιπτώσεις εκτείνεται σε δομές που σχηματίστηκαν πριν και κατά τη διάρκεια της διείσδυσης.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό σε intrusion-related συστήματα είναι ότι ο χρυσός σχηματίστηκε σε υδροθερμικές συνθήκες σε ποικίλες θερμοκρασίες. Μεμονωμένα συστήματα μπορούν να περιέχουν χρυσό σε μιαιολιθικές κοιλότητες, σε πηγματίτες και απλίτες, καθώς και σε υδροθερμικές φλέβες που σχηματίζονται σε θερμοκρασίες από >500 έως <250°C (Baker and Lang 2001).

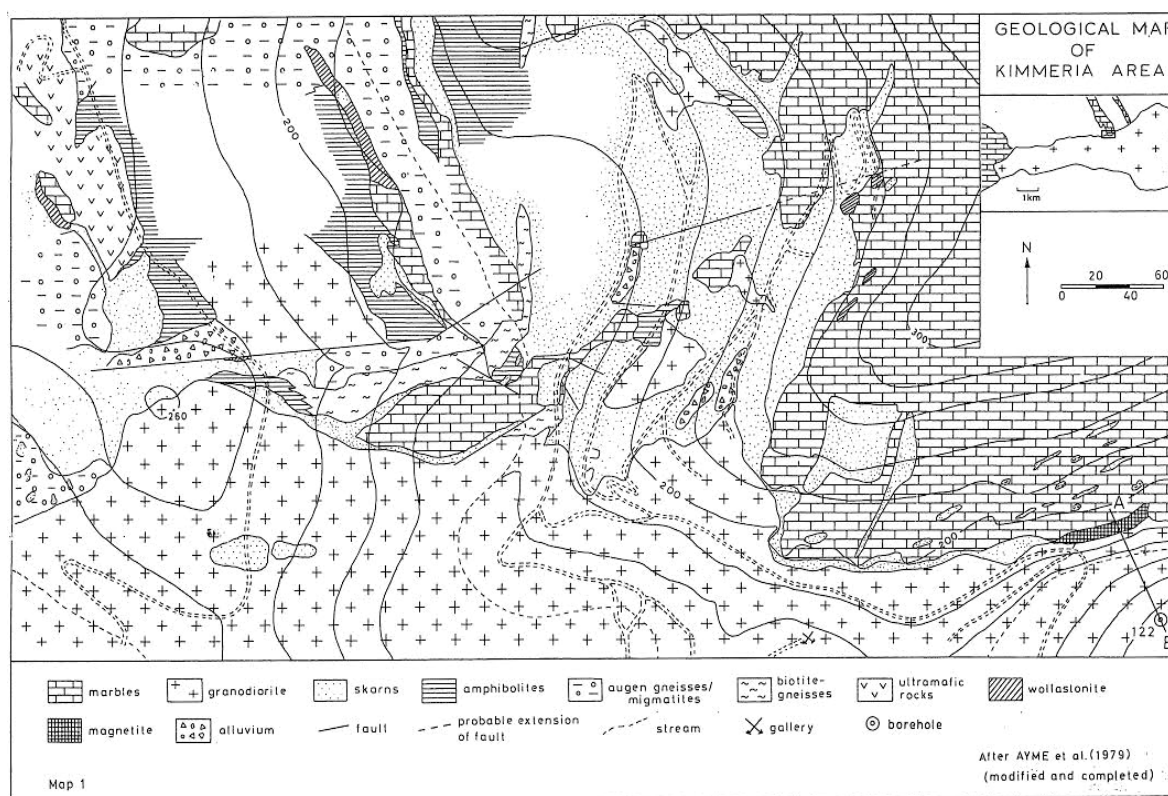
<sup>3</sup> εξαιρετικά εξαλλοιωμένο γρανιτικό πέτρωμα ή πηγματίτης

Σε ότι αφορά τη μεταλλοφορία τα intrusion-related συστήματα τυπικά περιέχουν από 1 έως 3 vol% μεταλλικά θειούχα ορυκτά (Bakke 1995). Ωστόσο αρκετά κοιτάσματα ή υπο-ζώνες μέσα στα κοιτάσματα, όπως για παράδειγμα το Salave στην Ισπανία, το Kori Kollo στη Βολιβία και το Niuxinshan στην Κίνα, μπορεί να περιέχουν >20 vol% μεταλλικά ορυκτά. Η συγκέντρωση θειούχων ορυκτών στα γειτονικά πετρώματα είναι συνήθως υψηλότερη, ιδιαίτερα στις περιφερειακές φλέβες και στα skarn. Η ορυκτολογία του μεταλλεύματος αποτελείται από παραγενέσεις του τελλουρίου, βισμούθιου, χρυσού, θειοαλάτων και σουλφιδίων (Mc Coy et al., 1997). Σε πολλά κοιτάσματα, ο χρυσός σχετίζεται ισχυρά με το βισμούθιο, σε μικρότερο αλλά σημαντικό βαθμό με το τελλούριο και μεταβάλλεται περισσότερο σε σχέση με τα As, Mo, Ag και Pb. Το βολφράμιο συναντάται συνήθως με το χρυσό, αλλά τα δύο αυτά μέταλλα γεωχημικά δεν συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό.

Ο σχηματισμός, η ανάπτυξη, η γεωμετρία και το περιβάλλον των intrusion-related κοιτασμάτων έχει επηρεάζεται σημαντικά από τα τεκτονικά γεγονότα και τις τεκτονικές δομές (Mair et al. 2000). Τα περισσότερα κοιτάσματα ωστόσο δηλώνουν κυρίως θραυστιγενείς συνθήκες, αλλά ακόμα και κάτω από ίδιες συνθήκες P-T μπορούν να αναγνωριστούν καθεστώτα πλαστικών συνθηκών. Αυτό μπορεί να αντανακλά την πλούσια σε CO<sub>2</sub> φύση των ρευστών σε αυτά τα συστήματα, τα οποία μπορούν να εκτείνονται από θραυστιγενή συμπεριφορά έως υψηλότερες συνθήκες P-T από ότι βρίσκονται συνήθως.

## 5. ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην περιοχή των Κιμμερίων εντοπίζονται τα πετρώματα της μάζας της Ροδόπης χαμηλής έως υψηλής μεταμόρφωσης (κυρίως φυλλίτες, επιδοτικοί-χλωριτικοί σχιστόλιθοι, μαργαρυγιακοί σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, αμφιβολίτες, μάρμαρα) μέσα στα οποία διεισδύει ο πλουτωνίτης της Ξάνθης Ολιγοκαινικής ηλικίας (Χριστοφίδης 1977, Liati 1986) (Σχ. 5.1).



Σχήμα 5.1 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής των Κιμμερίων (Liati 1986).

Διαφορετικοί τύποι μεταλλοφορίας έχουν βρεθεί να φιλοξενούνται στη μάζα της Ροδόπης ως αποτέλεσμα ποικίλων μεταλλογενετικών διαδικασιών (Melfos et al. 2002, Voudouris et al. 2003, 2013, Melfos and Voudouris 2012). Η μαγματική δραστηριότητα στην περιοχή της Ξάνθης και η μεταλλοφορία που συνδέεται με αυτή έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές, μεταξύ άλλων Christofides (1977), Ayme (1979), Liati (1986), Michailidis et al. (1987).

Από αναφορές αλλά κυρίως από ενδείξεις, στην περιοχή λειτούργησαν μεταλλεία κατά το παρελθόν, με υπόγειες στοές και υπαίθριες εξορύξεις μικρής όμως έκτασης.

Ειδικά, στο νότιο τμήμα του πλουτωνίτη της Ξάνθης, δίπλα στο χωριό Κιμμέρια, εντοπίζονται παλιά μεταλλεία στα οποία γινόταν εκμετάλλευση χαλκοπυρίτη και μολυβδαινίτη (Σχ. 5.2), ενώ στο βόρειο τμήμα στην περιοχή των Κιμμερίων εκμεταλλεύονταν τον μαγνητίτη και τον μαγνητοπυρίτη (Σχ. 5.3 και 5.4). Πιθανώς αυτά τα μεταλλεία να λειτούργησαν από την δεκαετία του 1930 και μετά.



**Σχήμα 5.2** Μεγάλη χαλαζιακή φλέβα (A) και παλιό μεταλλείο εκμετάλλευσης χαλκοπυρίτη-μολυβδαινίτη, Κιμμέρια (B). (φώτ. Β. Μέλφος, 2013)



**Σχήμα 5.3** Η περιοχή στα Κιμμέρια όπου εντοπίζονται τα παλιά μεταλλεία εκμετάλλευσης μαγνητίτη – μαγνητοπυρίτη.



**Σχήμα 5.4** Εγκαταστάσεις και μεταλλευτικά απορρίμματα στα παλιά μεταλλεία εκμετάλλευσης μαγνητίτη – μαγνητοπυρίτη, Κιμμέρια

Σύμφωνα με τους Χριστοφίδη (1977) και Liati (1986) στην περιοχή μελέτης ο πλουτωνίτης της Ξάνθης που αποτελεί μια ασβεσταλκαλική μαγματική διείσδυση γρανοδιοριτικής κυρίως σύστασης, δημιούργησε μία εκτεταμένη μεταμορφική ωρεόλη εντός των γύρω μεταμορφωμένων πετρωμάτων και ειδικά την ανάπτυξη μίας ζώνης skarn στην επαφή με τα μάρμαρα. Η μαγματική αυτή διείσδυση προκάλεσε τις κατάλληλες συνθήκες για τον σχηματισμό δύο τύπων μεταλλοφορίας: πνευματολυτικές - υδροθερμικές χαλαζιακές φλέβες Mo-Cu-Bi-W (Augustithis 1971) (Σχ. 5.5) και μεταλλοφορία τύπου skarn (Fe-Cu-Bi-W-Au), όπου έχει βρεθεί μεταξύ άλλων ορυκτών και αυτοφυής χρυσός (Michailidis et al. 1987).

Η μηχανική αποσάθρωση του skarn έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση προσχωματικού κοιτάσματος χρυσού μέσα στα γειτονικά ρέματα (Ιερομένος και Πλαγιά). Ο χρυσός εντοπίστηκε στα ρέματα σε απόσταση έως 4 Km από το skarn (Vavelidis et al., 1990).



**Σχήμα 5.5** Φλεβική μεταλλοφορία Cu-Mo στα Κιμμέρια. Ο πλουτωνίτης φαίνεται να είναι έντονα τεκονισμένος και εξαλλοιωμένος και διαπερνάται από τις μεταλλοφόρες χαλαζιακές φλέβες.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αναλύθηκαν δύο αντιπροσωπευτικά δείγματα, ένα από τη μεταλλοφορία τύπου skarn (Kim 21) και ένα από την φλεβική μεταλλοφορία Cu-Mo (Kim 23) όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Αντιπροσωπευτικές χημικές αναλύσεις από τη μεταλλοφορία τύπου skarn (Kim 21) και από την φλεβική μεταλλοφορία Cu-Mo (Kim 23) στα Κιμμέρια Ξάνθης.

| KIMMERIA                       |       |         | KIMMERIA |       |         |
|--------------------------------|-------|---------|----------|-------|---------|
|                                | Skarn | Φλεβική |          | Skarn | Φλεβική |
| wt%                            | KIM21 | KIM23   | wt%      | KIM21 | KIM23   |
| SiO <sub>2</sub>               | 15.15 | 24.39   | Lu       | 0.03  | 0.15    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.73  | 2.91    | Mo       | 1.9   | 1478.3  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 65.92 | 46.04   | Nb       | 0.8   | 3.2     |
| MgO                            | 3.16  | 0.18    | Nd       | 5.8   | 36.2    |
| CaO                            | 5.25  | 0.07    | Ni       | 48.7  | 5.3     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.10  | 0.05    | Pb       | 16.3  | 1709.0  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.04  | 0.98    | Pr       | 2.56  | 11.49   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.06  | 0.11    | Rb       | 1.8   | 87.0    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | bdl   | 0.02    | Sb       | 0.3   | 0.5     |
| MnO                            | 0.17  | 0.01    | Sc       | 2     | 3       |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.01  | bdl     | Se       | 16.0  | 21.5    |
| LOI                            | 9.2   | 24.5    | Sm       | 0.55  | 4.96    |
| Σύν                            | 99.79 | 99.26   | Sn       | 30    | 1       |
| ppm                            |       |         | Sr       | 17.5  | 8.4     |
| Ba                             | 2     | 42      | Ta       | 0.1   | 0.3     |
| Ag                             | 6.3   | 31.5    | Tb       | 0.05  | 0.39    |
| As                             | 13.1  | 30.3    | Th       | 0.9   | 4.7     |
| Bi                             | 6.6   | 26.5    | Tm       | 0.03  | 0.18    |
| Cd                             | 0.1   | 3.7     | U        | 5.7   | 1.0     |
| Ce                             | 28.4  | 112.9   | V        | 61    | 47      |
| Co                             | 153.8 | 94.2    | W        | 132.4 | 22.8    |
| Cs                             | 0.4   | 1.4     | Y        | 1.5   | 12.4    |
| Cu                             | 171.2 | 22.6    | Yb       | 0.18  | 1.10    |
| Dy                             | 0.26  | 2.08    | Zn       | 79    | 598     |
| Er                             | 0.16  | 1.10    | Zr       | 11.0  | 34.8    |
| Eu                             | 0.26  | 0.71    | ppb      |       |         |
| Ga                             | 14.4  | 3.3     | Au       | 148.7 | 59.0    |
| Gd                             | 0.44  | 3.31    |          |       |         |
| Hf                             | 0.2   | 0.9     |          |       |         |
| Hg                             | 0.02  | 0.06    |          |       |         |
| Ho                             | 0.05  | 0.40    |          |       |         |
| La                             | 14.9  | 59.8    |          |       |         |

Από τις αναλύσεις αυτές παρατηρούμε ότι η μεταλλοφορία skarn χαρακτηρίζεται από υψηλές περιεκτικότητες σε Cu (171.2 ppm), Sn (30 ppm), W (132.4 ppm) σε σχέση με την φλεβική μεταλλοφορία όπου οι περιεκτικότητες σε As (30.3 ppm), Bi (26.5 ppm), Mo (1478.3 ppm), Pb (1709 ppm) και Zn (598 ppm) είναι υψηλότερες.

Σε ότι αφορά την περιεκτικότητα των μεταλλοφοριών σε χρυσό παρατηρείται ότι η μεταλλοφορία του skarn περιέχει αρκετά μεγάλη ποσότητα χρυσού συγκριτικά με τη φλεβική μεταλλοφορία ( 148.7 ppb και 59.0 ppb αντίστοιχα)

## 5.1. ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΤΥΠΟΥ SKARN

Μια εκτεταμένη μεταλλοφορία skarn εμφανίζεται 2 χιλιόμετρα βόρεια του χωριού Κιμμέρια στην βόρεια επαφή της μαγματικής διείσδυσης με τα μάρμαρα (Σχ. 5.6). Η ορυκτολογία του σχηματισμού αυτού ποικίλει και εξαρτάται από την σύνθεση των γειτονικών πετρωμάτων της διείσδυσης καθώς επίσης κι από τη φύση των ρευστών που απελευθερώθηκαν από το μάγμα και αντέδρασαν με τα πετρώματα.

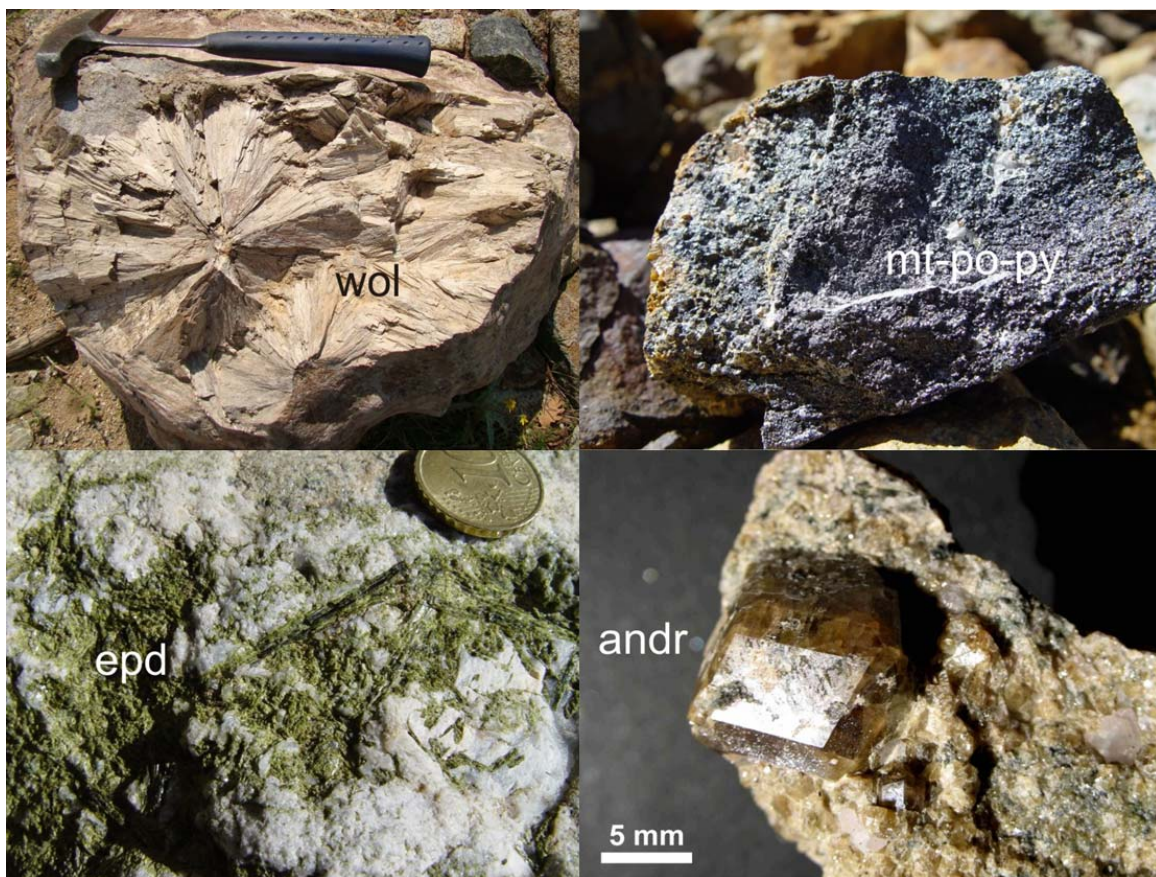


**Σχήμα 5.6** Η μεταλλοφορία τύπου skarn (A) στην επαφή του γρανοδιωρίτη της Ξάνθης (B) και των μαρμάρων της μάζας της Ροδόπης (Γ).

Τα κύρια μη μεταλλικά ορυκτά του σχηματισμού skarn στα Κιμμέρια είναι ο γρανάτης, το επίδοτο, ο βολλαστονίτης (Σχ. 5.7), ο πυρόξενος, ο βεζουβιανίτης και σε

μικρότερη ποσότητα ο ακτινόλιθος, ο χλωρίτης, ο χαλαζίας και ο ασβεστίτης (Liati 1986, Michailidis et al. 1989).

Σημαντική είναι η μεταλλοφορία μαγνητίτη που εντοπίζεται στο skarn και είναι κυρίως μαζώδης (Σχ. 5.7). Η μεταλλοφορία αυτή συνοδεύεται από σεελίτη-παουελλίτη, μολυβδαινίτη, βολφραμίτη και σουλφίδια. Συχνά τα σουλφίδια διαπερνούν εγκάρσια το μεταλλοφόρο μαγνητιτικό σώμα με τη μορφή μικροφλεβιδίων. Η μεταλλοφορία σουλφιδίων αποτελείται από μαγνητοπυρίτη, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη και σε μικρότερο βαθμό από σφαλερίτη και γαληνίτη.



Σχήμα 5.7 Ορυκτά του skarn Κιμερίων: wol: βολλαστονίτης, mt-po-py: μεταλλοφορία μαγνητίτη-μαγνητοπυρίτη-σιδηροπυρίτη, epd: επίδοτο, andr: ανδραδίτης (γρανάτης).

Ο μαγνητίτης έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε Ni, Co, Ti, Cr και V (Vavelidis et al. 1990) και εμφανίζεται να σχηματίζει μεγάλα μαζώδη συσσωματώματα με γρανάτη και πυροξενίτη ή διακριτούς ιδιόμορφους κρυστάλλους εντός των σουλφιδίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις σχηματίζεται μέσα στη μάζα του μαγνητίτη μία ζωνώδης δομή που αποτελείται από γρανάτη, αδιαφανή ορυκτά, ασβεστίτη και χαλαζία. Ο μαγνητίτης στο

skarn των Κιμμερίων δεν εμφανίζεται σε απόμειξη με άλλα ορυκτά όπως ιλμενίτη ή σπινέλιο ούτε και φαινόμενα μαρτιτίωσης, δηλαδή αλλοίωσης σε αιματίτη λόγω της οξείδωσης.

Ο σιδηροπυρίτης έχει στοιχειομετρική χημική σύσταση με πολύ χαμηλό As, Sn, Ag και μη ανιχνεύσιμα ποσοστά Co, Ni και Cu (Vavelidis et al. 1990) και συνήθως σχηματίζει διακριτούς ιδιόμορφους κρυστάλλους και τοπικά μεγάλα συσσωματώματα. Ο χαλκοπυρίτης και ο μαγνητοπυρίτης αναπτύσσονται ως ενδιάμεσες ορυκτές φάσεις ανάμεσα στον μαγνητίτη και στον σιδηροπυρίτη ή γεμίζουν διάκενα ανάμεσα στα υπόλοιπα ορυκτά. Ο σφαλερίτης και ο γαληνίτης έχουν παρατηρηθεί σε ίχνη με τη μορφή ακανόνιστων κόκκων μέσα στον μαγνητοπυρίτη. Ο μολυβδαινίτης, ο βολφραμίτης και ο σεελίτης-παουελλίτης εμφανίζονται τοπικά σε περιορισμένες ποσότητες.

Ο αιματίτης δεν αποτελεί ορυκτό συστατικό της μεταλλοφορίας skarn αλλά βρίσκεται με φυλλώδη μορφή και σχηματίζει συμπλέγματα με το επίδοτο, το γρανάτη και τον ασβεστίτη.

Σύμφωνα με τους Michailidis et al. (1989) η πιο ενδιαφέρουσα παρατήρηση στο σχηματισμό skarn της περιοχής Κιμμερίων Ξάνθης είναι η παρουσία αυτοφυούς χρυσού. Αυτή η παρατήρηση έχει μεγάλη σημασία για την αναζήτηση χρυσού σε άλλους σχηματισμούς skarn της ευρύτερης περιοχής, καθώς και για την ερμηνεία των προσχωματικών κοιτασμάτων χρυσού σε πολλές περιοχές της Ροδόπης.

Ο χρυσός βρέθηκε με τη μορφή ακανόνιστων κόκκων με μέγεθος από 5 έως 450  $\mu\text{m}$ , είτε μέσα στον σιδηροπυρίτη και στον χαλκοπυρίτη είτε ως πλήρωση των διακλάσεων των κρυστάλλων σιδηροπυρίτη (Michailidis et al. 1989). Έτσι, μπορούν να αναγνωριστούν δύο γενιές χρυσού, μία μέσα στον σιδηροπυρίτη και μία μέσα στον χαλκοπυρίτη. Σύμφωνα με τους Vavelidis et al. (1990) ο χρυσός που έχει βρεθεί να φιλοξενείται στο σιδηροπυρίτη διαφέρει στη χημική σύσταση από αυτόν που βρέθηκε στο χαλκοπυρίτη, αφού περιέχει χαμηλότερα ποσοστά σε Ag (μέσο όρο 22.4 και 24.8 κ.β. % αντίστοιχα). Ο χρυσός στον σιδηροπυρίτη έχει υψηλές αναλογίες Pt και χαμηλότερες Os, Ir, Se και Te σε συνδυασμό με τον χρυσό που φιλοξενείται στον χαλκοπυρίτη.

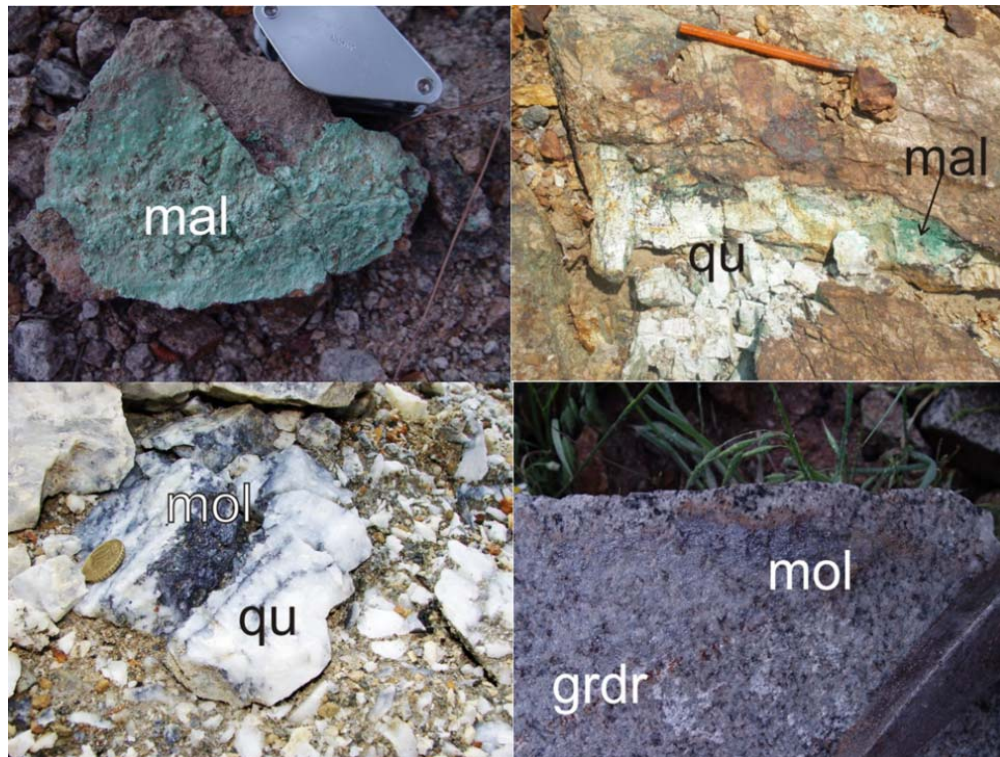
Όπως αναφέρουν οι Vavelidis et al. (1990) έχουν εντοπιστεί προσχωματικές εμφανίσεις χρυσού μέσα στις αλλουβιακές αποθέσεις των ρεμάτων της περιοχής Κιμμερίων (Ιερομένος και Πλαγιά) με περίπου ίδια χημική σύσταση με τον πρωτογενή χρυσό στο skarn, γεγονός το οποίο υποστηρίζει τη συμβολή της μεταλλοφορίας skarn στο σχηματισμό προσχωματικών εμφανίσεων χρυσού στην περιοχή.

## 5.2. ΠΝΕΥΜΑΤΟΛΥΤΙΚΕΣ – ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΕΣ ΧΑΛΑΖΙΑΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ Mo-Cu-Bi-W

Η μεταλλοφορία Mo-Cu-Bi-W σχετίζεται με φλέβες χαλαζία μεγάλου ή μικρού πάχους, και παράλληλα συστήματα φλεβών (sheeted veins). Οι φλέβες αυτές δημιουργήθηκαν μετά την κρυστάλλωση του πλουτωνίτη και μετά τον σχηματισμό του skarn, από τα υδροθερμικά διαλύματα τα οποία διέρρευσαν μέσα στις διακλάσεις του πλουτωνίτη όπου κι απέθεσαν τα μεταλλικά ορυκτά.

Η διεύθυνση αυτών των φλεβών στην περιοχή μελέτης είναι BBA-NNΔ και διαπερνούν τον πλουτωνίτη σε όλο το μήκος του, δηλαδή από το βόρειο τμήμα έως και το νότιο, έχοντας μήκος 300 m περίπου (Σχ. 5.9). Οι φλέβες στο νότιο τμήμα είναι μεγαλύτερες από ότι στο βόρειο, φτάνοντας σε πάχος έως και 2-3 m, ενώ στο βόρειο γίνονται αρκετά λεπτές ώστε το πλάτος τους δεν ξεπερνά τα 10 cm (Σχ. 3.1, B).

Όσον αφορά την ορυκτολογική σύσταση των φλεβών, αυτές αποτελούνται από μη μεταλλικά ορυκτά αποτελούνται κυρίως από χαλαζία αλλά περιέχουν και λίγο ασβεστίτη ενώ είναι πλούσιες σε σιδηροπυρίτη, μολυβδαινίτη, σεελίτη, βολφραμίτη και χαλκοπυρίτη (Σχ. 5.8).



**Σχήμα 5.8** Ορυκτά που εντοπίζονται στις χαλαζιακές μεταλλοφόρες φλέβες στα Κιμμέρια: Mal: μαλαχίτης, qu-mal: μαλαχίτης μέσα σε χαλαζία, mol-qu: μολυβδαινίτης μέσα σε χαλαζία, grdr-mol: μολυβδαινίτης μέσα στον γρανοδιορίτη της Ξάνθης.



**Σχήμα 5.9** Φλέβα χαλαζία με χαλκοπυρίτη και μολυβδαινίτη, μήκους περίπου 300 m που κόβει τον γρανοδιορίτη στην περιοχή Κιμμερίων.

## 6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η υπαίθρια έρευνα καθώς και η συλλογή των δειγμάτων πετρωμάτων και μεταλλεύματος στη περιοχή Κιμμερίων Ξάνθης έγιναν κατά τον Ιούλιο 2010. Συλλέχθηκαν συνολικά 14 δείγματα (Σχ. 6.1).



**Σχήμα 6.1** Περιοχή μελέτης. Σημεία δειγματοληψίας για τη δημιουργία και περαιτέρω μελέτη των στιλπνών τομών (πήγη: Google Earth).

Η εργαστηριακή έρευνα περιλαμβάνει την μικροσκοπική και γεωχημική μελέτη των δειγμάτων. Για τη μικροσκοπική μελέτη κατασκευάστηκαν λεπτές και στιλπνές τομές, οι οποίες μελετήθηκαν σε πολωτικό και μεταλλογραφικό μικροσκόπιο τύπου Leitz του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας στη Σχολή Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Για τον προσδιορισμό των κύριων στοιχείων και των ιχνοστοιχείων πραγματοποιήθηκαν δύο χημικές αναλύσεις με τη μέθοδο Φασματομετρίας Μάζας Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry - ICP-MS) στα Εργαστήρια ACME στο Vancouver του Καναδά.

## **7. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΚΙΜΜΕΡΙΑ ΞΑΝΘΗΣ**

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν συνολικά έξι στιλπνές τομές στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός. Από τη μελέτη αυτή προέκυψαν τα γενικότερα χαρακτηριστικά της μεταλλοφορίας σε ότι αφορά την ορυκτολογική της σύσταση σε σχέση με τα πετρώματα ξενιστές, τις υδροθερμικές χαλαζιακές φλέβες και τα μεταλλικά στοιχεία των εμφανίσεων στα Κιμμέρια.

### **7.1. ΣΤΙΑΠΝΕΣ ΤΟΜΕΣ – SEM**

#### **7.1.1. ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΤΥΠΟΥ SKARN**

##### ΣΤΙΑΠΝΗ ΤΟΜΗ Β.19.6

Η ορυκτολογική σύσταση αποτελείται από μαγνητοπυρίτη, μαγνητίτη, σιδηροπυρίτη και χαλκοπυρίτη (Σχ. 7.1a). Ο μαγνητοπυρίτης αποτελεί το επικρατέστερο ορυκτό και καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της μεταλλοφορίας. Επίσης, σε αρκετά μεγάλο ποσοστό συμμετέχει ο μαγνητίτης. Εμφανίζεται με τη μορφή διάσπαρτων κόκκων και σε κατά τόπους συγκεντρώσεις. Το μέγεθος των κόκκων μαγνητίτη κυμαίνεται από 10 μm έως 700 μm (Σχ. 7.1e). Ο σιδηροπυρίτης εμφανίζεται διάσπαρτος με υπιδιόμορφο σχήμα και μέγεθος κόκκων που κυμαίνεται από 5 μm έως 400 μm. Ο χαλκοπυρίτης φαίνεται να διεισδύει μέσα στον μαγνητοπυρίτη πληρώνοντας τα κενά και εμφανίζεται με ακανόνιστη μορφή. (Σχ. 7.1f).

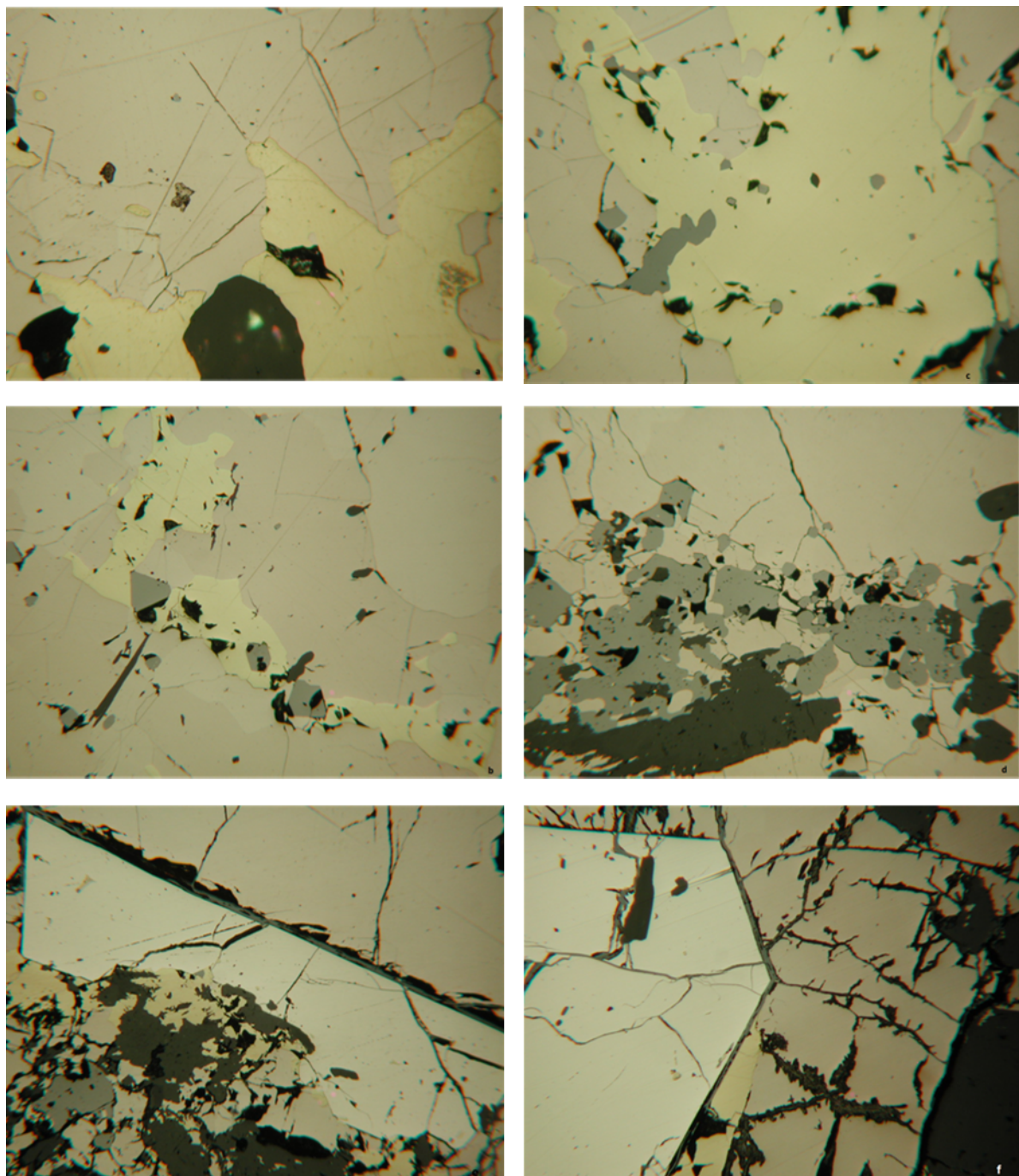
##### ΣΤΙΑΠΝΗ ΤΟΜΗ Β.19.7

Παρατηρούνται τα παρακάτω ορυκτά: μαγνητοπυρίτης, χαλκοπυρίτης και μαγνητίτης (Σχ. 7.1b). Ο μαγνητοπυρίτης και ο μαγνητίτης είναι τα κύρια ορυκτά της μεταλλοφορίας. Ο μαγνητίτης εμφανίζεται κυρίως σε συσσωματώματα κόκκων (Σχ. 7.1d). Ο χαλκοπυρίτης παρατηρήθηκε διάσπαρτος και με αλλοτριόμορφο σχήμα και κυρίως σε σπασίματα του μαγνητοπυρίτη.

##### ΣΤΙΑΠΝΗ ΤΟΜΗ Β.19.12

Τα κύρια ορυκτά της τομής είναι σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης, μαγνητίτης και σφαλερίτης (Σχ. 7.1c). Ο σιδηροπυρίτης εμφανίζεται σαν φλέβα μέσα στην τομή με συμπαγή μορφή. Ο μαγνητίτης καταλαμβάνει μεγάλο ποσοστό της τομής με συμπαγή μορφή ή κυρίως σε μορφή συσσωματωμάτων κόκκων. Ο χαλκοπυρίτης εντοπίζεται σε διάσπαρτους κόκκους στα κενά που αφήνει ο μαγνητίτης. Σημαντικό σε αυτή την τομή

είναι ότι εντοπίστηκαν μέσα στον χαλκοπυρίτη μικροί κόκκοι σφαλερίτη, της τάξης μεγέθους από 20  $\mu\text{m}$  έως 80  $\mu\text{m}$ .



**Σχήμα 7.1** Φωτογραφίες από μεταλλογραφικό μικροσκόπιο των τομών B16\_1ap (a), B16\_4ap (b), B16\_4bp (c), B19\_1bp (d), B19\_2ap (e), B19\_2bp (f) από τη μεταλλοφορία τύπου skarn στα Κιμμέρια. **a.** (μεγέθυνση x10) μαγνητοπυρίτης με χαλκοπυρίτη (σκούρο κίτρινο χρώμα), **b.** (μεγέθυνση x10) μαγνητοπυρίτης με χαλκοπυρίτη και κόκκους μαγνητίτη (τεφρό χρώμα), **c.** (μεγέθυνση x10) μαγνητοπυρίτης με χαλκοπυρίτη, υπιδιόμορφους κόκκους μαγνητίτη (σκούρο τεφρό χρώμα) και αλλοτριόμορφη μορφή σφαλερίτη (τεφρό χρώμα), **d.** (μεγέθυνση x10) μαγνητοπυρίτης με χαλκοπυρίτη και μαγνητίτη, **e.** (μεγέθυνση x10) μαγνητοπυρίτης με χαλκοπυρίτη, κόκκους μαγνητίτη και σιδηροπυρίτη (φωτεινό λευκοκίτρινο χρώμα), **f.** Μαγνητοπυρίτης με χαλκοπυρίτη και ιδιόμορφο κρύσταλλο σιδηροπυρίτη με χαρακτηριστική κατακλαστική υφή.

### **7.1.2. ΧΑΛΑΖΙΑΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ Mo-Cu-Bi-W**

#### **ΣΤΙΛΠΙΝΗ ΤΟΜΗ B.20.2**

Παρατηρείται μεγάλη ποικιλία ορυκτών όπως: χαλκοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, σφαλερίτης, μολυβδαινίτης και γκαιτίτης (Σχ. 7.2). Ο σιδηροπυρίτης εντοπίζεται στο μεγαλύτερο μέρος της τομής. Το σχήμα του σιδηροπυρίτη είναι υπιδιόμορφο έως ιδιόμορφο σχηματίζοντας εξαγωνικά και τετραγωνικά σχήματα της τάξης μεγέθους από 10 μm έως 250 μm περίπου. Ο χαλκοπυρίτης εμφανίζεται διάσπαρτος μέσα στον σιδηροπυρίτη ως εγκλείσματα.

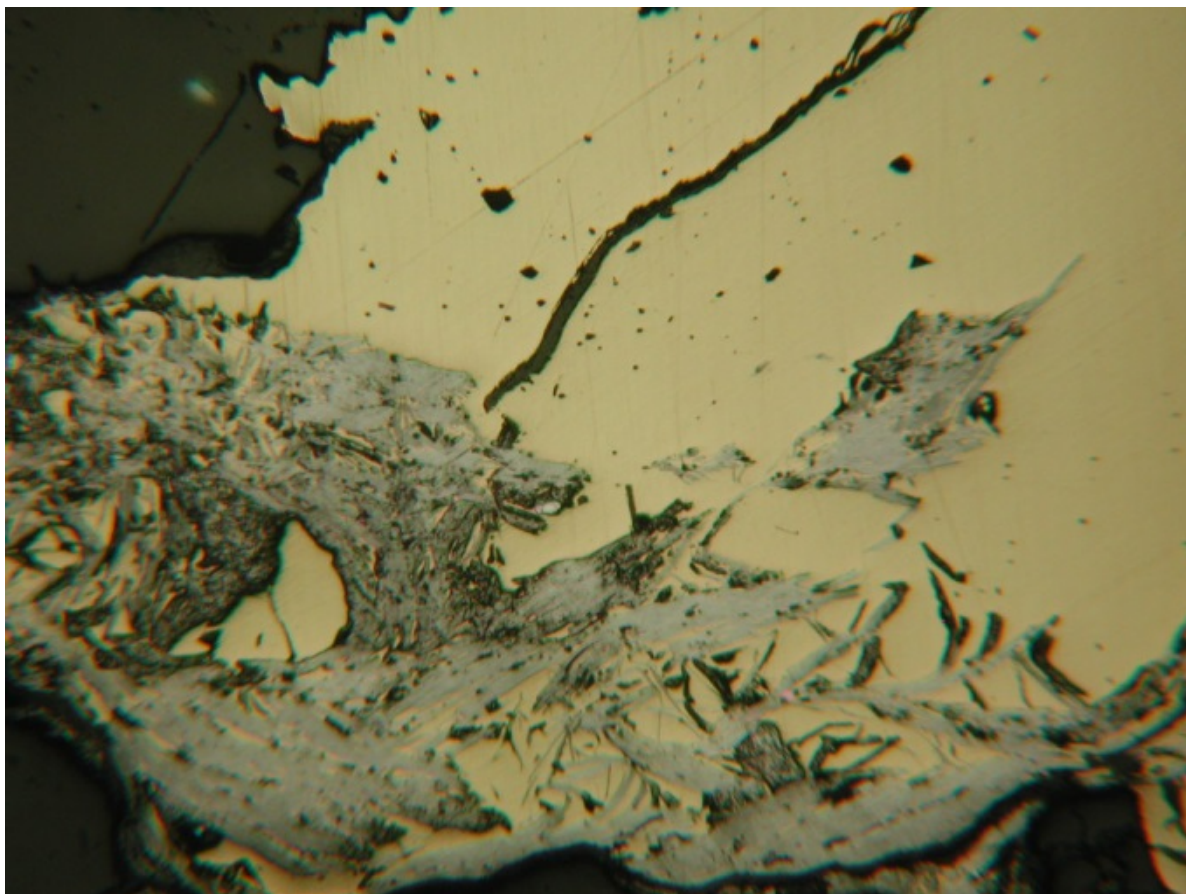
Ο σφαλερίτης έχει τη μορφή πολύ μικρών κόκκων (έως 20 μm) μέσα στον σιδηροπυρίτη. Ο μολυβδαινίτης εντοπίζεται υπό ακανόνιστες μορφές φυλλαρίων και έχει την τάση να αναπτύσσεται κατά μήκος μικρορωγμών του πετρώματος. Επίσης, σε αυτή τη τομή παρατηρείται ότι ο χαλκοπυρίτης μετατρέπεται σε γκαιτίτη κατά μήκος διακλάσεων ή περιφερειακά λόγω της οξείδωσης της μεταλλοφορίας σε επιφανειακές συθήκες.

#### **ΣΤΙΛΠΙΝΗ ΤΟΜΗ B.20.4**

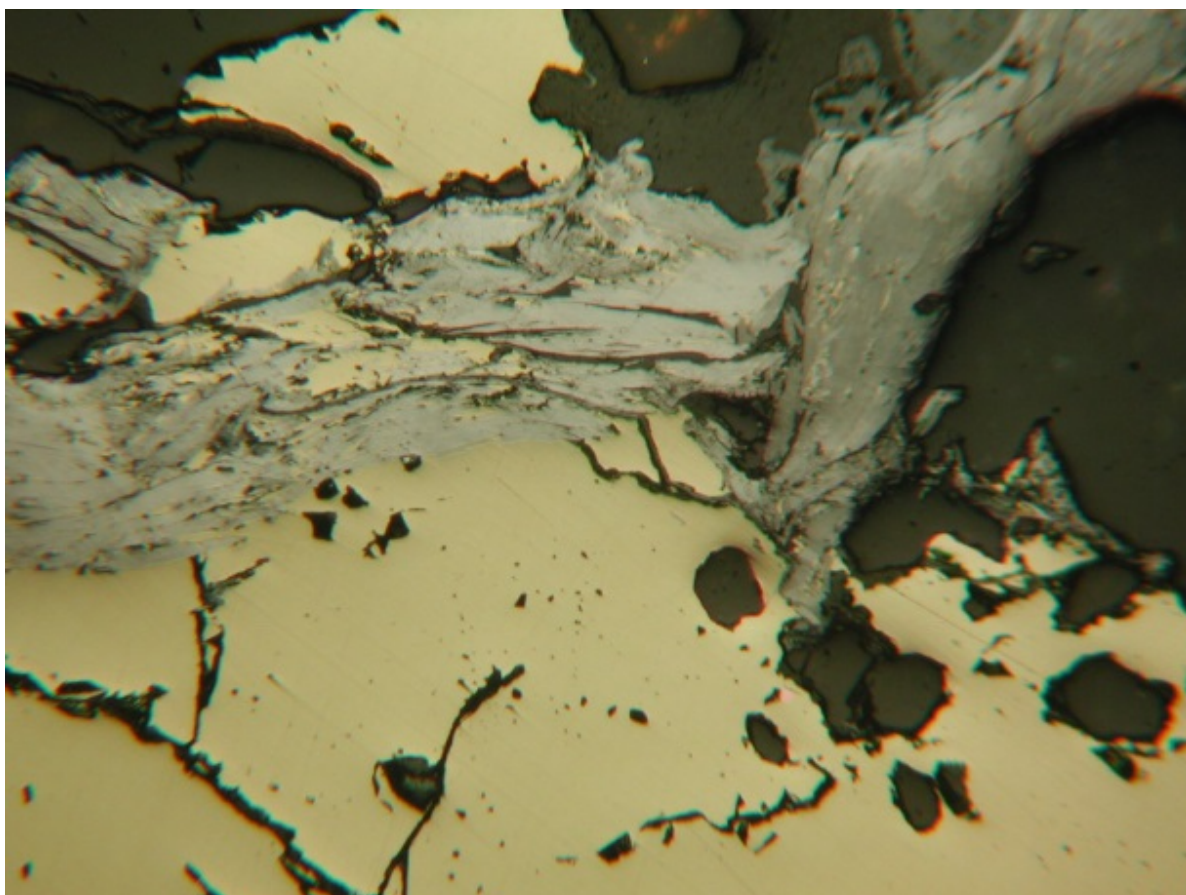
Εντοπίζονται διάσπαρτοι κόκκοι σιδηροπυρίτη με υπιδιόμορφο έως αλλοτριόμορφο σχήμα και μέγεθος 30 μm έως 100 μm κατά μέσο όρο και με κατακλαστική υφή. Ακόμη, εμφανίζεται ο χαλκοπυρίτης που διεισδύει στις διακλάσεις και το μέγεθός του είναι έως και 300 μm. Σημαντικό είναι ότι μέσα στον σφαλερίτη εντοπίζονται σταγονοειδή εγκλείσματα χαλκοπυρίτη. Κατά τόπους ο μολυβδαινίτης εμφανίζεται με τη μορφή φυλλαρίων (Σχ. 7.3) κατά μήκος διακλάσεων του σιδηροπυρίτη.

#### **ΣΤΙΛΠΙΝΗ ΤΟΜΗ B.20.6**

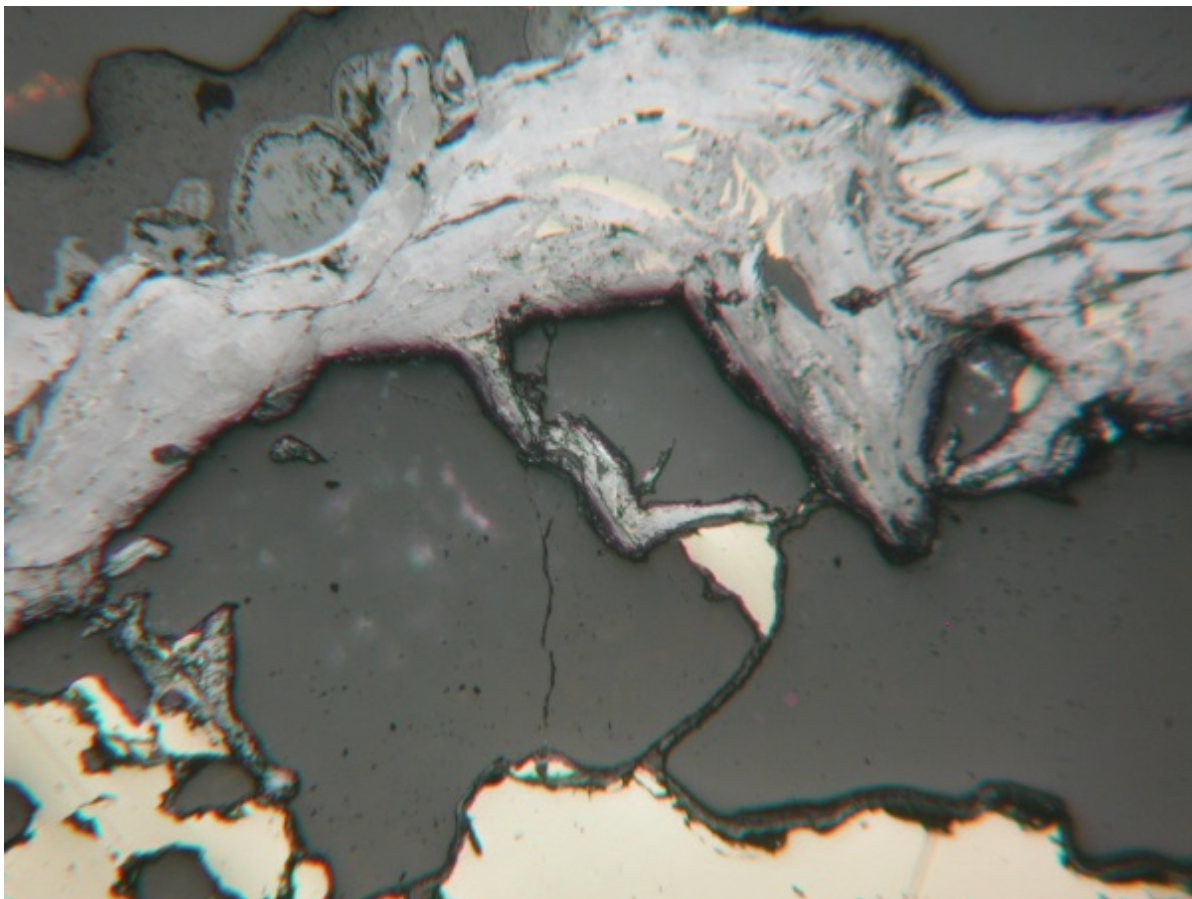
Η ορυκτολογική σύσταση αποτελείται από χαλκοπυρίτη, σιδηροπυρίτη και μολυβδαινίτη (Σχ. 7.4). Ο χαλκοπυρίτης καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της μεταλλοφορίας στην τομή. Ο σιδηροπυρίτης εμφανίζεται με υπιδιόμορφους έως ιδιόμορφους κόκκους με μέγεθος από 10 μm έως και 1.5 mm. Ο σιδηροπυρίτης παρουσιάζει έντονη κατακλαστική υφή.



**Σχήμα 7.2** Φωτογραφία από μεταλλογραφικό μικροσκόπιο της τομής molB20\_4p όπου απεικονίζεται ο μολυβδαινίτης με τον χαλκοπυρίτη από την φλεβική μεταλλοφορία στα Κιμμέρια Ξάνθης.



**Σχήμα 7.3** Φωτογραφία από μεταλλογραφικό μικροσκόπιο της τομής molB20\_3ap όπου απεικονίζεται ο μολυβδαινίτης με τον χαλκοπυρίτη από την φλεβική μεταλλοφορία στα Κιμμέρια Ξάνθης.



**Σχήμα 7.4** Φωτογραφία από μεταλλογραφικό μικροσκόπιο της τομής molB20\_3ap όπου απεικονίζεται ο μολυβδαινίτης με φυλλώδη μορφή σε σύμφυση με τον χαλκοπυρίτη από την φλεβική μεταλλοφορία στα Κιμμέρια Ξάνθης.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη σε συνδυασμό με τα δεδομένα από την υπάρχουσα βιβλιογραφία έδειξαν ότι οι μεταλλοφορίες που εμφανίζονται στα Κιμμέρια της Ξάνθης είναι αποτέλεσμα της δράσης της μαγματικής διείσδυσης και την ανάπτυξη υδροθερμικού συστήματος μετά την κρυστάλλωση και στερεοποίηση του μάγματος από το οποίο σχηματίστηκε ο πλουτωνίτης της Ξάνθης, κατά το Ολιγόκαινο.

Οι μεταλλοφορίες τύπου skarn και φλεβών χαλαζία συνδέονται άμεσα με την Τριτογενή διείσδυση του πλουτωνίτη της Ξάνθης. Η μάζα της Ροδόπης κατά το Τριτογενές επηρεάστηκε από την Αλπική ορογένεση με όλες τις τεκτονικές διαδικασίες που συνεπάγεται αυτή η τεκτονική. Όπως είναι γνωστό (Μουντράκης 2010) η ορογένεση αυτή ξεκινά με την ενδοωκεάνια υποβύθιση του ωκεανού της Τυθής, την τελική ηπειρωτική σύγκρουση μεταξύ Απουλίας πλάκας και Κιμμερικού ηπειρωτικού περιθωρίου και την υποβύθιση της μικροπλάκας της Απουλίας κάτω από την Κιμμερική – Ευρασιατική και τέλος δημιουργούνται συνθήκες εφελκυσμού και κατ' επέκταση λέπτυνσης του φλοιού οπότε και διεισδύουν τα μαγματικά σώματα ασβεσταλκαλικής συστάσεως. Το γεωτεκτονικό περιβάλλον των κοιτασμάτων που συνδέονται με τις διεισδύσεις είναι σύγκλιση λιθοσφαιρικών πλακών και ο μαγματισμός είναι ασβεσταλκαλικής σύστασης.

Λόγω αυτού του μαγματισμού τα ρευστά μαγματικής προέλευσης αντέδρασαν με τα γειτονικά μάρμαρα και έδωσαν τη μεταλλοφορία τύπου skarn κατά τη διείσδυση του γρανοδιορίτη της Ξάνθης. Με την πτώση της θερμοκρασίας και μετά την κρυστάλλωση και στερεοποίηση του μάγματος δημιουργήθηκαν υδροθερμικά διαλύματα που διέρρευσαν μέσα στις διακλάσεις και τα ρήγματα του πλουτωνίτη όπου κι απέθεσαν το μεταλλικό τους περιεχόμενο κι έδωσαν την φλεβική μεταλλοφορία. Επομένως, η μεταλλοφορία τύπου skarn στην περιοχή μελέτης φιλοξενείται στη γειτονία του πλουτωνίτη με τα μάρμαρα ενώ η φλεβική μεταλλοφορία φιλοξενείται μέσα στον πλουτωνίτη. Σύμφωνα με τους Lang and Baker (2001) τα κοιτάσματα που συνδέονται με μαγματικές διεισδύσεις (intrusion-related systems) φιλοξενούνται μέσα στον πλουτωνίτη ή εκτείνονται στα γειτονικά πετρώματα όπως ακριβώς συμβαίνει και στα Κιμμέρια.

Οι μαγματικοί όγκοι που συνδέονται με τα κοιτάσματα που σχετίζονται με τις διεισδύσεις (intrusion-related systems) είναι ενδιάμεσης έως όξινης σύστασης όπως

χαρακτηριστικά εντοπίζεται και στην περιοχή μελέτης με τη διείσδυση γρανοδιορίτη που αποτελεί ένα ενδιάμεσης σύστασης πέτρωμα.

Ο προσδιορισμός της μεταλλοφορίας γίνεται ύστερα από μελέτη της χημικής σύστασης του μεταλλεύματος. Τα συνηθέστερα μεταλλικά στοιχεία των κοιτασμάτων τύπου intrusion-related είναι Au με αυξημένες περιεκτικότητες σε Bi, W, As, Mo. Τα παραπάνω στοιχεία έχουν εντοπιστεί και στις εμφανίσεις των Κιμμερίων σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις των στοιχείων (Πίνακας 1) αλλά και στην χημική σύσταση των ορυκτών των δύο παραγενέσων πχ. σεελίτης, βολφραμίτης, μολυβδαινίτης

Τέλος σύμφωνα με τον Hart et al. (2000) τα κοιτάσματα μέσα στους πλουτωνίτες είναι συχνά χρυσοφόρα, αναπτύσσονται σε συστήματα φλεβών και χαρακτηρίζονται από μεταλλικές συγκεντρώσεις  $Au-Bi\pm Te\pm As\pm Mo\pm W$  και τα κοιτάσματα σε μικρή απόσταση από τους πλουτωνίτες βρίσκονται στα γειτονικά πετρώματα που φιλοξενούν τις διεισδύσεις και μέσα στην άλω της θερμικής μεταμόρφωσης με κοινούς τύπους μεταλλοφορίας να είναι τα Skarn  $W\pm Cu\pm Au$  και  $Cu-Bi-Au\pm W$ . Ακριβώς ίδιες μορφές και παρόμοιες συστάσεις παρατηρούνται και στις μεταλλοφορίες των Κιμμερίων της Ξάνθης.

Με βάση τα βιβλιογραφικά στοιχεία καθώς και τα στοιχεία που προέκυψαν από την γεωλογική, ορυκτολογική και γεωχημική μελέτη της περιοχής μπορεί να διεξαχθεί με ασφάλεια το συμπέρασμα ότι οι μεταλλοφορίες στη περιοχή των Κιμμερίων της Ξάνθης ανήκουν στην χαρακτηριστική ομάδα κοιτασμάτων που συνδέονται με μαγματικές διεισδύσεις (intrusion-related systems).

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ξενόγλωσση**

- Arikas, K. & Voudouris, P. (1998). Hydrothermal alterations and mineralisations of magmatic rocks in the southeastern Rhodope Massif. *Acta Vulcanologica* 10: 353–365.
- Augustithis, S.S., (1971). On the petrogenetic and geochemical relationship of the Mo-Cu-W-Bi hydrothermal quartz veins and the Fe-Cu-W-Mo epidote-garnet skarn bodies (contact metasomatism) of the younger intrusive granite of Kimmeria (Xanthi, Greece). *Sci. Ann. National Tech. Univ. Athens*. 2, 333-350.
- Ayme, Y., Kamche, H., Larribe, D., Piotite, D., (1979). Cadre geologique, petrologie et mineragraphie des mineralisations a cuivre et tungsten de la region de Xanthi. Unpubl. Diploma work, Centre de geologie generale et miniere, EMP.
- Bakke AA, (1995). The Fort Knox “porphyry” gold deposit: structurally controlled stockwork and shear quartz vein, sulfide-poor mineralization hosted by a Late Crataceous pluton, east-central Alaska. *Porphyry deposits of the northwestern cordillera of North America*. *Can Inst Min Metall Spec*, 46, 795-802.
- Baker, T., & Lang, J. R. (2001). Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone–Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada. *Mineralium Deposita*, 36(6), 563-582.
- Brun, J.P., and Sokoutis, D., (2007). Kinematics of the Southern Rhodope Core Complex (North Greece). *Int. J. Earth. Sci. (Geol Rundsch)* 96:1079–1099.
- Christofides, G. (1990), Evolution of the Xanthi pluton (NE Greece). XIV Congress of Carpatho-Balkan Geological Association, Sofia, 198-199.
- Christofides, G., Eleftheriadis, G, & Esson, J. (1990), Preliminary results on the magmatic evolution on the island of Samothraki granite (Thrace, Northeastern Greece), *Geol. Rhodopica*, 2, 213-226.
- Christofides, G., Soldatos, T., Eleftheriadis, G. & Koroneos, A. (1998). Chemical and isotopic evidence for source contamination and crustal assimilation in the Hellenic Rhodope plutonic rocks. *Acta Vulcanologica* 10: 305–318.

- De Boorder, H., Spakman, W., White, S.H., Wortel M.J.R., (1998). Late Cenozoic mineralization, orogenic collapse and slab detachment in the European Alpine Belt. *Earth and Planetary Science Letters* 164 569–575.
- Del Moro A, Innocenti F, Kyriakopoulos C, Manetti P, Papadopoulos P (1988) Tertiary granitoids from Thrace (Northern Greece): Sr isotopic and petrochemical data. *N Jb Min Abh* 159: 113-135
- Dewey, JF., Sengor, AMC., (1979). Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geol Soc Am Bull* 90:84–92.
- Dinter, D.A., Royden, L., (1993). Late Cenozoic extension in northeastern Greece: Strymon Valley detachment system and Rhodope metamorphic core complex. *Geology* 21:45–48.
- Eleftheriadis, G. (1990). Petrology and geochemistry of the Oligocene volcanic rocks from the Central Rhodope Massif (N.Greece). *Geol Rhodopica* 2: 180–196.
- Flanigan B, Freeman C, McCoy D, Newberry R, Hart C, (2000). Paleo-reconstruction of the Tintina gold belt- implications for mineral exploration. *The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. British Columbia and Yukon chamber of mines.* 2,35-48.
- Foote, R. and Manheim, F. (1975). *Geology of Bulgaria: a Review.* Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 59, 303–335.
- Fytikas, M., Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, R., Peccerillo, A. and Villari, L., (1984). Tertiary to Quaternary evolution of volcanism in the Aegean region. *Jour. Geol. Soc. London sp. Publ.* 17, 687-699.
- Goldfarb R, Hart C, Miller M, Miller L, Farmer GL, Groves D, (2000). The Tintina gold belt – a global perspective. *The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. British Columbia and Yukon chamber of mines.* 2,5-34.
- Hart CJR, Baker T, Burke M, (2000). New exploration concepts for country-rock-hosted, intrusion-related gold systems: Tintina gold belt in Yukon. *The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. British Columbia and Yukon chamber of mines.* 2,145-172.
- Hollister VF, (1992). On a proposed plutonic porphyry gold deposit model. *Nonrenewable Resour*, 1,293-302.
- Innocenti, F., Kollios, N., Manetti, P., Mazzuoli, R., Peccerillo, G., Rita, F., Villari, L. (1984). Evolution and Geodynamic Significance of the Tertiary Orogenic Volcanism in Northern Greece. *Bull. Volcanol.*, Vol. 47 – 1.

- Kaszuba JP, Wandlandt, RF (2000). Effect of carbon dioxide on dehydration melting reactions and melt compositions in the lower crust and the origin of alkaline rocks. *J Petrol.* 41:3,363-386
- Kilias, A., Mountrakis, D., (1990). Kinematics of the crystalline sequences in the western Rhodope Massif. *Geologica Rhodopica* 2:100–116.
- Kilias, A., Mountrakis, D., (1998). Tertiary extension of the Rhodope massif associated with granite emplacement (Northern Greece). *Acta Volcanologica*, 10, 2, 331-337.
- Koukouvelas and Pe-Piper G., (1991). The Oligocene Xanthi pluton, northern Greece: a granodiorite emplaced during regional extension. *Journal of the Geological Society*, London, 148:749-758.
- Krohe, A., & Mposkos, E. (2002). Multiple generations of extensional detachments in the Rhodope Mountains (northern Greece): evidence of episodic exhumation of high-pressure rocks. *Special Publication-Geological Society Of London*, 204, 151-178.
- Liati, A. (1986). Regional metamorphism and overprinting contact metamorphism of the Rhodope zone, near Xanthi (N. Greece): petrology, geochemistry, geochronology. PhD Thesis, Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany, p. 186.
- Lang R. James, Baker Timothy (2001) “Intrusion-related gold systems: the present level of understanding”, *Mineralium Deposita*, 36, 477-489.
- Lang R. James, Baker Timothy, Hart J. R. Craig, Mortensen K. James (2000) “An exploration model for intrusion-related gold systems”, *SEG NEWSLETTER*, 40.
- Laveille RCA, Newberry RJ, Bull KF, (1988). An oxidation state – alkalinity diagram for discriminating some gold-favorable plutons: an empirical and phenomenological approach. *Geo Sec Am Abstr Prog.* 20,A142.
- Liati, A., and Seidel, E., (1996). Metamorphic evolution and geochemistry of kyanite eclogites in central Rhodope, northern Greece. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 123, 293-307.
- Maltezou, F., & Brooks, M. (1989). A geophysical investigation of post-Alpine granites and Tertiary sedimentary basins in northern Greece. *Journal of the Geological Society*, 146(1), 53-59.
- McCoy DT, Newberry RJ, Layer PW, DiMarchi JJ, Bakke A, Masterman IS, Minehane D, (1997). Plutonic related gold deposits of Alaska. *Soc Econ Geol Monogr*, 9,151-190.

- Melfos V, Vavelidis M, Bogdanov K (2003). Occurrence, mineralogy and chemical composition of primary gold from Tertiary ore mineralisations in the Rhodope massif (Greece-Bulgaria). In: Eliopoulos DG et al (eds) Mineral exploration and sustainable development. Millpress, Rotterdam, pp 1201–1204.
- Melfos V., Vavelidis M., Christofides G., Seidel E. (2002). Origin and evolution of the Tertiary Maronia porphyry copper-molybdenum deposit, Thrace, Greece. *Mineralium Deposita*, 37, 648-668.
- Melfos V., Voudouris P.C. (2012). Geological, Mineralogical and Geochemical Aspects for Critical and Rare Metals in Greece. *Minerals*, 2, 300-317.
- Melfos, V., Vavelidis, M., Christofides, G. & Seidel E. (2002). Origin and evolution of the Tertiary Maronia porphyry copper-molybdenum deposit, Thrace, Greece. *Mineral. Deposita* 37: 648–668.
- Michael, C., Perdikatsis, V., Dimou, E. & Marantos, I. (1995). Hydrothermal alteration and ore deposition in epithermal precious metal deposit of Agios Demetrios, Konos area, Northern Greece. *Geol. Soc. Greece, Special Public.* 4, 778–782.
- Michailidis K., Vavelidis M., Christofides G., (1989). Native gold in the skarn-type mineralization of Kimmeria, NE of Xanthi. *Geologica Rhodopica*, 1: 396-402.
- Mposkos, E. and Krohe, A., (2000). Petrological and structural evolution of continental high pressure (HP) metamorphic rocks from the Greek Rhodope: a new ultra high-pressure metamorphic province established. *Earth and Planetary Science Letters*, 192, 497-506.
- Mposkos, E., (2002). Petrology of ultra-high pressure metamorphic Kimi complex in Rhodope: A new insight into the Alpine geodynamic evolution of the Rhodope. *Bull. Geol. Soc. Greece*, 34, 2169-2188.
- Newberry RJ, (2000). Mineral deposits and associated Mesozoic and Tertiary igneous rocks within the Interior Alaska and adjacent Yukon portions of the “Tintina gold belt”: a progress report. The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. *British Columbia and Yukon chamber of mines*, 2, 59-88.
- Newberry RJ, Burns LE, Solie Dn, Clautice KH, (1988). A revised geologic model for the North Star gold belt, interior Alaska: progress report. Alaska division of geological and geophysical Surveys Public-Data. File 88-23.
- Newberry RJ, McCoy DT, Brew DA, (1995). Plutonic-hosted gold ores in Alaska: igneous versus metamorphic origins. *Resour Geol Spec*, 18, 57-100.

- Pe-Piper, G., Christofides, G. & Eleftheriadis, G. (1998). Lead and neodymium isotopic composition of Tertiary igneous rocks of northeastern Greece and their regional significance. *Acta Vulcanologica* 10: 255–263.
- Pe-Piper, G., (2004) Unique features of Greek Cenozoic igneous rocks: tectonics and magma sources. 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology Thessaloniki, Greece, April 2004.
- Sillitoe RH, (1991). Intrusion-related gold deposits. Gold metallogeny and exploration. Blackie, Glasgow. 165-209.
- Soldatos, T., Koroneos, A., Del Moro, A., & Christofides, G. (2001). Evolution of the Elatia plutonite (Hellenic Rhodope Massif, N. Greece). *CHEMIE DER ERDE-GEOCHEMISTRY*, 61(2), 92-116.
- Thompson JFH, Sillitoe RH, Baker T, Lang JR, Mortensen JK, (1999). Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Miner Deposita*, 34,323-334.
- Touret JLR, (1992). Carbon dioxide transfer between the upper mantle and the atmosphere: temporary storage in the lower continental crust. *Terra Nova*. 4,87-98.
- Vavelidis M., Christofides G., Melfos V. (1997). Ancient gold mines near Krinides in Philippoi area (Macedonia, N. Greece). In: *Archaeometrie und Denkmalpflege*. Wien. 84-86.
- Vavelidis, M., Michailidis, K., Christofides, G., Boboti-Tsitlakides, I., (1990). Geochemical study of placer gold and the gold-bearing skarn-type mineralization of Kimmeria area, Xanthi district, NE Greece. *Geologica Rhodopica*, 2:297-308.
- Voudouris P., Melfos V., Spry P.G., Moritz R., Papavassiliou C., Falalakis G. (2011). Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrola Graben, NE Greece. *Mineralogy and Petrology*, 103, 79-100.
- Voudouris P, Tarkian M, Arikas K (2006). Mineralogy of telluride-bearing epithermal ores in Kassiteres-Sappes area, western Thrace, Greece. *Mineralogy and Petrology*, 87: 31-52.
- Voudouris P. (1993). Mineralogical, geochemical and fluid inclusions studies on epithermal vein type gold-silver mineralizations at Kassiteres/Sapes (NE Greece). Unpubl. PhD Thesis, Univ. of Hamburg, 218p (in German).
- Voudouris P., Melfos V., Spry P.G., Bindi L., Moritz R., Orтели M. Kartal T. (2013). Extremely Re-Rich Molybdenite from Porphyry Cu-Mo-Au Prospects in Northeastern Greece: Mode of occurrence, causes of enrichment, and implications for gold exploration. *Minerals*, 3, 165-191.

Voudouris P., Melfos V., Vavelidis M., Arikas K. (2003). Genetic relation between the Tertiary porphyry Cu-(±Mo) and the epithermal Au-(±Ag) deposits in the Rhodope metallogenic province, Thrace region, Northern Greece. In: Mineral Exploration and Sustainable Development. Eds: Eliopoulos et al., 541-544.

Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Moritz, R., Papavassiliou, C., Falalakis, G., (2011). Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrotta Graben, NE Greece. Mineralogy and Petrology.

### Ελληνική

Βαβελίδης Μ., Γιαλόγλου Γ., Wagner G.A., Μέλφος Β. (1996). Σκαπτή Ύλη: Ένα αρχαίο μεταλλείο χρυσού στην τοποθεσία Μάνδρα Καρή, Παλιάς Καβάλας. Αρχαιομετρικές και Αρχαιολογικές Έρευνες στη Μακεδονία και Θράκη. Θεσσαλονίκη 1993. 23-35.

Βαβελίδης Μ., Χριστοφίδης Γ., Μέλφος Β. (1997). Αρχαία μεταλλευτική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή Καβάλας-Φιλίππων. «Αρχαία Ελληνική Τεχνολογία». Θεσσαλονίκη. 95-101.

Δαβή, Ε., (1963). Γεωλογική κατασκευή της νήσου Σαμοθράκης. Ann. Geol. Pays Hell. 14, 133-188.

Κυριακόπουλος Γ.Κ. (1987). Γεωχρονολογική, γεωχημική, ορυκτολογική και ισοτοπική μελέτη των Τριτογενών πλουτωνικών πετρωμάτων της Ροδόπης. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Αθηνών, σ. 343.

Μουντράκης Δ. (2010). Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδος. Θεσσαλονίκη. University Studio Press.

Χριστοφίδης Θ. Γεώργιος (1977). Συμβολή εις την μελέτη των πλουτωνικών πετρωμάτων της περιοχής Ξανθής. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Θεσσαλονίκη.