



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΜΑΡΙΑ Γ. ΣΤΑΜΟΥΛΗ

ΑΕΜ: 5714

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΡΩΜΙΤΗ ΑΛΠΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΕ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2022



ΜΑΡΙΑ Γ. ΣΤΑΜΟΥΛΗ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΡΩΜΙΤΗ ΑΛΠΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΕ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥΣ

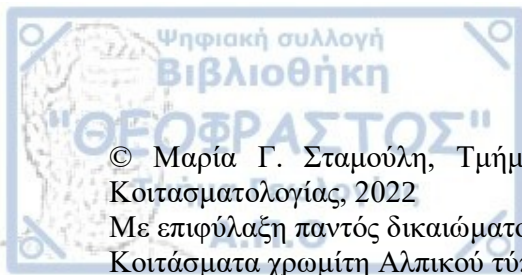
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Μαρία Γ. Σταμούλη, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Μαρία Γ. Σταμούλη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2022
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Κοιτάσματα χρωμίτη Αλπικού τύπου σε οφιολίθους - *Διπλωματική Εργασία*

© Maria G. Stamouli, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2022
All rights reserved.
Podiform chromite deposits in ophiolites - *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.

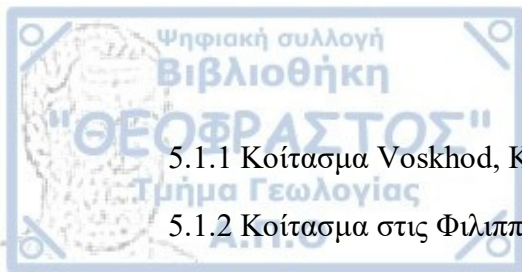
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Μακροσκοπική εικόνα χρωμίτη από την Νέας Καληδονία στον Ειρηνικό ωκεανό που ανήκει στη Γαλλία (www.mindat.org)



Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	7
Abstract	8
Πρόλογος	9
Κεφάλαιο 1	10
1.1Χρώμιο	10
1.1.1 Γενικά	10
1.1.2 Πηγές Χρωμίου	11
1.1.3 Εφαρμογές -Επιπτώσεις στην υγεία και στα φυτά.....	14
1.2 Οφιόλιθοι	15
1.3 Χρωμίτες.....	17
1.3.1 Στρωματόμορφοι.....	18
1.3.2 Αλπικού τύπου	19
2.1 Γεωτεκτονικό περιβάλλον	23
Κεφάλαιο 3	26
3.1 Πετρώματα- ξενιστές- Δομή	26
3.2 Εξαλλοίωση.....	26
3.2.1 Σερπεντινίωση.....	27
3.2.2 Εξαλλοίωση σε σιδηροχρωμίτη	28
Κεφάλαιο 4	29
4.1 Μορφή.....	29
4.2 Ορυκτολογική σύσταση.....	30
Κεφάλαιο 5	32
5.1 Κυριότερα Κοιτάσματα Παγκοσμίως	32



5.1.1 Κοίτασμα Voskhod, Καζακστάν.....	33
5.1.2 Κοίτασμα στις Φιλιππίνες.....	34
Κεφάλαιο 6	38
6.1 Κυριότερα Κοιτάσματα στην Ελλάδα.....	38
6.1.1 Κοιτάσματα Χρωμίου στη περιοχή του Βούρινου.....	38
6.1.2 Κοιτάσματα χρωμίου στη περιοχή Τσαγκλί	41
Βιβλιογραφία	43
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	Error! Bookmark not defined.
Ξένη Βιβλιογραφία.....	Error! Bookmark not defined.
Διαδικτυακές πηγές	45



Περίληψη

Το χρώμιο είναι ένα χημικό στοιχείο που βρίσκει ευρεία χρήση στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Κύρια πηγή του είναι τα κοιτάσματα χρωμίτη, που χαρακτηρίζονται από υψηλές ποσότητες οξειδίων χρωμίου. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση των κοιτασμάτων χρωμίτη αλπικού τύπου που συναντώνται μέσα σε οφιολιθικά συμπλέγματα. Αφού παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά του χρωμίου ως χημικό στοιχείο, στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στο χρωμίτη, την κύρια πηγή προέλευσής του και στα πετρώματα στα οποία εμφανίζεται, τους οφιολίθους. Η ανάλυση συνεχίζεται παρουσιάζοντας βασικά χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων, παραθέτοντας πληροφορίες για τα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα στα οποία σχηματίζονται και την μορφή που τα συναντάμε στο ύπαιθρο. Σαν τελικό κομμάτι της ανασκόπησης, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν σημαντικά κοιτάσματα τέτοιου τύπου, παγκοσμίως αλλά και στην Ελλάδα. Από την ανάλυση αυτή διαπιστώθηκε ότι η μελέτη και εξακρίβωση της φύσης και εμφάνισης των παραπάνω κοιτασμάτων είναι καταλυτική τόσο για την παγκόσμια βιομηχανία όσο και για την κατανόηση του ρόλου τους στην γεωτεκτονική εξέλιξη των ηπείρων.



Abstract

Chromium is a chemical element that is widely used in industry and the constructions. Its primary source is chromite deposits, characterized by high amounts of chromium oxides. The aim of this Bachelor thesis is the review of podiform chromite deposits found in ophiolite complexes. After presenting the basic characteristics of chromium as a chemical element, extensive reference is made to chromite, its main sources, and the rocks in which it forms, the ophiolites. The thesis continues by presenting basic characteristics of the deposits, citing information about the geotectonic environments in which they are formed and the form we find them in the field. As a final part of the review, important deposits of this type are presented, from worldwide as well as from Greece. From this analysis it was found that the study and clarification of the nature and appearance of these deposits is substantial, both for the global industry and for understanding of their role in the geotectonic evolution of continents.



Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε το Ακαδημαϊκό Έτος 2021-2022, στο πλαίσιο μελέτης των κοιτασμάτων χρωμίτη αλπικού τύπου, επιχειρώντας την λεπτομερέστερη και σε βάθος κατανόηση τους.

Η ανάθεση της εργασίας και η επίβλεψη της πορείας της πραγματοποιήθηκε από τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας κ. Βασίλειο Μέλφο. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, στον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Βασίλειο Μέλφο για την πολύτιμη βοήθεια του, αλλά επιπλέον να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με την στήριξή τους στην διεκπεραίωση της πτυχιακής μου εργασίας.

Το αντικείμενο μελέτης που μου ανατέθηκε είναι άξιο μελέτης καθώς αποσαφηνίζεται με αυτό τον τρόπο η σημασία του συγκεκριμένου χημικού στοιχείου στη ζωή μας, αλλά αποτελεί και έναυσμα για περαιτέρω μελέτη των επιπτώσεων που μπορεί να επιφέρει η υπερβολική έκθεση των ανθρώπων σε αυτό.

Κεφάλαιο 1

1.1 Χρώμιο

1.1.1 Γενικά

Το χρώμιο είναι χημικό στοιχείο της ομάδας 6 (VIb) του περιοδικού πίνακα. Είναι σκληρό, σκούρο γκρι μέταλλο που έχει υψηλή στίλβωση και χρησιμοποιείται σε κράματα για αύξηση της αντοχής και αντίστασης στη διάβρωση. Ανακαλύφθηκε από τον Γάλλο χημικό Nicolas-Louis Vauquelin το 1797 και απομονώθηκε ως μέταλλο ένα χρόνο αργότερα. Το όνομα του στοιχείου "χρώμιο" (από την ελληνική λέξη χρώμα), υποδηλώνει τους έντονους και ποικίλους χρωματισμούς των ενώσεων του. Το πράσινο χρώμα του σμαραγδιού, του σερπεντίνη και του χρωμιούχου μαρμαρυγία, καθώς επίσης και το κόκκινο χρώμα του ρουμπινιού, οφείλονται σε μικρές ποσότητες χρωμίου. Κάποιες ιδιότητες του στοιχείου παρατίθενται στον Πίνακα 1. Είναι ένα σχετικά άφθονο στοιχείο στον φλοιό της Γης, αλλά η ελεύθερη μορφή του δε συναντάται ποτέ στην φύση. Τα περισσότερα μεταλλεύματα αποτελούνται από χρωμίτη, ο ακριβής τύπος του οποίου είναι FeCr_2O_4 . Είναι ευρέως διαδεδομένο σε φυσικά κοιτάσματα, τα οποία περιέχουν συνήθως οξυγόνο, μαγνήσιο, αλουμίνιο και πυρίτιο. Η περιεκτικότητά τους σε χρώμιο κυμαίνεται από 42 έως και 56 %. Μια από τις κύριες χρήσεις του χρωμίου είναι σε κράματα σιδήρου, για τα οποία δεν απαιτείται το καθαρό μέταλλο. Κατά συνέπεια, ο χρωμίτης συχνά ανάγεται με άνθρακα σε έναν κλίβανο, παράγοντας το κράμα σιδηροχρωμίου, το οποίο περιέχει σίδηρο και χρώμιο σε αναλογία ατόμων 1 προς 2 (www.britannica.com).

Το φυσικό χρώμιο αποτελείται από ένα μείγμα τεσσάρων σταθερών ισοτόπων: χρώμιο 52 σε ποσοστό 83,76%, χρώμιο 53 σε ποσοστό 9,55% χρώμιο 50 σε ποσοστό 4,31% και χρώμιο 54 σε ποσοστό 2,38%. Σε θερμοκρασία δωματίου, διαλύεται αργά σε υδροχλωρικό και αραιό θειικό οξύ. Ορισμένοι οξειδωτικοί παράγοντες σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα οξειδίου που δεν αντιδρά με το μέταλλο, καθιστώντας το παθητικό ακόμα και σε αραιά διαλύματα οξέων, όπως θειικό οξύ, νιτρικό οξύ ή κρύο υδατικό διάλυμα νιτρικού και υδροχλωρικού οξέος. Σε κανονικές θερμοκρασίες το μέταλλο δεν παρουσιάζει καμία αντίδραση με το θαλασσίνο νερό ή τον υγρό ή ξηρό αέρα (www.britannica.com).

Πίνακας 1: Ιδιότητες του χρωμίου(www.britannica.com)

Ιδιότητες του Χρωμίου	
Ατομικός Αριθμός	24
Ατομικό Βάρος	51,9961
Σημείο Τήξης	1.890 °C (3.434° F)
Σημείο Βρασμού	2.482°C (4.500 ° F)
Ειδικό Βάρος	7,2 (στους 28 °C)
Καταστάσεις οξείδωσης	+2,+3,+6
Ηλεκτρονιακή Δομή	[Ar]3d ⁵ 4s ¹

Κάποιες επιπλέον ιδιότητες του χημικού στοιχείου είναι ότι παρουσιάζει θερμική αγωγιμότητα ίση με 0,402 σε θερμοκρασία 1K, 0,385 σε θερμοκρασία 10 K, 1,59 στους 100 K, 1,11 στους 200 K, 0,937 στους 300 K, 0,860 στους 500 K, 0,654 στους 1000 K, 0,556 στους 1600 K και 0,494 στους 2000 K. Η σκληρότητα Κnoop του χρωμίου παίρνει τιμή ίση με 1160, ενώ η μαγνητική επιδεκτικότητα του μεταβάλλεται ανάλογα την θερμοκρασία (από $180 \cdot 10^{-6}$ cgs στους 273 K μέχρι $224 \cdot 10^{-6}$ cgs στους 1713 K) (Papp and Lipin, 2001).

1.1.2 Πηγές Χρωμίου

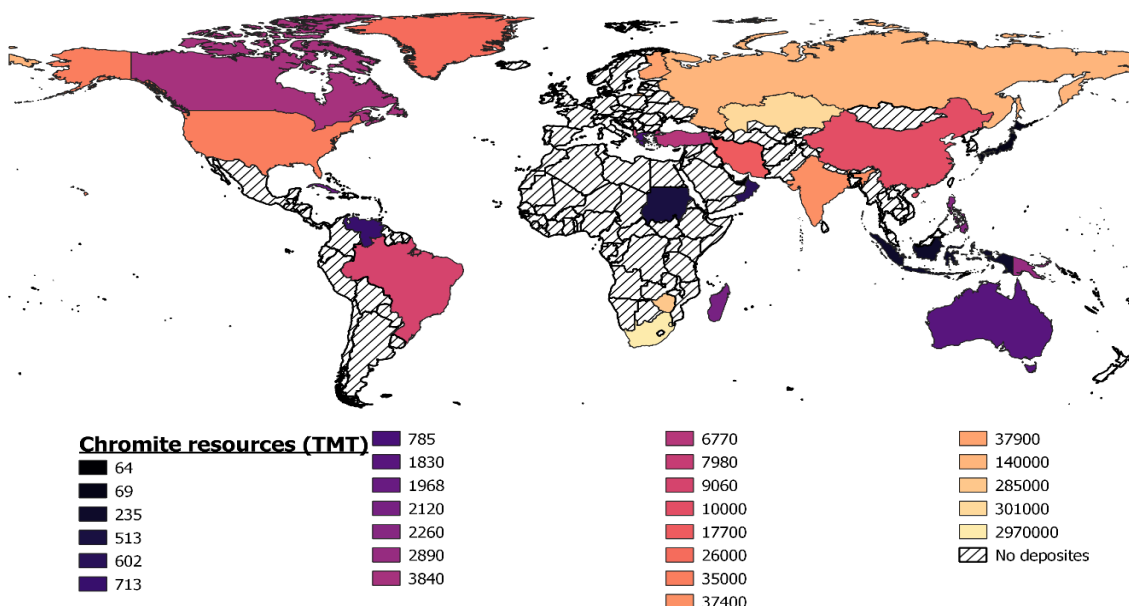
Το χρώμιο είναι το 21^ο πιο κοινό στοιχείο που βρίσκεται στο φλοιό της Γης, αλλά δεν βρίσκεται στην ελεύθερη μορφή του. Αντίθετα βρίσκεται κυρίως σε μεταλλεύματα χρωμίτη. Ο χρωμίτης εξορύσσεται στη Ζιμπάμπουε, στη Ρωσία, στη Νέα Ζηλανδία, στη Τουρκία, στο Ιράν, στην Αλβανία, στη Φινλανδία, στις Φιλιππίνες και στη Μαδαγασκάρη. Περίπου 20.000 τόνοι μετάλλου χρωμίου παράγονται κάθε χρόνο και εξακολουθούν να υπάρχουν περίπου ένα δισεκατομμύριο τόνοι ανεκμετάλλευτων κοιτασμάτων στη Γροιλανδία, τον Καναδά και τις ΗΠΑ. Το μέταλλο του χρωμίου, εξάγεται στη συνέχεια με θέρμανση του μεταλλεύματος χρωμίτη παρουσία αλουμινίου ή πυριτίου (www.livescience.com). Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας (Πίνακας 2) με τα καταγεγραμμένα αποθέματα χρωμίτη ανά τον κόσμο.

Πίνακας 2: Διαθέσιμα αποθέματα χρωμίτη ανά χώρα (Papp and Lipin, 2001).

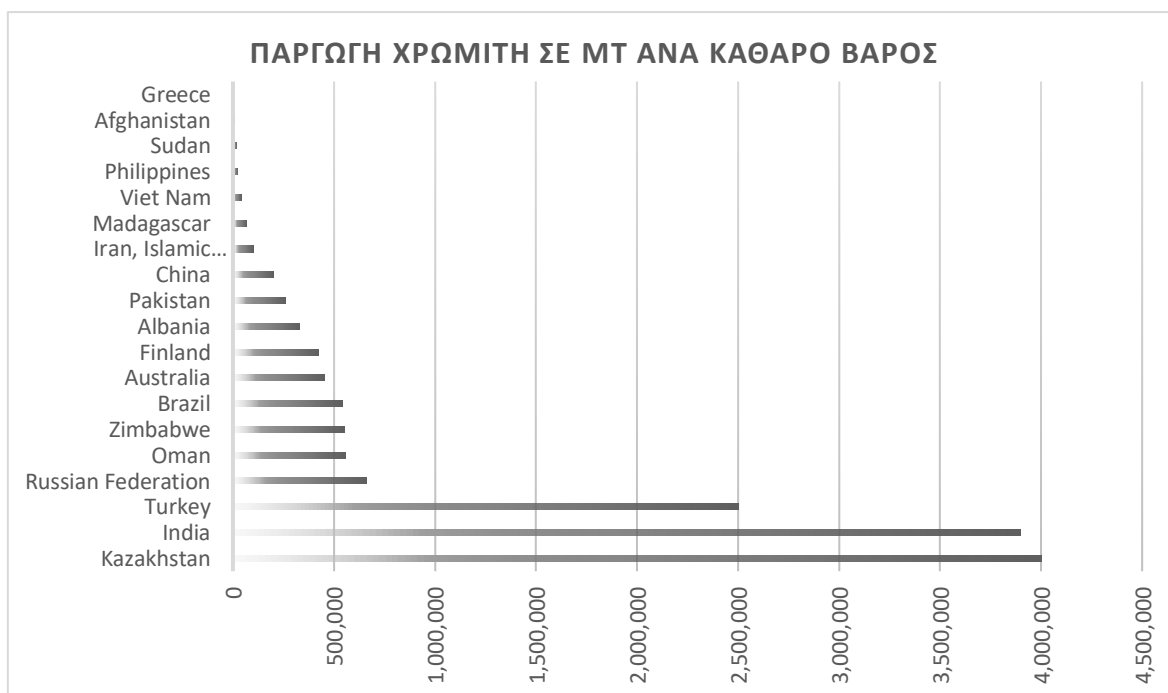
Χώρα	Τύπος κοιτάσματος	Αποδεδειγμένα Αποθέματα
Αλβανία	Αλπικού τύπου	7.980
Αυστραλία	Στρωματόμορφο	1.830
Βραζιλία	Στρωματόμορφο	9.060
Καναδάς	Στρωματόμορφο	3.840
Κίνα	Αλπικού τύπου	10.000
Κούβα	Αλπικού τύπου	1.970
Φινλανδία	Στρωματόμορφο	37.900
Ελλάδα	Αλπικού τύπου	785
Γροιλανδία	Στρωματόμορφο	26.000
Ινδία	Στρωματόμορφο	37.400
Ινδονησία	Λατερίτης	235
Ιράν	Αλπικού τύπου	17.700
Ιαπωνία	Αλπικού τύπου	69
Καζακστάν	Αλπικού τύπου	301.000
Μαδαγασκάρη	Στρωματόμορφο	2.120
Ομάν	Αλπικού τύπου	602
Νέα Γουινέα	Λατερίτης	2.890
Φιλιππίνες	Αλπικού τύπου	2.260
Ρωσία	Αλπικού τύπου	140.000
Νότια Αφρική	Αλπικού τύπου	2.970.000
Σουδάν	Αλπικού τύπου	513
Τουρκία	Αλπικού τύπου	6.770
Αμερική	Στρωματόμορφο	35.000
Αραβικά Εμιράτα	Αλπικού τύπου	64
Βενεζουέλα	Αλπικού τύπου	713
Ζιμπάμπουε	Στρωματόμορφο	285.000
Συνολικά		3.910.000

Στο Σχήμα 1 έγινε οπτικοποίηση του παραπάνω πίνακα με την χρήση ενός προγράμματος (Qgis) για να γίνει κατανοητή η χωρική κατανομή των κοιτασμάτων. Πέρα όμως από τα διαθέσιμα κοιτάσματα, σημασία έχει ποια από αυτά είναι εκμεταλλεύσιμα και

χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή χρωμίου. Σύμφωνα λοιπόν με το USGS (United States Geological Survey) για τα δεδομένα του έτους 2012 από το Σχήμα 2 φαίνεται η παραγωγή χρωμίτη ανά χώρα.



Σχήμα 1: Χωρική κατανομή των κοιτασμάτων χρωμίτη παγκοσμίως (Papp and Lipin, 2001).



Σχήμα 2: Χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή χρωμίτη (www.usgs.gov).

Από τα δεδομένα είναι φανερό ότι η χώρα με την μεγαλύτερη παραγωγή χρωμίτη είναι η Νότια Αφρική σε αντίθεση με την Ελλάδα, η συνεισφορά της οποίας στην παγκόσμια παραγωγή

χρωμίτη φαίνεται να είναι ασήμαντη, αφού από το 1994 και μετά σταμάτησε να εξορύσσει χρωμίτη και να παράγει σιδηροχρώμιο. Παράλληλα σημαντικές οικονομικές δυνάμεις στο κομμάτι παραγωγής χρωμίτη φαίνεται να είναι η Ινδία και η Τουρκία (www.indexmundi.com). Επιπλέον κάτι εξίσου σημαντικό και άξιο αναφοράς είναι ότι οι Φιλιππίνες παρόλο που φιλοξενούν μεγάλες ποσότητες αλπικού τύπου χρωμίτη δεν συνεισφέρουν συνολικά σε μεγάλο βαθμό στη παραγωγή του. Να σημειωθεί ότι είναι σπουδαίο να γνωρίζουμε τη συνεισφορά της κάθε χώρας στην παραγωγή χρωμίτη γιατί η κατανομή του είναι άμεσα συνδεδεμένη με την γεωτεκτονική θέση και εξέλιξη της κάθε ηπείρου, όπως θα δούμε και παρακάτω.

Για αρκετά χρόνια κυρίαρχη θέση στη παραγωγή κοιτασμάτων χρωμίτη κατείχαν η Νότια Αφρική και η περιοχή της πρώην Σοβιετικής Ένωσης (κυρίως το Καζακστάν). Μετά την διάλυση της όμως η παραγωγή άλλων χωρών όπως της Τουρκίας και του Ιράν υπερίσχυσε αυτής του Καζακστάν. Η πολιτική μεταβολή στο Καζακστάν, φαίνεται να επηρέασε αρνητικά την παραγωγή χρωμίου, εκτός από το 1995 που αποτέλεσε έτος ανάκαμψης, καθώς από το 1991 και μετά η παραγωγή μειώθηκε. Οι αυξανόμενες ανάγκες σε χρώμιο και η μειωμένη παραγωγή χρωμίου στο Καζακστάν οδήγησαν την Τουρκία και το Ιράν να ενταχθούν στις κύριες χώρες παραγωγούς τα έτη 1994 και 1989 αντίστοιχα (Papp and Lipin, 2001).

1.1.3 Εφαρμογές -Επιπτώσεις στην υγεία και στα φυτά

Το κύριο πεδίο εφαρμογής του χρωμίου είναι η παραγωγή σιδηροχρωμίου με ποσοστό 95,2%. Άλλα πεδία στα οποία βρίσκει εφαρμογή είναι τα χυτήρια 2,4%, χημικά 1,6% και τα πυρίμαχα 0,8%. Χρησιμοποιείται στην Παρασκευή ανοξείδωτου χάλυβα, λόγω της μεγάλης αντοχής του στη διάβρωση και της μεγάλης σκληρότητάς του, στην ηλεκτρική επιμετάλλωση χρωμίου, στις βαφές και χρωστικές, στη διατήρηση του ξύλου, στην κατεργασία δέρματος, στα πυρίμαχα υλικά καθώς σε πολλές άλλες εφαρμογές (Lunk, 2015).

Παρά τη διαδεδομένη και ευρεία χρήση του, το χρώμιο είναι υπεύθυνο για τοξικές επιδράσεις στον άνθρωπο και προκαλεί αλλεργιογένεση και καρκινογένεση σε ανθρώπους αλλά και σε ζώα. Το εξασθενές χρώμιο είναι κυρίως υπεύθυνο για όλη την καρκινογόνο δράση σε σύγκριση με το τρισθενές χρώμιο. Είναι υπεύθυνο για δερματικές αλλεργίες, καθώς επίσης εμφανής είναι η διάτρηση του στο ρινικό διάφραγμα που σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει σε καρκίνο του πνεύμονα. Ακόμα λόγω της έκθεσης στο χρώμιο γενετική αλλοίωση που είναι επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία μπορεί να συμβεί (Shekhawat et al., 2015).

1.2 Οφιόλιθοι

Η λέξη «οφιόλιθος» είναι αποτέλεσμα συνδυασμού των όρων «όφις» και «λίθος», από τον Γάλλο Brogniart (1813), ο οποίος χρησιμοποίησε αυτή τη λέξη λόγω του ότι το χρώμα και η λάμψη των συγκεκριμένων πετρωμάτων του θύμιζε το δέρμα του φιδιού. Αρχικά ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε για τους σερπεντινίτες, ενώ αργότερα ως οφιόλιθοι χαρακτηρίστηκαν γαββρικά και ηφαιστειακά πετρώματα μαζί με τους σερπεντινίτες (Πομώνης, 2003).

Οι οφιόλιθοι είναι συμπλέγματα ηφαιστειακών και πλουτωνικών πετρωμάτων κυρίως βασικής και υπερβασικής σύστασης. Το πρόβλημα των οφιολίθων έχει επικεντρώσει το ενδιαφέρον των γεωλόγων και γεωφυσικών τα τελευταία χρόνια σε μεγάλο βαθμό λόγω της σημασίας τους στην εξέλιξη του ωκεάνιου φλοιού και στις τεκτονικές πλάκες. Οι πιο πρόσφατοι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι οι οφιόλιθοι είναι θραύσματα του ωκεάνιου φλοιού που δημιουργήθηκαν σε μεσοωκεάνιες ράχες και μεταφέρθηκαν σε ζώνες υποβύθισης στα όρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών. Αυτή η υπόθεση θεωρείται ως αναπόσπαστο μέρος των τεκτονικών πλακών. Παρόλα αυτά πολλοί ορισμοί έχουν δοθεί για να περιγράψουν πετρώματα της σειράς των οφιολίθων (Miyashiro, 1975).

Στον ορισμό του Penrose, ένας οφιόλιθος περιγράφεται ως η «διακριτική συγκέντρωση βασικών έως υπερβασικών πετρωμάτων» που περιλαμβάνει, από κάτω προς τα πάνω, τεκτονισμένους περιδοτίτες, σωρευτικούς περιδοτίτες και πυροξενίτες που επικαλύπτονται από στρωματομένους γάββρους, βασαλτικές λάβες, ηφαιστειακή ακολουθία και ιζηματογενές κάλυμμα. Ένας οφιόλιθος μπορεί να είναι ατελής, τεκτονικά διαμελισμένος ή μεταμορφωμένος (Dilek and Furnes, 2011).

Αυτός ο αρχικός ορισμός Penrose για τους οφιόλιθους είναι εξαιρετικά περιοριστικός και δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική ετερογένεια στη σύσταση και την εμφάνιση των οφιολίθων, και επομένως χρειάζεται μια πιο ντετερμινιστική προσέγγιση για τον ορισμό των οφιολίθων και της πυριγενούς εξέλιξής τους. Το βασικό δόγμα του ορισμού Penrose του 1972 είναι ότι ένας ιδανικός οφιόλιθος έχει ψευδοστρωματογραφία με διαρκείς πλευρικές και οριζόντιες επαφές. Μελέτες από το 1972 έχουν δείξει, ότι οι περισσότεροι οφιόλιθοι έχουν δυναμική εξέλιξη και παρουσιάζουν μια πλευρικά ασυνεχή και κάθετα ετερογενή αρχιτεκτονική φλοιού και ποικίλα γεωχημικά χαρακτηριστικά λόγω πολλαπλών μαγματικών επεισοδίων και διαφορετικών πηγών μανδύα κατά την πύρινη εξέλιξή τους. Η ποικιλομορφία στην αρχιτεκτονική και τα γεωχημικά αποτυπώματα που παρατηρούνται στους οφιόλιθους αντανακλά τις διαφορές στις πυριγενείς και τεκτονικές διεργασίες που εμπλέκονται στο

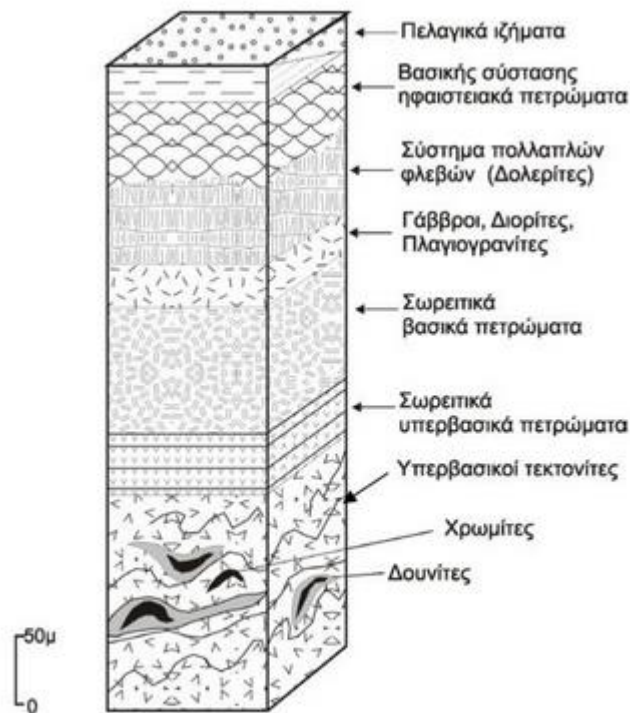
σχηματισμό του ωκεάνιου φλοιού σε διαφορετικές γεωδυναμικές φάσεις (Dilek and Furnes, 2011).

Τελικά ορίζουμε έναν οφιολίθο ως ένα αλλόχθονο σύμπλεγμα πετρωμάτων του ανώτερου μανδύα και του ωκεάνιου φλοιού που μετατοπίζεται τεκτονικά από την κύρια πυριγενή πηγή σχηματισμού του ως αποτέλεσμα της σύγκλισης των πλακών. Μια τέτοια ακολουθία περιλαμβάνει μια σειρά, από κάτω προς τα πάνω, από περιδοτίτες και υπερβασικά έως βασικά πλουτωνικά και ηφαιστειακά πετρώματα που μπορούν να σχετίζονται γεωχρονολογικά και πετρογενετικά. Μερικές από αυτά τα [πετρώματα μπορεί να λείπουν σε ημιτελείς οφιολίθους (Dilek and Furnes, 2011).

Σύμφωνα με τον Coleman (1977) ο όρος "οφιολιθικό σύμπλεγμα" ή "οφιολιθική σειρά" (cortege orphiolitique) αποδίδεται σε μια ακολουθία πετρωμάτων που από κάτω προς τα πάνω εμφανίζει την εξής στρωματογραφία (Εμμανουηλίδης, 2019):

- Υπερβασικό σύμπλεγμα: Αποτελείται από χαρτσβουργίτη, λερζόλιθο και δουνίτη σε διαφορετικές αναλογίες συνήθως είναι τεκτονισμένοι και μεταμορφωμένοι (μεταμορφικοί τεκτονίτες) και σερπεντινιωμένοι σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό (Εμμανουηλίδης, 2019).
- Γαββρικό σύμπλεγμα: αποτελείται από σωρειτικούς περιδοτίτες, πυροξενίτες και γάββρους συνήθως λιγότερα μεταμορφωμένα από το υπερβασικό σύμπλεγμα (Εμμανουηλίδης, 2019).
- Βασικά συμπλέγματα πολλαπλών φλεβών: συμπαγής διαβάσης (βασάλτης-κερατοφύρης) ή διαβασικές φλέβες είναι τα κύρια στοιχεία αυτού του συμπλέγματος (Εμμανουηλίδης, 2019).
- Βασικό ηφαιστειακό σύμπλεγμα: συχνά διαμορφωμένο σε μαξιλαροειδείς λάβες (Εμμανουηλίδης, 2019).
- Πελαγικές ιζηματογενείς αποθέσεις σε εναλλαγές με ιζήματα συχνά μεταλλοφόρα (Fe,Cu) (Εμμανουηλίδης, 2019).
- Ιζήματα βαθιάς θάλασσας (Εμμανουηλίδης, 2019).

Στο Σχήμα 3 εμφανίζεται και η στρωματογραφική στήλη που περιγράφηκε παραπάνω και διαφαίνεται η διαδοχή των πετρωμάτων.



Σχήμα 3: Στρωματογραφία μιας πλήρους ανεπτυγμένης οφιολιθικής ακολουθίας (Εμμανουηλίδης, 2019).

1.3 Χρωμίτες

Ο χρωμίτης είναι ένα ορυκτό οξείδιο που αποτελείται από χρώμιο, σίδηρο και οξυγόνο (FeCr_2O_4). Είναι σκούρο γκρι έως μαύρο με μεταλλική ημιμεταλλική λάμψη και μεγάλο ειδικό βάρος (www.geology.com). Το σύστημα κρυστάλλωσης του είναι το κυβικό, ενώ η ομάδα συμμετρίας χώρου είναι $Fd3m$ και τα στοιχεία συμμετρίας του $4/m\bar{3}2/m$ ή $m3m$. Παρουσιάζει οκταεδρική κρυσταλλική μορφή αλλά κυρίως σε μεγάλους κρυστάλλους. Εμφανίζει σκληρότητα 5,5 στην κλίμακα Mohs, με πυκνότητα να λαμβάνει τιμή ίση με $5,09 \text{ gr/cm}^3$. Η αναλογία οξειδίων του χρωμίτη είναι 32% FeO και 68% Cr_2O_3 . Το Mg^{+2} σε μικρές ποσότητες μπορεί να αντικαταστήσει τον Fe^{+2} και αντίστοιχα το Al^{+3} και ο τρισθενής Fe^{+3} να αντικαταστήσουν το Cr^{+3} . Συναντάται σαν πρωτογενές ορυκτό στους περιδοτίτες και σε άλλα υπερβασικά πετρώματα (Θεοδωρίκας, 2017).

Ο χρωμίτης είναι σημαντικός γιατί είναι το μόνο οικονομικά εκμεταλλεύσιμο μέταλλευμα χρωμίου, απαραίτητο στοιχείο για μια μεγάλη ποικιλία μεταλλικών, χημικών και βιομηχανικών προϊόντων. Μικρές ποσότητες χρωμίτη βρίσκονται σε πολλά είδη πετρωμάτων

(www.geology.com). Για τον σχηματισμό κοιτασμάτων χρωμίτη, πραγματοποιείται κρυστάλλωση χρωμίτη σε υπερβασικά και βασικά μάγματα και στην συνέχεια λόγω μαγματικού διαχωρισμού το ορυκτό συγκεντρώνεται στην βάση του μαγματικού θαλάμου. Η απόθεση κρυστάλλων χρωμίτη γίνεται σε συγκεκριμένα σημεία μέσα στο μαγματικό θάλαμο λόγω του ότι αλλάζουν οι φυσικοχημικές συνθήκες, κυρίως λόγω μεταβολών στη διαφυγότητα του οξυγόνου. Σήμερα για να θεωρηθεί ένα κοίτασμα εκμεταλλεύσιμο και να εξορυχθεί θα πρέπει ο λόγος Cr/Fe να είναι μεγαλύτερος από 1.5:1, ενώ παλαιότερα λόγω της λιγότερο εξελιγμένης τεχνολογίας ο λόγος έπρεπε να λαμβάνει τιμή 2.8:1 (Κοκκαλιάρη, 2015).

Ωστόσο, τα κοιτάσματα χρωμίτη που είναι αρκετά σημαντικά για εξόρυξη χωρίζονται γενικά σε (www.geology.com):

1) Στρωματόμορφα κοιτάσματα (μεγάλες μάζες πυριγενών πετρωμάτων όπως ο νορίτης ή ο περιδοίτης που κρυσταλλώνονται αργά από το μάγμα του υπεδάφους) (www.geology.com).

2) Κοιτάσματα χρωμίτη αλπικού τύπου (σερπεντινίτες και άλλα μεταμορφωμένα πετρώματα που προέρχονται από την αλλοίωση του νορίτη και του περιδοίτη) (www.geology.com).

Αναλυτικότερα λοιπόν οι δύο τύποι περιγράφονται παρακάτω.

1.3.1 Στρωματόμορφοι

Οι στρωματόμορφοι χρωμίτες προκύπτουν στο κατώτερο τμήμα του φλοιού ενός οφιολίθου, ο οποίος αποτελείται από καλά στρωματωμένα βασικά-υπερβασικά σωρευτικά πετρώματα. Οι συγκεντρώσεις χρωμίτη, σε λεπτά στρώματα και ελάσματα, εναλλάσσονται με στρώσεις σωρευτικού δουνίτη. Η διαδοχή δουνίτη-χρωμίτη μπορεί να φτάσει σε πάχος ακόμα και μερικά χιλιόμετρα. Η παρουσία λεπτής κλίμακας ρυθμικής διαστρωμάτωσης χρωμίτη και σωρευτικού χρωμίτη-ολιβίνη και χαρακτηριστικά που φανερώνουν εναπόθεση από μαγματικά ρεύματα, ξεκάθαρα υποδηλώνουν ότι οι χρωμίτες προέρχονται από μαγματικό διαχωρισμό κατά την ψύξη του μάγματος (Paktunc, 1990). Κατά τη διάρκεια αυτής της αργής ψύξης, ο χρωμίτης και τα σχετικά ορυκτά κρυσταλλώθηκαν νωρίς ενώ το μάγμα ήταν ακόμα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Οι κρύσταλλοι τους στη συνέχεια αποτέθηκαν στον πυθμένα του μαγματικού θαλάμου για να σχηματίσουν ένα στρωματόμορφο κοίτασμα. Ορισμένα από τα στρώματα σε αυτά τα κοιτάσματα μπορεί να περιέχουν 50% ή περισσότερο χρωμίτη ανάλογα το βάρος (www.geology.com). Έγιναν διάσημοι από την εμφάνισή τους σε μεγάλα και παχιά

πυριγενή συμπλέγματα που εισχώρησαν σε ηπειρωτικές περιοχές μέσω συμπαγών μαγματικών γεγονότων στους αρχαίους έως και προτεροζωικούς γεωλογικούς χρόνους (Rospabé et al., 2019). Τα πιο γνωστά στρωματόμορφα κοιτάσματα χρωμίτη εμφανίζονται στην Κρητιδική ζώνη του συμπλέγματος Bushveld στη Νότια Αφρική. Για το λόγο αυτό, έχουν αναφερθεί τα στρωματόμορφα κοιτάσματα χρωμίτη ως κοιτάσματα χρωμίου τύπου Bushveld. Άλλα κοιτάσματα με χαρακτηριστικά παρόμοια με το Bushveld περιλαμβάνουν εκείνες που φιλοξενούνται στο Great Dyke (Ζιμπάμπουε) και διεισδύσεις στο Muskox (Nunavut, Καναδάς) (Schulte et al., 2012). Στο Σχήμα 4 διακρίνεται η χαρακτηριστική μορφή των κοιτασμάτων αυτού του τύπου.



Σχήμα 4: Στρωματόμορφο κοιτάσμα χρωμίτη στο Bushveld, όπου διακρίνεται η στρωμάτωση (www.geology.com).

1.3.2 Αλπικού τύπου

Τα κοιτάσματα αλπικού τύπου εμφανίζονται στο ανώτερο τμήμα του μανδύα ενός οφιολίθου, ο οποίος περιλαμβάνει παραμορφωμένο χαρτσβουργίτη σε ζώνες διείσδυσης, δουνίτη και μικρές ποσότητες λερζόλιθου. Η αξιοσημείωτη ορυκτολογική και χημική ομοιογένεια αυτών των πετρωμάτων, γενικά πιστεύεται ότι οφείλεται στον υπολειμματικό χαρακτήρα τους. Αυτά τα υπολειμματικά πετρώματα διαβαθμίζονται ακανόνιστα προς τα πάνω σε δουνίτες, κοντά στο όριο μανδύα-φλοιού. Αυτή η ζώνη με άφθονο δουνίτη, έχει

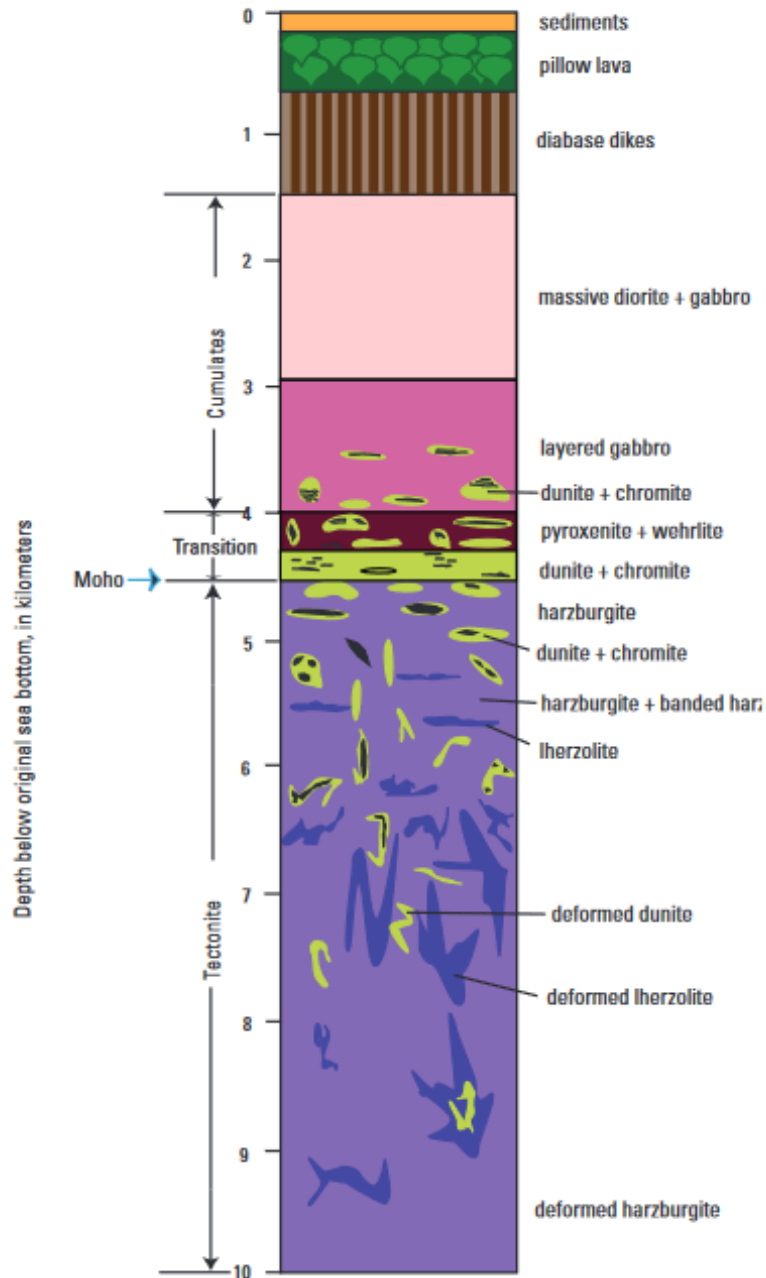
χαρακτηριστεί ως ζώνη μετάβασης. Οι δουνίτες εμφανίζονται με τη μορφή στηλών, αναχωμάτων και φλεβών (Paktunc, 1990).

Τα κοιτάσματα αυτού του τύπου, αποτελούνται από στηλοειδή έως φακοειδή σώματα, και σωληνοειδή έως ακανόνιστα σώματα συμπαγούς έως διάσπαρτου χρωμίτη. Μεμονωμένα σώματα αποδίδουν περίπου 1000 τόνους μεταλλεύματος κατά μέσο όρο. Το μεγαλύτερο κοιτάσμα, στην περιοχή Coto στις Φιλιππίνες, περιέχει περίπου 8 εκατομμύρια τόνους κοιτάσματος (Paktunc, 1990).

Τα περισσότερα κοιτάσματα χρωμίτη αλπικού τύπου είναι προσανατολισμένα με τον μεγάλο άξονά τους παράλληλο προς την φολίδωση του πετρώματος ξενιστή. Είναι ουσιαστικά σύμφωνα με την συμπεριφορά του γύρω πετρώματος. Σύμφωνα με τους Cassard et al. (1981), η σύμφωνη φύση των κοιτασμάτων δείχνει ότι τα σώματα τοποθετήθηκαν νωρίς κατά τη διάρκεια μετάβασης στη στερεή κατάσταση. Η κονδυλώδης υφή, που αποτελείται από πυκνές συμπαγείς ελλειψοειδείς μάζες χρωμιτών σε μια δουνιτική μάζα, είναι χαρακτηριστικό αυτού του είδους κοιτασμάτων (Paktunc, 1990).

Οι χρωμίτες σε αλπικού τύπου κοιτάσματα παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα σύστασης από υψηλή συγκέντρωση Cr έως υψηλή συγκέντρωση Al. Οι ποικιλίες με υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο έχουν λόγο $100 * Cr / (Cr + Al)$ μεγαλύτερο από 60, γνωστό σαν αριθμό χρωμίτη (Cr#), ενώ για τους τύπους υψηλής συγκέντρωσης Al συνήθως ο λόγος παίρνει τιμές μεταξύ 40 και 60. Και οι δύο τύποι είναι κοινοί στους οφιόλιθους, όπου φιλοξενούνται σε χαρτσβουργίτες και δουνίτες του άνω μανδύα. Η αρχική σύσταση του μάγματος φαίνεται να είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που ελέγχει τη σύσταση χρωμίτη αν και μικρές παραλλαγές μπορεί να αντανakλούν διαφορές στη θερμοκρασία, την πίεση και την πτητικότητα του οξυγόνου. Χρωμίτες με υψηλούς Cr# πιστεύεται ότι προέρχονται από την κρυστάλλωση μαγμάτων υψηλής συγκέντρωσης μαγνησίου (μπονιτιτικός τύπος) ενώ αυτοί με μικρότερο αριθμό προέρχονται από θολειϊτικά μάγματα. Η σύσταση του μάγματος σχετίζεται, με τη σειρά της, με το βαθμό μερικής τήξης στον άνω μανδύα. Έτσι, οι πλούσιοι σε Cr χρωμίτες ερμηνεύονται ως τα προϊόντα κρυστάλλωσης μάγματος που σχηματίζονται από μεγάλο βαθμό μερικής τήξης ενώ οι χρωμίτες υψηλής περιεκτικότητας σε Al προέρχονται από μάγματα που έχουν προκύψει από χαμηλότερο βαθμό μερικής τήξης (Zhou et al., 1994).

Παρακάτω στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η στρωματογραφική στήλη αυτών των κοιτασμάτων. Λιθολογικά η ανώτερη σωρευτική ζώνη περιέχει στρώσεις γάββρου, νορίτη, διορίτη, πυροξενίτη, βερλίτη, και δουνίτη. Η ζώνη μετάβασης, ή MoHo, περιέχει κυρίως δουνίτη μαζί με κάποια ανάμειξη των άλλων σωρευτικών και τεκτονισμένων πετρωμάτων και το πάχος της μπορεί να φτάσει έως και 3 χιλιόμετρα.



Σχήμα 5: Λιθοστρωματογραφική στήλη των κοιτασμάτων Αλπικού τύπου (Mosier et al., 2012).

Η ασυνέχεια Moho ορίζεται ως η βάση του σωρευτικού τμήματος και η κορυφή του τεκτονισμένου περιδοτίτη. Η μεταβατική ζώνη περιλαμβάνει το ανώτατο τμήμα του τεκτονίτη, την ασυνέχεια Moho και το σωρευτικό υπερβασικό τμήμα μέχρι τη βάση των γάββρων. Η τεκτονική ζώνη στη βάση αποτελείται κυρίως από χαρτσβουργίτη και δουνίτη, κατά μήκος με λερζόλιθο και πυροξενίτη (Mosier et al., 2012).

Είναι γνωστό ότι η περιεκτικότητα σε Ti των χρωμιτών που είναι πλούσιοι σε Cr είναι μικρότερη από αυτούς υψηλής περιεκτικότητας σε Al. Χρωμίτες από πλούσια σε μαγνήσιο

πετρώματα και ανδεσίτες υψηλής συγκέντρωσης Mg έχουν κάπως χαμηλότερο Ti (υψηλότερο βαθμό μερικής τήξης) από εκείνους που έχουν προέλευση από θολειϊτικά πετρώματα μεσοωκεάνιων ραχών (χαμηλός βαθμός μερικής τήξης) (Zhou et al., 1994).

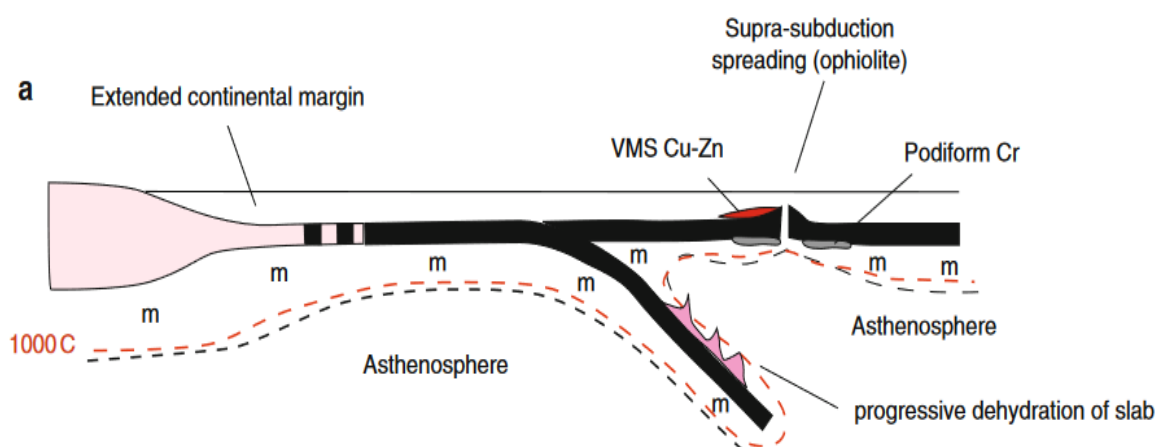
Οι χρωμίτες υψηλής περιεκτικότητας σε Cr έχουν επίσης υψηλότερη περιεκτικότητα σε στοιχεία της ομάδας της πλατίνας (PGE: Platinum Group Element), ειδικά σε Os, Ir και Ru, σε σχέση με χρωμίτες υψηλής συγκέντρωσης Al. Αυτά τα στοιχεία είναι εξαιρετικά συμβατά με τον χρωμίτη κατά τη μερική τήξη μάγματος του ανώτερου μανδύα, και η σχετική αφθονία τους στους χρωμίτες αλπικού τύπου θα πρέπει να αντικατοπτρίζει το βαθμό μερικής τήξης του. Έτσι, οι χρωμίτες υψηλής περιεκτικότητας σε Cr, με σχετικά υψηλά περιεχόμενα PGE, θα πρέπει να συσχετίζονται με μάγματα που σχηματίζονται από υψηλό βαθμό μερικής τήξης (Zhou et al., 1994).

Συνοπτικά, η σύσταση του χρωμίτη, η γεωχημεία ολόκληρου του πετρώματος και ο χαρακτήρας του πετρώματος ξενιστή συνδυαστικά υποδηλώνουν ότι οι χρωμίτες υψηλής περιεκτικότητας σε Cr προέρχονται από μάγματα τα οποία σχηματίζονται από μεγάλο βαθμό μερικής τήξης, ενώ πλούσιοι σε Al χρωμίτες σχετίζονται με μάγματα που σχηματίζονται από μικρότερο βαθμό μερικής τήξης (Zhou et al., 1994).

Κεφάλαιο 2

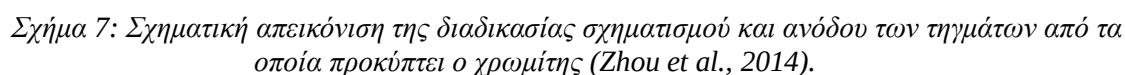
2.1 Γεωτεκτονικό περιβάλλον

Τα ορυκτά κοιτάσματα που χαρακτηρίζουν την πρώιμη φάση σχηματισμού ενός ωκεάνιου τόξου κυριαρχούνται από εκείνα που σχετίζονται αρχικά με βασικούς και υπερβασικούς τύπους μαγματικών πετρωμάτων. Οι περισσότερες εμφανίσεις οφιολίθων φαίνεται να έχουν σχηματιστεί σε τέτοιο περιβάλλον με μάγματα που προέρχονται από την έντονη υποβύθιση του μανδύα, χωρίς ή με ελάχιστη συνεισφορά από τα υλικά της υποβυθιζόμενης πλάκας. Τα ορθομαγματικά κοιτάσματα περιλαμβάνουν οφιολιθικά κοιτάσματα χρωμίτη αλπικού τύπου, ενώ στις ζώνες εφελκυσμού σχηματίζονται μαγματικά-υδροθερμικά ηφαιστειογενή. Το γεωτεκτονικό περιβάλλον που σχετίζεται με τον σχηματισμό των οφιολίθων αλπικού τύπου φαίνεται στο Σχήμα 6 (Brown et al., 2011).

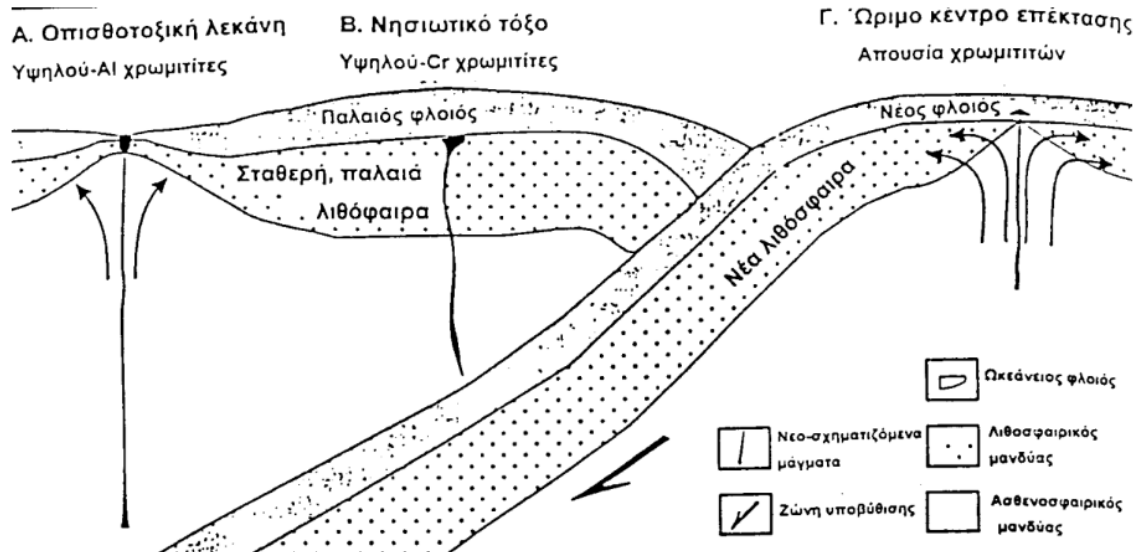


Σχήμα 6: Απλοποιημένη τομή μιας πρώιμης υποβύθισης, που δείχνει σχηματισμό οφιολίθων και των αντίστοιχων μεταλλευμάτων (Brown et al., 2011).

Οι χρωμίτες είναι προϊόντα μάγματος που σχετίζονται με ενδοωκεάνια υποβύθιση λίγο πριν από το κλείσιμο των ωκεάνιων λεκανών. Η αποκοπή και κύλιση της πλάκας προς τα πίσω (Roll back) προκαλούν την έξαρση της ασθενόσφαιρας από κάτω από την ζώνη υποβύθισης που παράγει βασικά μάγματα. Η μόλυνση αυτών των μαγμάτων από την υποβυθιζόμενη πλάκα πυροδοτεί κρυστάλλωση χρωμίτη πριν τα μάγματα αυτά φτάνουν στη θέση εναπόθεσής του. Η άνοδος των μαγμάτων που φέρουν χρωμίτη υφίστανται μια μεταβολή από κατακόρυφη σε υποοριζόντια κίνηση κοντά στην κορυφή της πλατφόρμας του μανδύα, οδηγώντας σε συσσώρευση χρωμίτη και δημιουργία χρωμίτη αλπικού τύπου. Η γρήγορη κρυστάλλωση των



Και στα δύο σχήματα που παρατίθενται παρουσιάζεται ο ίδιος μηχανισμός. Η θέση στην οποία φαίνεται να σχηματίζεται το κοίτασμα παίζει σημαντικό ρόλο στη σύσταση του σχηματιζόμενου χρωμίτη. Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8) σε 2 διαφορετικές θέσεις μπορεί να σχηματιστούν χρωμίτες αλπικού τύπου αλλά σε κάθε περίπτωση αλλάζει η χημική τους σύσταση, καθιστώντας τους χρωμίτες της οπισθοτόξιας λεκάνης ιδιαίτερα πλούσιους σε Al, ενώ τους χρωμίτες του νησιωτικού τόξου πλούσιους σε Cr. Αυτή η διαφοροποίηση σχετίζεται με την αντίδραση των νεοσχηματιζόμενων μαγμάτων με τους ήδη υπάρχοντες μανδουακούς περιδοτίτες (Εμμανουηλίδης, 2019).



Σχήμα 8: Σχέση μεταξύ χημικής σύστασης και γεωτεκτονικού περιβάλλοντος σχηματισμού των κοιτασμάτων (Εμμανουηλίδης, 2019).

Υπάρχουν δύο υποθέσεις που μπορούν να ερμηνεύσουν την παρουσία των υψηλής θερμοκρασίας υπερβασικών και βασικών πετρωμάτων μέσα στα ιζήματα που δεν είναι μεταμορφωμένα. Η πρώτη περιλαμβάνει ότι η θέση των οφιολίθων αλπικού τύπου σήμερα δεν είναι ίδια με εκείνη που είχαν όταν πρώτο σχηματίστηκαν και αυτό τους καθιστά αλλόχθονους. Η δεύτερη υπόθεση η οποία και βρίσκει όλο και περισσότερη αποδοχή τα τελευταία χρόνια είναι ότι η ωκεάνια λιθόσφαιρα όταν εγκλωβίστηκε μέσα στα ιζήματα του ηπειρωτικού περιθωρίου είχε ήδη ψυχθεί (Εμμανουηλίδης, 2019).

Κεφάλαιο 3

3.1 Πετρώματα- ξενιστές- Δομή

Τα κοιτάσματα χρωμίου αυτού του τύπου φιλοξενούνται σε δουνίτη, σερπεντινίτη ή περιδοτίτη. Τα πετρώματα ξενιστές περιδοτίτη περιλαμβάνουν στο τεκτονισμένο τμήμα των οφιολίθων, τον χαρτσβουργίτη και τον λερζόλιθο ενώ στην υπερκείμενη ακολουθία, τον βερλίτη. Κάποιοι χρωμίτες σχηματίζονται σε στρώματα δουνίτη στην τεκτονισμένη επαφή. Εκτός των σωμάτων περιδοτίτη, ο χρωμίτης συνδέεται σχεδόν πάντα με σώματα δουνίτη, τροκτόλιθους και σώματα σερπεντινίτη που βρίσκονται κοντά σε γάββρο ή πυροξενίτη ή σχετίζεται με κανάλια που είναι πλούσια σε χρωμίτη μέσα στα σωρευτικά στρώματα δουνίτη. Αυτό οδήγησε αρκετούς ερευνητές να καταλήξουν ότι τα κοιτάσματα αλπικού τύπου, έχουν την τάση να εμφανίζονται κοντά ή μέσα στην ασυνέχεια Moho, ή αλλιώς στη ζώνη μετάβασης μεταξύ των υπερκείμενων σωρευτικών ακολουθιών και των υποκείμενων τεκτονισμένων οφιολιθικών ακολουθιών.

Τα μεταλλεύματα του χρωμίτη μπορεί να έχουν απότομη ή βαθμιαία μετάβαση με το πέτρωμα ξενιστή. Ορισμένα κοιτάσματα συνοδεύονται και από μια άλω που έχει υποστεί σερπεντινίωση. Τα κοιτάσματα σχετίζονται με ζώνες διάτμησης, που σχηματίζονται μέσα ή γύρω από ήδη υπάρχουσες ζώνες χρωμιτών και μπορεί να μετατοπιστούν έντονα από ρήγματα ή έντονες τεκτονικές διεργασίες. Ορισμένα κοιτάσματα έχουν διαταραχθεί εμφανώς από ρήγματα ή βρίσκονται μέσα σε ζώνες melange, τόσο που το μέγεθος τους έχει μειωθεί πολύ. Σε κάποια κοιτάσματα φαίνεται η δομή τους να ελέγχεται από πλαστικές αναδιπλώσεις στρωμάτων χρωμίτη σε υψηλής θερμοκρασίας ορυκτά (Mosier et al., 2012).

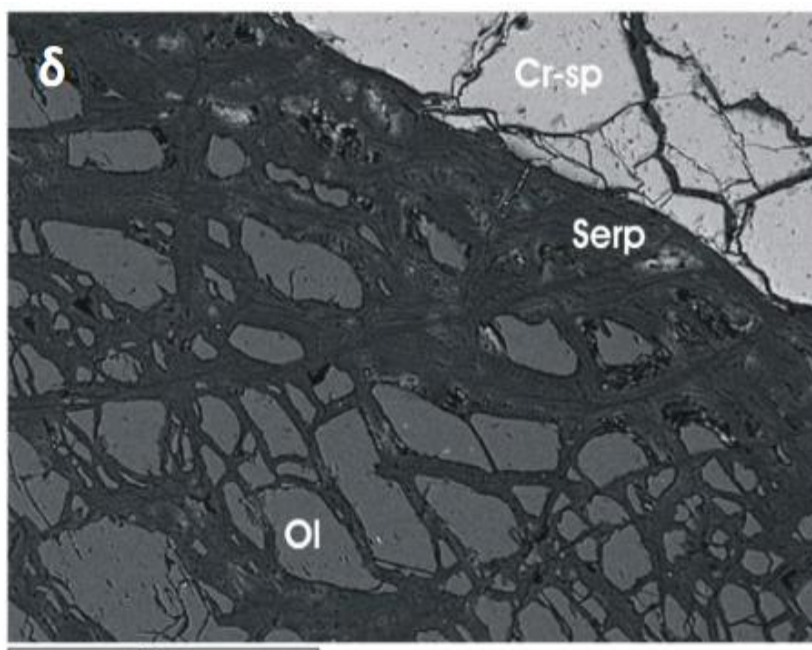
3.2 Εξαλλοίωση

Όπως σημειώθηκε σε προηγούμενη ενότητα ο χρωμίτης είναι ένα ιδιαίτερα σταθερό ορυκτό. Παρόλα αυτά όταν οι συνθήκες αποκλίνουν αρκετά από τις συνθήκες που επικρατούσαν όταν σχηματίστηκε το ορυκτό, η σύσταση μπορεί να μεταβληθεί. Οι διεργασίες δράσης των υδροθερμικών διαλυμάτων και τα διάφορα μεταμορφικά φαινόμενα τροποποιούν αρκετά την αρχική σύσταση των χρωμιούχων σπινελίων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικότερες εξαλλοιώσεις που συναντώνται στα κοιτάσματα μελέτης (Εμμανουηλίδης, 2019).

3.2.1 Σερπεντινίωση

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά ότι σε ορισμένες περιπτώσεις σχηματίζεται μια ζώνη εξαλλοίωσης που έχει υποστεί σερπεντινίωση. Ο όρος λοιπόν αυτός χρησιμοποιείται για να δηλώσει την υδροθερμική εξαλλοίωση που μετατρέπει ορυκτά σιδήρου, μαγνησίου και πυριτίου, που περιέχονται σε υπερβασικά πετρώματα στο ορυκτό του σερπεντίνης. Ο σερπεντίνης είναι ένα μαλακό όλκιμο ορυκτό και η παρουσία του στον υποβυθιζόμενο μανδύα, υποβοηθά την υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας λόγω της ολισθηρότητας που προκαλεί. Η παραγωγή του στον ωκεάνιο φλοιό οδηγεί στο σχηματισμό υδροθερμικών ρευστών και απελευθερώνει μεθάνιο και υδρογόνο σε αέρια μορφή, όπως παρατηρείται κατά μήκος των μεσοωκεάνιων ραχών (Pinti D.L, 2011).

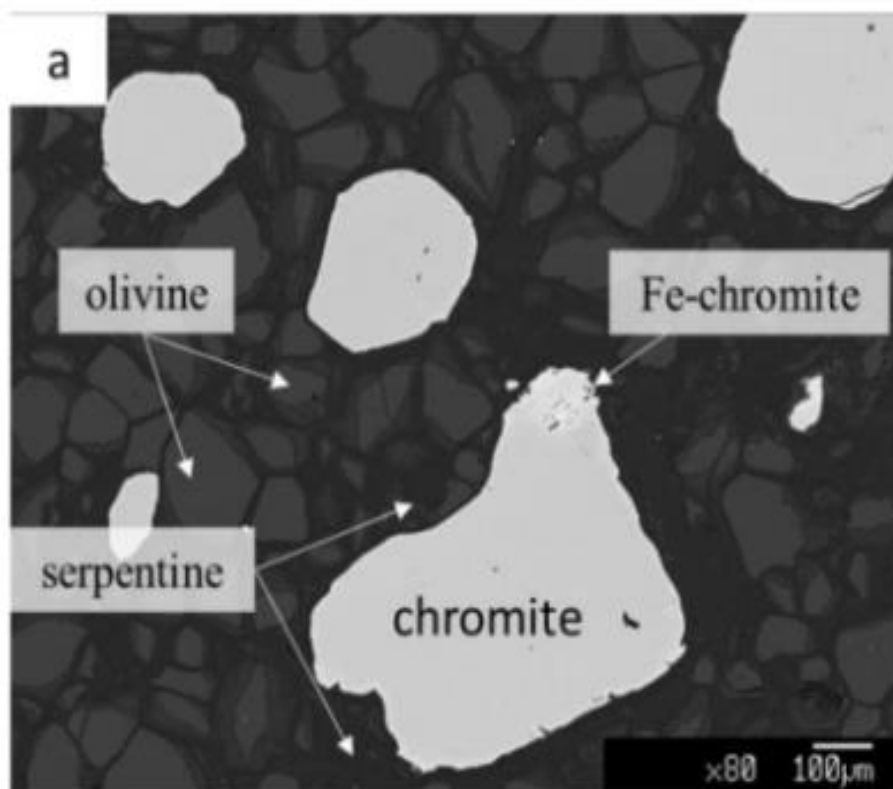
Διεξοδική μελέτη του σερπεντίνης στο μικροσκόπιο φανερώνει ότι η εξαλλοίωση αρχίζει από διακλάσεις και στη συνέχεια επεκτείνεται στα δίκτυα δευτερογενών ρηγμάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στα μετέπειτα στάδια ο ιστός να μετατραπεί σε κυψελοειδή. Παράγοντες σαν την σύσταση του νερού, τη τεκτονική δραστηριότητα του πετρώματος, και το είδος του γεωτεκτονικού περιβάλλοντος παίζουν καταλυτικό ρόλο στη διαδικασία σερπεντινίωσης. Υδροθερμικά ρευστά βρίσκουν δίοδο μέσω των ρηγμάτων αντιδρώντας με τον περιδοτίτη και σχηματίζοντας σερπεντίνη (Γιαννακοπούλου, 2019). Στο Σχήμα 9 φαίνεται η κυψελοειδής μορφή του σερπεντίνης στο μικροσκόπιο.



Σχήμα 9: Ανάπτυξη σερπεντίνης στις μικροδιακλάσεις του ολιβίνης (Ol) και χρωμιούχου σπινελίου (Cr-sp) (Γιαννακοπούλου, 2019).

3.2.2 Εξαλλοίωση σε σιδηροχρωμίτη

Πέρα από την σερπεντινίωση μεταμαγματική αλλοίωση του χρωμίτη μπορεί να παράγει σιδηροχρωμίτη. Οι αλλοιωμένοι κόκκοι έχουν σημαντικά υψηλότερο Cr_2O_3 (36,7-44,0 wt.%) και FeO (33,2-39,6 wt.%) και χαμηλότερο Al_2O_3 (1,3-3,4 wt.%) και MgO (9,8-16,0 wt.%) από αυτούς που δεν έχουν υποστεί αλλοίωση (Zhou et al., 2014). Ο χρωμίτης αντικαθίσταται από σιδηροχρωμίτη από τα όρια των κόκκων ή τις μικροδιακλάσεις προς τα μέσα αυξάνοντας τη ζωνώδη μορφή που αποτελείται κυρίως από αναλλοίωτους πυρήνες χρωμίτη οι οποίοι περιβάλλονται από ζώνες σιδηροχρωμίτη ποικίλου πάχους. Αυτά τα μοτίβα ζωνών είναι καλύτερα διατηρημένα σε κόκκους χρωμίτη, χρωμιτικών σωμάτων παρά στον επουσιώδη χρωμίτη του περιδοτίτη με δεδομένο βαθμό αλλοίωσης (Gervilla et al., 2011). Ακόμα και στην ίδια θέση εξαλλοίωσης η ορυκτοχημεία του σιδηροχρωμίτη δεν είναι ίδια και αυτό είναι αποτέλεσμα της αρχικής χημικής σύστασης του χρωμίτη και ευκολίας ή δυσκολίας κίνησης των στοιχείων (Εμμανουηλίδης, 2019). Στο Σχήμα 10 διακρίνεται σιδηροχρωμίτης περιφερειακά του χρωμίτη, ελαφρώς πιο λευκός και όπως ήδη αναφέρθηκε στα όρια των κόκκων.



Σχήμα 10: Μικροσκοπική εμφάνιση του σιδηροχρωμίτη στην περιφέρεια του χρωμίτη. Διακρίνονται επιπλέον ολιβίνης και σερπεντίνης (Bussolesi et al., 2022).

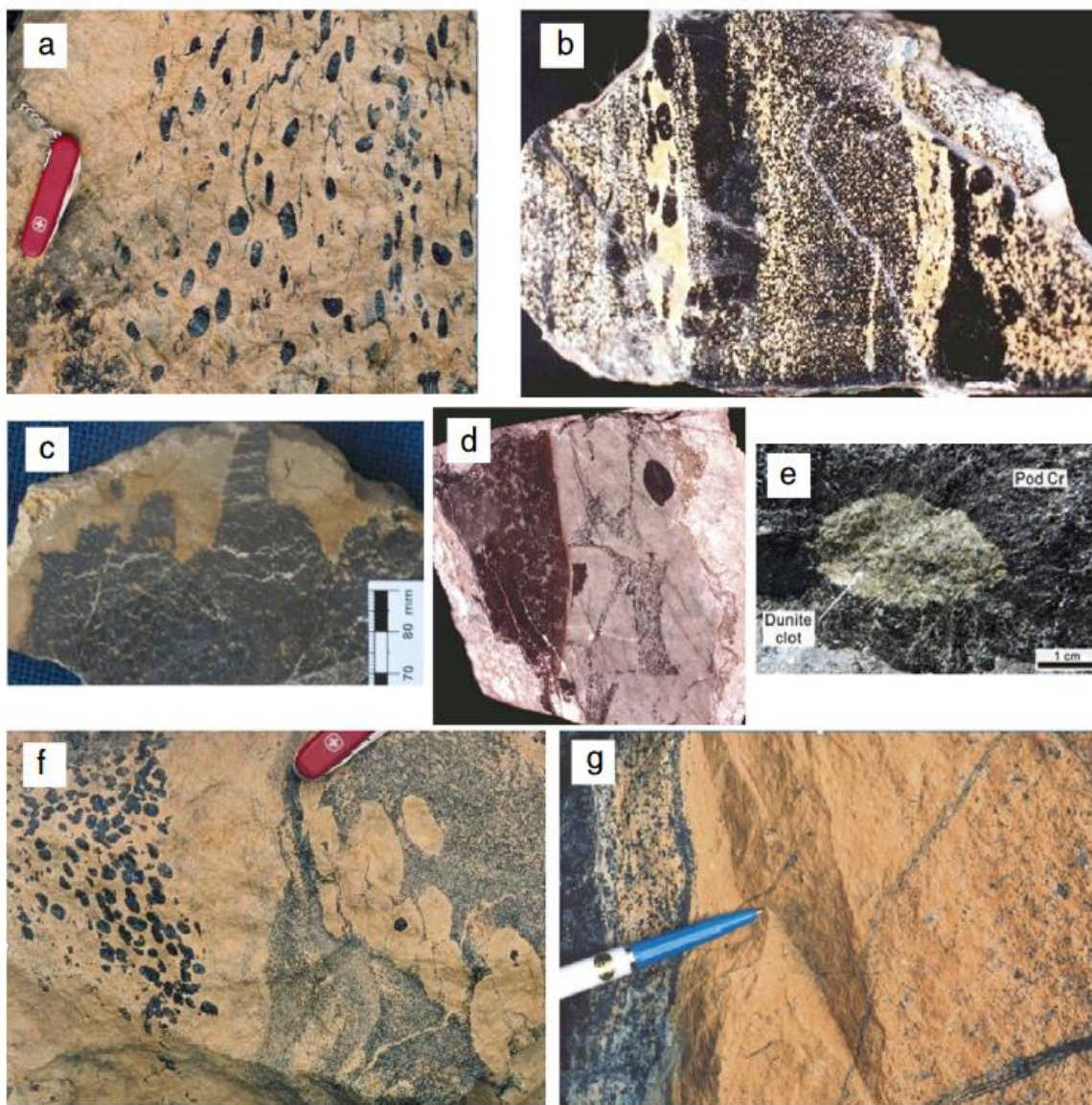
Κεφάλαιο 4

4.1 Μορφή

Τα μεταλλεύματα χρωμίτη εμφανίζονται ως συμπαγή, διάσπαρτα, κονδυλώδη (μορφή λεοπαρδάλεως) και λατυποπαγή (Zhou et al., 2014). Παρακάτω διακρίνονται τα πιο βασικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας:

- Ο ασθενώς διάσπαρτος χρωμίτης αποτελείται από λιγότερο από 5% αναλογία χρωμίτη. Οι κόκκοι έχουν τυπικό μέγεθος από 0,1-2 mm και έχουν ιδιόμορφο, υπιδιόμορφο ή ακανόνιστο σχήμα (Johnson, 2012).
- Τα συμπαγή κοιτάσματα χρωμίτη μπορεί να είναι συνεχή για δεκάδες μέτρα (Mosier et al., 2012). Οι κόκκοι είναι αδροί (έως 10 mm), ιδιόμορφοι σε υπιδιόμορφοι και συνενώνονται για να σχηματίσουν κοκκώδη συσσωματώματα. Μια μικρή αναλογία (<10%) σερπεντινοποιημένου ολιβίνη είναι εμφανής ανάμεσα στους κόκκους. Διακύμανση στην αναλογία του σερπεντίνης έχει ως αποτέλεσμα μια ταινιωτή υφή. Όταν η αναλογία του σερπεντίνης υπερβαίνει το 10% το πέτρωμα ονομάζεται ολιβινιούχος-χρωμίτης (Johnson, 2012).
- Οι ταινιωτές ζώνες διαφέρουν από τα μεγαλύτερης έκτασης στρωματόμορφα κοιτάσματα, λόγω της περιορισμένης έκτασης τους που είναι συνήθως μικρότερη από 800 m. Αυτά τα στρώματα ή ζώνες χρωμίτη περιέχουν από 10 έως 30 % οξείδιο του χρωμίου (Cr_2O_3), ενώ το συμπαγές μετάλλευμα χρωμίτη περιέχει συνήθως 40 έως 60 % οξείδιο του χρωμίου (Mosier et al., 2012).
- Οι κόνδυλοι χρωμίτη κυμαίνονται από 2 έως 30 mm σε μέγεθος και έχουν περίπου σχεδόν σφαιρικό ή ωοειδές σχήμα. Μπορούν ωστόσο να έχουν επίπεδες επιφάνειες δίνοντας διακριτικά κυβικά σχήματα με στρογγυλεμένες γωνίες (Prichard et al., 2015). Μέσα σε ένα κοίτασμα αλπικού τύπου οι κόνδυλοι μπορεί να διαφέρουν σε μέγεθος κατά μήκος αλλά και με το βάθος σε όλο το κοίτασμα (Johnson, 2012).

Παρακάτω (Σχήμα 11) παρατίθενται κάποια μακροσκοπικά δείγματα, χαρακτηριστικά για κάθε μια μορφή που αναφέρθηκε.



Σχήμα 11: Οι διάφορες μορφές εμφάνισης του χρωμίτη. (α) μορφή λεοπαρδάλεως, (β) ταινιωτός, (c) συμπαγής χρωμίτης σε δουνίτη, (d) λατυποπαγής, (e),(f) συμπαγής χρωμίτης με έγκλεισμα δουνίτη, (g) διάσπαρτος χρωμίτης (Zhou et al., 2014).

4.2 Ορυκτολογική σύσταση

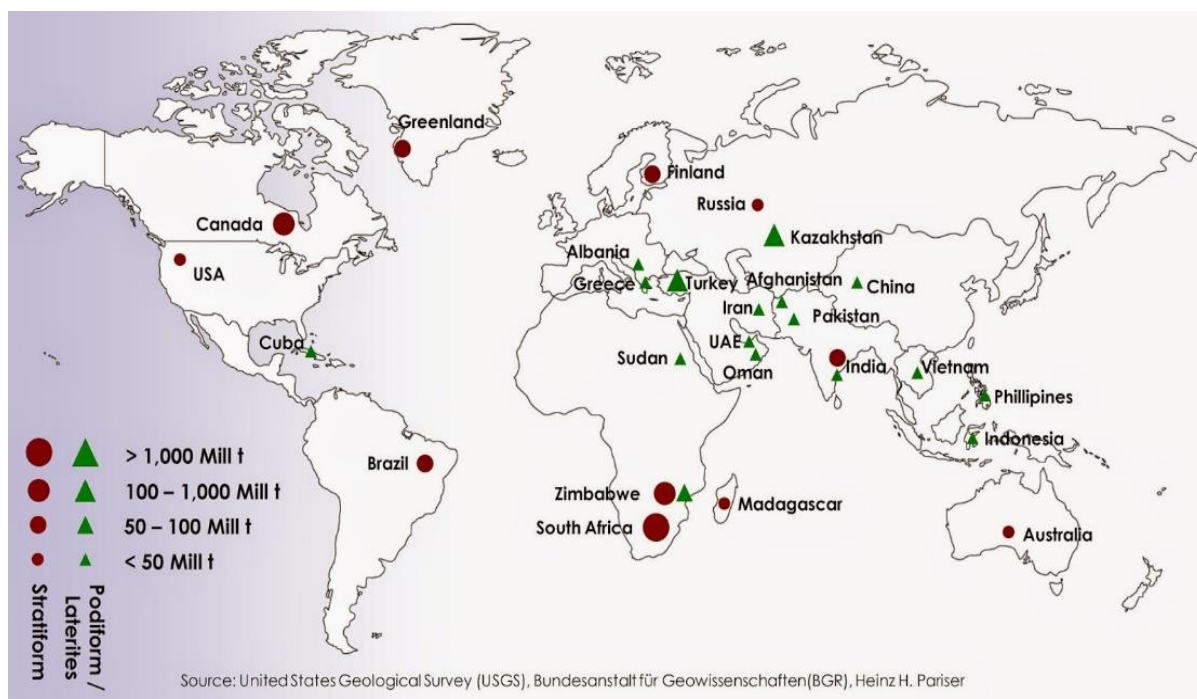
Στα κοιτάσματα αλπικού τύπου οι κρύσταλλοι χρωμίτη ποικίλλουν από ακανόνιστοι (ανομοιόμορφοι) σε ιδιόμορφοι (καλοσχηματισμένοι), με τον πρώτο τύπο να κυριαρχεί και κυμαίνονται σε μέγεθος από λιγότερο από 1 mm έως και 10 mm σε διάμετρο. Τα ορυκτά που σχετίζονται με τον χρωμίτη είναι ο ολιβίνης, ο πυρόξενος, ο σερπεντίνης, ο μαγνητίτης, ο σιδηροχρωμίτης, ο χλωρίτης, ο τάλκης, ο μαγνησίτης, ο ουβαροβίτης, ο καιμερερίτης, και άλλα.

Ενδιάμεσα μεταλλικά σουλφίδια νικελίου και χαλκού και κράματα μπορεί επίσης να υπάρχουν. Ο χρωμιούχος ολιβίνης είναι συνήθως εμπλουτισμένος σε όσμιο (Os), ιρίδιο (Ir) και ρουθίνιο (Ru), αλλά μπορεί επίσης να εμπλουτιστεί σε πλατίνα (Pt), παλλάδιο (Pd) και ρόδιο (Rh), όπως αναφέρθηκε στο Al 'Ays στη Σαουδική Αραβία. Οι μέγιστες ποσότητες που μπορεί να συναντηθούν στα πετρώματα είναι 2.570 ppb για το Pt, 6.870 ppb για το Pd, 840 ppb για το Rh, 5.800 ppb για το Ru, 6.200 ppb για το Ir και τέλος 3.300 ppb για το Os (Mosier et al., 2012). Αυτού του είδους ο χρωμίτης τυπικά περιέχει μια ποικιλία από ορυκτά εγκλείσματα. Σε ένα έγκλεισμα μπορεί να υπάρχει μια σειρά ορυκτών που βρίσκονται σε διαφορετική φάση. Θειούχα και ορυκτά οξειδίων μπορεί επίσης να υπάρχουν ως μικροσκοπικοί κρύσταλλοι σε τέτοια εγκλείσματα. Η σειρά ορυκτών και οι υφές δείχνουν ξεκάθαρα ότι τα εγκλείσματα αντιπροσωπεύουν προϊόντα κρυστάλλωσης παγιδευμένων υγρών κατά την κρυστάλλωση του χρωμίτη (Zhou et al., 2014).

Κεφάλαιο 5

5.1 Κυριότερα Κοιτάσματα Παγκοσμίως

Τόσο τα κοιτάσματα ολιβίνη όσο και χρωμίτη συνδέονται στενά με υπερβασικά πλουτωνικά πετρώματα όπως έχει ήδη αναφερθεί. Τα κοιτάσματα αλπικού τύπου εμφανίζονται σε ζώνες «στο τμήμα του μανδύα των οφιολίθων» όπως τα Ουράλια, κατά μήκος της συρραφής του ωκεανού της Τηθύος των Βαλκανίων, της Τουρκίας και του Ιράν, καθώς και στο Δακτύλιο της Φωτιάς στον Ειρηνικό (www.mininggeology.blogspot.com). Πιο συγκεκριμένα, τα πιο σημαντικά κοιτάσματα αλπικού τύπου παγκοσμίως συναντώνται στο Καζακστάν, στη Ρωσία, στις Φιλιππίνες, στη Ζιμπάμπουε, και στην Κύπρο (www.geology.com). Όλα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 12 που πέρα από τη χωρική κατανομή των κοιτασμάτων χρωμίτη διακρίνεται και ο τύπος κοιτάσματος χρωμίτη.



Σχήμα 12 : Χωρική κατανομή των 2 τύπων κοιτασμάτων χρωμίτη σε παγκόσμια κλίμακα. Με κόκκινο σημειώνονται τα στρωματομόρφα κοιτάσματα και με πράσινο τα κοιτάσματα αλπικού τύπου (www.mininggeology.blogspot.com).

Παρακάτω πραγματοποιείται εκτενέστερη ανάλυση ορισμένων εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων οικονομικής σημασίας παγκοσμίως.

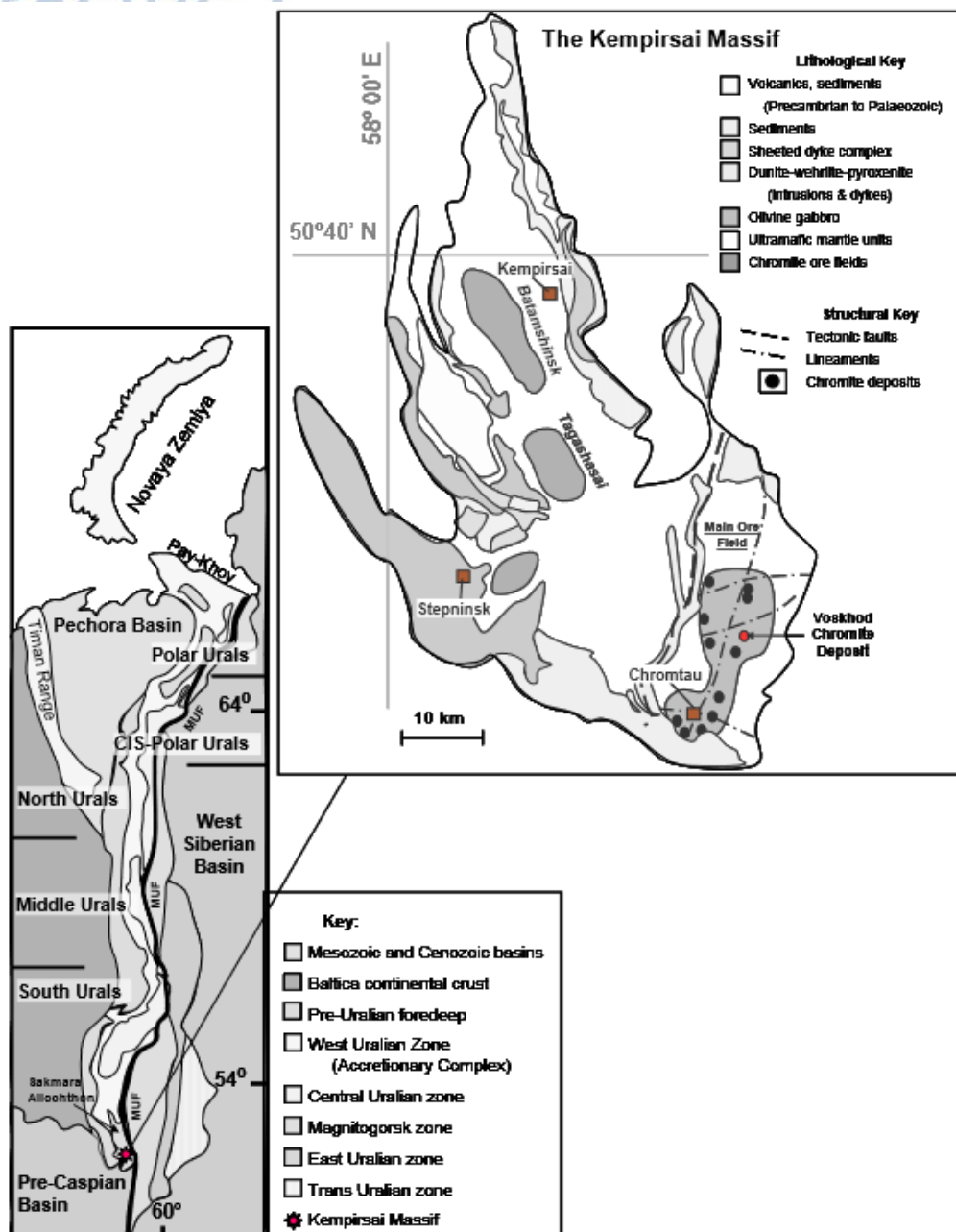
5.1.1 Κοίτασμα Voskhod, Καζακστάν

Το κοίτασμα αλπικού τύπου Voskhod είναι ένα από τα 30 (και περισσότερα) κοιτάσματα χρωμίτη που συλλογικά αποτελούν το Κύριο Πεδίο Μεταλλεύματος (Main Ore Field: MOF) στην οροσειρά Kempirsai, στο Καζακστάν. Το MOF είναι το μεγαλύτερο πεδίο μεταλλεύματος χρωμίτη αλπικού τύπου στον κόσμο. Το σώμα μεταλλεύματος 18 εκατομμυρίων τόνων έχει εκτόπισμα 600 m, έχει πλάτος από 170 m έως 360 m και μέσο πάχος 39 m. Φέρει άλω δουνίτη πάχους μεταξύ 1 m και 5 m (Johnson, 2012).

Το κοίτασμα αποτελείται από πολλαπλά στρώματα στοιβαγμένων φακών χρωμίτη προσανατολισμένων παράλληλα με τη βύθιση του στρώματος μεταλλοφορίας. Το πάχος αυτών των στρωμάτων ποικίλει, από μερικά εκατοστά έως πολλά μέτρα. Το παχύτερο στρώμα συνεχούς μεταλλοφορίας έχει πάχος 123 m (αποτελείται από συμπαγείς και διάσπαρτους τύπους μεταλλεύματος χρωμίτη). Το στυλ της μεταλλοφορίας ποικίλλει από ογκώδη χρωμίτη (>80% χρωμίτης) έως διάσπαρτο χρωμίτη (~10% χρωμίτης). Το ανώτερο τμήμα εδαφικής σύστασης αποτελείται από υπερκείμενες παλαιογενείς-τεταρτογενείς αργίλους, αμμώδεις αργίλους και μπάζα πάχους 0,5-0,7 μ. Παρακάτω στο Σχήμα 13 φαίνεται η γεωλογία της περιοχής μελέτης συνδυαστικά με την μεταλλοφορία (Johnson, 2012).

Η ορυκτολογική σύσταση του συγκεκριμένου κοιτάσματος φαίνεται παρακάτω, όπου παρατίθενται τα στρώματα από την κορυφή προς την βάση (Johnson, 2012)

- 1) Αποθέσεις: περιλαμβάνουν εδαφικές αποθέσεις, πηλούς, καφέ λάσπη έως άμμο και άργιλο, μπάζα, πορώδη θραύσματα πετρωμάτων, χαλαρή άμμο, χαλίκια (Johnson, 2012).
- 2) Αδιατάρακτος δουνίτης: λεπτόκοκκος, σκούρος γκρι ή μαύρος, με κοκκώδη υφή χωρίς εσωτερική δομή (Johnson, 2012).
- 3) Αλλοιωμένος δουνίτης: Η έκταση της αλλοίωσης του δουνίτη ποικίλλει σε όλο το σώμα του μεταλλεύματος (Johnson, 2012).
- 4) Χαρτσβουργίτης: Αποτελείται από ολιβίνη σε ποσοστό 85%, είναι γκρι με κοκκώδη υφή, μεσαίου μεγέθους (Johnson, 2012).
- 5) Αλλοιωμένος Χαρτσβουργίτης: Ο αλλοιωμένος χαρτσβουργίτης υπάρχει στα ανώτερα 65 m έως 100 m, είναι ένα πέτρωμα με ροζ και μαύρες κηλίδες κλίμακας εκατοστών δίνοντας στο πέτρωμα μια διάστικτη εμφάνιση (Johnson, 2012).



Σχήμα 13: Γεωλογία της οροσειράς Kempirsai στο Καζακστάν (Johnson, 2012).

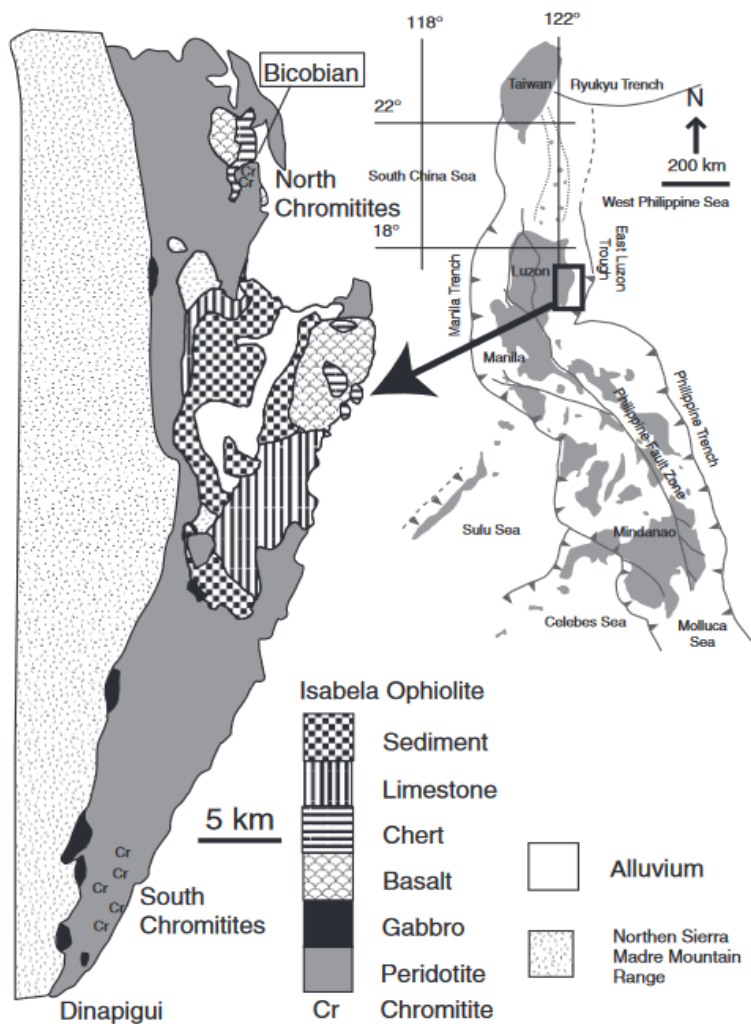
5.1.2 Κοίτασμα στις Φιλιππίνες

Καθώς τα νησιά των Φιλιππίνων περιβάλλονται από πολύπλοκα όρια πλακών, αναδύονται πολυάριθμοι οφιόλιθοι και πετρώματα. Στο Σχήμα 14 είναι πρόδηλη η γεωτεκτονική θέση της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Ο οφιόλιθος της περιοχής είναι ένας οφιόλιθος με κυρίαρχο λερζόλιθο, με πολλά ορυχεία χρωμίτη να έχουν λειτουργήσει στο παρελθόν. Ο οφιόλιθος στην περιοχή Isabela αναπτύσσεται κατά μήκος της ανατολικής ακτής

της βόρειας Luzon εκτείνεται για 90 km και βρίσκεται κατά μήκος του ανατολικού περιθωρίου της κινητής ζώνης των Φιλιππίνων. Φανερώνει μια πλήρη οφιολιθική αλληλουχία που αποτελείται από μανδουακούς περιδοτίτες, γάββρους, βασάλτες και πυριτόλιθους. Αυτά τα πετρώματα δεν είναι διαδοχικά κατανεμημένα στην περιοχή. Οι περιδοτίτες είναι κυρίως λερζόλιθοι μέχρι και χαρτσβουργίτες πλούσιοι σε κλινοπυρόξενους, με κοκκώδη έως πορφυροκλαστική υφή και μικρές ποσότητες χαρτσβουργίτη, δουνίτη και πυροξενίτη (Morishita et al., 2006).

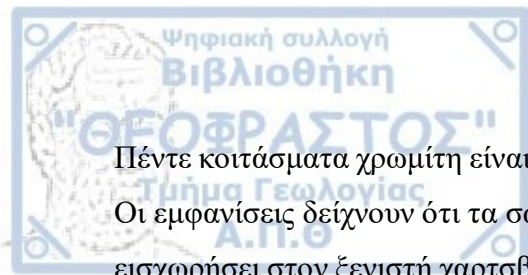
Ο δουνίτης εμφανίζεται ως λεπτά στρώματα ή φακοί με πάχος από μερικά εκατοστά έως λίγα μέτρα, πέρα από την άλω που σχηματίζει γύρω από τους χρωμίτες. Συνήθως κόβει εμφανώς την φολίδωση των πετρωμάτων ξενιστών που ορίζονται από στρώματα πλούσια και φτωχά σε πυρόξενο. Όλοι οι περιδοτίτες κόβονται από γαββρικές ή/και κλινοπυροξενικές φλέβες. Αρκετά ορυχεία χρωμίτη έχουν λειτουργήσει τόσο στο βόρειο (δύο ορυχεία) όσο και στο νότιο τμήμα (πέντε ορυχεία) της υπό μελέτη περιοχής και έχουν εγκαταλειφθεί. Αυτό είναι φανερό στο Σχήμα 14 όπου διακρίνεται επιπλέον η τοποθεσία των κοιτασμάτων χρωμίτη (Morishita et al., 2006).

Από μελέτες κυρίως στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης βρέθηκε ότι τα κοιτάσματα περιέχουν χρωμίτες με πολύ χαμηλή αναλογία ατόμων ($Cr/(Cr + Al)$) (0,08-0,16), η πλειονότητα των δειγμάτων έχει χρωμίτη με αναλογία 0,17-0,43, συσχετιζόμενη αρνητικά με αναλογία ατόμων ($Mg/(Mg + Fe^{2+})$). Επίσης ο βαθμός σερπεντινίωσης είναι σχετικά υψηλός στους περιδοτίτες γύρω από τους χρωμίτες. Όλοι οι χρωμίτες φαίνεται να περιβάλλονται από δουνίτη με λοβοειδές σχήμα χωρίς να ξεπερνούν τα 300 μέτρα πλάτος. Τόσο στους βόρειους όσο και στους νότιους χρωμίτες απαντώνται συμπαγείς, διάσπαρτοι, κονδυλώδεις και στρωματώμορφοι χρωμίτες (Morishita et al., 2006).



Σχήμα 14: Γεωλογία της περιοχής Ισαμπέλα στις Φιλιππίνες (Morishita et al., 2006).

Το ενδιάμεσο πυριτικό υλικό των χρωμιτών είναι ολιβίνης, πλέον πλήρως σερπεντινοποιημένος. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι χαρτσβουργίτες συσχετίζονται πάντα με το περίβλημα δουνίτη των χρωμιτών, αν και ο λερζόλιθος βρίσκεται επίσης προς τα έξω. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι στους χρωμίτες αλπικού τύπου υπάρχουν περιβλήματα δουνίτη που διαβαθμίζονται προς τα έξω σε χαρτσβουργίτη και λερζόλιθο. Αμφιβολίτες και ορθοπυρόξενοι είναι σπάνιοι. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο κλινοπυρόξενος, ο ορθοπυρόξενος και η αμφίβολος δεν βρίσκονται ως ενδιάμεσα πυριτικά ορυκτά των χρωμιτών, αν και το περίβλημα δουνίτη των χρωμιτών περιέχει μερικές φορές λίγο κλινοπυρόξено ως ακανόνιστους κόκκους μεταξύ των κόκκων ολιβίνη (Morishita et al., 2006). Αναφορά έγινε στα ορυχεία που λειτουργούσαν στο παρελθόν στη περιοχή.



Πέντε κοιτάσματα χρωμίτη είναι γνωστό ότι υπάρχουν στο νότιο τμήμα του οφιόλιθου Isabela. Οι εμφανίσεις δείχνουν ότι τα σώματα δουνίτη που φιλοξενούν τα κοιτάσματα χρωμίτη έχουν εισχωρήσει στον ξενιστή χαρτσβουργίτη ασύμφωνα. Δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί το μέγεθος των εμφανίσεων χρωμίτη καθώς έχουν ήδη εξορυχθεί. Ωστόσο, το μεγαλύτερο ορυχείο στα πλαίσια ερευνών δεν φαίνεται να εκτείνεται περισσότερο από 300 m. Γεωλογικά στοιχεία για τον οφιόλιθο της Isabela υποδηλώνουν την πιθανότητα αργής ανάπτυξης ράχης. Η κυριαρχία των λερζόλιθων και των πλούσιων σε κλινοπυρόξενο χαρτσβουργιτών έρχεται σε συμφωνία με αυτήν την ιδέα. Οι οφιόλιθοι αργής ανάπτυξης της μεσοωκεάνιας ράχης συνήθως κυριαρχούνται από λερζόλιθο σε αντίθεση με τους οφιολίθους που προέρχονται από τη ράχη ταχείας εξάπλωσης, οι οποίοι συνήθως κυριαρχούνται από τον χαρτσβουργίτη (Andal et al., 2005).

Κεφάλαιο 6

6.1 Κυριότερα Κοιτάσματα στην Ελλάδα

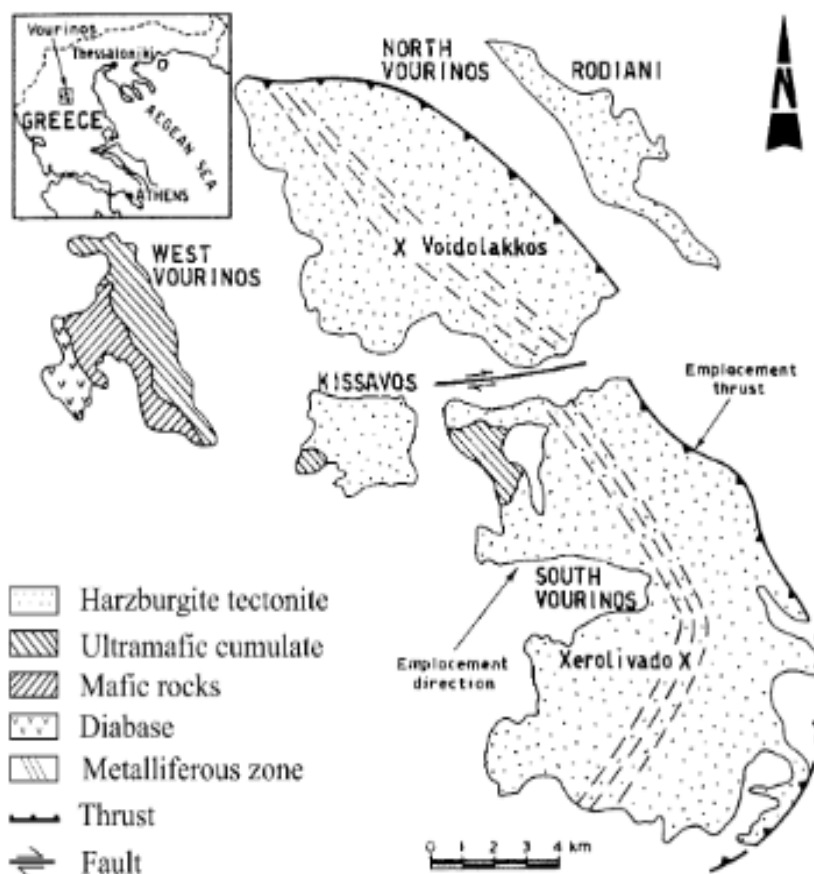
Μεταλλεύματα χρωμίου έχουν βρεθεί σε πολλά οφιολιθικά συμπλέγματα κατά μήκος όλης της Ελλάδας, παρόλα αυτά λίγα είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα και αποφέρουν σημαντικές ποσότητες χρωμίτη. Στο παρελθόν υπήρξε στοιχειώδης εκμετάλλευση ελληνικών κοιτασμάτων, όπως στο Βούρινο και στην Όθρυ. Η περιοχή του Ξερολίβαδου στο Βούρινο, ο Δομοκός της Φθιώτιδας και η Ερέτρια (Τσαγκλί) Φαρσάλων, στην ευρύτερη περιοχή του Όθρυ αποτελούν τα σημαντικότερα κοιτάσματα της Ελλάδας. Κατά μήκος Ελλάδας υπάρχουν διάσπαρτα και άλλα κοιτάσματα μικρότερων διαστάσεων που δεν έχουν μελετηθεί ακόμα για το αν είναι ικανά να επιφέρουν οικονομικές απολαβές. Το μεγαλύτερο ποσοστό των χρωμιτών της περιοχής βρίσκονται μέσα στο τεκτονισμένο κομμάτι που αποτελείται από δουνίτες, ενώ εμφανίζονται σπάνια σε δουνίτες της σωρευτικής σειράς (Κοκκαλιάρη, 2015).

6.1.1 Κοιτάσματα Χρωμίου στη περιοχή του Βούρινου

Η πλειονότητα των οφιολιθικών συμπλεγμάτων στην Ελλάδα ξεπροβάλλει σε ασυνεχείς στενές ζώνες στα δυτικά του ορεινού όγκου της Πελαγονικής (Πίνδος και Όθρυς), στην ίδια την Πελαγονική οροσειρά (Σύμπλοκο Βουρίνου), και ανατολικά της Πελαγονικής Οροσειράς (Έδεσσα, Βέρμιο, Βέροια). Σήμερα οι δραστηριότητες εξαγωγής κοιτασμάτων συνεχίζονται μόνο στη περιοχή ανατολικά του Ξερολίβαδου αλλά και πάλι μόνο για την εξαγωγή ολιβίνη (Καπιώτης, 2008).

Κοιτάσματα χρωμίτη έχουν βρεθεί στους οφιολίθους της Πίνδου και του Βούρινου αλλά ήταν πολύ σημαντικότερα και εξορύχθηκαν από το Βούρινο. Παρά το γεγονός ότι μικρά στρώματα χρωμίτη φιλοξενούνται στην σωρευτική σειρά, όλα τα κύρια χρωμιτικά σώματα συναντώνται σε σώματα δουνίτη μέσα στο χαρτσβουργίτη. Το σύμπλεγμα στο Βούρινο καλύπτει 400 τετραγωνικά χιλιόμετρα αποτελούμενο από μανδυακά πετρώματα, αλλά και από μια πλήρη οφιολιθική ακολουθία με καλά εκτεθειμένη ασυνέχεια MoHo. Η ακολουθία περιλαμβάνει βασικές υπερβασικές εμφανίσεις, γάββρο, φλέβες και μερικές μαξιλαροειδείς

λάβες και ανθρακικό ιζηματογενές κάλυμμα. Η Ιουρασική ηλικία της ωκεάνιας ακολουθίας έχει αποδειχτεί ότι ανέρχεται στα $168,5 \pm 2,4$ εκατομμύρια χρόνια και $172,9 \pm 3,9$ εκατομμύρια χρόνια, ηλικίες που υπολογίστηκαν από χρονολόγηση ζirkονίων με μέθοδο χρονολόγησης U/Pb σε πλαγιογρανίτες (Grieco and Merlini, 2012).



Σχήμα 15: Γεωλογία της περιοχής Βούρινου (Grieco and Merlini, 2012).

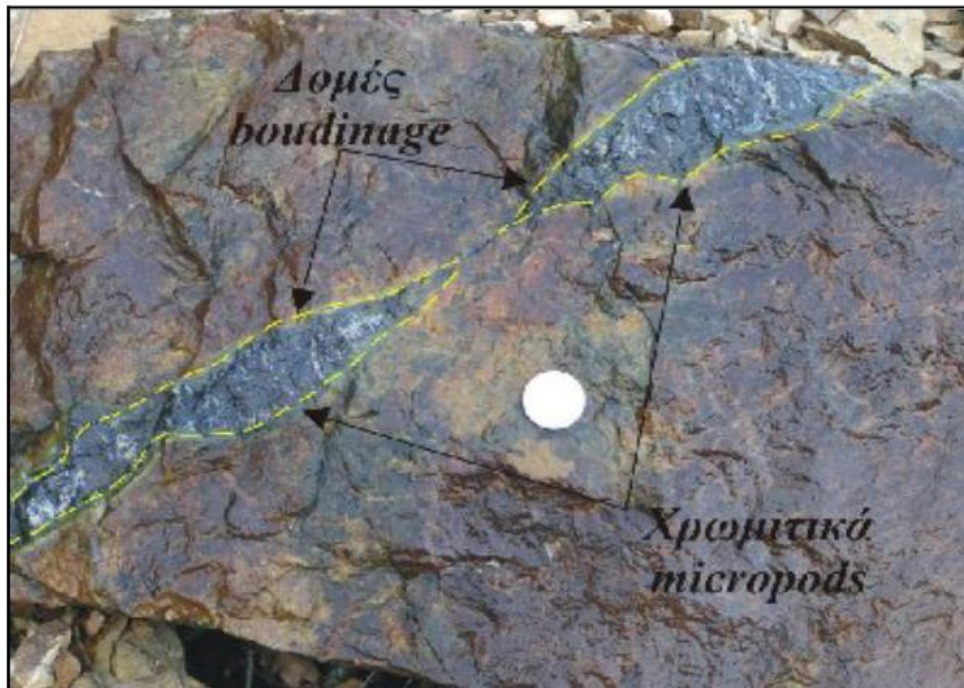
Στην περιοχή του Ξερολίβαδου, το σώμα δουνίτη εκτείνεται σε μήκος 3 χιλιόμετρα και είναι το μεγαλύτερο οφιολιθικό σύμπλεγμα της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, το ανατολικό τμήμα της περιοχής περιλαμβάνει εναλλασσόμενες λεπτές ταινίες χρωμίτη και ολιβίνη, σε αντίθεση με το δυτικό κομμάτι όπου οι μεταλλοφόρες ζώνες έχουν μεγαλύτερο πάχος και η ρυθμικότητα των εναλλαγών είναι πιο περιορισμένη (Κασιώτης, 2008). Το μεταλλείο στο Ξερολίβαδο, στο κέντρο της νοτιότερης περιοχής του Βούρινου, στο οποίο φιλοξενείται το μεγαλύτερο σώμα δουνίτη στη περιοχή, εξήγαγε το μεγαλύτερο μεταλλευτικό σώμα του συμπλέγματος. Τα συνολικά αποθέματα υπολογίζονται γύρω στους 3,2 εκατομμύρια τόνους από τους οποίους 2,2 έχουν ήδη εξορυχθεί. Ταινωτοί χρωμίτες κυριαρχούν στο κοίτασμα, αλλά ο χρωμίτης μπορεί ακόμα να σχηματίζει κοιλάτες μαζώδους μεταλλευτικού σώματος,

ο οποίος συχνά διαβαθμίζεται σε διάσπαρτο χρωμίτη. Όλοι οι χρωμίτες ανεξαρτήτου υφής αποτελούνται από ιδιόμορφους ή υπιδιόμορφους κρυστάλλους με μέγεθος από 0,1-2 mm. Εξαλλοίωση του χρωμίτη σε σιδηροχρωμίτη έχει βρεθεί στην ευρύτερη περιοχή (και στα 5 μεταλλεία). Ο σιδηροχρωμίτης αναπτύσσεται σε βάρος του χρωμίτη και μαζί με αυτόν ορίζουν την μορφή του αρχικού κρυστάλλου. Μικρές ποσότητες σερπεντίνη εμφανίζονται σε κάποιες περιοχές ενώ εκτεταμένη σερπεντινίωση εμφανίζεται στην περιοχή Αετοράχες και Ξερολίβαδο (Grieco and Merlini, 2012).

Ο σερπεντινίτης αποτελείται εξ ολοκλήρου από το ορυκτό σερπεντίνη, με σπάνιες εμφανίσεις πυρόξενου και περιστασιακά μερικά θραύσματα ολιβίνη. Ο χρωμίτης είναι συνήθως το μόνο ορυκτό πρωτογενούς φάσης που διατηρείται σε μικρούς κρυστάλλους παρόμοιους με αυτούς που συναντώνται στον χαρτσβουργίτη. Στους σερπεντινίτες, οι διαδικασίες αλλοίωσης είναι πιο εμφανείς (Grieco and Merlini, 2012). Κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά στο συγκεκριμένο κοίτασμα αναφέρονται παρακάτω:

- Αντικατάσταση του χρωμίτη από σιδηροχρωμίτη είναι πολύ κοινή και εμφανίζεται πάντα στην άκρη του κρυστάλλου χρωμίτη έτσι ώστε χρωμίτης και σιδηροχρωμίτης μαζί να διατηρούν το σχήμα του αρχικού κόκκου χρωμίτη (Grieco and Merlini, 2012).
- Η ανάπτυξη του χρωμιούχου χλωρίτη σχετίζεται σαφώς με το σχηματισμό του σιδηροχρωμίτη, όπου είναι άφθονος. Ο χρωμιούχος χλωρίτης αναπτύσσεται γύρω από τον χρωμίτη σε επαφή με τον σιδηροχρωμίτη (Grieco and Merlini, 2012).
- Η περιεκτικότητα σε μαγνητίτη σε αυτά τα δείγματα είναι υψηλή (έως 5% σε όγκο) και, γενικά, ο περιεχόμενος μαγνητίτης σχετίζεται άμεσα με τον βαθμό σερπεντινίωσης. Ο μαγνητίτης σχηματίζει μικρούς ακανόνιστους κόκκους μέσα στον σερπεντίνη ή αναπτύσσεται σαν περίβλημα γύρω από σιδηροχρωμίτη (Grieco and Merlini, 2012).

Επιπλέον οι φακοειδείς χρωμίτες αυτής της περιοχής εμφανίζουν δομές boudinage, η ύπαρξη και ο σχηματισμός των οποίων είναι αποτέλεσμα της διάτμησης του περιδοτίτη στη διάρκεια απομάκρυνσης από της υψηλές θερμοκρασίες καθώς επίσης και της διαφορετικής πλαστικής αντίδρασης του δουνίτη και του χρωμίτη στην παραμόρφωση (Κασιώτης, 2008).



Σχήμα 16: Μορφές boudinage στους χρωμίτες του Ξερολίβαδου (Καπιώτης, 2008).

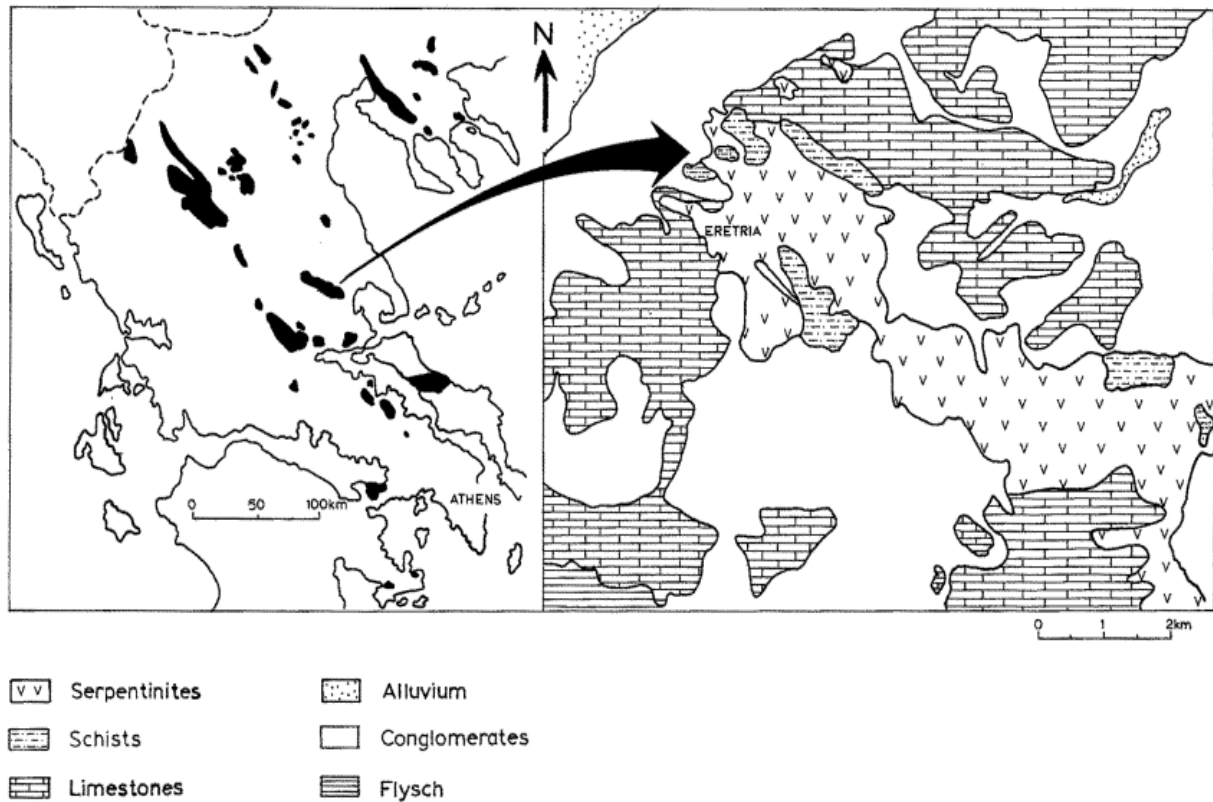
6.1.2 Κοιτάσματα χρωμίου στη περιοχή Τσαγκλί

Μεταξύ των μεγαλύτερων κοιτασμάτων χρωμίτη στην κεντρική Ελλάδα συγκαταλέγονται αυτά στην Ερέτρια (Τσαγκλί), στο βορειότερο τμήμα του οφιολιθικού συμπλέγματος του Όθρυ. Το μεταλλείο στην περιοχή αυτή είναι γνωστό από το 1870. Ο χρωμίτης έχει εμφανίσεις σφαιρικών, φακοειδών, ή ακανόνιστων λοβών, που κυμαίνονται σε μέγεθος από λίγους έως 40.000 τόνους εντός του σερπεντινίτη, που είναι το επικρατέστερο είδος πετρώματος στην περιοχή. Οι λοβοί κατανέμονται τυχαία εντός του πετρώματος ξενιστή, αν και υπάρχει μια ασυνήθιστα μεγάλη συγκέντρωση γύρω από την περιοχή Τσαγκλί (Economou and Naldrett, 1984).

Το βουνό Όθρυς αποτελείται από μια ακολουθία επωθημένων στρωμάτων. Τα ανώτερα στρώματα περιλαμβάνουν τα πετρώματα της οφιολιθικής σειράς, περιδοτίτες, γάββρους, φλέβες διαβάση, και μαξιλαροειδείς λάβες. Καθένα από τα κατώτερα στρώματα περιλαμβάνει μια διαδοχή από πυριγενή πετρώματα, που σε μερικές περιπτώσεις υπόκεινται κλαστικών ιζημάτων Περμίου- Κάτω Τριαδικού και υπέρκεινται ασβεστοσχιστοκερατολιθικών ακολουθιών ηλικίας Άνω Ιουρασικού- Μέσο Κρητιδικού (Economou and Naldrett, 1984).

Πρόσφατα η εξόρυξη διαμαντιών και η υπόγεια επέκταση έδειξαν μια συσχέτιση θειούχων και μαγνητίτη με τον χρωμίτη περιφερειακά από τους λοβούς. Η ζώνη μεταξύ των σουλφιδίων και των σπινελίων μαρτυρά την μαγματική προέλευση αυτών των μεταλλευμάτων.

Το οφιολιθικό σύμπλεγμα του Όθρυ ανήκει στην Υποπελαγονική ζώνη, δυτικά της Πελαγονικής μάζας (Σχήμα 17). Η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από Μεσοζωικούς οφιολίθους και μια ακολουθία ασβεστοραδιολαρικών κερατόλιθων που επικαλύπτονται με ασυμφωνία από Κρητιδικούς ασβεστόλιθους (Economou and Naldrett, 1984).



Σχήμα 17: Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του όρους Όθρυ (Economou and Naldrett, 1984).



Βιβλιογραφία

- Andal, E. S., Arai, S., & Yumul Jr, G. P. (2005). Complete mantle section of a slow-spreading ridge-derived ophiolite: An example from the Isabela ophiolite in the Philippines. *Island Arc*, 14(3), 272-294.
- Barcza, N. A., Boyes, M., Clarke, N. R., Johnson, C., & Van Der Merwe, A. J. THE DEVELOPMENT OF THE VOSKHOD CHROME PROJECT IN KAZAKHSTAN. Brown, D., Ryan, P. D., Afonso, J. C., Boutelier, D., Burg, J. P., Byrne, T., ... & Zagorevski, A. (2011). Arc-continent collision: the making of an orogen. In *Arc-continent collision* (pp. 477-493). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bussolesi, M., Grieco, G., Cavallo, A., & Zaccarini, F. (2022). Different tectonic evolution of fast cooling ophiolite mantles recorded by olivine-spinel geothermometry: Case studies from Iballe (Albania) and Nea Roda (Greece). *Minerals*, 12(1), 64.
- Cassard, D., Nicolas, A., Rabinovitch, M., Moutte, J., Leblanc, M., & Prinzhofer, A. (1981). Structural classification of chromite pods in southern New Caledonia. *Economic Geology*, 76(4), 805-831.
- COLEMAN, R. G. (1977): Ophiolites, Ancient Oceanic Lithosphere? Springer-Verlag, Heidelberg, New York. COLEMAN, R. G. (1977): Ophiolites. Springer Verlag. New York. p. 220.
- Dilek, Y., & Furnes, H. (2011). Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Bulletin*, 123(3-4), 387-411.
- Economou, M. I., & Naldrett, A. J. (1984). Sulfides associated with podiform bodies of chromite at Tsangli, Eretria, Greece. *Mineralium Deposita*, 19(4), 289-297.
- Gervilla, F., Fanlo, I., Kerestedjian, T. N., Castroviejo Bolívar, R., Padrón, J. A., Rodrigues, J. F., & González-Jiménez, J. M. (2011). Origin of ferrian chromite in metamorphosed podiform chromites: a two-stage process. In *11th SGA Biennial Meeting: Let's Talk Ore Deposits*.
- Grieco, G., & Merlini, A. (2012). Chromite alteration processes within Vourinos ophiolite. *International journal of earth sciences*, 101(6), 1523-1533.

Johnson, C. (2012). *Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan* (Doctoral dissertation, Cardiff University).

Lunk, H. J. (2015). Discovery, properties and applications of chromium and its compounds. *ChemTexts*, 1(1), 1-17.

Miyashiro, A. (1975). Classification, Characteristics, and Origin of Ophiolites. *The Journal of Geology*, 83(2), 249-281. <http://www.jstor.org/stable/30060218>

Morishita, T., Andal, E. S., Arai, S., & Ishida, Y. (2006). Podiform chromitites in the Iherzolite-dominant mantle section of the Isabela ophiolite, the Philippines. *Island Arc*, 15(1), 84-101.

Mosier, D. L., Singer, D. A., Moring, B. C., & Galloway, J. P. (2012). Podiform chromite deposits—database and grade and tonnage models. *US Geological Survey Scientific Investigations Report*, 5157, 45.

Paktunc, A. D. (1990). Origin of podiform chromite deposits by multistage melting, melt segregation and magma mixing in the upper mantle. *Ore Geology Reviews*, 5(3), 211-222.

Papp, J. F., & Lipin, B. R. HANDBOOK OF CHEMICAL INDUSTRY ECONOMICS, INORGANIC.

Pinti D.L. (2011) Serpentinization. In: Gargaud M. et al. (eds) Encyclopedia of Astrobiology. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_1430.

Prichard, H. M., Barnes, S. J., Godel, B., Reddy, S. M., Vukmanovic, Z., Halfpenny, A., ... & Fisher, P. C. (2015). The structure of and origin of nodular chromite from the Troodos ophiolite, Cyprus, revealed using high-resolution X-ray computed tomography and electron backscatter diffraction. *Lithos*, 218, 87-98.

Rospabé, M., Ceuleneer, G., Granier, N., Arai, S., & Borisova, A. Y. (2019). Multi-scale development of a stratiform chromite ore body at the base of the dunitic mantle-crust transition zone (Maqsad diapir, Oman ophiolite): The role of repeated melt and fluid influxes. *Lithos*, 350, 105235.

Schulte, R. F., Taylor, R. D., Piatak, N. M., & Seal II, R. R. (2012). *Stratiform chromite deposit model: Chapter E in Mineral deposit models for resource assessment* (No. 2010-5070-E). US Geological Survey.

Shekhawat, K., Chatterjee, S., & Joshi, B. (2015). Chromium toxicity and its health hazards. *International Journal of Advanced Research*, 3(7), 167-172.

Zhou, M. F., Robinson, P. T., & Bai, W. J. (1994). Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle. *Mineralium Deposita*, 29(1), 98-101.

Zhou, M. F., Robinson, P. T., Su, B. X., Gao, J. F., Li, J. W., Yang, J. S., & Malpas, J. (2014). Compositions of chromite, associated minerals, and parental magmas of podiform chromite deposits: The role of slab contamination of asthenospheric melts in suprasubduction zone environments. *Gondwana Research*, 26(1), 262-283.

Γιαννακοπούλου, Π. (2019). Μελέτη των οφιολιθικών πετρωμάτων των Γερανείων Ορέων και της Γευγελής. Η επίδραση των μικροπετρογραφικών, γεωχημικών και φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών στην ποιότητα τους ως αδρανών υλικών (Doctoral dissertation).

Εμμανουηλίδης, Χ. (2019). Μεταλογέννεση μεταξύ Βεροίας και Ναούσης περιοχής (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας. Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας)

Θεοδωρίκας, Σ. (2013). Ορυκτολογία-Πετρολογία.

Κασιώτης, Α. (2008). Κοιτασματογένεση πλατινοειδών ορυκτών και χρωμιτών συνδεόμενων με την πετρογενετική εξέλιξη των οφιολιθικών συμπλεγμάτων Βούρινου και Πίνδου (Doctoral dissertation, University of Patras).

Κοκκαλιάρη, Μ. (2015). Ορυκτοχημική μελέτη χρωμιτών, εγκλεισμάτων πλατινοειδών και άλλων μεταλλικών φάσεων καθώς και των πρωτολίθων-ξενιστών τους, εις το οφιολιθικό κάλυμμα της νήσου Τήνου (Doctoral dissertation).

Πομώνης, Π. (2003). Οι οφιόλιθοι της οροσειράς του Κόζιακα: γεωλογική μελέτη-πετρογενετική εξέλιξη-γεωτεκτονική ερμηνεία (Doctoral dissertation, Πανεπιστήμιο Πατρών. Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας. Τομέας Ορυκτών Πρώτων Υλών).

Διαδικτυακές πηγές

www.britannica.com

www.livescience.com

www.mininggeology.blogspot.com

www.indexmundi.com

www.usgs.gov