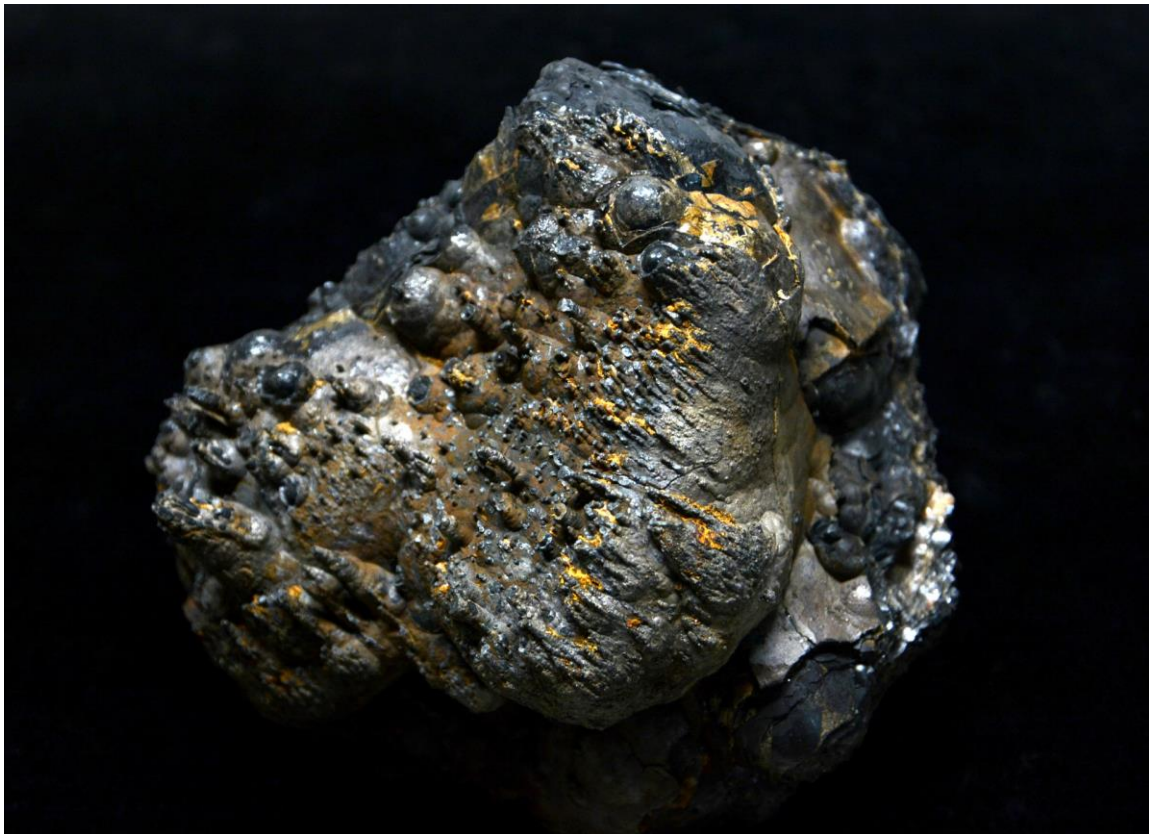




**ΠΕΡΙΣΤΕΡΙΔΟΥ ΕΥΤΥΧΙΑ**

A.E.M.: 5174

**ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΜΑΓΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΣΤΗ ΜΑΖΑ  
ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΗΣ**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Β. Μέλφος, Επίκουρος Καθηγητής

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018



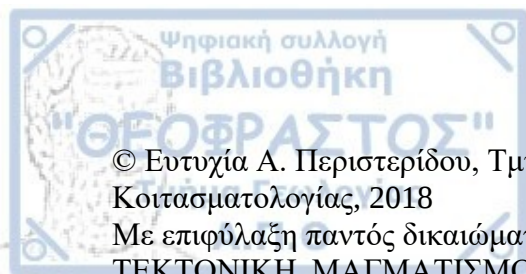


ΕΥΤΥΧΙΑ Α. ΠΕΡΙΣΤΕΡΙΔΟΥ  
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5174

## ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΜΑΓΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΣΤΗ ΜΑΖΑ ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,  
Τομέα Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας

**Επιβλέπων**  
Βασίλειος Μέλφος



© Ευτυχία Α. Περιστερίδου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΜΑΓΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΣΤΗ ΜΑΖΑ ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΗΣ –  
*Διπλωματική Εργασία*

© Eftychia A. Peristeridou, School of Geology, Dept. of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, 2018

All rights reserved.

TECTONICS, MAGMATISM AND MINERALIZATION IN THE RHODOPE MASSIF –  
*Bachelor Thesis*

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

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

*Εικόνα Εξωφύλλου: ©Νίκος Μπαχαρίδης*



## Περιεχόμενα

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| Πρόλογος .....                                        | 6  |
| Περίληψη .....                                        | 7  |
| Abstract .....                                        | 9  |
| 1. Εισαγωγή .....                                     | 10 |
| 1.1 Γενικά.....                                       | 10 |
| 1.2 Διαδικασία γένεσης μαγναντιούχων κοιτασμάτων..... | 12 |
| 2. Μάζα Ροδόπης .....                                 | 16 |
| 2.1 Γεωλογία της Μάζας της Ροδόπης .....              | 16 |
| 2.2 Εξέλιξη της περιοχής.....                         | 19 |
| 2.3.1 Εξέλιξη της Ροδόπης κατά τον Μεσοζωικό .....    | 21 |
| 2.3.2 Τριτογενής εξέλιξη του SRCC .....               | 22 |
| 2.4 Μαγματισμός στη Ροδόπη .....                      | 27 |
| 2.5 Κοιτασματογένεση .....                            | 28 |
| 3. Η Δράμα .....                                      | 32 |
| 3.1 Γεωλογία της περιοχής.....                        | 32 |
| 3.2 Χαρακτηριστικά του κοιτάσματος.....               | 34 |
| 3.2.1 Πρωτογενής μεταλλοφορία .....                   | 35 |
| 3.2.2 Υπεργενής μεταλλοφορία .....                    | 38 |
| 4. Τα μεταλλεία της περιοχής .....                    | 40 |
| 4.1 Μεταλλείο 25° χιλιόμετρο .....                    | 40 |
| 4.2 Μεταλλείο Γρανίτης .....                          | 43 |
| 4.3 Μεταλλείο 28° χιλιόμετρο .....                    | 43 |
| 4.4 Μεταλλείο Λαγός, Μεταλλείο Σταρέν .....           | 44 |
| 4.5 Μεταλλείο Καρποσλούκ .....                        | 44 |
| 4.6 Μεταλλείο Άγιοι Θεόδωροι .....                    | 45 |
| 4.7 Μεταλλείο Ταρτάνα .....                           | 46 |
| 4.8 Μεταλλείο Σύνθια.....                             | 47 |
| 4.9 Μεταλλείο Πύργοι .....                            | 47 |
| 5. Συζήτηση και συμπεράσματα .....                    | 49 |
| 6. Βιβλιογραφία .....                                 | 51 |



Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Τεκτονική, μαγματισμός και μεταλλογένεση στη Μάζα της Ροδόπης» εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017- 2018 , στον Τομέα Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης. Σκοπός της εργασίας είναι η συλλογή δεδομένων από τη σύνθεση διαφόρων εργασιών για την παρουσίαση της σχέσης των δράσεων της τεκτονικής με τον μαγματισμό και τη μεταλλογένεση στη Μάζα της Ροδόπης, καθώς και η μελέτη των κοιτασμάτων οξειδίων του μαγγανίου στην περιοχή της Δράμας και η σύνδεση της γένεσής τους με τα τεκτονικά γεγονότα. Μελετάται η γεωλογία της περιοχής και παρουσιάζονται οι θέσεις εκμετάλλευσης του παρελθόντος.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επίκουρο καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. κ. Βασίλειο Μέλφο, επιβλέποντα της εργασίας μου, που καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου μου προσέφερε τη βοήθειά του και χρήσιμες συμβουλές που με βοήθησαν στην επίτευξη του σκοπού μου. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε στη διάρκεια των προπτυχιακών μου χρόνων που με βοήθησαν να κατανοήσω το πιο ενδιαφέρον για εμένα αντικείμενο της Γεωλογίας με το οποίο θα ήθελα να ασχοληθώ, την Κοιτασματολογία.

Τέλος, σημαντική ήταν η υποστήριξη από την οικογένειά μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και του στενού φιλικού μου περιγύρου που μου προσέφεραν κουράγιο και δύναμη για μια επιτυχημένη φοιτητική πορεία.

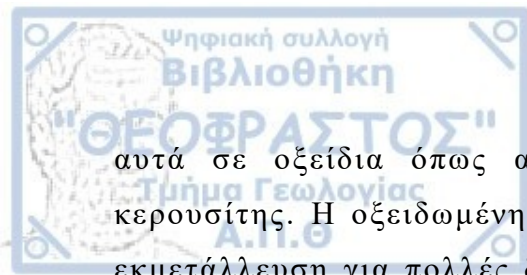


Τίτλος: Τεκτονική, μαγματισμός και μεταλλογένεση στη Μάζα της

Ροδόπης

Ευτυχία Περιστερίδου

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, μέσω συλλογής δεδομένων από τη σύνθεση προϋπαρχόντων εργασιών, της υπεργενούς μεταλλοφορίας οξειδίων του μαγγανίου που φιλοξενούνται στους πρόποδες τους όρους Φαλακρό, στο δυτικό τμήμα της Μάζας της Ροδόπης. Η μεταλλοφορία αυτή είναι αποτέλεσμα της οξείδωσης πρωταρχικών κοιτασμάτων αντικατάστασης Pb- Zn σε ανθρακικά πετρώματα, υδροθερμικής προέλευσης, πλούσια σε Mn ηλικίας 32.5-33.0 Ma. Τα πετρώματα της περιοχής ανήκουν στο SRCC της Μάζας της Ροδόπης είναι Ερκύνιας ηλικίας και αποτελούνται από γνεύσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, αμφιβολίτες και μάρμαρα. Η γένεση των υδροθερμικών ρευστών συνδέεται με τα ενδιάμεσης έως όξινης σύστασης ασβεσταλκαλικά πετρώματα, γρανοδιοριτικά, ρυοδακιτικά και ανδεσιτικά πυριγενή σώματα που διεισδύουν στην περιοχή ηλικίας  $30.0 \pm 1$  Ma. Η μεταλλοφορία βρίσκεται κυρίως στους ανώτερους ορίζοντες του μαρμάρου, όπου ελέγχεται από τα ρήγματα, ενώ σε αμελητέα ποσότητα βρίσκουμε και στις διαρρήξεις των σχιστολίθων. Η πρωτογενής μεταλλοφορία αποτελείται από ανθρακικά και πυριτικά ορυκτά που περιέχουν Mn (ροδοχρωσίτης, ανκερίτης, μαύρος ασβεστίτης), συνοδεία χαλαζία και πολυμεταλλικών σουλφιδίων κυρίως σφαλερίτη πλούσιο σε Zn. Με την εισχώρηση του μετεωρικού νερού πλούσιο σε CO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> προκαλείται η διάλυση του πετρώματος ξενιστή και της μεταλλοφορίας, εμπλουτίζονται τα ρευστά σε στοιχεία και μέσω των ασυνεχειών του πετρώματος, τις οποίες διευρύνουν, κυκλοφορούν στο πέτρωμα και στις κατάλληλες φυσικοχημικές συνθήκες που προκαλείται ο κορεσμός τους αποθέτουν οξείδια του Mn. Έτσι, πραγματοποιείται η υπεργενής διαδικασία γένεσης των κοιτασμάτων πλούσιων σε Mn που εμφανίζονται με ακανόνιστη μορφή στο πέτρωμα και αποτελούνται από ορυκτολογικές παραγενέσεις με MnO-gel, τοντοροκίτη, νσουτίτη, χαλκοφανίτη, μπιρνεσσίτη, κρυπτομέλανα, πυρολουσίτη και ρανσιεΐτη. Τα πρωτογενή σουλφίδια με τη δράση των μετεωρικών νερών μετατράπηκαν κι



αυτά σε οξείδια όπως αζουρίτης, μαλαχίτης, γκαιτίτης, λειμωνίτης και κερουσίτης. Η οξειδωμένη αυτή μορφή μεταλλοφορίας υπέστησε οικονομική εκμετάλλευση για πολλές δεκαετίες για την εξόρυξη Mn, κατάλληλο για την κατασκευή μπαταριών, ενώ πλέον έχει εγκαταλειφθεί.



Abstract

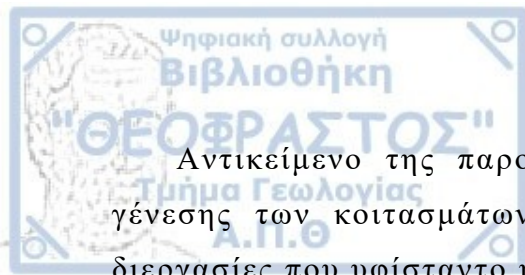
Title: Tectonics, magmatism and mineralization in the Rhodope Massif  
by Eftychia Peristeridou

The subject of the following Bachelor Thesis is the study of supergene Mn-oxides that are found in the marbles of Falakro mountain, in the Western part of the Rhodope Massif. The mineralization was caused by the oxidation of primary Pb- Zn carbonate replacement deposits. These deposits were created by hydrothermal activity, they were rich in Mn and their age is estimated at around 32.5- 33.0 Ma. The rocks of the region belong to the South Rhodope Core Complex and their age is Hercynian. They consist of gneiss, mica schists, amphibolites and marbles. The genesis of hydrothermal fluids is associated with the intermediate to acidic calc alkaline igneous rocks, granodiorites, rhyodacites and andesite that penetrate the metamorphic basement and their age is  $30.0 \pm 1$  Ma. The mineralization is mainly found in the upper sequence of the marble and is controlled by the faults. There is also a negligible amount in the schists' fractures. The primary mineralization consists of carbonate and silicate ores containing Mn (rhodochrosite, ankerite, black calcite) with quartz and polymetallic sulfides, mainly Zn- rich sphalerite. The penetration of the meteoric water rich in  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$ , causes the dissolution of the host rock and the primary mineralization. This results in the enrichment of fluids in elements that move through the fractures, causing them to expand, and under the appropriate physicochemical conditions the precipitation of Mn- oxides happens. The mineral assemblage of the supergene mineralization consists of  $\text{MnO}$ - gel, todorokite, nsutite, chalcophanite, birnessite, cryptomelane, pyrolusite and rancieite. The primary sulfides are transformed into azurite, malachite, goethite, limonite and cerussite. This oxidized form of mineralization had been exploited for many decades to extract Mn, but has now been abandoned.

Η μεταλλογενετική επαρχία της Μάζας της Ροδόπης είναι μέρος της ευρύτερης μεταλλογενετικής επαρχίας της Τηθύος. Οι ηλικίες των αποθέσεων των μεταλλοφοριών αντικατοπτρίζουν τα διάφορα μαγματικά επεισόδια που εκδηλώθηκαν κατά την συν- ορογενετική έως βραδυ- ορογενετική φάση έκτασης στην περιοχή του βορειοανατολικού Αιγαίου που ξεκίνησε περίπου στα 45Ma (Melfos and Voudouris 2017).

Η Δυτική Μάζα της Ροδόπης φιλοξενεί μεγάλο αριθμό εμφανίσεων μεταλλικών ορυκτών που περιλαμβάνουν αξιόλογες ποσότητες βασικών, αλλά και πολύτιμων μετάλλων (Mn, Fe, Au, Ag, Pb, Zn, Cu). Γι' αυτό το λόγο αποτέλεσαν αντικείμενο εκμετάλλευσης, ήδη από την αρχαιότητα, προς εύρεση κυρίως πολύτιμων μετάλλων που θα αναβάθμιζαν τις εμπορικές συναλλαγές. Όμως, ακόμη και σήμερα με την ανάπτυξη καινούριων μεθόδων έρευνα και εκμετάλλευσης η Ροδόπη αποτελεί τον στόχο πολλών ελληνικών, ακόμη και ξένων εταιριών με επενδύσεις πολλών εκατομμυρίων. (Tsirambides 2005, Tsirambides and Filippidis 2012 a, b, c).

Στα βόρεια της περιοχής της Δράμας, στον ορεινό όγκο του Φαλακρού είχε αναπτυχθεί κατά τις δεκαετίες 1930- 1990 μεταλλευτική δραστηριότητα σε περίπου δέκα μεταλλεία για την εξόρυξη μαγγανίου σε ένα από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα μαγγανίου της Ελλάδος. Το εξορυσσόμενο μέταλλευμα περιείχε 35- 45%  $MnO_2$ , ενώ ύστερα από την επεξεργασία του στην μονάδα εμπλουτισμού το ποσοστό αυτό αυξανόταν φτάνοντας το 74% (Επεξηγηματικών τεύχος του μεταλλευτικού χάρτου Ελλάδος 1965). Το προϊόν αυτό εξαγόταν στην παγκόσμια αγορά με τις ονομασίες Scalma 74 (ελάχιστο περιεχόμενο σε  $MnO_2$  72%) και Scalma 72 (ελάχιστο περιεχόμενο σε  $MnO_2$  70%), με κύριους εξαγωγείς στη Γαλλία, Βουλγαρία, Τουρκία, Αίγυπτο και Ισπανία (Tsimbarides 2005, Tsimbarides and Filippidis 2012c). Τα αποθέματα Mn στη χώρα μας υπολογίζονται σύμφωνα με τους Tsimbarides and Filippidis (2012b) ότι ανέρχονται στους  $2.400 \times 10^3$  τόνους.

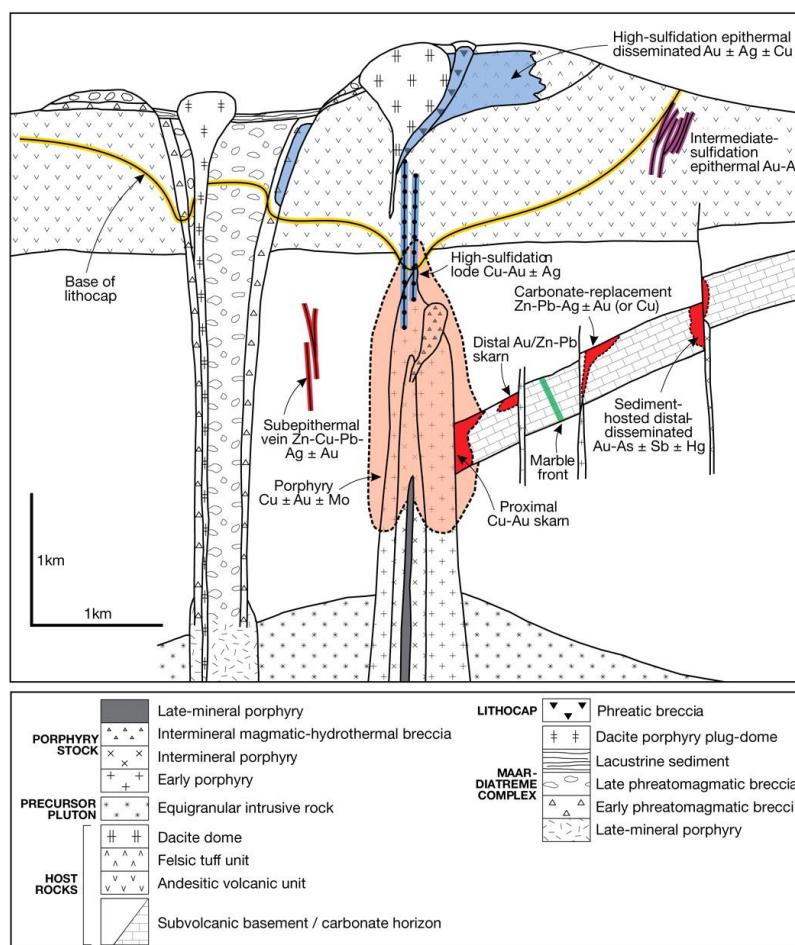


Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση του τρόπου γένεσης των κοιτασμάτων αυτών και η σύνδεσή τους με τις τεκτονικές διεργασίες που υφίσταντο η Ροδόπη.

## 1.2 Διαδικασία γένεσης μαγγανιούχων κοιτασμάτων

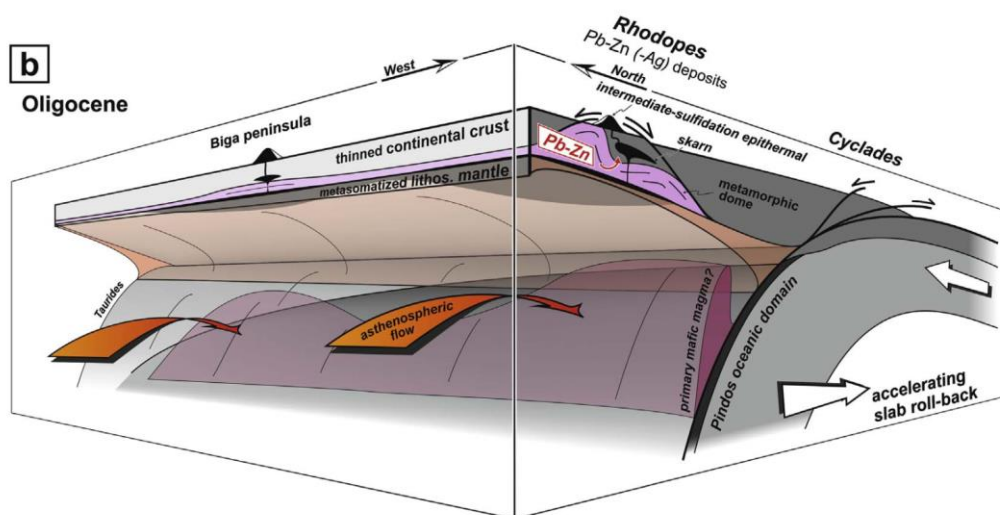
Τα μαγγανιούχα κοιτάσματα προέρχονται από τη διάβρωση πρωταρχικών κοιτασμάτων αντικατάστασης Pb- Zn σε ανθρακικά πετρώματα, υδροθερμικής προέλευσης.

Γενικά, τα υδροθερμικά κοιτάσματα παρουσιάζουν μια ζωνώδη κατανομή τόσο κάθετα (σε βάθος), όσο και οριζόντια σε σχέση με τη μαγματική διείσδυση που αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος (Σχ. 1.1). Τα κοιτάσματα αντικατάστασης βασικών μετάλλων (Pb- Zn) φιλοξενούνται στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο της Ροδόπης, στα ανθρακικά κυρίως πετρώματα που παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαλυτότητα. Ανήκουν στην κατηγορία των επιθερμικών κοιτασμάτων ενδιάμεσης θείωσης (intermediate sulfidation- IS) βασικών μετάλλων Pb- Zn- Cu± Ag- Au (Arikas and Voudouris 1998, Hedenquist et al. 2000, Marchev et al. 2005).



Σχήμα 1.1. Κατανομή των υδροθερμικών κοιτασμάτων με κέντρο την μαγματική διείσδυση. (Sillitoe 2010)

Η γένεση των υδροθερμικών ρευστών σχετίζεται με τον ασβεσταλκαλικό μαγματισμό που εκδηλώνεται με τις όξινες έως ενδιάμεσες πυριγενείς διεισδύσεις, ηλικίας Άνω Ηωκαίνου- Ολιγοκαίνου (29-32Ma) στη Ροδόπη, ως αποτέλεσμα της εκτατικής τεκτονικής και αποκάλυψης των μεταμορφωμένων πυρήνων (Σχ. 1.2), καθώς τα κοιτάσματα μετασωμάτωσης σχετίζονται γενετικά και χωρικά με τα ρήγματα που δρουν σε αυτές τις διαδικασίες (Heinrich and Neubauer 2002, Marchev 2004, Bonsall 2008, Márton et al. 2009). Σύμφωνα με τους De Boorder et al. (1998) η μεταλλογένεση σχετίζεται με τον διαχωρισμό του slab που επιτρέπει την απότομη άνοδο υλικών από τον ασθενοσφαιρικό μανδύα σε ρηχά βάθη.



Σχήμα 1.2. Τρισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης της ζώνης υποβύθισης κατά το Ολιγόκαινο που έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό των επιθερμικών κοιτασμάτων Pb- Zn (Menant et al. 2018)

Η δράση των υδροθερμικών ρευστών συνοδεύεται από τη μετασωμάτωση του πετρώματος ξενιστή, δηλαδή μεταβολές στην ορυκτολογία και τη δομή, λόγω της μετακίνησης των συστατικών στοιχείων (Rakovan 2005). Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη γένεση ανθρακικών (ροδοχρωσίτης) ή πυριτικών (νεοτοκίτης) ορυκτών του μαγγανίου. Αργότερα, γίνεται από τα ρευστά η απόθεση των πολυμεταλλικών σουλφιδίων (Kuleshov et al. 2017).

Η αποκάλυψη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων που περιέχουν πυριτικά ή ασβεστιτικά ορυκτά του μαγγανίου και η επικράτηση ήσυχου τεκτονικού περιβάλλοντος ευνοούν την διάβρωση των μεταλλοφοριών και τον εμπλουτισμό τους σε μαγγανιούχα οξείδια. Ο σχηματισμός και η διατήρηση των υπεργενών οξειδίων του Mn σηματοδοτεί την ισορροπία μεταξύ χημικής

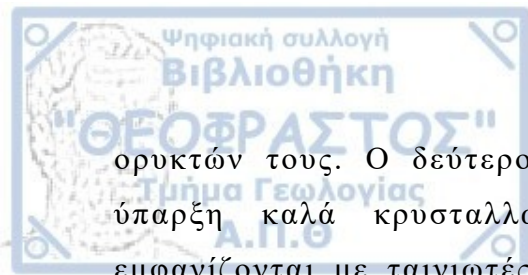
και μηχανικής διάβρωσης δημιουργώντας ένα παχύ προφίλ διάβρωσης (Deng and Li 2013).

Στη διαδικασία διάβρωσης των πρωτογενών μεταλλοφοριών και σχηματισμό κοιτασμάτων Μπ ορισμένοι παράγοντες καθορίζουν το ρυθμό και το μέγεθος ανάπτυξής τους. Κρίνεται απαραίτητο να υπάρχει συνέχεια ανάπτυξης των ορυκτών, χωρίς τη διακοπή των διαδικασιών, στις οποίες συντελούν οι παλαιοκλιματικές συνθήκες που ενισχύουν ή διακόπτουν τις διαδικασίες διάβρωσης. Φυσικά, το μέγεθος του προκύψαντος κοιτάσματος ή εμφάνισης εξαρτάται από την ποσότητα των διαθέσιμων πρωταρχικών ορυκτών του μαγγανίου που υπόκεινται μεταβολές. Τέλος, σημαντικό ρόλο, όπως προείπαμε, παίζουν τα διαλύματα, η φυσική και χημική τους κατάσταση, για το βαθμό που μπορούν να προκαλέσουν τις μεταβολές.

Ο Kuleshov (2011) διαχωρίζει τα κοιτάσματα Μπ σε τέσσερεις γενετικούς τύπους με βάση την προέλευση:

- 1) Ιζηματογενείς. Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται όσα κοιτάσματα των οποίων τα αρχικά μαγγανιούχα ορυκτά φιλοξενούνται σε ιζηματογενείς σχηματισμούς θαλάσσιου περιβάλλοντος.
- 2) Ηφαιστειοϊζηματογενή. Φιλοξενούνται σε ιζηματογενή πετρώματα και σχετίζονται με υδροθερμικές διαδικασίες που δημιουργούνται από εκδηλώσεις ηφαιστειότητας.
- 3) Επιγενετικά. Για τον σχηματισμό τους είναι απαραίτητη η συμμετοχή CO<sub>2</sub> που συμβάλλει στην διαδικασία της διαγένεσης.
- 4) Υπεργενή. Αποτελούν προϊόντα διάβρωσης αρχικών μαγγανιούχων ορυκτών και σχετίζονται με την διήθηση ρευστών και πλήρωση καρστικών εγκοίλων.

Επίσης, η μεταλλοφορία διακρίνεται σε δύο τύπους που ξεχωρίζουν μεταξύ τους ορυκτολογικά και στους ιστούς που παρουσιάζουν τα ορυκτά. Ο πρώτος τύπος είναι αποτέλεσμα της επί τόπου αντικατάστασης των πρόδρομων ορυκτών από υπεργενή οξείδια του Μπ. Χαρακτηρίζεται από μαζώδη, μικροκρυσταλλικά συσσωματώματα και κολλοειδείς υφές. Τα κύρια ορυκτολογικά τους χαρακτηριστικά είναι ο πυρολουσίτης και ο κρυπτομέλανας συνοδευόμενα από υπολείμματα των πρωταρχικών πετρωμάτων και των



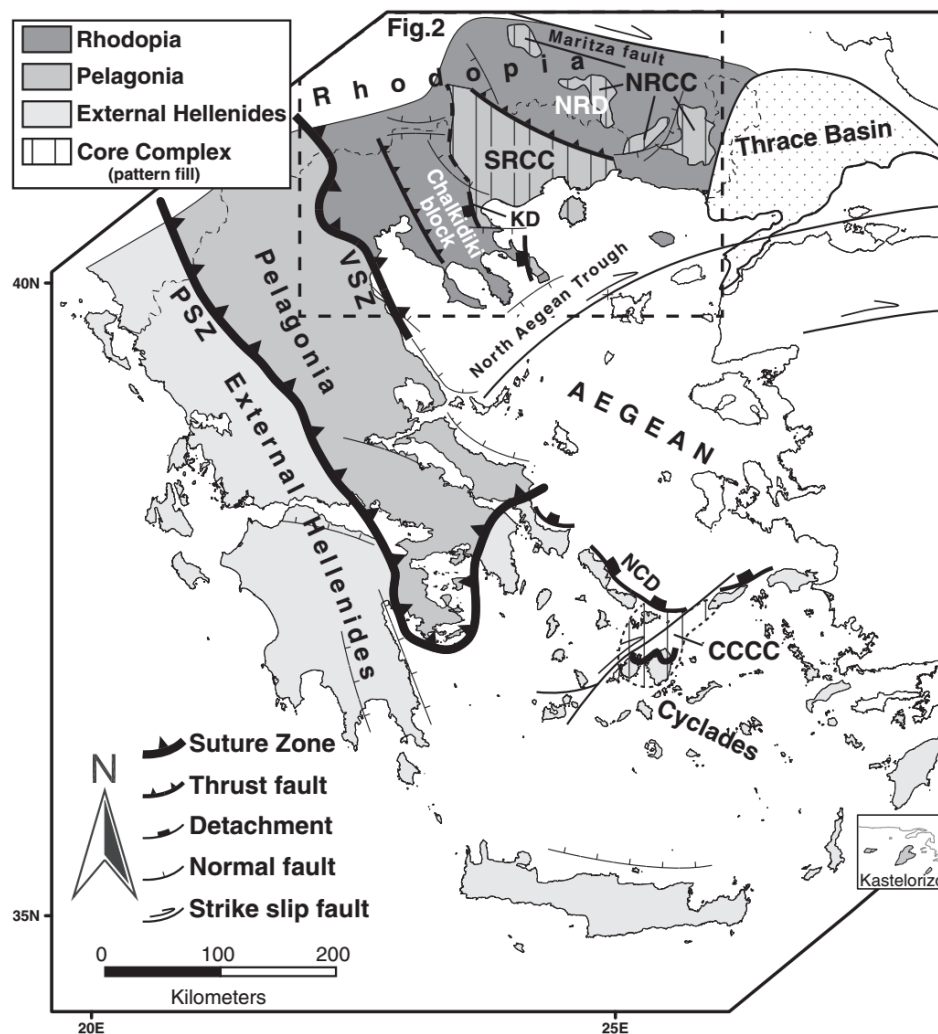
ορυκτών τους. Ο δεύτερος τύπος μεταλλοφορίας χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη καλά κρυσταλλωμένων αποκλειστικά οξειδίων του Mn που εμφανίζονται με ταινιωτές ή βοτρυοειδείς υφές. Αποτελούνται από οξείδια τετρασθενούς μαγγανίου ( $Mn^{4+}$ ) που φαίνεται να έχουν αποτεθεί από τα διαλύματα διάβρωσης στα σπασίματα ή στη σχιστότητα του πετρώματος ξενιστή. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δεύτερος τύπος μεταλλοφορίας φέρει μεγαλύτερα ποσοστά Mn και άρα αποτελεί υψηλότερη ποιότητα μεταλλεύματος.



## 2. Μάζα Ροδόπης

### 2.1 Γεωλογία της Μάζας της Ροδόπης

Η Ροδόπη, γνωστή ως Rhodope Metamorphic Province, αποτελεί ένα εκτεταμένο τεκτονικό στοιχείο μεταξύ δύο αλυσίδων βουνών που έχουν σχηματιστεί από τη δράση της Αλπικής ορογένεσης, των Καρπάθιων-Βαλκανίδων στα βόρεια και των Δειναρίδων-Ελληνίδων στα νότια (Burg 2012). Η αλυσίδα των οροσειρών Άλπεων-Ιμαλαΐων είναι αποτέλεσμα της σύγκλισης των δύο ηπειρωτικών πλακών της Γκοτβάννα, κινούμενη προς βόρεια, και του νοτιότερου άκρου της Ευρασίας δημιουργώντας συνθήκες συμπίεσης κατά τον Μεσοζωικό και Καινοζωικό αιώνα (Jolivet et al. 2013, Kydonakis et al. 2015a, b). Όπως υποστηρίζεται, το Ελληνικό ορογενές συγκροτείται από τρία ηπειρωτικά τεμάχια που διαχωρίζονται μεταξύ τους από ωκεάνια τμήματα, που αποτελούν ζώνες συρραφής. Από τα ανατολικά προς τα δυτικά αυτά είναι η Ροδοπία, η ζώνη συρραφής του Βαρδάρη-Αξιού (Vardar Suture Zone), η Πελαγονία, η ζώνη συρραφής της Πίνδου (Pindos Suture Zone) και οι Εξωτερικές Ελληνίδες (Σχ. 2.1).



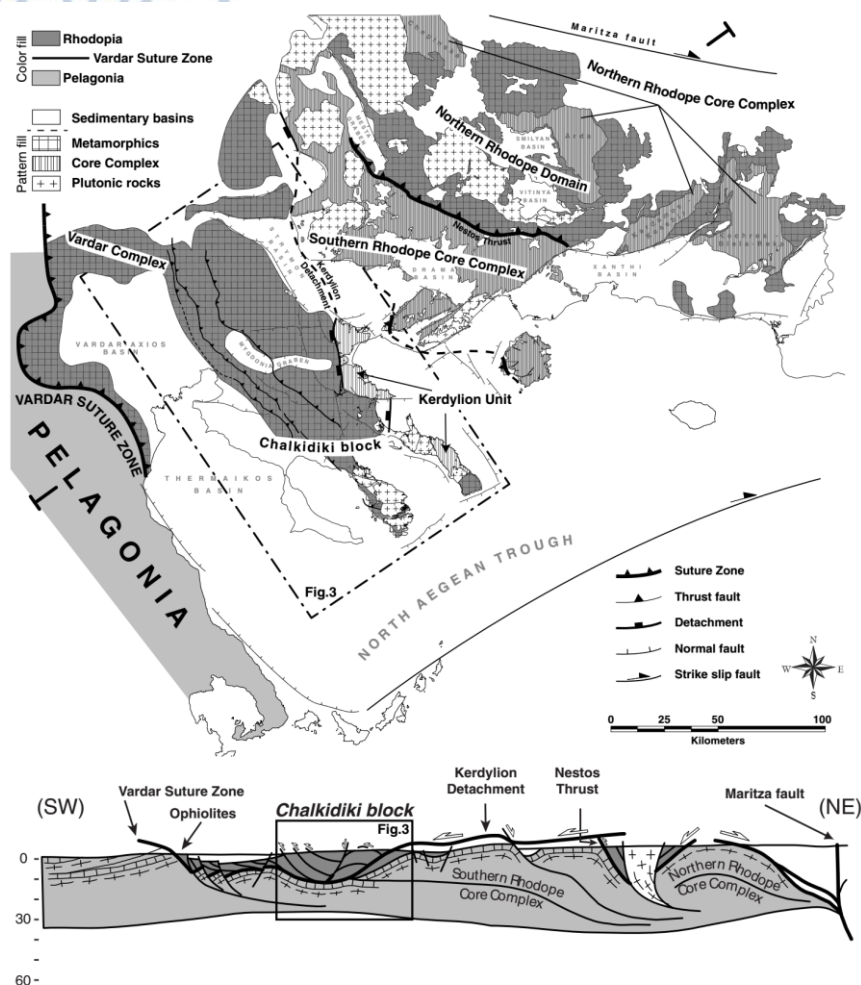
Σχήμα 2.1. Ο διαχωρισμός του Ελληνικού χώρου στα επιμέρους ηπειρωτικά τεμάχια και οι ζώνες συρραφής που παρεμβάλλονται μεταξύ τους (Kydonakis et al. 2015b)

Στο χώρο της Βορείου Ελλάδος και Νοτίου Βουλγαρίας, η Ροδόπη οριοθετείται στα βόρεια από τις γεωτεκτονικές ενότητες Sredna Gora και Strandja με το δεξιόστροφο strike slip ρήγμα Maritsa, στα δυτικά βρίσκεται η Περιοδοπική ζώνη, στα νότια συνορεύει με το Βόρειο Αιγαίο και στα ανατολικά χάνεται κάτω από τα Νεογενή ιζήματα της λεκάνης της Θράκης στην Τουρκία (Σχ. 2. 2) (Himmerkus et al. 2009, Burg 2012, Kydonakis et al. 2015 και Kounov et al. 2015).

Έχει επικρατήσει ο διαχωρισμός της Ροδόπης σε τρεις υπο- περιοχές, που από ΒΑ προς ΝΔ είναι η Ενότητα της Βόρειας Ροδόπης (North Rhodope Domain- NRD), το μεταμορφικό σύμπλεγμα της Νότιας Ροδόπης (Southern Rhodope Core Complex- SRCC) και το μπλοκ της Χαλκιδικής, το οποίο

συμπεριλαμβάνει τη Σερβομακεδονική μάζα λόγω των ομοιοτήτων στο βαθμό μεταμόρφωσης και των τεκτονικών δομών των πετρωμάτων, εκτός της ενότητας των Κερδυλίων, η οποία εντάσσεται στο SRCC με βάση τα ίδια κριτήρια (Kounov et al. 2015, Kydonakis et al. 2015b) (Σχ. 2.2). Τα πετρώματα που χαρακτηρίζουν τη Ροδόπη σε όλη την έκτασή της είναι πετρώματα μεταμορφωμένα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης που συμμετέχουν στην Αλπική ορογένεση και την επερχόμενη εκτατική τεκτονική κατάρρευσης κατά τον Καινοζωικό έχοντας ως αποτέλεσμα την αποκάλυψη των μεταμορφικών πυρήνων, τη δημιουργία όξινου ως βασικού μαγματισμού που διεισδύει στα μεταμορφωμένα και το σχηματισμό ιζηματογενών λεκανών (Marchev et al. 2005, Brun and Sokoutis 2007, Burg 2012, Melfos and Voudouris 2012, Kiliass et al. 2015, Kounov et al. 2015, Kydonakis et al. 2015a, b).

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση της Γεωλογίας του SRCC, καθώς σε αυτό συγκαταλέγεται η περιοχή ενδιαφέροντος της συγκεκριμένη εργασίας, η Δράμα.



Σχήμα 2.2. Διαχωρισμός της Μάζας της Ροδόπης στις επιμέρους ενότητες της Βόρειας Ροδόπης (North Rhodope Domain- NRD), στο Μεταμορφικό Σύμπλεγμα της Νότιας Ροδόπης (South Rhodope Core Complex- SRCC) και του Τεμάχου της Χαλκιδικής (Chalkidiki block) (Kydonakis et al. 2015b)

## 2.2 Εξέλιξη της περιοχής

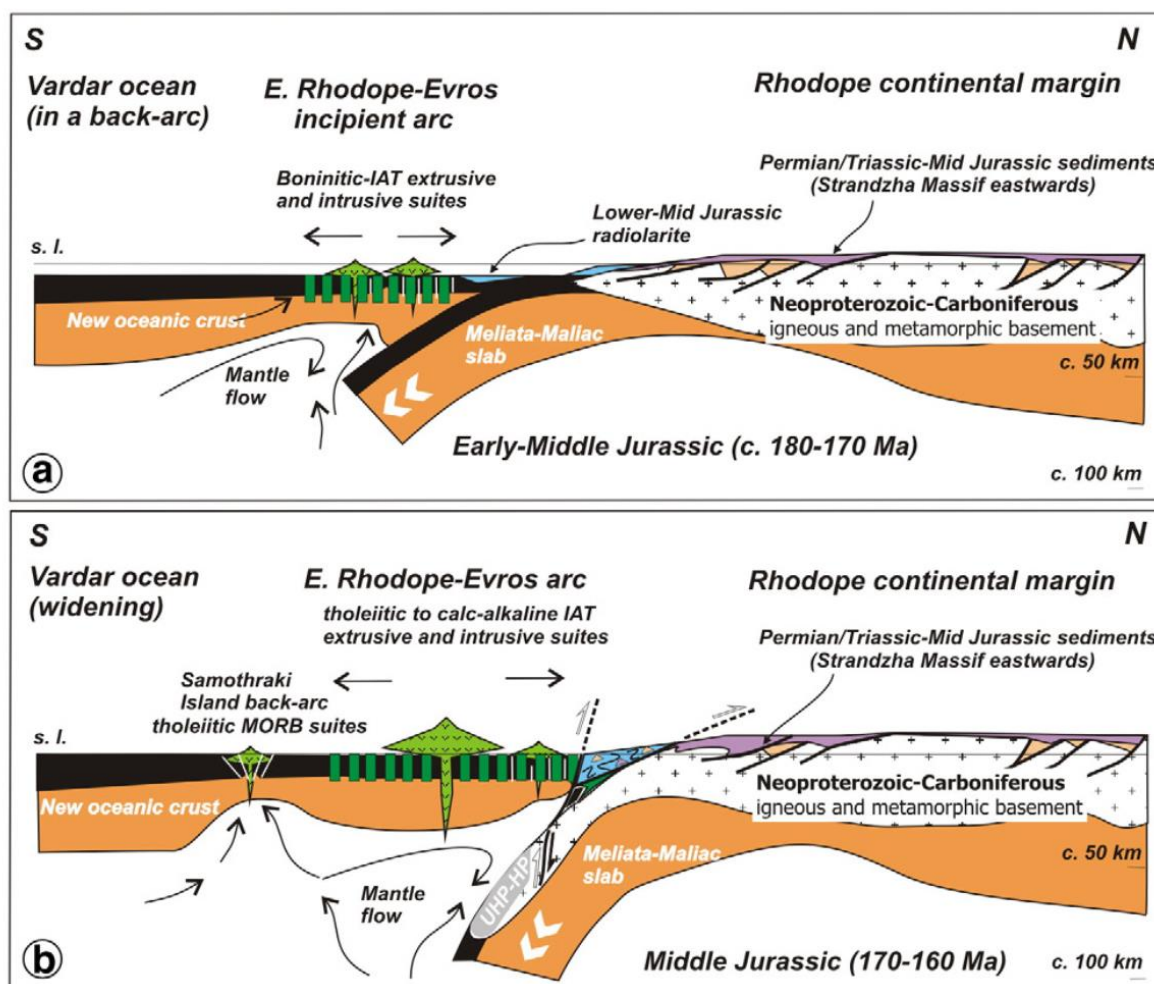
Το SRCC βρίσκεται στα νοτιοδυτικά της Μάζας της Ροδόπης και είναι ένα τεκτονικό παράθυρο που αποκαλύπτει στην επιφάνεια την Πελαγονική (Koupon et al. 2015, Kydonakis et al. 2015a, Brun et al. 2016). Η ανάπτυξη του SRCC διαχώρισε τη Ροδοπία σε δύο τμήματα, το Μπλοκ Χαλκιδικής και το NRD, με τα οποία οριοθετείται μέσω του ρήγματος αποκόλλησης μικρής γωνίας κλίσης (detachment) των Κερδυλίων και του thrust του Νέστου αντίστοιχα. Η εκτατική τεκτονική στη Ροδόπη άρχισε να δρα από το Μέσο Ηώκαινο (~45 Ma) (Brun et al. 2016) και σε διάρκεια 40My, μέχρι το Μέσο Μειόκαινο, είχε δράσει για περισσότερα από 120Km εμφανίζοντας στην επιφάνεια τον πιθανόν μεγαλύτερο

μεταμορφικό πυρήνα παγκοσμίως (Brun and Sokoutis 2007). Κατά την αποκάλυψη του core complex το άνω τέμαχος του detachment των Κερδυλίων, δηλαδή το μπλοκ Χαλκιδικής περιστράφηκε κατά 30° δεξιόστροφα, λόγω της δράσης του δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης (strike slip) της Βόρειας Ανατολίας (North Anatolian Fault- NAF), προσδίδοντας το κλειστό τριγωνικό σχήμα του SRCC προς τα ΒΔ (Brun and Sokoutis 2007, Brun et al. 2016).

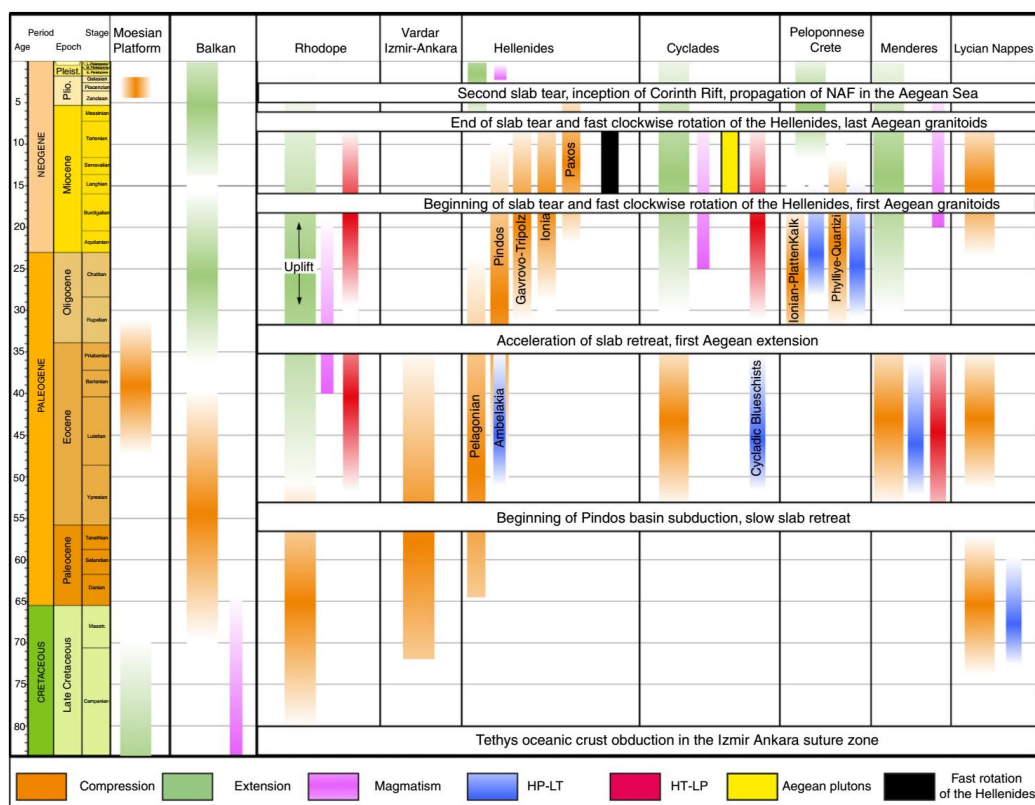
Το SRCC μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις επιμέρους ενότητες που διαχωρίζονται με τεκτονικές επαφές. Η κατώτερη, αναφερόμενη ως Παράθυρο Δράμας, αποτελείται από μαζώδεις ορίζοντες μαρμάρων στους οποίους παρεμβάλλονται αμφιβολίτες και μεταπηλίτες. Στα βόρεια, η κατώτερη ενότητα χωρίζεται μέσω του thrust του Νέστου από την ενδιάμεση ενότητα του Σιδηρόνερου, όπου εμφανίζονται πετρώματα υψηλότερου βαθμού μεταμόρφωσης που φτάνουν ως αμφιβολιτική- γρανουλιτική φάση, ενώ στα νοτιοδυτικά το detachment των Κερδυλίων φέρει σε επαφή το Παράθυρο της Δράμας με πετρώματα (σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, αμφιβολίτες και κατά τόπους υπερβασικά) που φτάνουν ως την αμφιβολιτική φάση μεταμόρφωσης και αποτελούν την ανώτερη ενότητα, τον Βερτίσκο (Κουνον 2015). Οι πρωτόλιθοι από τους οποίους προέρχονται θεωρούνται Παλαιοζωικής ηλικίας (Ερκύνιας). Σε ορισμένα τμήματα τα πετρώματα έχουν υποστεί υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τη μερική τήξη τους και τη δημιουργία μειγματιτών (Θάσος, Κερδύλια). Στα μεταμορφωμένα διεισδύουν κατά το Ολιγόκαινο- Κάτω Μειόκαινο οι συν- τεκτονικοί πλουτωνίτες της Ξάνθης, της Βροντούς (Συμβόλου) και της Καβάλας (Brun and Sokoutis 2007, Jolivet and Brun 2010, Kydonakis et al. 2014, Kounon et al. 2015), ενώ δημιουργούνται κανονικά ρήγματα στη μάζα των μεταμορφωμένων, που είναι αποτέλεσμα θραυστιγενούς τεκτονικής έκτασης δρώντας από το Μέσο Μειόκαινο (Τορτόνιο) έως σήμερα, με αποτέλεσμα να δημιουργούν τις Νεογενείς ιζηματογενείς λεκάνες ΒΑ- ΝΔ διεύθυνσης, όπως του Στρυμόνα, των Σερρών, του Ορφανού- Πρίνου και της Δράμας (Brun and Sokoutis 2007, Kydonakis et al. 2014, Kydonakis et al. 2015a, Brun et al. 2016).

### 2.3.1 Εξέλιξη της Ροδόπης κατά τον Μεσοζωικό

Σύμφωνα με τους Bonev et al. 2015 ο ορογενετικός κύκλος στη Ροδόπη ξεκινά από την ενδοωκεάνια υποβύθιση του Μελιάτα- Μαλιακού ωκεανού προς τα ΝΔ κατά την έναρξη του Ιουρασικού (180- 170Ma) (Σχ. 2.3a) και συνεχίστηκε μέχρι το Άνω Ιουρασικό δημιουργώντας τα πετρώματα υψηλής έως υπερ- υψηλής πίεσης, τους εκλογίτες, καθώς και βασικό μαγματισμό (Σχ. 2.3b). Κατά το Μέσο Κρητιδικό τα μεταμορφωμένα πετρώματα υπέστησαν οπισθοδρομική μεταμόρφωση αμφιβολιτικής φάσης σε συνθήκες πίεσης 0,7 GPa και θερμοκρασίας 720°C (Burg 2012, Kydonakis et al. 2015a). Η τεκτονική συμπίεσης που επικρατεί στο Μεσοζωικό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών thrust και τη σταδιακή πάχυνση του φλοιού.



Σχήμα 2.3. Στάδια εξέλιξης της υποβύθισης στη Ροδόπη κατά το Κάτω Ιουρασικό (a) και Άνω Ιουρασικό (b) (Bonev et al. 2015)



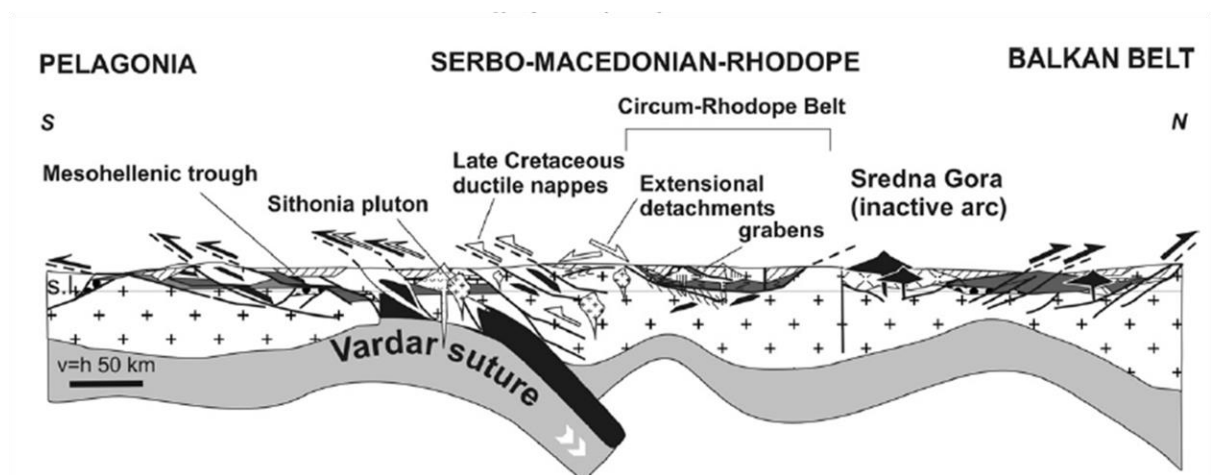
Σχήμα 2.4. Σύνοψη των τεκτονικών, μαγματικών και μεταμορφικών γεγονότων που επηρέασαν την Μάζα της Ροδόπης, αλλά και την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου (Jolivet et al. 2015)

### 2.3.2 Τριτογενής εξέλιξη του SRCC

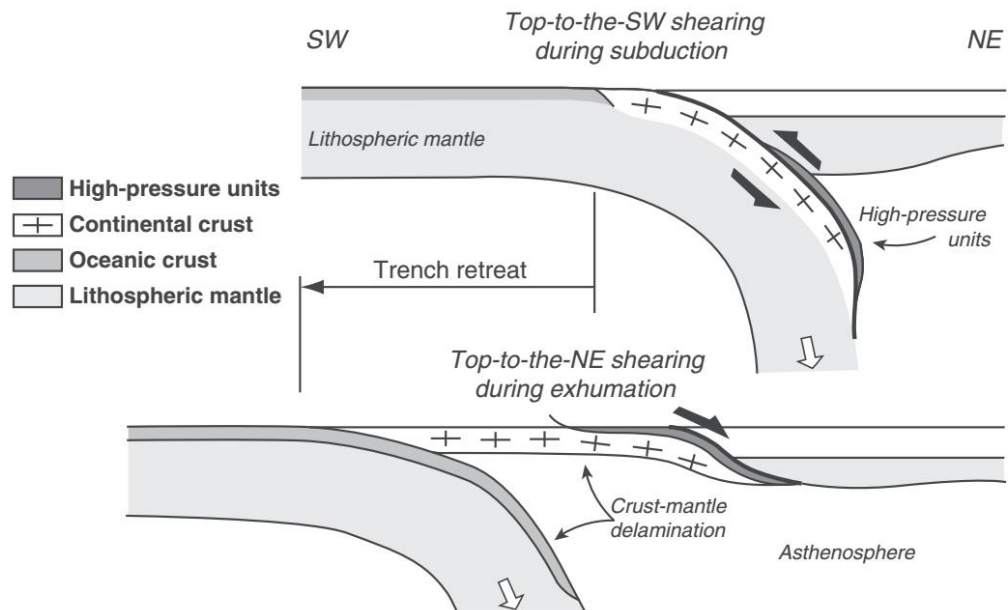
Αμέσως μετά το Παλαιόκαινο, στα 55Ma περίπου, αρχίζει η κατάρρευση του ορογενούς μέσω της εκτατικής τεκτονικής που δημιουργούν τα ρήγματα αποκόλλησης μικρής γωνίας κλίσης (detachment faults) (Σχ. 2.5), τα οποία αποκαλύπτουν στην επιφάνεια επιμήκεις δόμους μεταμορφικών συμπλεγμάτων, όπως το SRCC (Bonev et al. 2006, Brun and Sokoutis 2007, Burg 2012, Kydonakis et al. 2014, Bonev et al. 2015, Kydonakis et al. 2015b). Η εκταφή του SRCC έγινε από το Μέσο Ηώκαινο ως το Μέσο Μειόκαινο (Brun and Sokoutis 2007) λόγω του ότι η καταδυόμενη Αφρικανική ωκεάνια πλάκα που καταβυθίζεται κάτω από το νότιο περιθώριο της Ευρασίας αρχίζει να υποχωρεί (slab rollback) προς τα νότια από τα 45Ma (Jolivet et al. 2013, Brun et al. 2016).

Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή του Αιγαίου η έκταση ακολούθησε τη συρραφή των ωκεανών του Βαρδάρη και της Πίνδου κατά το Κρητιδικό με Ηώκαινο, όπου προκλήθηκε η σύγκρουση της Ροδοπίας, της Πελαγονίας και

των εξωτερικών Ελληνίδων. Η σύγκρουση των ηπειρωτικών τεμάχων είχε ως αποτέλεσμα την ανύψωση της συμπιεστικής σφήνας λόγω πάχυνσης του φλοιού (στο Αιγαίο ο φλοιός έχει πάχος περισσότερο από 25Km). Όμως, η κατάσταση αυτή δημιούργησε αστάθεια λόγω του αυξημένου βάρους και έτσι άρχισε η έκταση στην πίσω από το τόξο περιοχή (back arc) που οδήγησε στην εκταφή δύο μεταμορφικών συμπλεγμάτων πάνω και κάτω από τη ζώνη συρραφής του Βαρδάρη αντίστοιχα, του SRCC στη Ροδόπη, και του μεταμορφικού συμπλέγματος των Κυκλάδων (Cyclades Core Complex- CCC) πιο νότια. Το SRCC αποκαλύπτει πετρώματα μεταμορφωμένα σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και διαχωρίζει το NRD στα ανατολικά και το μπλοκ της Χαλκιδικής στα δυτικά, που στον Μεσοζωικό υπέστησαν τα ίδια τεκτονικά και θερμικά γεγονότα (Kydonakis et al. 2015a, b). Σύμφωνα με τους Brun and Sokoutis (2007) η έκταση στις Κυκλάδες ξεκίνησε 10-15 Ma αργότερα και η αποκάλυψη του CCC έγινε κατά το Κάτω Μειόκαινο, φέροντας στην επιφάνεια πετρώματα υψηλής πίεσης (μπλε σχιστόλιθοι) που αντιπροσωπεύουν το υποβυθιζόμενο ηπειρωτικό τέμαχος που αποκολλήθηκε από το slab και βγήκε στην επιφάνεια κατά το rollback (Σχ. 2.6).



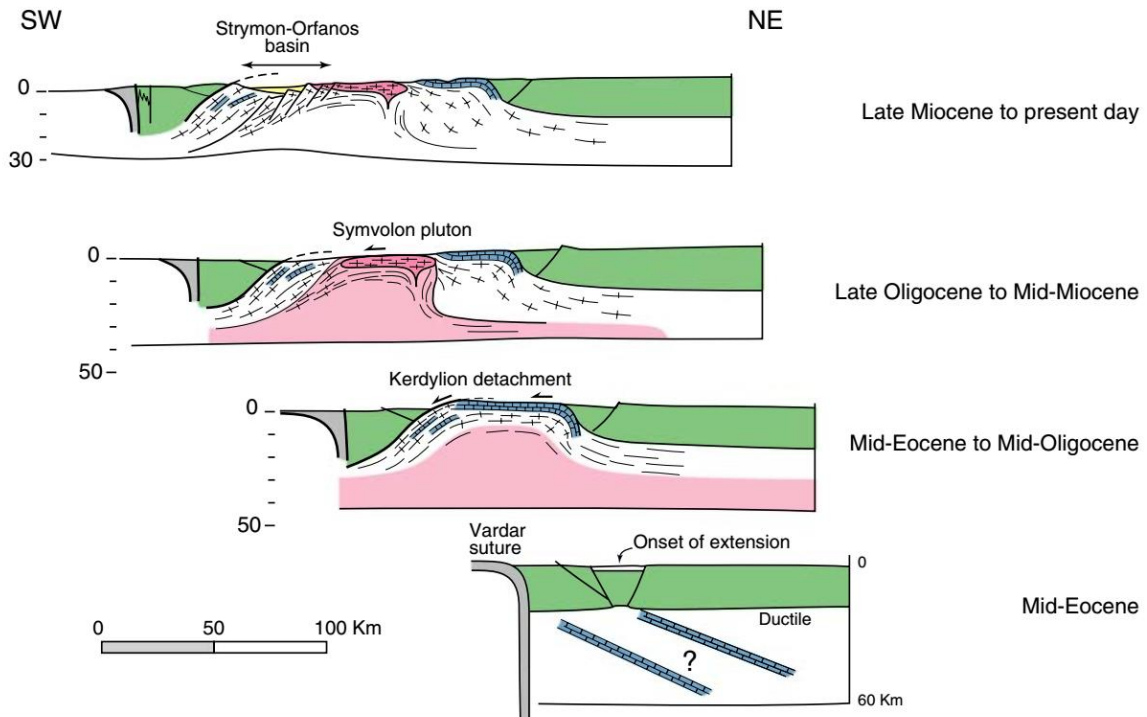
Σχήμα 2.5. Η δημιουργία ρηγμάτων αποκόλλησης μικρής γωνίας κλίσης (detachment) λόγω της εκτατικής τεκτονικής κατάρρευσης του ορογενούς (Bonev and Stampfli 2011)



Σχήμα 2.6. Αποκάλυψη στην επιφάνεια των πετρωμάτων υψηλής πίεσης από την διαφυγή τους από την υποβυθιζόμενη πλάκα (Kydonakis et al. 2015b)

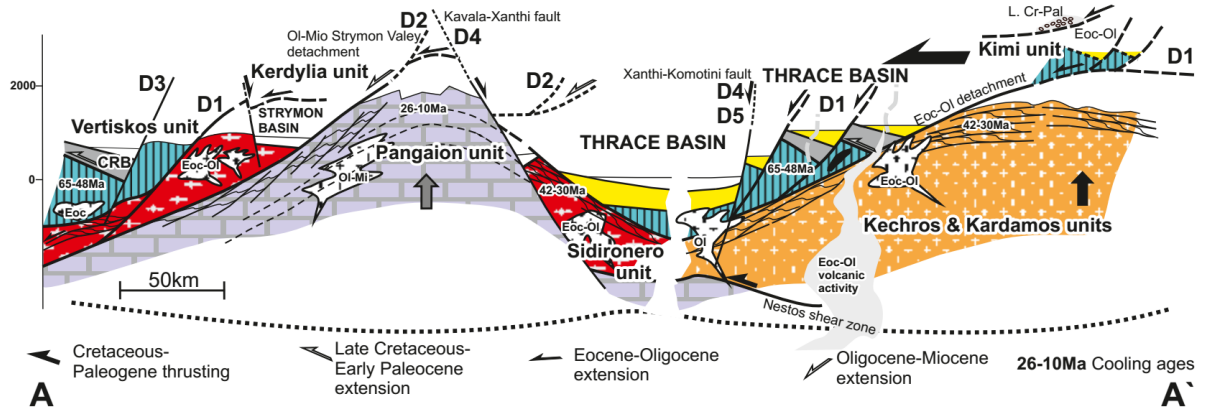
Τα detachment faults που καθόρισαν την εξέλιξη του SRCC (Σχ. 2.7) είναι αυτό των Κερδυλίων και του Στρυμόνα. Το detachment των Κερδυλίων, όπως αναφέρουν οι Brun and Sokoutis (2007) αρχικά θεωρήθηκε από τους Burg et al. (1996) ως ρήγμα επώθησης. Πλέον, θεωρείται ως ρήγμα αποκόλλησης ΔΝΔ βύθισης του οποίου η δράση του ξεκίνησε πριν 42My και τερματίστηκε στα 24Ma (Μέσο Μειόκαινο- Μέσο Ολιγόκαινο) (Kounov et al. 2015). Η τεκτονική αυτή προκάλεσε την διαφυγή του άνω τεμάχους (hanging wall) που είναι το μπλοκ Χαλκιδικής προς τα ΝΔ, φέροντας στην επιφάνεια μια παχιά ζώνη υπερμυλωνιτιωμένων πετρωμάτων της ενότητας των Κερδυλίων (foot wall) (Brun and Sokoutis 2007). Στα βόρεια εξαφανίζεται κάτω από τα ιζήματα της λεκάνης του Στρυμόνα, αλλά θεωρείται ότι συνεχίζει μέχρι την ανατολική πλευρά της λεκάνης των Σερρών όπου εμφανίζονται μυλωνιτιωμένα συν-τεκτονικά πλουτωνικά σώματα. Από τα 24Ma μέχρι τα 12Ma η ανάδυση ελεγχόταν από το detachment του Στρυμόνα. Στον μεταμορφωμένο πυρήνα διεισδύουν πλουτωνίτες καθόλη τη διάρκεια δράσης των detachment που είναι αυτοί της Ξάνθης (34-30Ma), της Βροντού (33±2 και 29±1Ma) και της Καβάλας (21- 22Ma). Στο Άνω Μειόκαινο η εκτατική αυτή τεκτονική κόβει το SRCC σε επιμέρους μάζες ονομαζόμενες Φαλακρό, Μενοίκιο και Λεκάνη στα βόρεια και στα νότια Παγγαίο, Κερδύλια και Θάσος. Μετά το Άνω Μειόκαινο η

θερμοκρασία μειώνεται επαρκώς (Brun and Sokoutis 2007, Kounov et al. 2015).



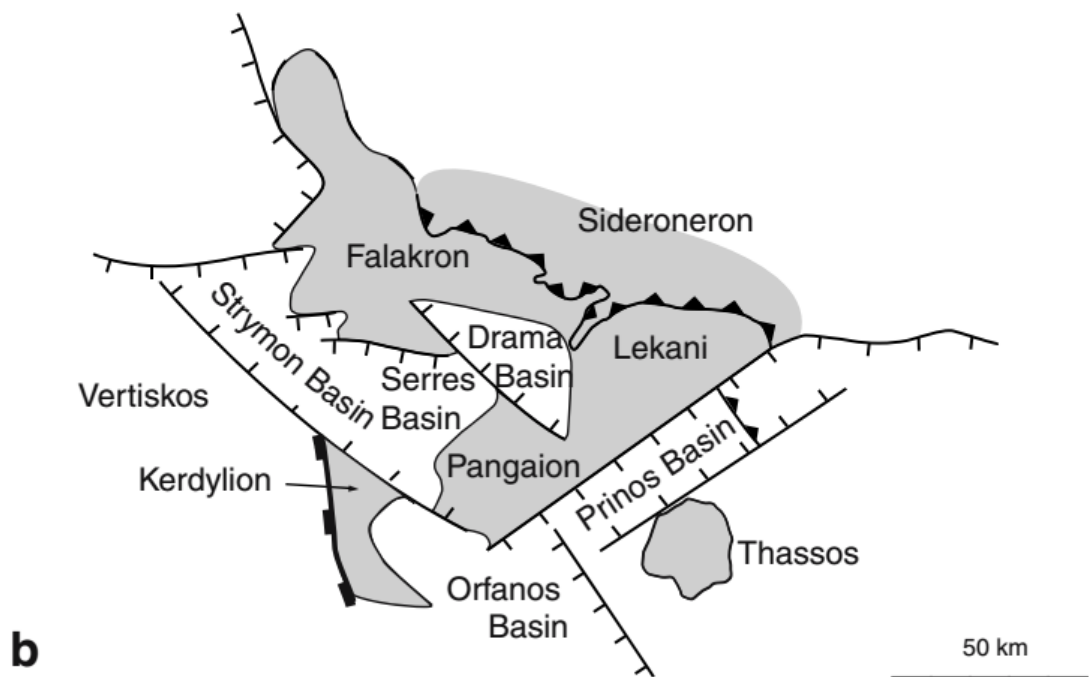
Σχήμα 2.7. Η εξέλιξη του SRCC από την έναρξη της αποκάλυψής του μέχρι σήμερα (Brun and Sokoutis 2007)

Στο Παλαιογενές σχηματίζεται η συν- ορογενετική λεκάνη της Θράκης, η οποία χαρακτηρίζεται από παχιά ιζηματογενή ακολουθία μολασσικού τύπου που φτάνουν σε πάχος τα 3- 5Km και πάνω σε αυτά επικάθονται ασύμφωνα ιζήματα που αποτέθηκαν από το Μέσο -Άνω Ηώκαινο έως το Άνω Ολιγόκαινο. Η λεκάνη της Θράκης θεωρείται μια supra- detachment λεκάνη, δηλαδή σχετίζεται με την εκτατική τεκτονική και αποκάλυψη βαθιών μεταμορφωμένων πετρωμάτων σχηματίζοντας τα core complexes και βρίσκεται πάνω στο ρήγμα αποκόλλησης (Σχ. 2.8) (Kilias et al. 2015, Kydonakis et al. 2015a).

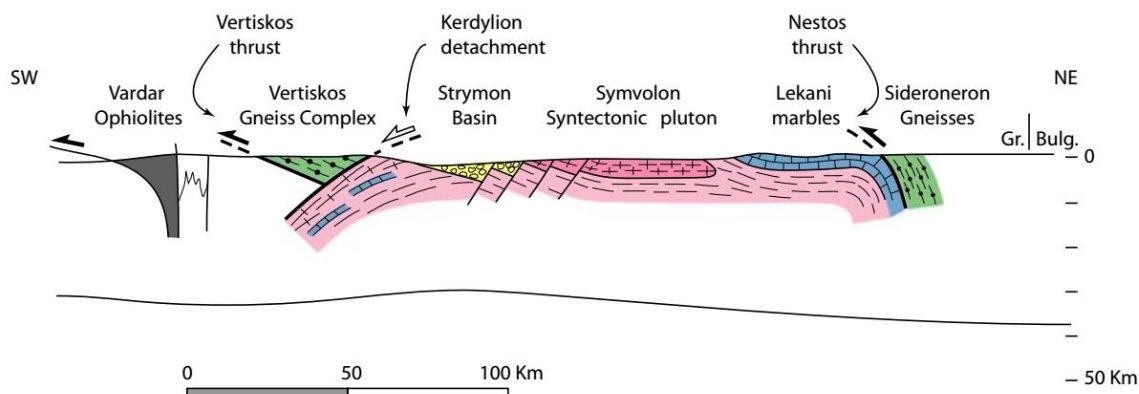


Σχήμα 2.8. Σχηματική τομή δημιουργίας της λεκάνης της Θράκης (Kiliyas et al. 2015)

Κατά το Μέσο Μειόκαινο (12Ma) η θερμοκρασία του SRCC μειώθηκε επαρκώς (Kydonakis et al. 2014) και ξεκίνησε η δράση θραυσιγενούς τεκτονικής έκτασης με κανονικά ρήγματα να κόβουν τα detachment και να δημιουργούν βυθίσματα πάνω στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο, δημιουργώντας τις Νεογενείς λεκάνες στα οποία έγινε η ιζηματογένεση (Στρυμόνα, Σερρών, Δράμας, Πρίνου, Ορφανού) (Σχ. 2.9). Τα ρήγματα αυτά έχουν διαχωριστεί σε δύο ομάδες με διευθύνσεις ΒΑ- ΝΔ και ΒΔ- ΝΑ (Brun and Sokoutis 2007).



Σχήμα 2.9. Οι Νεογενείς λεκάνες στο SRCC (Brun and Sokoutis 2007)

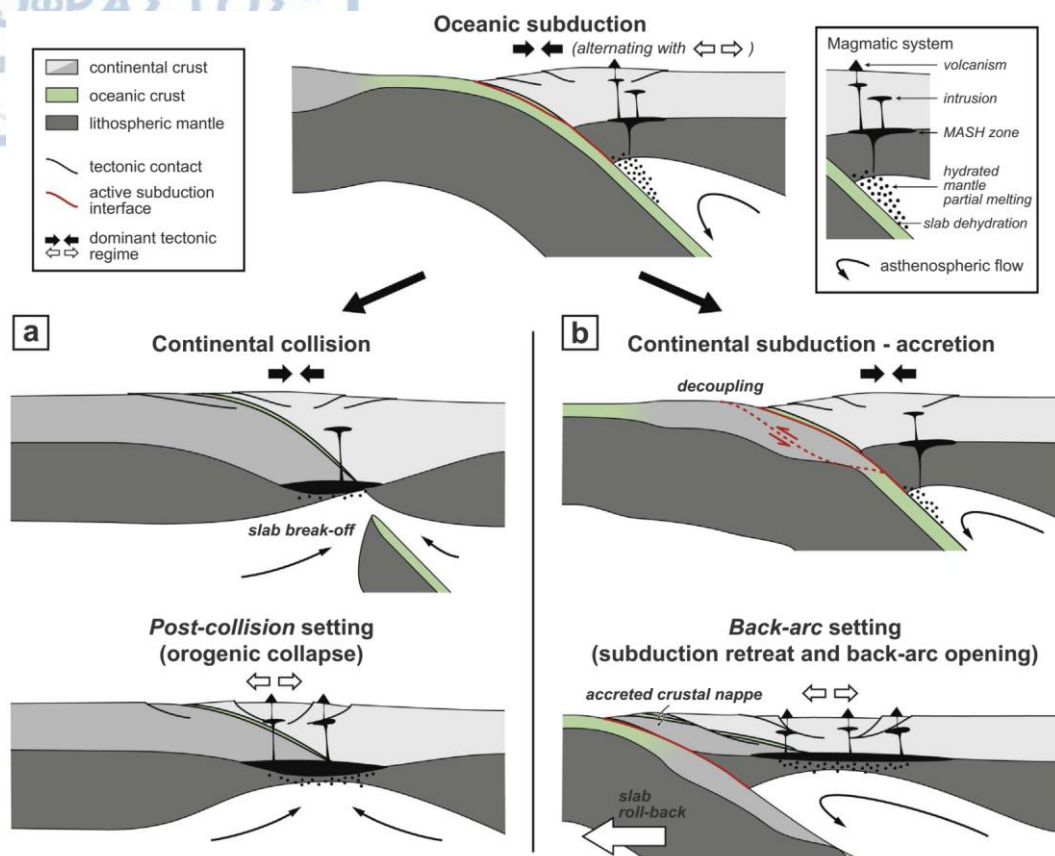


Σχήμα 2.10. Γεωλογική τομή του SRCC (Brun and Sokoutis 2007)

## 2.4 Μαγματισμός στη Ροδόπη

Στην γεωλογική επαρχία της Ροδόπης τα μαγματικά επεισόδια οφείλονται στο γεωτεκτονικό περιβάλλον σύγκλισης- υποβύθισης ωκεάνιων και ηπειρωτικών τεμάχων και το επικείμενο περιβάλλον έκτασης με την δημιουργία των detachment faults, την περιστροφή του άνω τεμάχους (μπλοκ Χαλκιδικής), την αποκάλυψη των core complexes και τη δημιουργία ρηγμάτων κανονικών και οριζόντιας μετατόπισης (Ersoy and Palmer 2013). Η μαγματική δραστηριότητα ξεκίνησε με σωσσονιτική σύσταση και συνεχίστηκε με υψηλού καλίου ασβεσταλκαλικά πετρώματα (πλουτωνικά και ηφαιστειακά) βασικής έως όξινης σύστασης (Σχ. 2.13) (Christofides et al. 1998, Pe- Piper 2004, Ersoy and Palmer 2013, Jolivet et al. 2013).

Πιο αναλυτικά, οι Bertrand et al. (2014) περιγράφουν την εξέλιξη του Τριτογενή μαγματισμού σε δύο τεκτονικά στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η σύγκλιση και η υποβύθιση, με την υποκείμενη τεκτονική πλάκα να απελευθερώνει πτητικά συστατικά που ανεβαίνουν προς τα επάνω, φτάνουν στη σφήνα του μανδύα και προκαλούν την μερική τήξη του (Blundell et al. 2005). Κατά το δεύτερο στάδιο, σημειώνεται μια μεγάλου βαθμού μείωση της ταχύτητας σύγκλισης που πιθανώς ήταν αποτέλεσμα της μείωσης της ταχύτητας υποβύθισης και της οπισθοχώρησης της τάφρου. Έτσι, στην υπερκείμενη πλάκα, στην περιοχή πίσω από το τόξο (back arc) δημιουργούνται εκτατικές δυνάμεις που διευκολύνουν την άνοδο του μάγματος μέσα στον φλοιό (Σχ. 2.11b).



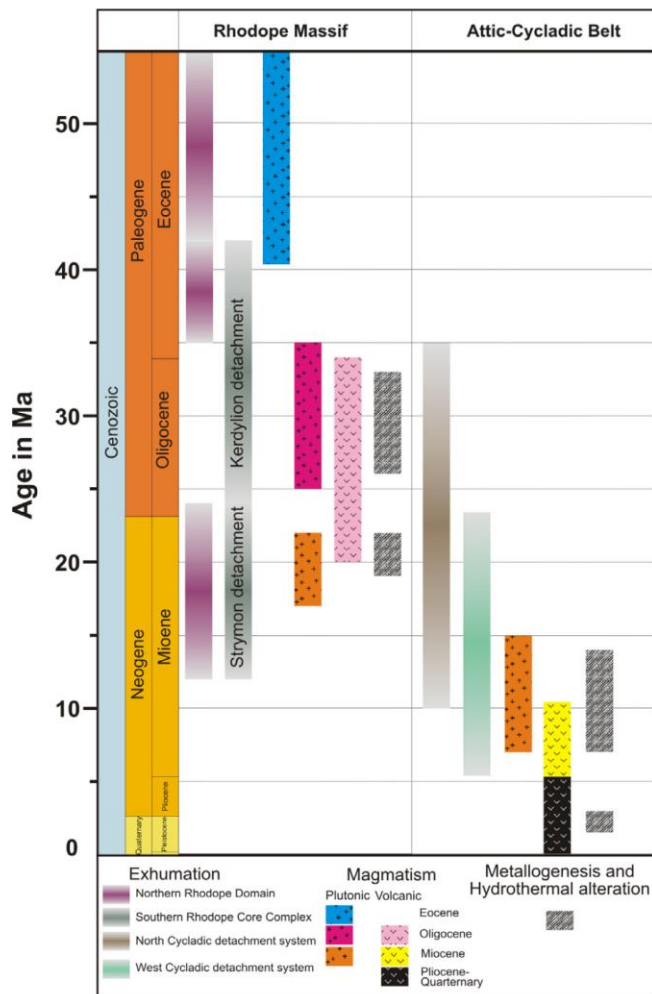
Σχήμα 2.11. Η εξέλιξη της πορείας της υποβύθισης ανάλογα με την συμπεριφορά του slab (Menant et al. 2018 )

## 2.5 Κοιτασματογένεση

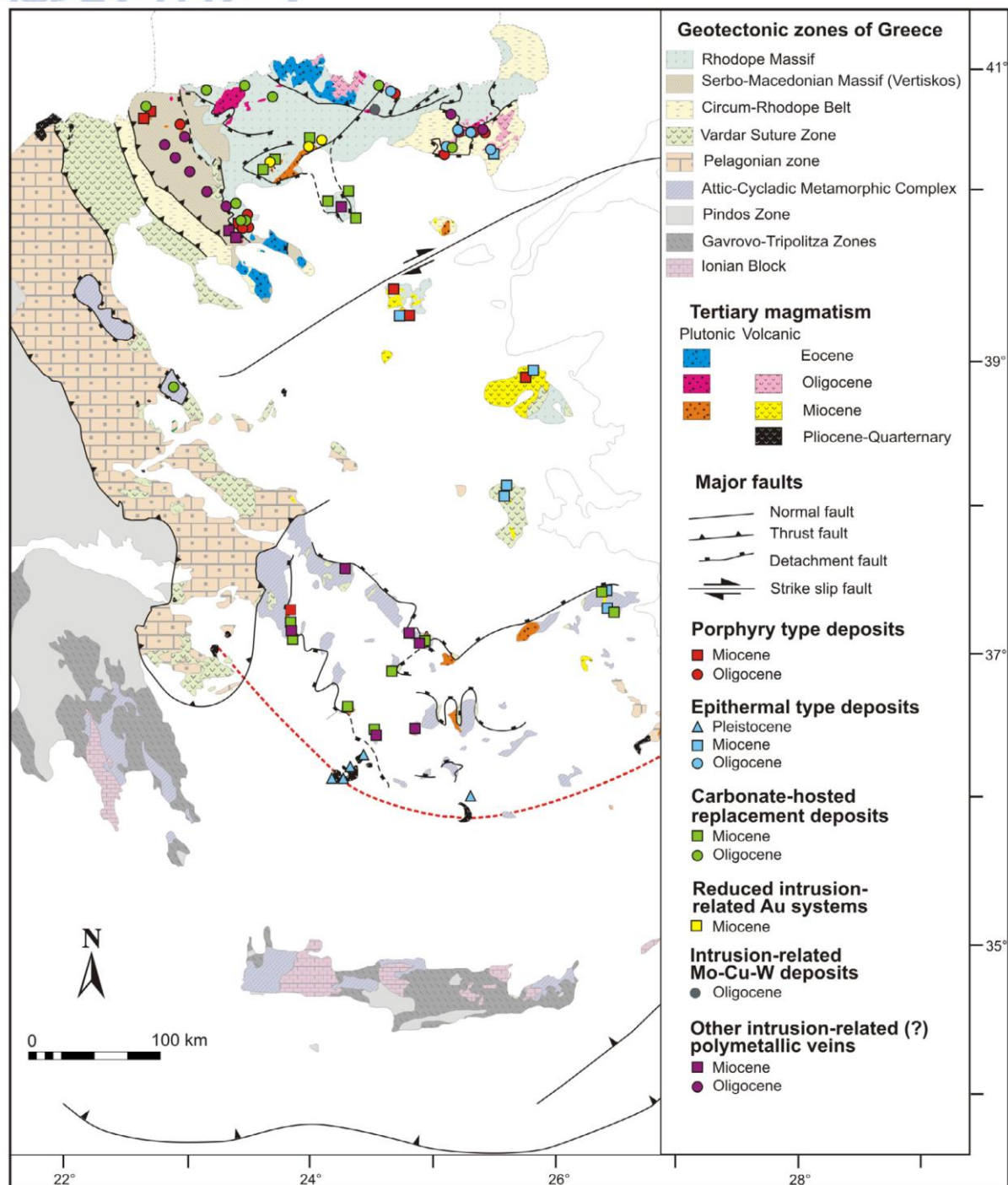
Υπό το γεωτεκτονικό αυτό καθεστώς που ξεκίνησε από το Κρητιδικό και συνεχίζεται μέχρι σήμερα στη Ροδόπη έχουν δημιουργηθεί πολυάριθμες σημαντικές αποθέσεις μεταλλευμάτων και εκατοντάδες μικρότερες εμφανίσεις με τη συμβολή του μαγματισμού και των μαγματικών υδροθερμικών διαλυμάτων (Σχ. 2.13) (Melfos and Voudouris 2016, 2017). Οι χρονολογικές σχέσεις και η χωρική ανάπτυξη ανάμεσα στις μεταλλοφορίες και τον μαγματισμό, φανερώνουν μια γρήγορη διαδοχή μαγματικών και υδροθερμικών διαδικασιών που είναι αποτέλεσμα θερμικής διαταραχής που υπέστη ο φλοιός και πιθανώς ο υποκείμενος μανδύας κατά την μεγάλης κλίμακας ορογενετική έκταση (Marchev et al. 2005). Ο ευρείας κλίμακας ασβεσταλκαλικός μαγματισμός ρυθμίζεται από τις τεκτονικές διεργασίες των πλακών, ενώ η μεταλλογένεση απαιτεί επί πρόσθετους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου την αποθήκευση μάγματος στους θαλάμους του ανώτερου φλοιού και συγκέντρωση

των ρευστών με την συμβολή των ρηγμάτων (Richards 2003). Το περιβάλλον δράσης εκτατικής τεκτονικής που προκαλεί την ταχεία ανύψωση των metamorphic core complexes και τα detachment faults μπορεί να δημιουργήσει ή να συγκεντρώσει μαγματικές υδροθερμικές ροές ρευστών σε σύντομο χρονικό διάστημα, λιγότερο του ενός εκατομμυρίου χρόνια. Η αποβολή των μεταλλικών ορυκτών από τα υδροθερμικά διαλύματα εξαρτάται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης (Blundell et al. 2005). Επίσης, σημαντικός παράγοντας είναι η ποσότητα του περιεχόμενου νερού, καθώς καθορίζει της φυσικοχημικές ιδιότητες των ρευστών, τη διαλυτότητά τους, και προσδίδει την ικανότητα στα ρευστά να ανέβουν στον ανώτερο φλοιό. Οι ανοιχτές ασυνέχειες στα πετρώματα που προκαλούνται από την τεκτονική καταπόνησή τους αποτελούν τα μονοπάτια για την κίνηση των υδροθερμικών ρευστών, καθώς και τον κενό χώρο στον οποίο αναπτύσσονται οι φλέβες μεταλλοφορίας. Στη Ροδόπη, η έκταση με τη δημιουργία των detachment faults και των κανονικών ρηγμάτων ευνόησε την κυκλοφορία του μετεωρικού νερού στο βάθος, το οποίο αναμειγνύεται με τα μαγματικά ρευστά και αποθέτεται η μεταλλοφορία, όπως προτείνουν τα ρευστά εγκλείσματα και μελέτες ισοτόπων. (Marchev et al. 2005, Menant et al. 2018).

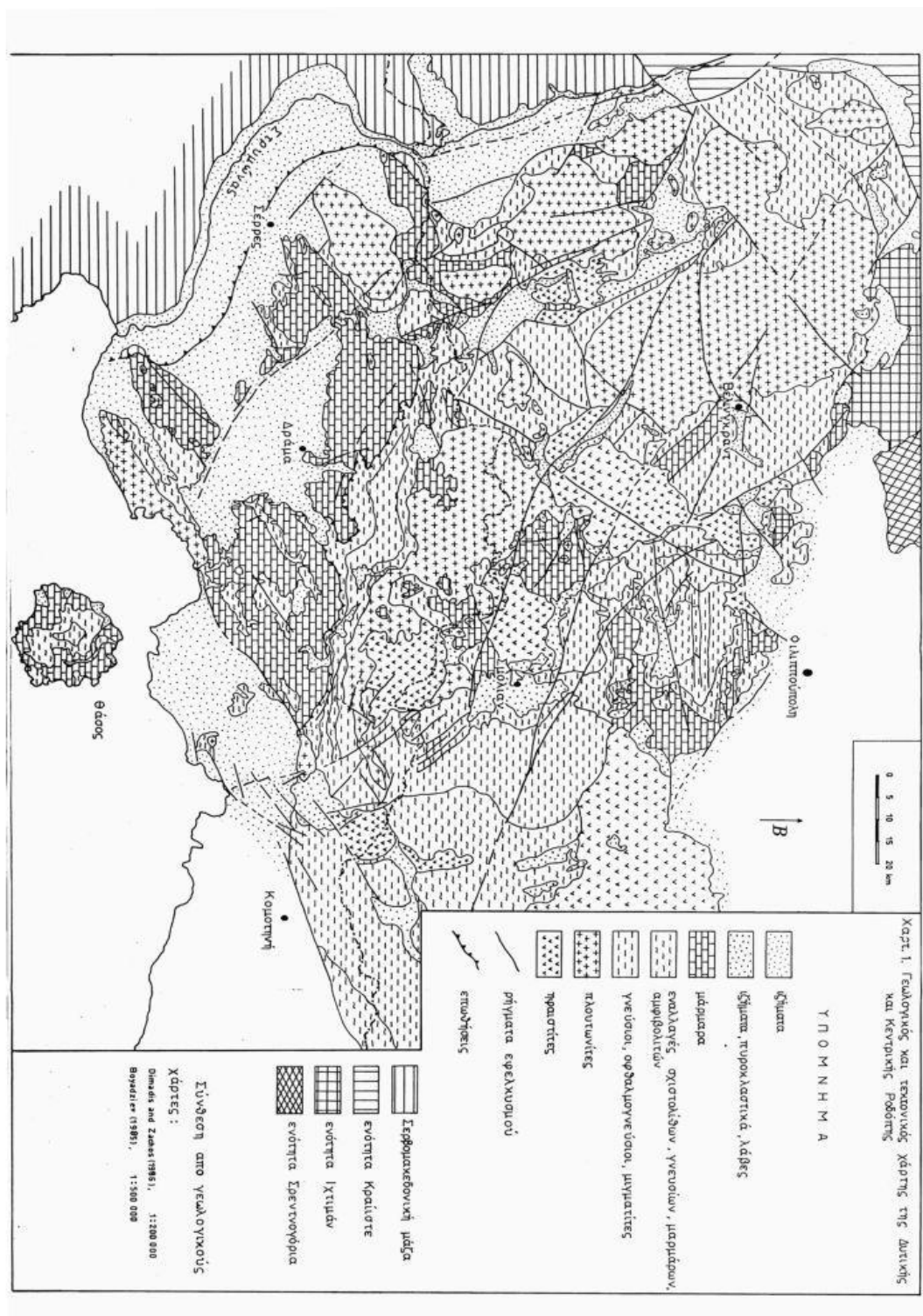
Σύμφωνα με τους Menant et al. (2018) η μεταλλογένεση στη Ροδόπη μπορεί να διαχωριστεί σε δύο μεταλλογενετικές περιόδους. Η πρώτη χρονολογείται στο Άνω Κρητιδικό και χαρακτηρίζεται από πορφυριτικές αποθέσεις Au- Cu (-Mo). Οι εμφανίσεις αυτές σχηματίστηκαν από ένα πλούσιο σε μεταλλικά στοιχεία μάγμα, πάνω σε μια γραμμική και σταθερή ζώνη υποβύθισης δημιουργώντας ένα στενό μαγματικό τόξο. Η δεύτερη μεταλλογενετική περίοδος χρονολογείται στο Άνω Ηώκαινο με Μειόκαινο και χαρακτηρίζεται γενικά από μικρότερες επιθερμικές αποθέσεις Pb- Zn (-Ag) που ακολουθείται από περίοδο πλούσια σε Au. Η περίοδος αυτή συνδέεται με την μετα-ορογενετική έκταση και τη διάνοιξη οπισθοτόξιων λεκανών λόγω της υποχώρησης της υποβυθιζόμενης πλάκας, της μετανάστευσης της τάφρου ακόμα και την αποκόλληση της υποβυθιζόμενης πλάκας.



Σχήμα 2.12. Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου μεταλλογένεσης με την έκταση και τον μαγματισμό (Melfos and Voudouris 2017)



Σχήμα 2.13. Χάρτης κατανομής του μαγματισμού και των μεταλλοφοριών του Τριτογενούς (Melfos and Voudouris 2017)



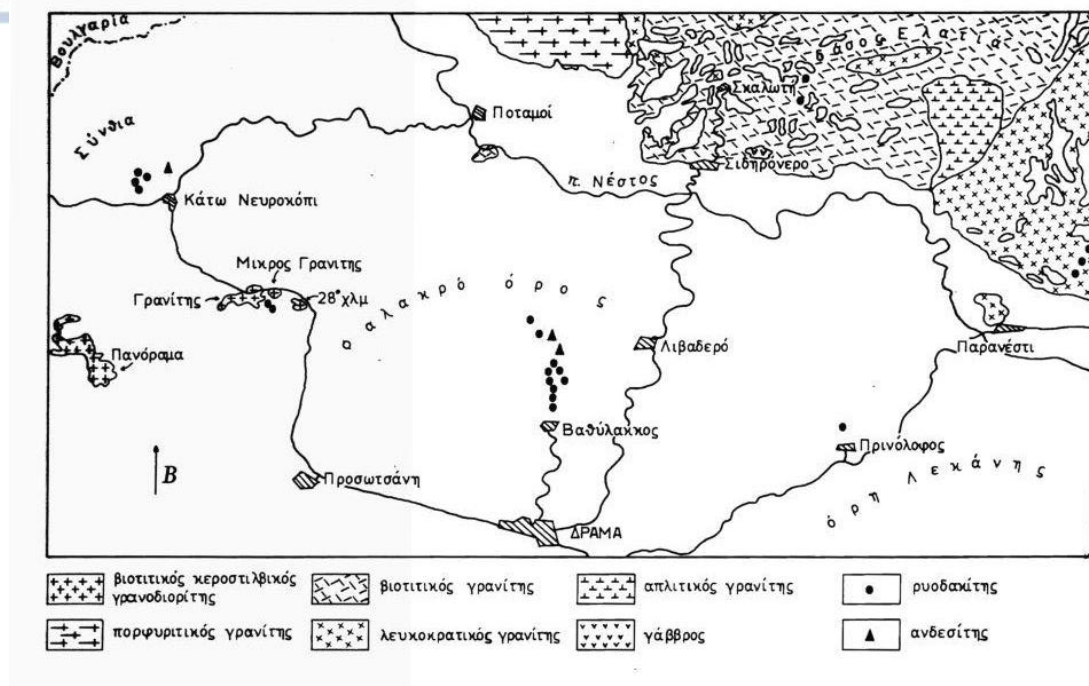
Σχήμα 3.1. Γεωλογικός χάρτης της Δράμας (Χατζηπαναγής 1991)

Οι μαγγανιούχες μεταλλοφορίες της Δυτικής Ροδόπης βρίσκονται στο Νομό Δράμας, στους πρόποδες του όρους Φαλακρό, περιοχή Bos- Dag (Nimforoulos and Pattrick 1991). Η ευρύτερη περιοχή του Φαλακρού περιλαμβάνει το βόριο και κεντρικό κομμάτι του νομού, καλύπτοντας συνολική έκταση περισσότερο από  $1800\text{Km}^2$  (Χατζηπαναγής 1991). Το γεωλογικό υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής περιλαμβάνει πετρώματα Προκάμβριας έως Παλαιοζωικής ηλικίας που έχουν υποστεί μέσου έως υψηλού βαθμού μεταμόρφωση (Σχ. 3.1) (Χατζηπαναγής κ.ά. 1993).

Στην περιοχή αυτή έχουν εντοπιστεί περίπου δέκα κοιτάσματα, τα οποία υπέστησαν οικονομική εκμετάλλευση κατά το 1930- 1990. Τα εγκαταλελειμμένα, πλέον, μεταλλεία βρίσκονται στις περιοχές Πύργοι, Μαύρο Ξύλο,  $25^\circ$  χλμ., Σταρέν, Λαγός, Γρανίτης, Σύνθια, Καρποσλούκ, Άγιοι Θεόδωροι και Ταρτάνα. Τα πετρώματα που συναντώνται στην περιοχή είναι κατά σειρά προς τα ανώτερα γνεύσιοι, μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες και μάρμαρα. Διαχωρίζονται σε δύο ενότητες με βάση την ηλικία τους, στον παλιότερο ορίζοντα του Προκαμβρίου ορίζοντα ανήκουν οι γνεύσιοι, σχιστόλιθοι και αμφιβολίτες με μικρές παρεμβολές μαρμάρων, ενώ στην νεότερη ενότητα ηλικίας Σιλούριου- Λιθανθρακοφόρου περιλαμβάνονται κυρίως παχείς ορίζοντες μαρμάρων μέγιστου πάχους  $1500\text{m}$  (Nimforoulos 1988, Χατζηπαναγής 1991). Η επαφή μεταξύ των δύο αυτών ενοτήτων είναι τεκτονική, καθώς η ενότητα υψηλότερου βαθμού μεταμόρφωσης (μέση έως ανώτερη αμφιβολιτική φάση) έχει επωθηθεί πάνω στην έως πρασινοσχιστολιθικής μεταμόρφωσης ενότητα. Οι σχιστόλιθοι επικρατούν στα βόρεια και δυτικά του Φαλακρού, ενώ στο κεντρικό του τμήμα βρίσκουμε κυρίως μάρμαρα. Γενικά εμφανίζονται ισχυρά παραμορφωμένα και τεκτονισμένα, με ανοιχτές πτυχές και δύο συστήματα ρηγμάτων γενικής διεύθυνσης ΒΑ- ΝΔ και ΒΔ- ΝΑ.

Στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο της περιοχής διεισδύουν μικρά και μεγάλα πλουτωνικά και ηφαιστειακά πετρώματα κατά το Τριτογενές κυρίως ενδιάμεσης έως όξινης σύστασης, αλλά και βασικά ασβεσταλκαλικά. Αυτά συνδέονται με την εκτατική τεκτονική της Ροδόπης (Σχ. 3.2) και αποτελούν την πηγή τροφοδοσίας των ρευστών διαλυμάτων για τη γένεση των μεταλλοφοριών. Στις περιοχές γύρω από τους γρανίτες σχηματίζεται

μεταμορφική άλως σε απόσταση 1Km, φθάνοντας μέχρι και την αμφιβολιτική φάση μεταμόρφωσης.



Σχήμα 3.2. Πυριγενή πετρώματα Τριτογενούς ηλικίας στην περιοχή της Δράμας

Τέλος, στο νότιο άκρο του Φαλακρού το ανάγλυφο γίνεται φανερά πιο ήπιο, καθώς εκτείνεται η λεκάνη της Δράμας καταλαμβάνοντας έκταση 1.610,7Km<sup>2</sup> που καλύπτεται κυρίως από ιζήματα του Πλειοκαίνου-Πλειστοκαίνου καθώς και λιγνιτικές εμφανίσεις και τύρφη.

### 3.2 Χαρακτηριστικά του κοιτάσματος

Η μεταλλοφορία κοντά στο Κάτω Νευροκόπι αποτελεί οξειδωμένη μορφή αρχικών κοιτασμάτων αντικατάστασης Pb- Zn σε ανθρακικά πετρώματα, υδροθερμικής προέλευσης πλούσια σε Mn. Βρίσκεται στον ανώτερο ορίζοντα μαρμάρων του Φαλακρού, ενώ πιο αμελητέες ποσότητες φιλοξενούνται από τους σχιστόλιθους στις τεκτονικές ασυνέχειες που παρουσιάζουν (Nimforoulos 1988). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρή διαπερατότητα που χαρακτηρίζει τον σχιστόλιθο και δεν επιτρέπει στα υδροθερμικά διαλύματα να βρουν διόδους ώστε να εισχωρήσουν και υπό τις κατάλληλες συνθήκες να αποθέσουν τα μεταλλικά ορυκτά. Οι δολομίτες που συναντώνται στην περιοχή, επίσης, δεν φέρουν μεταλλοφορία. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η μεταλλοφορία φθίνει

καθώς αυξάνεται η απόσταση από τα ρήγματα και τα thrust , ενώ εξαλείφεται τελείως σε απόσταση περίπου 40m από αυτά. Επομένως, είναι φανερό ότι η μεταλλοφορία ελέγχεται από τα ρήγματα που αποτελούν ασυνέχειες στον όγκο των πετρωμάτων και κατευθύνουν τις διόδους μεταφοράς των ρευστών και τους κενούς χώρους απόθεσης της μεταλλοφορίας με τη μορφή φλεβών και πλέγματος φλεβών (stockwork).

Τα μεταλλοφόρα σώματα έχουν τη μορφή φλεβών, πλέγματος φλεβών ή ακανόνιστα σχήματα και μπορεί να φτάσουν σε μήκος τα 50m, σε πλάτος τα 20m και σε πάχος τα 10m. Τα όρια μεταξύ μεταλλοφορίας- πετρώματος ξενιστή είναι οξύληκτα, παρουσιάζονται φαινόμενα αντικατάστασης και αλλοίωσης του μαρμάρου σε δολομίτη και αργιλικά ορυκτά.

Σύμφωνα με τον Nimforoulos (1988) βάσει της γεωλογικής τους θέσης και της ορυκτολογικής τους παραγένεσης οι μεταλλοφορίες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες:

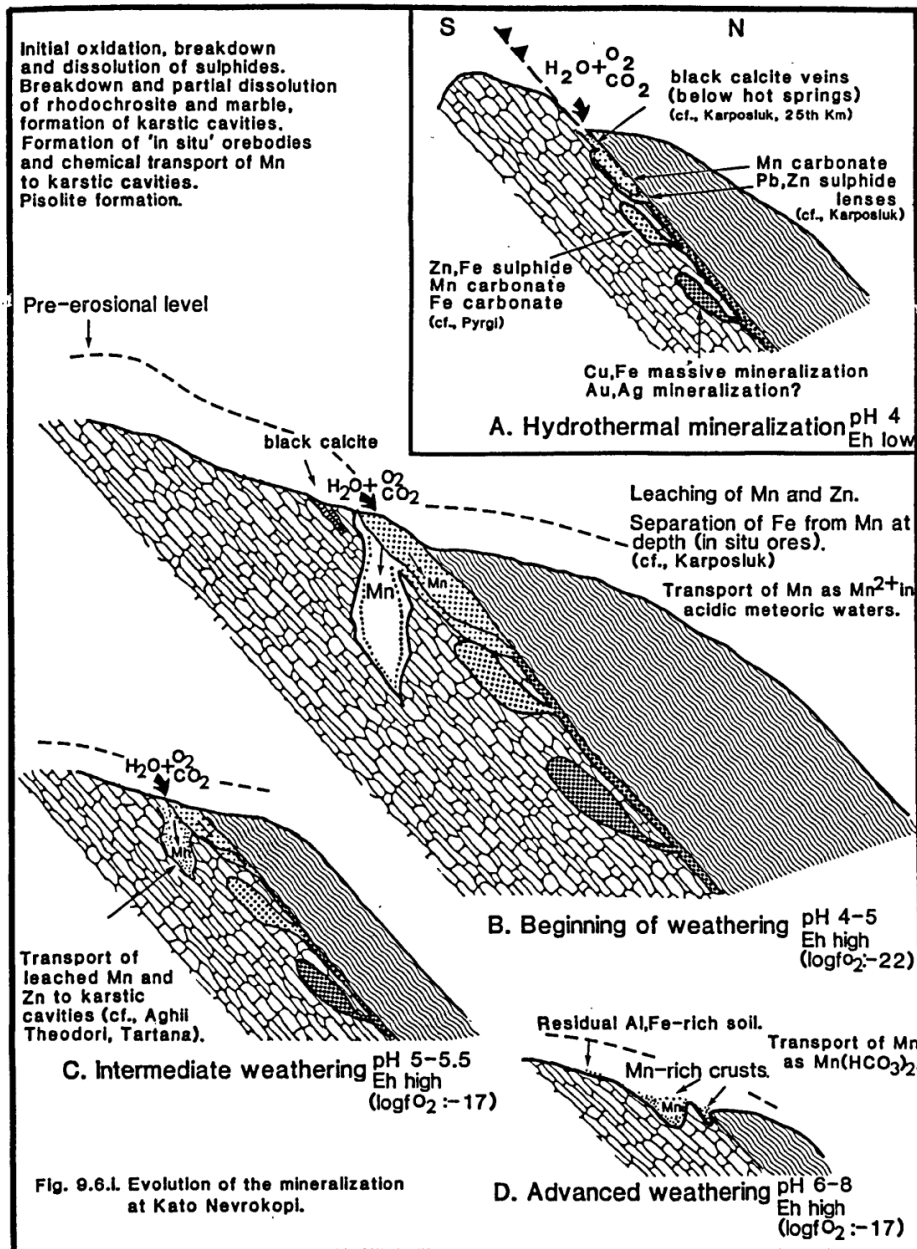
- i) Η υπογενής πρωτογενής μεταλλοφορία και
- ii) Η υπεργενής οξειδωμένη μεταλλοφορία.

### 3.2.1 Πρωτογενής μεταλλοφορία

Η υπογενής πρωτογενής μεταλλοφορία (Σχ. 3.3Α) εμφανίζεται μόνο στο μεταλλείο των Πύργων, το οποίο βρίσκεται στο χαμηλότερο υψόμετρο με αποτέλεσμα να μην έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό η διάβρωση της μεταλλοφορίας. Πρόκειται για μεταλλοφορία τύπου αντικατάστασης Pb- Zn. Η ορυκτολογική παραγένεση αποτελείται κατά σειρά μειωμένης συχνότητας από πολυμεταλλικά μεικτά σουλφίδια (σφαλερίτης, σιδηροπυρίτης, μαγνητοπυρίτης, χαλκοπυρίτης, μαρκασίτης), ροδοχρωσίτη, χαλαζία και ανκερίτη. Στις ανώτερες ζώνες τα μεταλλοφόρα σώματα περιέχουν φλέβες μαύρου ασβεστίτη και γαληνίτη. Ο μαύρος ασβεστίτης είναι υδροθερμικός ασβεστίτης με προσμείξεις  $Mn^{4+}$  -οξειδίων, συνήθως τοντοροκίτη, στα οποία οφείλεται το χρώμα του.

Η απόθεση των ορυκτών από τα υδροθερμικά διαλύματα γίνεται κατά την αντίδραση των ρευστών με τα μάρμαρα σε περιβάλλον όπου η θερμοκρασία των διαλυμάτων ήταν περίπου 200°C, το pH 3-4 και το Eh χαμηλό. Τα πρώτα ορυκτά που αποτίθενται κατά την αντικατάσταση του μαρμάρου είναι ο

χαλαζιάς και ο σφαλερίτης. Η μεγάλη ποσότητα χαλαζία που υπάρχει στη μεταλλοφορία αποδεικνύει την πτώση θερμοκρασίας που υπέστησαν τα υδροθερμικά διαλύματα και οδηγήθηκαν στην απόθεση των ορυκτών. Στη συνέχεια, σχηματίζονται τα υπόλοιπα σουλφίδια αντικαθιστώντας τα αρχικά ορυκτά. Ο ροδοχρωσίτης αποτελεί το πιο άφθονο ορυκτό στην πρωτογενή μεταλλοφορία όπως φαίνεται και από τα μεταλλεία στους Πύργους, όμως στις υπόλοιπες εμφανίσεις έχει αντικατασταθεί πλήρως (Nimforoulos and Pattrick 1991). Η ύπαρξη μαύρου ασβεστίτη στα ανώτερα τμήματα των φλεβών μαρτυρά την σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας των ρευστών συνοδευόμενη από αύξηση της ποσότητας  $S_2$ ,  $O_2$  που προκαλείται από την αντικατάσταση του σιδηροπυρίτη από μαρκασίτη, καθώς επίσης το περιεχόμενό του σε τοντοροκίτη (οξείδιο τετρασθενούς Mn) δείχνει ότι τα ρευστά υπέστησαν οξείδωση κοντά στην επιφάνεια ύστερα από τη μείξη τους με το μετεωρικό νερό (Michailidis et al. 1995).



Σχήμα 3.3. Γεωχημικό μοντέλο σχηματισμού της υπεργενούς μεταλλοφορίας Mn στο Κάτω Νευροκόπι (Nimfopoulos 1988)

Η γένεση των υδροθερμικών διαλυμάτων σχετίζεται με τον Ολιγοκαινικό μαγματισμό που δημιουργήθηκε από την εκτατική τεκτονική και αποκάλυψη των μεταμορφικών πυρήνων στη Ροδόπη (Kaiser-Rohrmeier et al. 2004, Melfos and Voudouris 2016, 2017). Πιο συγκεκριμένα, ο γρανοδιορίτης του Γρανίτη και άλλα μικρότερα ρυοδακιτικά και ανδεσιτικά σώματα φαίνεται να έπαιξαν το σημαντικότερο ρόλο.

Σύμφωνα με τους Nimforoulos (1988) και Nimforoulos et al. (1988) η ηλικία του γρανοδιορίτη με βάση χρονολογήσεις K-Ar σε βιοτίτη είναι  $30.0 \pm 1$  Ma, ενώ η ηλικία του υδροθερμικού σταδίου χρονολογήθηκε στα 32.5-33.0 Ma (K-Ar σε υδροθερμικό μοσχοβίτη).

Η πρωτογενής μεταλλοφορία στο Κάτω Νευροκόπι παρουσιάζει ομοιότητες στην ηλικία, τη μορφή, την ορυκτολογική σύσταση και τον μηχανισμό γένεσης με άλλα κοιτάσματα αντικατάστασης Pb- Zn στην κεντρική Ροδόπη (κοίτασμα Pb- Zn- Mn Madan στην Βουλγαρία) και στη Σερβομακεδονική (Pb- Zn κοιτάσματα στην Ολυμπιάδα, Μαύρες Πέτρες και Πιάβιτσα της Χαλκιδικής που στα ανώτερα τμήματά τους έχουν Mn- οξείδια) (Heinrich and Neubauer 2002).

### 3.2.2 Υπεργενής μεταλλοφορία

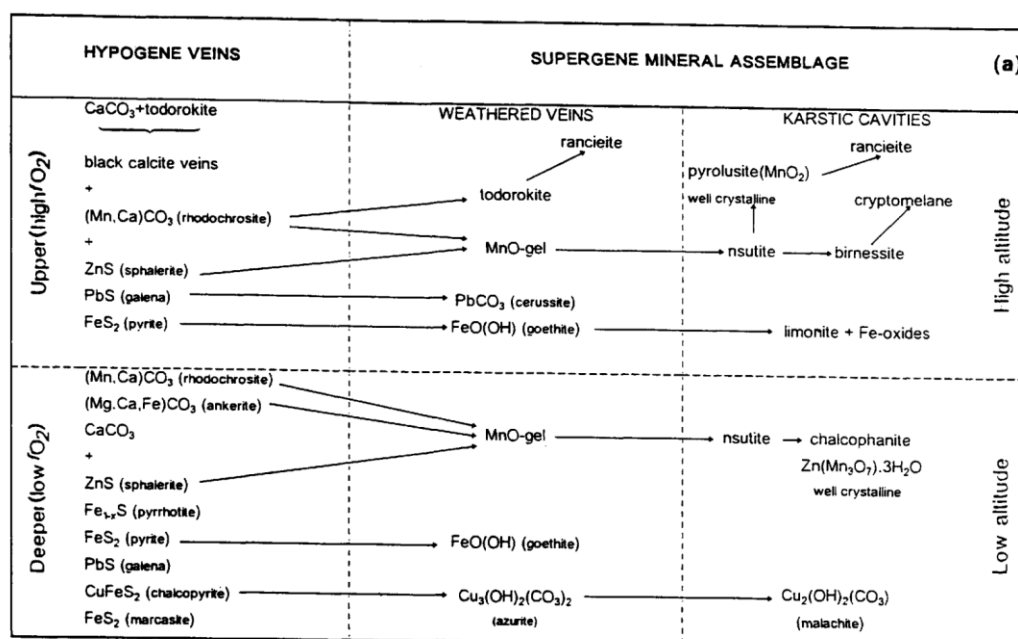
Η υπεργενής μεταλλοφορία είναι αποτέλεσμα οξείδωσης των υδροθερμικών ορυκτών υπό τη συνεχή δράση πλούσιων σε CO<sub>2</sub> μετεωρικών νερών (Σχ. 3.3B). Η διαδικασία αυτή είχε σαν αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των εμφανίσεων σε περιεχόμενο Mn σε βαθμό μεταλλεύματος. Τα υπεργενή αυτά κοιτάσματα συνοδεύονται από βασικά μέταλλα (Pb, Zn, Cu) σε ποσοστό 0,1%- 12% και περιέχουν πολύτιμα μέταλλα σε περιεκτικότητες Ag: 70 ppm και Au: 0,5ppm (Nimforoulos and Pattrick 1991, Χατζηπαναγής 1991).

Η υπεργενής μεταλλοφορία μπορεί να σχηματιστεί είτε επί τόπου από την δράση των ρευστών στον ροδοχρωσίτη σχηματίζοντας άμορφες έως μικροκρυσταλλικές φάσεις, είτε διαλύοντας τα υδροθερμικά ορυκτά, αποσπώντας από αυτά Mn<sup>2+</sup>, μεταφέροντάς το και αποθέτοντάς το με τη μορφή Mn<sup>4+</sup> -οξειδίων.

Έτσι, κατά την επί τόπου οξείδωση του ροδοχρωσίτη το πρώτο προϊόν που σχηματίζεται είναι άμορφες φάσεις ή μικροκρυσταλλικές ψευδόμορφες του αρχικού ορυκτού, αποτελούμενες από Mn<sup>2+</sup>, το MnO- gel που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τα υδροθερμικά σουλφίδια. Σε φλέβες που βρίσκονται σε υψηλότερο υψόμετρο κι έχουν υποστεί πιο προχωρημένη διάβρωση παρατηρείται ο ροδοχρωσίτης να μετατρέπεται επί τόπου σε ψευδόμορφο τοντοροκίτη καθώς και τα σουλφίδια να έμφανίζονται με τις οξειδωμένες τους μορφές (αζουρίτης, γκαιτίτης, κερουσίτης) (Σχ. 3.4) (Nimforoulos and Pattrick 1991).

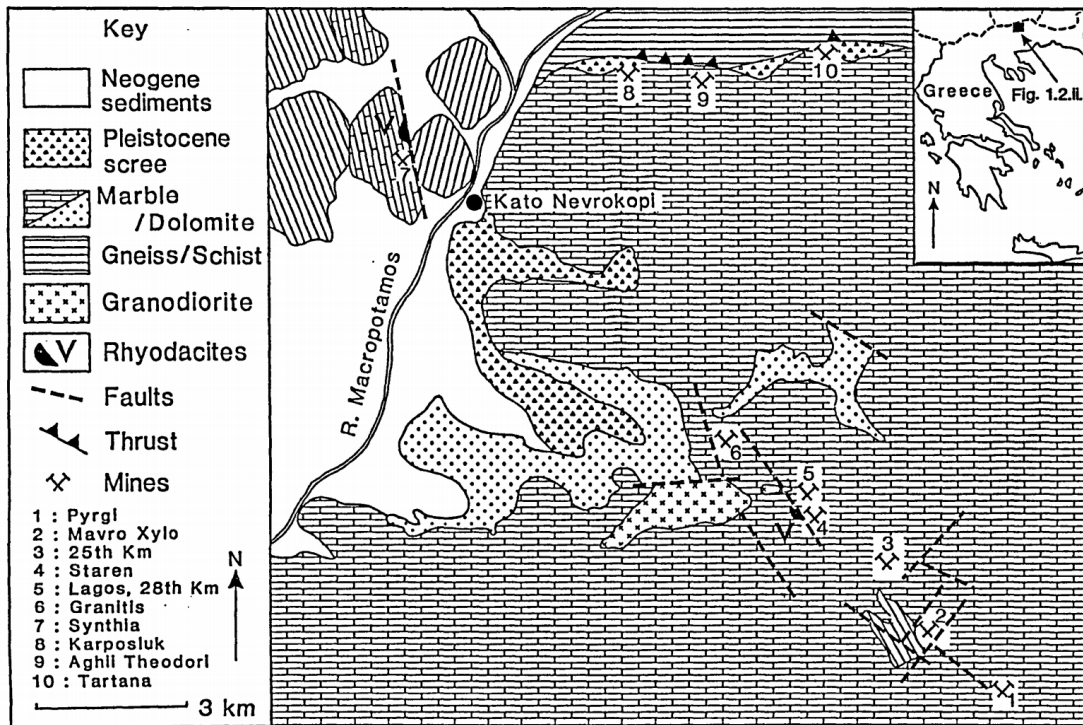
Η απόσπαση S από τα σουλφίδια προσδίδει έναν όξινο χαρακτήρα (pH 4-5) (Σχ. 3.3B) στα ρευστά διευκολύνοντας τη δράση τους στη διάλυση του μαρμάρου και σχηματισμό περισσότερων κενών χώρων. Η απελευθέρωση του ευκίνητου δισθενούς μαγγανίου ( $Mn^{2+}$ ) από το πλέγμα των υδροθερμικών ορυκτών οδηγεί στην εύκολη μεταφορά του και απόθεσή του με τη μορφή οξειδίων τετρασθενούς μαγγανίου ( $Mn^{4+}$ ), όπως είναι ο τοντοροκίτης, νσουτίτης, χαλκοφανίτης, μπιρνεσσίτης, κρυπτομέλανας και ο πυρολουσίτης που αποτελεί το τελευταίο ορυκτό αυτού του σταδίου (Σχ. 3.4) (Nimforoulos and Pattrick 1991, Nimforoulos et al. 1997a). Η χημική σύσταση των τελικών οξειδίων εξαρτάται από τα μετεωρικά νερά και τις χημικές διακυμάνσεις που παρουσιάζουν από τα προσφερόμενα διαλυμένα στοιχεία του πετρώματος ξενιστή και της πρωταρχικής μεταλλοφορίας.

Με τη συνέχιση της διαδικασίας και τη διάλυση του μαρμάρου από τα ρευστά, το pH των μετεωρικών νερών αυξάνεται (~7-8) λόγω αύξησης της ποσότητας διαλυμένου Ca (Nimforoulos et al. 2000) (Σχ. 3.3D) αλλά και σε  $Zn^{2+}$  από τη διάλυση του σφαλερίτη, με αποτέλεσμα την επίδρασή τους στον τοντοροκίτη από τον οποίο αποσπάται το Mg σχηματίζοντας το ορυκτό ρανσιεΐτη σε πολύ χαμηλές πλέον θερμοκρασίες και πιέσεις (25°C, πίεση περιβάλλοντος) με τη μορφή στρωμάτων και επιφλοιώσεων πάνω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα (Nimforoulos et al. 1997 a).



Σχήμα 3.4. Περιγραφή σειράς σχηματισμού των ορυκτών που προκύπτουν από την οξείδωση της πρωτογενούς μεταλλοφορίας (Nimforoulos et al. 1997)

#### 4. Τα μεταλλεία της περιοχής



Σχήμα 3.5. Γεωλογικός χάρτης που αναφέρονται τα δέκα μεταλλεία που λειτούργησαν στην περιοχή. (Nimfopoulos 1988)

##### 4.1 Μεταλλείο 25° χιλιόμετρο

Στο 25° χιλιόμετρο Δράμας – Κάτω Νευροκοπίου, στις πλαγιές του όρους Φαλακρού βρίσκονται οι κύριες εμφανίσεις μαγγανιούχων της περιοχής στην τομή δύο thrust ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης που αποτελεί την επαφή του ανώτερου ορίζοντα μαρμάρων με τον γνεύσιο και σε απόσταση 15- 20m από τον ρυοδακίτη. Διαχωρίζονται σε δύο μεταλλοφόρα σώματα, το Great Fault και το Μαύρο Ξύλο. Το Great Fault βρίσκεται σε υψόμετρο 560m και ξεπερνά σε βάθος τα 210m. Η μεταλλοφορία βρίσκεται εξ ολοκλήρου μέσα στα μάρμαρα αποτελούμενη από το ακανόνιστο κύριο σώμα σε διαστάσεις μήκους 50m, πλάτους 20m και πάχους 5- 10m με πολλές μικρότερες απολήξεις παράλληλες στη σχιστότητα του πετρώματος ξενιστή και οξύληκτα όρια. Μαζί με τα οξείδια Μn υπάρχει μικρή ποσότητα πρωτογενούς μεταλλοφορίας που αποτελείται από χαλαζία και σιδηροπυρίτη. Γειτονικά της μεταλλοφορίας, μέσα στα σπασίματα του μεταμορφωμένου πετρώματος βρίσκουμε, επίσης, μαύρο ασβεστίτη και μαγγανιούχα οξείδια με τη μορφή δενδριτικών φλεβών. Τα περισσότερα

σουλφίδια είναι οξειδωμένα κι εμφανίζονται ως αιματίτητες και γκαιτίτης, ενώ εντοπίζονται και ορυκτά της αργίλου.

Το Μαύρο Ξύλο βρίσκεται σε υψηλότερο υψόμετρο (640m). Η μεταλλοφορία αντικαθιστά το μάρμαρο παράλληλα στη σχιστότητά του σχηματίζοντας πινακοειδείς, στηλοειδείς και λοβοειδείς μορφές. Έχει μικρότερη έκταση ( μήκος: 4- 40m, πλάτος 2- 20m, πάχος 2cm- 10m) και είτε παρουσιάζει πισολιθική υφή με τον ασβεστίτη να έχει αντικατασταθεί από οξείδια του Mn, είτε σε τμήματα όπου η αρχική μεταλλοφορία διαβρώθηκε δημιουργήθηκαν επιφλοιώσεις οξειδίων του Mn και ορυκτά όπως λειμωνίτης και γκαιτίτης, ενώ δεν λείπουν και οι φλέβες μαύρου ασβεστίτη συνοδευόμενος από χαλαζία.

Γενικά η συγκέντρωση του Mn φαίνεται να μειώνεται με το βάθος, καθώς σύμφωνα με μετρήσεις στην επιφάνεια η περιεκτικότητα σε Mn των ορυκτών είναι στο 54 wt%, ενώ σε βάθος περίπου 34m μειώνεται στα 37 wt%. Αντίθετα, με το βάθος αυξάνονται οι περιεκτικότητες άλλων μετάλλων που συμμετέχουν περισσότερο στην πρωτογενή μεταλλοφορία, όπως ο Pb (0,03- 0,06 wt%) , ο Cu (0,008- 0,012 wt%), και ο Fe (0,8- 1,5 wt%).

Στο μεταλλείο 25° χιλιόμετρο έγινε εκμετάλλευση από το 1930 έως το 1990 από την εταιρεία «ΕΛΒΟΜΙΝ Α.Ε.» αρχικά, η οποία μετέπειτα, το 1950, μετονομάστηκε σε «Α.Ε. Μεταλλεία Βωξίτου Ελευσίνος». Μέχρι το 1975 η παραγωγή μαγγανίου από την περιοχή κάλυπτε το 1% της παγκόσμιας παραγωγής. Η εξόρυξη γινόταν με τη διάνοιξη υπόγειων στοών κι επί τόπου γινόταν λειοτρίβιση, εμπλουτισμός με υδρομηχανική μέθοδο, ξήρανση και ενσάκκιση του τελικού προϊόντος (Tsirampides 2005). Μέχρι το 1994 είχαν εξορυχθεί 500.000 τόνοι εμπλουτισμένου μαγγανίου, με μέση ετήσια παραγωγή 6.000 τόνων (Επεξηγηματικών τεύχος του μεταλλογενετικού χάρτου 1965) . Σήμερα στην περιοχή αυτή συναντάμε την κατεστραμμένη μονάδα εμπλουτισμού (Σχ. 4.1), εγκαταλελειμμένες υπόγειες στοές εκμετάλλευσης (Σχ. 4.2) καθώς και σοροί στείρων υλικών από τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος (Σχ. 4.3).



Σχήμα 4.1. Εγκαταλελειμμένες εγκαταστάσεις της μονάδας εμπλουτισμού μεταλλεύματος (Φωτογραφία Β. Μέλφος)



Σχήμα 4.2. Υπόγεια στοά εξόρυξης μαγγανιούχων οξειδίων (<https://www.mindat.org/photo-850596.html>)



Σχήμα 4.3. Σοροί στείρων υλικών κοντά στη μονάδα εμπλουτισμού του 25<sup>ου</sup> χιλιομέτρου. (Google Earth)

#### 4.2 Μεταλλείο Γρανίτης

Το μεγαλύτερο υψόμετρο (1060m) στο όρος Φαλακρό όπου συναντάμε μαγγανιούχα μεταλλοφορία βρίσκεται στον Γρανίτη. Τα μεταλλεία βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τον γρανοδιορίτη του Γρανίτη, ο οποίος έχει δημιουργήσει άλως μεταμόρφωσης που περιέχει ορυκτά όπως επίδοτο, βολλαστονίτη, γρανάτη (πλούσιο σε Mn), χαλαζία και οξείδια του Fe (μαγνητίτη και αιματίτη ή γκαιτίτη). Η μεταλλοφορία έχει αντικαταστήσει το μάρμαρο δημιουργώντας ποικίλα σχήματα και σχετίζεται με τη ζώνη ρηγμάτων BA- NΔ και ΒΔ- NΑ διεύθυνσης. Λόγω του μεγάλου υψομέτρου και της προχωρημένης διαδικασίας διάβρωσης τα οξείδια του Mn συνυπάρχουν με άφθονα οξείδια του Fe, που προέρχονται από την αλλοίωση των πρωτογενών σουλφιδίων (γκαιτίτης, λειμωνίτης) μαζί με άφθονο μαύρο ασβεστίτη.

#### 4.3 Μεταλλείο 28<sup>ο</sup> χιλιόμετρο

Σε υψόμετρο 880m και σε απόσταση μικρότερη του 1 χιλιομέτρου από το μεταλλείο βρίσκεται ο ρυοδακίτης, στην επαφή του οποίου με το μάρμαρο σχηματίστηκε υδροθερμικός μοσχοβίτης. Χαλαζιακές φλέβες κόβουν το

μάρμαρο σε περιοχές κοντά στα μεταλλοφόρα σώματα, ενώ η μεταλλοφορία αποτελείται κυρίως από  $Mn^{4+}$  οξειδία.

#### 4.4 Μεταλλείο Λαγός, Μεταλλείο Σταρέν

Σε πολύ κοντινή απόσταση και στο ίδιο υψόμετρο, στο μεταλλείο του Λαγού βρίσκουμε  $Mn$  και  $Fe$  οξειδία μέσα στις ζώνες ρηγμάτων που τεκτονίζουν το μάρμαρο. Το  $Mn$  αντικαθιστά τον  $Ca$  και δημιουργεί ψευδόμορφα ρομβικά σχήματα (2-3cm) συγκολλημένα με ανακρυσταλλωμένο ασβεστίτη. Αντιπροσωπεύουν το ανώτερο τμήμα των υδροθερμικών φλεβών που έχει υποστεί έντονη διάβρωση και συνοδεύονται από αργιλικά ορυκτά. Στην περιοχή, επίσης, εντοπίζονται αρχαίες στοές για την εκμετάλλευση χρυσού από τα σουλφίδια που βρίσκονται βαθύτερα.

#### 4.5 Μεταλλείο Καρποσλούκ

Το μεταλλείο Καρποσλούκ βρίσκεται στα βόρεια, σε υψόμετρο 800m, κοντά στο thrust διεύθυνσης Α-Δ που φέρει σε επαφή την ενότητα των μαρμάρων με την κατώτερη ενότητα του σχιστολίθου, υδροθερμικές φλέβες παράλληλες με τη στρώση έχουν αντικαταστήσει το μάρμαρο κι αποτελούνται κυρίως από γαληνίτη, λιγότερο σφαλερίτη, σιδηροπυρίτη που υπέρκεινται από  $Mn$  οξειδία (τοντοροκίτη, κρυπτομέλανα, νσουνίτη). Άφθονος είναι και ο μαύρος ασβεστίτης. Η επιφάνεια του ρήγματος δεν φέρει σχεδόν καθόλου μεταλλοφορία, ενώ λείπει εντελώς από τον σχιστόλιθο λόγω του χαμηλού του πορώδους και των προϊόντων υδροθερμικής εξαλλοίωσης (ορυκτά της αργίλου). Λόγω της διάβρωσης τα μεταλλοφόρα σώματα μπορούν να διαχωριστούν σε 3 ζώνες που από πάνω προς τα κάτω είναι:

1. Ένα αμμώδες στρώμα χονδρόκοκκου ιδιόμορφου-υπιδιόμορφου χαλαζία που αντιστάθηκε στην μεταφορά, αλλά πολλές φορές εμφανίζεται διαρρηγμένος και περιέχει εγκλείσματα σιδηροπυρίτη. Δευτερογενής ασβεστίτης και καλά κρυσταλλωμένα υδροξειδία του  $Mn$  είναι συνοδά. Πρόκειται δηλαδή για υπολείμματα πρωτογενούς μεταλλοφορίας συνοδευόμενα από τα πρώτα αποβληθέντα μαγγανιούχα οξειδία.

2. Ένα συμπαγές στρώμα άμορφων υδροξειδίων του Μn, το οποίο πλαισιώνει και τα υπόλοιπα.
3. Ζώνη επί τόπου αντικατάστασης του ροδοχρωσίτη με πισόλιθους υδροξειδίων του Μn, συγκολλημένα με ύστερο ασβεστίτη.

Το άνω τέμαχος του μαρμάρου έχει αντικατασταθεί από Μn- υδροξείδια, ενώ στο κάτω τέμαχος έχουν αποτεθεί δενδριτικά συσσωματώματα τοντοροκίτη. Μέσα σε κοιλότητες αποτέθηκαν μικροκρυσταλλικές έως και καλά κρυσταλλωμένες σιδηρομαγγανιούχες επιφλοιώσεις μαζί με δευτερογενή ασβεστίτη και αργιλικά ορυκτά από την αλλοίωση του γνευσίου.

#### 4.6 Μεταλλείο Άγιοι Θεόδωροι

Σε κοντινή απόσταση από το Καρποσλούκ, η περιοχή Άγιοι Θεόδωροι παρουσιάζουν μεγάλης κλίμακας διάβρωσιγενή έγκοιλα στα οποία έχουν αποτεθεί δευτερογενή οξείδια του Μn που αποτελούνται από σκληρούς κονδύλους μέσα σε μαλακό έδαφος μαγγανικής σύστασης, συνοδευόμενα μαζί με μεγάλους φακούς μαρμάρου που δεν υπέστησαν χημική διάβρωση. Οι αποθέσεις αυτές ακολουθούν μια ζώνωση με το μάρμαρο να καλύπτεται από το σιδηρομαγγανιούχο έδαφος (terra rosa) και στο κέντρο του κοιλώματος αποτίθεται η κύρια Μn μεταλλοφορία, μαζί με άφθονα αργιλικά ορυκτά. Επίσης, υπάρχουν σε μικρή ποσότητα γκιψίτης, μαλαχίτης, αζουρίτης και χρυσόκολλα που αποτελούν προϊόντα διάβρωσης πρωτογενών σουλφιδίων.



Σχήμα 4.3. Μακροσκοπικό δείγμα από το μεταλλείο των Αγίων Θεοδώρων με καλά αναπτυγμένους βοτρυοειδείς κρυστάλλους μαγγανιούχων οξειδίων (Nimforoulos 1988)

#### 4.7 Μεταλλείο Ταρτάνα

Η τρίτη σε σειρά περιοχή που βρίσκεται πάνω στην τεκτονική επαφή Α-Δ των μαρμάρων με την ενότητα γνευσίου. Τα μεταλλοφόρα σώματα  $Mn^{4+}$  οξειδίων αποτελούν τις μεγαλύτερες υπεργενείς αποθέσεις της Δράμας. Υπάρχουν επιπλέον φλέβες αντικατάστασης του μαρμάρου σε περιοχές με χαμηλό τοπογραφικό ανάγλυφο, όπου υπάρχουν πισόλιθοι οξειδίων του Μn συγκολλημένοι από ασβεστίτη που σχηματίστηκαν από την επιτόπου αντικατάσταση του ροδοχρωσίτη. Πλησίον αυτών βρίσκονται φλέβες μαύρου ασβεστίτη και παρατηρείται έντονο το φαινόμενο της δολομιτίωσης, καθώς και της γένεσης ορυκτών της αργίλου.

Στα ανατολικά του Καρποσλούκ, σε υψόμετρο 800m, βρίσκεται το μεταλλείο Σύνθια, στο οποίο έγινε εκμετάλλευση κατά τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα. Η ύπαρξη ρηγμάτων διεύθυνσης ΒΑ και ΒΔ διευκόλυνε την άνοδο του ρυοδακίτη που βρίσκεται σε απόσταση 500m από το μεταλλείο. Η επαφή μαρμάρου- σχιστολίθου οριοθετεί την μεταλλοφορία με τον σχιστόλιθο, τον οποίο δεν τον διαπερνά. Η μεταλλοφορία βρίσκεται στο μάρμαρο με τη μορφή φλεβών έχοντας αντικαταστήσει την πρωτογενή, καθώς και με τη μορφή μαύρου ασβεστίτη. Οι φλέβες ακολουθούν τη στρώση και αποτελούνται από Μn και Fe οξείδια συγκολλημένα με δευτερογενή ασβεστίτη. Το μάρμαρο έχει υποστεί αλλοίωση και δημιουργήθηκαν αργιλικά ορυκτά και φαινόμενα δολομιτίωσης. Ορισμένη ποσότητα μεταλλικών βρίσκουμε και μέσα στο ρυοδακίτη, ωστόσο στο μάρμαρο εξαλείφεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από αυτόν.

#### 4.9 Μεταλλείο Πύργοι

Το μεταλλείο στην περιοχή των Πύργων διερευνήθηκε, αλλά γρήγορα εγκαταλείφθηκε καθώς όπως αναφέραμε βρίσκεται στο χαμηλότερο υψόμετρο από όλα τα μεταλλεία και φέρει κυρίως φλέβες πρωτογενούς υδροθερμικής μεταλλοφορίας ροδοχρωσίτη, ανκερίτη, μαύρου ασβεστίτη και σουλφιδίων (Nimforoulos and Pattrick 1989). Η μεταλλοφορία εμφανίζεται συμπτυχωμένη με το πέτρωμα ξενιστή, γεγονός που υποδεικνύει την συν- τεκτονική μεταλλογένεση. Εμφανίζεται, λοιπόν, μια χημική ζώνωση στην περιοχή αυτή που από κάτω προς τα πάνω είναι:  $Cu \rightarrow Fe \rightarrow Pb + Zn \rightarrow Mn$  (Nimforoulos et al. 1997b).

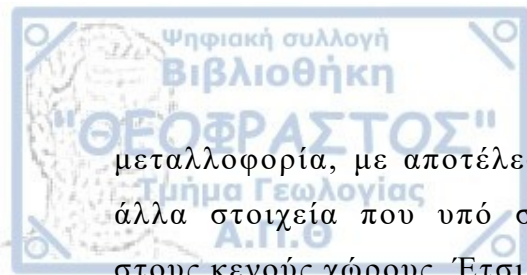


Σχήμα 4.4. Συμπτυχωμένη πρωτογενής μεταλλοφορία από την περιοχή των Πύργων (Nimforoulos 1988)

## 5. Συζήτηση και συμπεράσματα

Η Μάζα της Ροδόπης αποτελεί τον πυρήνα του Ελληνικού ορογενούς και καλύπτεται από μεταμορφωμένα πετρώματα στα οποία έχουν διεισδύσει πυριγενή σώματα ηλικίας Ιουρασικού έως Μειοκαίνου (Brun and Sokoutis 2007, Kydonakis et al. 2014). Σημαντικές είναι οι μεταλλοφόρες εμφανίσεις σε όλη την έκταση της ζώνης. Σε πολλές θέσεις έχουν σχηματιστεί βυθίσματα τα οποία καλύπτονται από Νεογενή ιζήματα. Το μεγάλο αυτό εύρος των ηλικιών των γεγονότων αυτών που συνδέονται με τεκτονική δράση δείχνει ότι η δράση αυτή είναι συνεχής μέχρι και σήμερα αποτελώντας τη γενεσιουργό αιτία αλλά και τον ρυθμιστικό παράγοντα της εξέλιξης. Η γένεση του μαγματισμού αποδίδεται στην υποβύθιση και την άνοδο υλικών του μανδύα στον ανώτερο φλοιό. Η οπισθοχώρηση της υποβυθιζόμενης πλάκας προκαλεί την έκταση και τη δημιουργία λεκανών. Η μεταλλογένεση που σχετίζεται με τον Ολιγοκαινικό μαγματισμό οφείλεται στην αυξανόμενη ταχύτητα οπισθοχώρησης του slab και την αποκοπή του που είχε ως αποτέλεσμα την είσοδο υλικών στον φλοιό (Menant 2018).

Με βάση τα βιβλιογραφικά στοιχεία που αναφέρονται σε παγκοσμίου κλάσεις κοιτάσματα μαγγανιούχων οξειδίων, καθώς και εργασίες και έρευνες που αφορούν τα κοιτάσματα στην ευρύτερη περιοχή του όρους Φαλακρό, αυτά τα κοιτάσματα μαγγανίου ανήκουν στον γενετικό τύπο των υπεργενών (Kuleshov 2011). Προέρχονται από την οξείδωση μεταλλοφοριών αντικατάστασης βασικών μετάλλων (Pb- Zn  $\pm$  Ag- Au) σε ανθρακικά πετρώματα. Η πρωτογενής μεταλλοφορία είναι υδροθερμικής προέλευσης και χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ασβεστιτικών ορυκτών πλούσια σε Mn (ροδοχρωσίτης, ανκερίτης, μαύρος ασβεστίτης) μαζί με μεικτά θειούχα, κυρίως σφαλερίτη, λιγότερο σιδηροπυρίτη, μαγνητοπυρίτη, χαλκοπυρίτη, μαρκασίτη και γαληνίτη. Ως σύνδρομο ορυκτό βρίσκουμε χαλαζία (Nimforoulos and Pattrick 1991). Η πρωτογενής μεταλλοφορία εμφανίζεται σε βαθύτερα σημεία της περιοχής και δεν φέρει οικονομικό ενδιαφέρον. Ο εμπλουτισμός των μεταλλοφοριών σε επίπεδο οικονομικού ενδιαφέροντος έγινε μέσω της διαδικασίας της διάβρωσης. Κυρίαρχο ρόλο είχαν τα μετεωρικά νερά πλούσια σε CO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> αρχικά εισήλθαν στο πέτρωμα ξενιστή από τις προϋπάρχουσες τεκτονικές ασυνέχειές του, διευρύνοντάς τες διαλύοντας το πέτρωμα και τη



μεταλλοφορία, με αποτέλεσμα να γίνει ο εμπλουτισμός τους σε μέταλλα και άλλα στοιχεία που υπό συγκεκριμένες φυσικοχημικές συνθήκες απέθεσαν στους κενούς χώρους. Έτσι, έγινε η γένεση ορυκτών του μαγγανίου όπως  $MnO$ -gel, τοντοροκίτης, νσουτίτης, χαλκοφανίτης, μπιρνεσσίτης, κρυπτομέλανας, πυρολουσίτης και ρανσιεΐτης σε συνοδεία με τα προϊόντα οξείδωσης των σουλφιδίων, αζουρίτης, μαλαχίτης, γκαιτίτης και κερουσίτης (Nimfopoulos and Pattrick 1991, Nimfopoulos et al. 1997b).

- Arikas, K., & Voudouris, P. (1998). Hydrothermal alterations and mineralizations of magmatic rocks in the southeastern Rhodope Massif. *Acta Vulcanologica*, 10, 353-366.
- Bertrand, G., Guillou-Frottier, L., & Loiselet, C. (2014). Distribution of porphyry copper deposits along the western Tethyan and Andean subduction zones: Insights from a paleotectonic approach. *Ore Geology Reviews*, 60, 174-190.
- Blundell, D., Arndt, N., Cobbold, P. R., & Heinrich, C. (2005). 9: Processes of tectonism, magmatism and mineralization: Lessons from Europe. *Ore Geology Reviews*, 27(1-4), 333-349.
- Bonev, N., Burg, J. P., & Ivanov, Z. (2006). Mesozoic–Tertiary structural evolution of an extensional gneiss dome—the Kesebir–Kardamos dome, eastern Rhodope (Bulgaria–Greece). *International Journal of Earth Sciences*, 95(2), 318-340.
- Bonev, N., Marchev, P., Moritz, R., & Collings, D. (2015). Jurassic subduction zone tectonics of the Rhodope Massif in the Thrace region (NE Greece) as revealed by new U–Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Evros ophiolite and high-grade basement rocks. *Gondwana Research*, 27(2), 760-775.
- Bonev, N., & Stampfli, G. (2011). Alpine tectonic evolution of a Jurassic subduction-accretionary complex: Deformation, kinematics and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on the Mesozoic low-grade schists of the Circum-Rhodope Belt in the eastern Rhodope-Thrace region, Bulgaria-Greece. *Journal of Geodynamics*, 52(2), 143-167.
- Brun, J. P., Faccenna, C., Gueydan, F., Sokoutis, D., Philippon, M., Kydonakis, K., & Gorini, C. (2016). The two-stage Aegean extension, from localized to distributed, a result of slab rollback acceleration. *Canadian journal of earth sciences*, 53(11), 1142-1157.
- Brun, J. P., & Sokoutis, D. (2007). Kinematics of the southern Rhodope core complex (North Greece). *International Journal of Earth Sciences*, 96(6), 1079-1099.
- Burg, J. P. (2012). Rhodope: From Mesozoic convergence to Cenozoic extension: Review of petro-structural data in the geochronological frame. *Journal of the Virtual Explorer*, 42, 1.
- 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(3-4), 569-575.

Deng, X., & Li, J. (2013). 40 Ar/39 Ar dating of cryptomelane from the Baye manganese deposit, SW Yunnan, China: Implications for growth rate of supergene Mn-oxide veins. *Science China Earth Sciences*, 56(10), 1654-1663.

Ersoy, E. Y., & Palmer, M. R. (2013). Eocene-Quaternary magmatic activity in the Aegean: implications for mantle metasomatism and magma genesis in an evolving orogeny. *Lithos*, 180, 5-24.

Hedenquist, J. W., Arribas, A. N. T. O. N. I. O., & Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13(2), 45-77.

Heinrich, C. A., & Neubauer, F. (2002). Cu–Au–Pb–Zn–Ag metallogeny of the Alpine–Balkan–Carpathian–Dinaride geodynamic province.

Himmerkus, F., Reischmann, T., & Kostopoulos, D. (2009). Serbo-Macedonian revisited: a Silurian basement terrane from northern Gondwana in the Internal Hellenides, Greece. *Tectonophysics*, 473(1-2), 20-35.

Jolivet, L., & Brun, J. P. (2010). Cenozoic geodynamic evolution of the Aegean. *International Journal of Earth Sciences*, 99(1), 109-138.

Jolivet, L., Faccenna, C., Huet, B., Labrousse, L., Le Pourhiet, L., Lacombe, O., ... & Philippon, M. (2013). Aegean tectonics: Strain localisation, slab tearing and trench retreat. *Tectonophysics*, 597, 1-33.

Jolivet, L., Menant, A., Sternai, P., Rabillard, A., Arbaret, L., Augier, R., ... & Labrousse, L. (2015). The geological signature of a slab tear below the Aegean. *Tectonophysics*, 659, 166-182.

Kaiser-Rohrmeier, M., Handler, R., Quadt, A. V., & Heinrich, C. (2004). Hydrothermal Pb–Zn ore formation in the central Rhodopian dome, south Bulgaria: review and new time constraints from Ar–Ar geochronology. *Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology*, 84(1), 37-58.

Kilias, A. D., Vamvaka, A., Falalakis, G., Sfeikos, A., Papadimitriou, E., Gkarlaouni, C. H., & Karakostas, B. (2015). The Mesohellenic Trough and the paleogene Thrace basin on the Rhodope massif, their structural evolution and geotectonic significance in the Hellenides. *J. Geol. and Geosc*, 4(2), 198.

Kounov, A., Wüthrich, E., Seward, D., Burg, J. P., & Stockli, D. (2015). Low-temperature constraints on the Cenozoic thermal evolution of the Southern Rhodope Core Complex (Northern Greece). *International journal of earth sciences*, 104(5), 1337-1352.

Kuleshov, V. N. (2011). Manganese deposits: Communication 1. Genetic models of manganese ore formation. *Lithology and Mineral Resources*, 46(5), 473.

Kuleshov, V. N., Zhukov, I. G., & Brusnitsyn, A. I. (2017). Isotope ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) and genetic features of manganese carbonates of the Mazul deposit (Krasnoyarsk region). *Lithology and Mineral Resources*, 52(1), 51-60.

Kydonakis, K., Brun, J. P., & Sokoutis, D. (2015a). North Aegean core complexes, the gravity spreading of a thrust wedge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(1), 595-616.

Kydonakis, K., Brun, J. P., Sokoutis, D., & Gueydan, F. (2015b). Kinematics of Cretaceous subduction and exhumation in the western Rhodope (Chalkidiki block). *Tectonophysics*, 665, 218-235.

Kydonakis, K., Gallagher, K., Brun, J. P., Jolivet, M., Gueydan, F., & Kostopoulos, D. (2014). Upper Cretaceous exhumation of the western Rhodope Metamorphic Province (Chalkidiki Peninsula, northern Greece). *Tectonics*, 33(6), 1113-1132.

Marchev, P., Kaiser-Rohrmeier, M., Heinrich, C., Ovtcharova, M., von Quadt, A., & Raicheva, R. (2005). 2: Hydrothermal ore deposits related to post-orogenic extensional magmatism and core complex formation: The Rhodope Massif of Bulgaria and Greece. *Ore Geology Reviews*, 27(1-4), 53-89.

Marchev, P., Raicheva, R., Downes, H., Vaselli, O., Chiaradia, M., & Moritz, R. (2004). Compositional diversity of Eocene–Oligocene basaltic magmatism in the Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: implications for genesis and tectonic setting. *Tectonophysics*, 393(1-4), 301-328.

Márton, I., Moritz, R., & Spinkings, R. (2010). Application of low-temperature thermochronology to hydrothermal ore deposits: Formation, preservation and exhumation of epithermal gold systems from the Eastern Rhodopes, Bulgaria. *Tectonophysics*, 483(3-4), 240-254.

Melfos, V., & Voudouris, P. C. (2012). Geological, mineralogical and geochemical aspects for critical and rare metals in Greece. *Minerals*, 2(4), 300-317.

Melfos, V., & Voudouris, P. (2016). Fluid evolution in Tertiary magmatic-hydrothermal ore systems at the Rhodope metallogenic province, NE Greece. A review. *Geologia Croatica*, 69(1), 157-167.

Melfos, V., & Voudouris, P. (2017). Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration. *Ore Geology Reviews*, 89, 1030-1057.

Menant, A., Jolivet, L., Tuduri, J., Loiselet, C., Bertrand, G., & Guillou-Frottier, L. (2018). 3D subduction dynamics: A first-order parameter of the transition from copper-to gold-rich deposits in the eastern Mediterranean region. *Ore Geology Reviews*, 94, 118-135.

Michailidis, K. M., Nicholson, K., Nimfopoulos, M. K., & Patrick, R. A. D. (1997). An EPMA and SEM study of the Mn-oxide mineralization of Kato Nevrokopi, Macedonia, northern Greece: Controls on formation of the Mn<sup>4+</sup> oxides. *Geological Society, London, Special Publications*, 119(1), 265-280.

Michailidis, K., Nimfopoulos, M., Nicholson, K., & Chatzikirkou, A. (1995). A hydrothermal manganiferous sulphide assemblage associated with pegmatite intrusions in the Sideronero area, Drama, N. Greece. P In. In *Proceedings of the XV Congress of the Carpatho-Balkan Geological Association*.

Nimfopoulos, M. K. (1988). *Manganese mineralisation near Kato Nevrokopi, Drama, Greece* (Doctoral dissertation, University of Manchester).

Nimfopoulos, M. K., Arvanitidis, N., Michailidis, K. M., Naden, J., & De Groot, P. A. (2000). Fluid inclusion and isotopic investigation of the auriferous base metal mineralization in the Palia Kavala area, Macedonia, N. Greece. In *Proceedings of the 3rd international conference on the geology of the eastern Mediterranean* (pp. 211-220).

Nimfopoulos, M. K., Michailidis, K. M., & Christofides, G. (1997a). Zincian rancieite from the Kato Nevrokopi manganese deposits, Macedonia, northern Greece. *Geological Society, London, Special Publications*, 119(1), 339-347.

Nimfopoulos, M., & Patrick, R. (1989). Mineralogical evolution of the mineralization at K. Nevrokopi-Drama, Greece. *Geol Rhodopica*, 1, 444-452.

Nimfopoulos, M. K., & Patrick, R. A. D. (1991). Mineralogical and textural evolution of the economic manganese mineralisation in western Rhodope Massif, N. Greece. *Mineralogical Magazine*, 55(380), 423-434.

Nimfopoulos, M. K., Patrick, R. A. D., Michailidis, K. M., Polya, D. A., & Esson, J. (1997b). Geology, geochemistry, and origin of the continental karst-hosted supergene manganese deposits in the western Rhodope Massif, Macedonia, northern Greece. *Exploration and Mining Geology*, 6, 171-184.

Nimfopoulos, M. K., Rex, D., & Patrick, R. (1988). Age of hydrothermal manganese mineralization near Kato Nevrokopi, Drama, northern Greece. *Institution of Mining and Metallurgy Transactions. Section B. Applied Earth Science*, 97.

Pe-Piper, G. (2004, April). Unique features of Greek Cenozoic igneous rocks: tectonics and magma sources. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Thessaloniki, Greece* (Vol. 3, pp. 1208-1211).

Rakovan, J. (2005). Word to the Wise: Metasomatism. *Rocks & Minerals*, 80(1), 63-64.

Richards, J. P. (2003). Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8), 1515-1533.

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), 3-41.

Tsirambides, A. (2005). The mineral wealth of Greece. *Yiachoudi Publ., Thessaloniki*.

Tsirambides, A., & Filippidis, A. (2012a). Exploration key to growing Greek industry. *Industrial Minerals(London)*, (533).

Tsirambides, A., & Filippidis, A. (2012b). Greece seeks mineral lifeboat. *Industrial Minerals(London)*, (532).

Tsirambides, A., & Filippidis, A. (2012c). Metallic mineral resources of Greece. *Open Geosciences*, 4(4), 641-650.

Επεξηγηματικό τεύχος του μεταλλογενετικού χάρτου 1:1000000, εκδόσεως ΙΓΕΥ 1965. Εθνικόν Ίδρυμα Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Αθήνα 1973, 253p.

ΧΑΤΖΗΠΑΝΑΓΗΣ, Ι. (1991). *Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΦΑΛΑΚΡΟΥ* (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών).

Χατζηπαναγής, Ι., Φυρολάκης, Ν., & Μπόσκος, Ε. (1993). Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του όρους Φαλακρού και η τεκτονική σχέση της Δ. Ροδόπης με τη Σερβομακεδονική μάζα. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 28(1), 151-163.