



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



ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ
ΑΕΜ 5848

**ΟΙ ΠΟΛΥΤΙΜΕΣ ΠΟΙΚΙΛΙΕΣ ΤΟΥ ΚΟΡΟΥΝΔΙΟΥ. ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ
ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024





ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

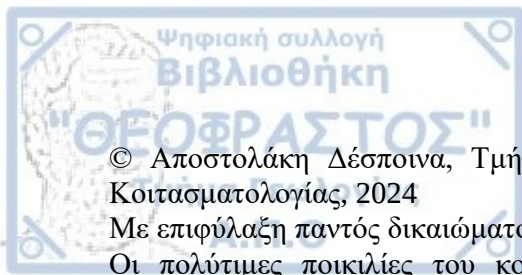
ΟΙ ΠΟΛΥΤΙΜΕΣ ΠΟΙΚΙΛΙΕΣ ΤΟΥ ΚΟΡΟΥΝΔΙΟΥ. ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
ΚΑΙ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Αποστολάκη Δέσποινα, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Αποστολάκη Δέσποινα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Οι πολύτιμες ποικιλίες του κορουνδίου. Εμφανίσεις στην Ελλάδα και στο εξωτερικό. – *Διπλωματική Εργασία*

© Apostolaki Despoina, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2024

All rights reserved.

Gem varieties of corundum. Occurrences in Greece and globally. – *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.

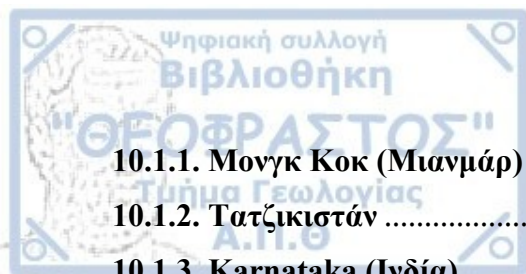
Εικόνα Εξωφύλλου: http://www.geo.auth.gr/106/4_oxides/corundum.htm





Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	4
2.1. Χρώμα.....	4
2.2. Θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες	5
2.3. Trapice	5
3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ.....	6
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	9
4.1. Γεωλογικό μικροσκόπιο	9
4.2. Συνεστιακή φασματοσκοπία μικρο-Raman και φωταύγειας (Confocal micro Raman and luminescence spectroscopy)	9
4.3. Φασματοσκοπία απορρόφησης FTIR (FTIR absorption spectroscopy).....	10
4.4. Φασματοσκοπία Υπεριώδους- Ορατού (UV-Vis-NIR absorption spectroscopy)	10
4.5. Μικροανάλυση ανίχνευσης ηλεκτρονίων (Electron Probe Micro-Analysis (EPMA))	10
4.6. LA-ICP-MS	10
5. ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΑΞΙΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	10
6. ΗΛΙΚΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΚΟΡΟΥΝΔΙΟΥ	13
7. ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΟΨΗΣ.....	14
7.1 Διάχυση βηρυλλίου (Beryllium diffusion).....	14
8. ΧΡΗΣΕΙΣ ΡΟΥΜΠΙΝΙΩΝ ΚΑΙ ΖΑΦΕΙΡΙΩΝ	15
9. ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	15
9.1. Περιοχές εύρεσης κοιτασμάτων.....	17
9.1.1. Παρανέστι Δράμας	17
9.1.2. Ξάνθη	17
9.1.3. Νάξος.....	18
9.1.4. Ικαρία.....	18
9.1.5. Κασσιτερά Σαπών.....	18
9.2. Δακτυλικό αποτύπωμα ισοτόπων οξυγόνου στα ρουμπίνια του Παρανεστίου.....	22
10. ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ	22
10.1. Ασία-Ωκεανία	23



10.1.1. Μονγκ Κοκ (Μιανμάρ)	24
10.1.2. Τατζικιστάν	25
10.1.3. Karnataka (Ινδία)	25
10.1.4. Κασμίρ	26
10.1.5. Νεπάλ.....	26
10.1.6. Σρι Λάνκα	26
10.1.7. Βιετνάμ.....	27
10.1.8. Καμπότζη-Ταϊλάνδη	28
10.1.9. Καμπότζη-Αυστραλία.....	29
10.2. Αφρική	29
10.2.1. Τανζανία.....	29
10.2.2. Μαδαγασκάρη	30
10.2.3. Κένυα.....	30
10.3. Αμερική.....	31
10.3.1. Η.Π.Α.	31
10.3.2. Κολομβία (Mercaderes, Rio Mayo)	31
10.3.3. Κολομβία (Mercaderes, Cauca).....	32
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	33



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πολύτιμες ποικιλίες του κορουνδίου. Εμφανίσεις στην Ελλάδα και στο εξωτερικό.

Αποστολάκη Δέσποινα

Οι πολύτιμες ποικιλίες του κορουνδίου, το ρουμπίνι και το ζαφείρι, με την ομορφιά και τις ιδιότητές τους ασκούν εδώ και αιώνες γοητεία στους ανθρώπους καθιστώντας τα διαχρονικά περιζήτητα. Εκτός όμως από τις διακοσμητικές ιδιότητές τους, η χρήση τους σε εφαρμογές επιστημονικών ανακαλύψεων είναι σημαντική. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τις πολύτιμες ποικιλίες του κορουνδίου, τις ιδιότητές τους, τις συνθήκες και το χρόνο σχηματισμού τους, τις χρήσεις, τις εμφανίσεις τους στην Ελλάδα και στο εξωτερικό, την εμπορική τους αξία και τις τεχνικές βελτίωσης του χρώματός τους.



ABSTRACT

Gem varieties of corundum. Occurrences in Greece and globally.

Apostolaki Despoina

The gem varieties of corundum, ruby and sapphire, with their beauty and properties have been fascinating people for centuries, making them timelessly sought after. But apart from their decorative properties, their use in applications of scientific discoveries is important. This thesis focuses on the gem varieties of corundum, their properties, the conditions and the time of their formation, their uses, their appearances in Greece and globally, their commercial value and the techniques for improving their color.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο τον Μάρτιο του 2024.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η γνωριμία με τις πολύτιμες ποικιλίες του κορουνδίου και η γεωγραφική τους εξάπλωση.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Β. Μέλφο, που ήταν ο επιβλέπων της πτυχιακής αυτής εργασίας, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, όπως και για την συνεχή στήριξη του με τις συμβουλές του κατά την συγγραφή αυτής της εργασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κορούνδιο (corundum) αποτελεί κρυσταλλική μορφή του οξειδίου του αργιλίου με χημικό τύπο Al_2O_3 (Diep, 2015). Το όνομα προέρχεται από την σανσκριτική λέξη kurivinda που σημαίνει σκληρή πέτρα (Giuliani et al., 2014). Στην κλίμακα Μος (Mohs scale) έχει σκληρότητα 9 που είναι η δεύτερη υψηλότερη σκληρότητα που συναντάται στα ορυκτά (Diep, 2015). Μερικά ρουμπίνια είναι οι πιο ακριβοί πολύτιμοι λίθοι. Τα καλύτερα ρουμπίνια της Μιανμάρ είναι μεγαλύτερης αξίας από ένα ισοδύναμου μεγέθους άψογο διαμάντι (Giuliani et al., 2014).

Το κορούνδιο ανήκει στην ομάδα του σπινέλιου με χημικό τύπο (X_2O_3). Εμφανίζεται από διάφανο έως ημιδιάφανο με υαλώδη λάμψη σε διάφορα χρώματα, συνήθως κόκκινο και κυανό αλλά και άχρωμο, κίτρινο, πορτοκαλί, πράσινο, καστανό και τεφρό. Βρίσκεται στη φύση σε δυο πολύτιμες ποικιλίες το ρουμπίνι (κόκκινο) και το ζαφείρι (ποικιλία χρωμάτων, συνήθως κυανό). Το κόκκινο χρώμα στο ρουμπίνι οφείλεται σε ίχνη χρωμίου (Cr) μέσα στους κρυστάλλους του κορουνδίου, ενώ τα χρώματα στο ζαφείρι οφείλονται σε ίχνη σιδήρου (Fe) ή τιτανίου (Ti) μέσα στους κρυστάλλους κορουνδίου. Οι κρύσταλλοί του είναι πρισματικοί και συναντάται σε συσσωματώματα. Πιο συχνή είναι η εμφάνισή του σε μεταμορφωμένα πετρώματα και πιο σπάνια σε πυριγενή πετρώματα που έχουν μικρή ποσότητα διοξείδιο του πυριτίου. Γενικά εμφανίζεται σε πετρώματα πλούσια σε αργίλιο (Al) και φτωχά σε διοξείδιο του πυριτίου (Χριστοφίδης και Σολδάτος, 2008).

Ο όρος "ruby" (ρουμπίνι) εμφανίστηκε ως όρος στην Ευρώπη κατά το Μεσαίωνα και προέρχεται από το λατινικό "ruber" που σημαίνει κόκκινο. Μέχρι να αρχίσει η χρήση του όρου κορούνδιο τα περισσότερα κόκκινα πετράδια αποκαλούνταν ρουμπίνια. Οι ειδικοί τα διαχώριζαν κυρίως από τη χώρα που προέρχονταν. Πολλά από τα "διάσημα ρουμπίνια" με τη σημερινή ονοματολογία που στηρίζεται στην ορυκτολογία θα ονομάζονταν σπινέλιοι (Giuliani et al., 2020).

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

2.1. Χρώμα

Το καθαρό κορούνδιο δεν έχει χρώμα και τα χρώματα που παίρνει είναι από «ακαθαρσίες» που αντικαθιστούν το Al^{3+} στο εσωτερικό της δομής του. Το κόκκινο χρώμα του ρουμπινιού οφείλεται στην αντικατάσταση του Al^{3+} από Cr^{3+} αλλά απαραίτητο είναι η περιεκτικότητά του να είναι ανάμεσα σε 0,1 έως 3,0 wt.%. Ωστόσο έχουν παρατηρηθεί

περιεκτικότητες έως και 13 wt.%. Στα ρουμπίνια πάντα ισχύει η σχέση $\text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3$. Χρώματα από καστανοκόκκινο έως κοκκινωπό εμφανίζεται και σε ζαφείρια τα οποία θυμίζουν ρουμπίνια, όμως σε αυτά η περιεκτικότητα σε σίδηρο Fe είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή του χρωμίου Cr με αποτέλεσμα ο φθορισμός να είναι πολύ χαμηλός αφού ο σίδηρος Fe τον «σβήνει». Η ροζ-πορτοκαλί ποικιλία του κορουνδίου ονομάζεται padparadscha (Giuliani et al. 2014).

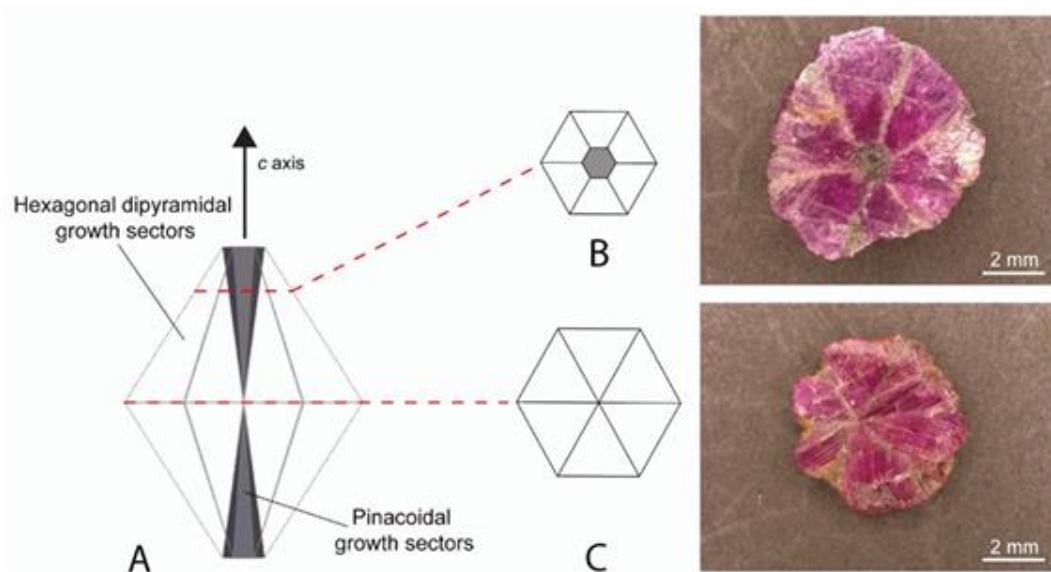
Πρόσφατες μελέτες στα χρωμοφόρα στοιχεία που καθορίζουν τα χρώματα που εμφανίζονται στο κορούνδιο, δείχνουν ότι τα συνδυασμένα μεμονωμένα αποτελέσματά τους μπορούν να ποσοτικοποιηθούν ανάλογα με τη συμβολή τους στο τελικό χρώμα που παρατηρείται (Frederick et al., 2020).

2.2. Θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες

Το άχρωμο ζαφείρι είναι ένας από τους καλύτερους ηλεκτρικούς μονωτές και χρησιμοποιείται σαν μονωτικό υπόστρωμα σε ολοκληρωμένα κυκλώματα υψηλής ισχύος και συχνότητας. Το σημείο τήξης του είναι 2030 °C και το σημείο βρασμού 3500 °C (Phan , 2015).

2.3. Trapice

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αναπτύσσεται ένα ρουμπίνι μπορεί να δημιουργήσουν μια συγκεκριμένη υφή που ονομάζεται trapice. Περιγράφηκε για πρώτη φορά για ένα ασυνήθιστο κολομβιανό σμαράγδι που έμοιαζε με τις ακτίνες ενός τροχού άλεσης ζαχαροκάλαμου. Μέχρι το 1990 ο όρος trapice χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για τα σμαράγδια. Εκείνη την εποχή εμφανίστηκαν trapice ρουμπίνια στην αγορά πολύτιμων λίθων της Ταϊλάνδης και της Μιανμάρ. Η υφή trapice είναι καλύτερα ορατή σε διατομές κάθετες στον άξονα c. Η παρουσία και το μέγεθος του πυρήνα εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των διατομών στους κρυστάλλους. Έτσι είναι δυνατόν να εμφανιστούν δύο διατομές: (α) Ο πυρήνας είναι παρών και τα όρια των τομέων τον περιβάλλουν και αναπτύσσονται από τις άκρες του προς το περιθώριο του κρυστάλλου χωρίζοντας έξι τραπεζοειδούς ανάπτυξης τομείς. (β) Ο πυρήνας είναι απών και τα όρια των τομέων τέμνονται σε ένα κεντρικό σημείο, δημιουργώντας τομείς τριγωνικής ανάπτυξης (Σχ. 1) (Giuliani et al., 2020).



Σχ. 1. Δύο μορφές trapice: B) Με πυρήνα, C) Χωρίς πυρήνα. Φωτογραφία από Isabella Pignatelli. (Giuliani et al., 2020)

3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ

Το κορούνδιο εμφανίζεται δύσκολα στη φύση αφού οι συνθήκες που πρέπει να επικρατούν για τη δημιουργία του είναι πολύ συγκεκριμένες. Αρχικά, το περιβάλλον πρέπει να είναι πλούσιο σε αργίλιο (Al) και φτωχό σε διοξείδιο του πυριτίου, καθώς επίσης θα πρέπει να υπάρχει χρώμιο (Cr), σίδηρος (Fe), και τιτάνιο (Ti) όπου αντικαθιστούν το αργίλιο (Al) στη δομή και θερμοβαρομετρικές συνθήκες που θα ευνοούν την κρυστάλλωσή του και τη σταθερότητά του. Φιλοξενούνται σε δύο ευνοϊκά, για την δημιουργία πολύτιμων λίθων, γεωλογικά περιβάλλοντα. Αυτές είναι η αμφιβολιτική με μέτριας πίεσης γρανουλιτική φάση μεταμορφική ζώνη και σε αλκαλική-βασαλτική ηφαιστειότητα σε περιβάλλον ηπειρωτικής απόκλισης. Κρυσταλλώνεται σε υψηλή θερμοκρασία και σε υψηλή έως μέτρια πίεση (Giuliani et al. 2014).

Το ρουμπίνι ήταν ανέκαθεν περιζήτητο διότι είναι ένας φυσικός πολύτιμος λίθος με ιδιαίτερο χρώμα και ιδιότητες. Για αυτό στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκε σε διακοσμητικά και κοσμήματα από σημαντικά πρόσωπα και είναι διάσημο μέχρι και σήμερα. Σήμερα, οι ερευνητές το μελετούν και ψάχνουν ενδείξεις για πιθανές θέσεις κοιτασμάτων αυτού (Frederick et al., 2020).

Τα κοιτάσματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πρωτογενή και δευτερογενή. Πρωτογενή θεωρούνται όταν ο πολύτιμος λίθος φιλοξενείται στο πέτρωμα όπου κρυσταλλώθηκε ή στο πέτρωμα που το μετέφερε από τη ζώνη κρυστάλλωσης, στο φλοιό ή το μανδύα, στην επιφάνεια της Γης (πχ. ξενόλιθος μέσα σε βασάλτη). Θεωρούνται δευτερογενή όταν τα προϊόντα διάβρωσης πρωτογενών κοιτασμάτων μεταφέρονται από ποτάμια και συσσωρεύονται σε ιζηματογενείς λεκάνες (Gaston Giuliani et al. 2012).

Τα πρωτογενή χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με το περιβάλλον δημιουργίας τους.

1. Κοιτάσματα μαγματικού τύπου (Ma) που περιέχουν δυο υποκατηγορίες:

- 1) (Ma1) τα μαγματικά κοιτάσματα που περικλείουν το κορούνδιο σε αλκαλι-βασάλτες (90% των μαγματικών αποθέσεων), τα ζαφείρια σε λαμπροφύρη και συηνίτη.
- 2) (Ma2) μετασωματικά μαγματικά κοιτάσματα που χαρακτηρίζονται από υψηλή αλληλεπίδραση υγρού-πετρώματος και χημική μεταμόρφωση του πετρώματος ξενιστή. Αυτός ο τύπος κοιτάσματος περιέχει 70% σμαράγδια, 10% ρουμπίνια και αλεξανδρίτη.

2. Κοιτάσματα μεταμορφικού τύπου (Me) χωρίζονται και αυτά σε δύο υποκατηγορίες:

- 1) (Me1) μεταμορφικά κοιτάσματα s.s. (πχ. κορούνδια σε μάρμαρα).
- 2) (Me2) μετασωματικά μεταμορφικά κοιτάσματα που σχετίζονται με την κυκλοφορία ρευστών σε ρήγματα και ζώνες διάτμησης που κόβουν κυρίως μεταμορφωμένους σχιστόλιθους.

3. Ιζηματογενείς αποθέσεις (Se) (Gaston Giuliani et al. 2012).

Σε έρευνες αναφέρεται ότι τα ζαφείρια και τα ρουμπίνια δημιουργούνται κάτω από μεταμορφικές ή μαγματικές συνθήκες και εμφανίζονται πιο συχνά ως ξενοκρύσταλλοι κορούνδιου και πιο σπάνια ως ξενόλιθοι που μεταφέρουν κορούνδια. Αυτά τα κορούνδια μεταφέρθηκαν στην επιφάνεια από αλκαλι-βασάλτες κατά την ηπειρωτική διάρρηξη (Giuliani et al. 2012).

Σύμφωνα με τα πετρογραφικά, γεωχημικά και τα ισοτοπικά χαρακτηριστικά τα κορούνδια διαχωρίζονται σε τρεις τύπους:

1. Τα ρουμπίνια έχουν μεταμορφική προέλευση από όποια γεωγραφική τοποθεσία και αν έρχονται.
2. Τα πολύχρωμα ζαφείρια έχουν αλκαλική προέλευση, η ισοτοπική σύνθεση οξυγόνου αυτών προσδιορίζει και τη γεωλογική τους προέλευση.

3. Τα ζαφείρια με παστέλ χρώματα είναι μεταμορφικά-μετασωματικά και έχουν αναπτυχθεί στη γρανουλιτική φάση (Giuliani et al. 2012).

Τα ρουμπίνια σχηματίζονται σε μεταμορφωμένα/μετασωματικά υπερβασικά/βασικά πετρώματα και σε ανθρακικές πλατφόρμες σε ζώνες πτυχώσεων όπου είναι πλούσιες σε χρώμιο (Cr) και αργίλιο (Al), έτσι είναι πιθανό να υπάρχουν συγκεντρώσεις ορυκτών πλούσια σε χρώμιο μέσα σε ρουμπίνια και στο πέτρωμα ξενιστή (Frederick et al., 2020).

Πρωτογενείς αποθέσεις ρουμπινιών σχηματίστηκαν κατά τον Αρχαιοζωικό στη Γροιλανδία και κατά το Πλειόκαινο στο Νεπάλ. Δευτερογενείς αποθέσεις ρουμπινιών σχηματίστηκαν σε διάφορες χρονικές στιγμές από τη διάβρωση σε μεταμορφωμένες ζώνες από το Προκάμβριο και σε αλκαλιβασάλτες από τον Καινοζωικό μέχρι το Τεταρτογενές (Giuliani, 2020).

Σύμφωνα με το γεωλογικό περιβάλλον δημιουργίας των ρουμπινιών, οι πρωτογενείς τους αποθέσεις χωρίζονται σε δύο τύπους:

1. (Τύπου I) συνδεδεμένα με μαγματισμό
2. (Τύπου II) συνδεδεμένα με μεταμόρφωση.

Οι δευτερογενείς αποθέσεις συνδέονται με ιζηματογένεση. Τα ρουμπίνια φιλοξενούνται σε ιζήματα που σχηματίστηκαν από διάβρωση, την επιρροή της βαρύτητας, την μηχανική μεταφορά και την ιζηματογένεση κατά μήκος των πλαγιών ή των λεκανών που συνδέεται με τις κινήσεις της νεοτεκτονικής και την παραμόρφωση (Giuliani, 2020).

Η παρουσία του κορούνδιου στο μάρμαρο θέτει το ερώτημα της πηγής του αργιλίου και πώς παγιδεύεται από το μάρμαρο. Το αργίλιο μπορεί να προέρχεται από ορυκτά που το περιέχουν και βρίσκονται στο μάρμαρο, από αργίλιο που είναι άμεσα συνδεδεμένο με μαγματική πηγή ή από αργίλιο και χρωμοφόρα στοιχεία που συλλέγονται από ρευστά που κυκλοφορούν μέσα σε σχιστόλιθους που συνδέονται με τα μάρμαρα, κατά τη διάρκεια της μεταμόρφωσης. Τα μάρμαρα είναι φτωχά σε πυρίτιο και αυτό είναι ένα καλό χημικό περιβάλλον για το σχηματισμό του ρουμπινιού (Garnier et al., 2008).

Στα πρωτογενή κοιτάσματα το πυρίτιο, το οποίο υπάρχει σχεδόν σε όλα τα περιβάλλοντα και ευνοεί το σχηματισμό αργιλοπυριτικών ορυκτών, συμβάλλει στη σπανιότητα του κορούνδιου στα πετρώματα αφού εμποδίζει τη δημιουργία του τριοξειδίου του αργιλίου. Σε ένα όμως περιβάλλον με λίγο Si κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, δεν θα σχηματιστεί πολύτιμο κορούνδιο, αλλά στην καλύτερη περίπτωση αδιαφανές κορούνδιο. Χρειάζονται χρωμοφόρα συστατικά όπως το χρώμιο (Cr^{3+}) για να

σχηματίζεται ένα ρουμπίνι ή ζαφείρι. Με αυτόν τον τρόπο εξηγείται γιατί το πολύτιμο ρουμπίνι, το ζαφείρι και το *radparadscha* είναι τόσο σπάνια.

Σε ότι αφορά τα προσχωματικά κοιτάσματα, το πολύτιμο κορούνδιο αναμένεται κατάντη προς το επίπεδο των ποτάμιων αποθέσεων σε ρέματα, όπου αυτοί οι χρωματιστοί πολύτιμοι λίθοι συνοδεύουν άλλους λίθους. Τα εμπορικά βιώσιμα προσχωματικά κοιτάσματα βρέθηκαν μεταξύ υπολειμματικών και αλλουβιακών αποθέσεων. Η καρστικοποίηση έχει μια επίδραση στις δευτερογενείς αποθέσεις όπως στα προσχωματικά κοιτάσματα της Μιανμάρ (Dill, 2018).

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

4.1. Γεωλογικό μικροσκόπιο

Το γεωλογικό μικροσκόπιο είναι χρήσιμο στην έρευνα των εσωτερικών χαρακτηριστικών του πολύτιμου λίθου. Τα στοιχεία που δίνει βοηθούν στη δημιουργία ενός γενικού προφίλ του κρυστάλλου με χαρακτηριστικά όπως τις ρωγμές, τους σχισμούς, το χρώμα και τη θέση και το σχήμα των εγκλεισμάτων (Diep, 2015).

4.2. Φασματοσκοπία μικρο-Raman και φωταύγειας (Confocal micro Raman and luminescence spectroscopy)

Είναι μια αναλυτική μέθοδος βασισμένη στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του φωτός του λέιζερ και των δονήσεων του πλέγματος ή των μορίων. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται για τον καθορισμό της ορυκτολογίας του ορυκτού που μελετάται. Με αυτήν τη μέθοδο γίνεται ο εντοπισμός των εγκλεισμάτων χωρίς προετοιμασία ή καταστροφή του δείγματος. Όταν ένα ορυκτό απορροφά μικρότερο μήκος κύματος (υψηλότερη ενέργεια) και εκπέμπει μεγαλύτερο μήκος κύματος (χαμηλότερη ενέργεια) στην περιοχή του ορατού φωτός, αυτή η διαδικασία ονομάζεται φωταύγεια. Μια προέλευση της φωταύγειας στα ζαφείρια είναι το χρώμιο και για αυτό χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος για την ανίχνευση της περιεκτικότητας του χρωμίου στα ζαφείρια (Diep, 2015). Η μικροφασματοσκοπία Raman είναι η καθιερωμένη αναλυτική μέθοδος στις έρευνες για την εύρεση εγκλεισμάτων αφού είναι αξιόπιστη. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ανάλυση δε χρειάζεται ιδιαίτερη προετοιμασία. Χρησιμοποιείται σε πολύτιμους λίθους με πολλές έδρες που είναι απαραίτητο να ερευνηθούν χωρίς να καταστραφούν (Zeug et al., 2017).

4.3. Φασματοσκοπία απορρόφησης FTIR (FTIR absorption spectroscopy)

Λόγω της υψηλής ευαισθησίας του σχετικά με τους πολικούς δεσμούς οξυγόνου-υδρογόνου, η φασματοσκοπία απορρόφησης FT-IR χρησιμοποιείται για την ανίχνευση υδρογόνου στη δομή των υλικών. Στο ζαφείρι χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ομάδων OH, του νερού ή των ένυδρων μεταλλικών εγκλεισμάτων στο ζαφείρι (Diep, 2015).

4.4. Φασματοσκοπία Υπεριώδους- Ορατού (UV-Vis-NIR absorption spectroscopy)

Το χρώμα στα ζαφείρια προέρχεται από τη μετάβαση των ηλεκτρονίων σε ενεργειακό επίπεδο. (Diep, 2015).

4.5. Μικροανάλυση ανίχνευσης ηλεκτρονίων (Electron Probe Micro-Analysis (EPMA))

Είναι ένα χημικό αναλυτικό εργαλείο που προσδιορίζει τη χημική σύνθεση, πολύ μικρών όγκων στην επιφάνεια γυαλισμένου λεπτού τμήματος ενός ορυκτού. Τέλος, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό κύριων και δευτερευόντων στοιχείων (Diep, 2015).

4.6. LA-ICP-MS

Είναι μια ευαίσθητη τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ιχνοστοιχείων που έχουν χαμηλά όρια ανίχνευσης. Μπορεί να ανιχνεύσει στοιχεία που δεν είναι ανιχνεύσιμα με μη καταστροφικές μεθόδους, όπως το EPMA. Τα όρια ανίχνευσης είναι γενικά κάτω από 1 ppm (Diep, 2015).

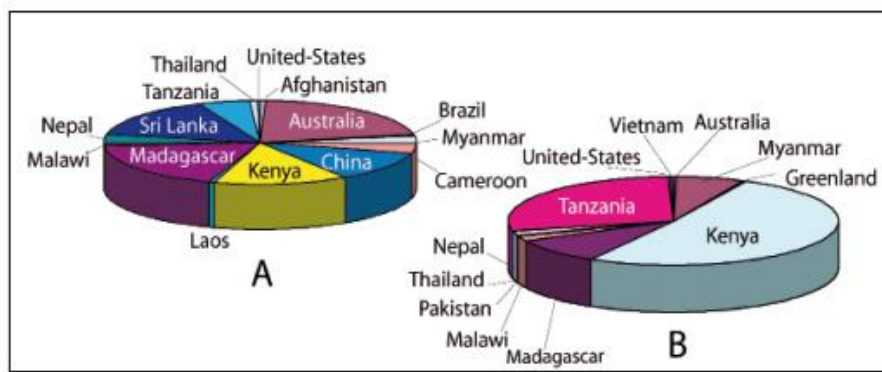
5. ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΑΞΙΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ

Τα ζαφείρια είναι ανάμεσα στις πιο παλιές και περιζήτητες ποικιλίες πολύτιμων λίθων στον κόσμο. Εμφανίζονται σε διάφορες μίξεις χρωμάτων και από διάφορα μέρη στον κόσμο. Τα ζαφείρια δημιουργούνται από διαδικασίες που γίνονται στο εσωτερικό της Γης και είναι χαρακτηριστικές για κάθε περιοχή. Έτσι κάποια χαρακτηριστικά που συναντώνται στους πολύτιμους λίθους μπορούν να υποδείξουν την προέλευσή τους αφού αυτά τα χαρακτηριστικά είναι συνδεδεμένα με συγκεκριμένες περιοχές και τον τρόπο δημιουργίας τους. Κάποια από αυτά είναι το γεωμετρικό σχήμα των κρυστάλλων, το χρώμα, η χημεία ιχνοστοιχείων και κυρίως τα εγκλείσματα που παγιδεύτηκαν κάποια στιγμή κατά την κρυστάλλωση (στερεά, ρευστά και αέρια). Είναι σημαντικό να υπάρχει πιστοποιητικό προέλευσης αφού ρουμπίνια από την Μιανμάρ και ζαφείρια από το Κασμίρ πωλούνται σχεδόν πάντα σε υψηλότερη τιμή από τους αντίστοιχους πολύτιμους λίθους από την Ταϊλάνδη, τη Σρι Λάνκα και οποιαδήποτε άλλη περιοχή (Chitty, 2009).

Η εμπορική αξία ενός πολύτιμου λίθου εξαρτάται από το μέγεθός του, το χρώμα του, την καθαρότητά του καθώς και τη γεωγραφική του προέλευση. Συγκεκριμένα, οι λόγοι για τους οποίους είναι σημαντική η προέλευσή τους είναι:

1. Το κύρος που έχουν οι πολύτιμοι λίθοι ορισμένων περιοχών (π.χ. ρουμπίνια από την Μιανμάρ, ζαφείρια από το Κασμίρ).
2. Πολιτικές, περιβαλλοντικές και ηθικές συνθήκες που επικρατούν στους τόπους προέλευσής τους (Krebs et al., 2020).

Ο καθορισμός της γεωγραφικής προέλευσης των πολύτιμων λίθων είναι ένα σημαντικό έργο που είναι απαραίτητο για την πώλησή τους στη διεθνή αγορά. Για αυτόν τον καθορισμό πρέπει να υπάρχει μια βάση δεδομένων που θα περιέχει την ορυκτολογία, τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των πολύτιμων λίθων που προέρχονται από κοιτάσματα που έχουν εξορυχθεί είτε παλαιότερα είτε πιο πρόσφατα και η χρήση ακριβούς εξοπλισμού για τη βελτίωση των διακρίσεων που αφορούν την προέλευσή τους. Ωστόσο, αυτές οι απαιτήσεις περιορίζονται από την ανεπαρκή γνώση της γεωλογίας που συμβάλλει στο σχηματισμό πολύτιμων λίθων. Οι υψηλής αξίας χρωματιστοί πολύτιμοι λίθοι (HVCG) αποτελούν σημαντικό ορυκτό πόρο που συμβάλλει σημαντικά στο εγχώριο προϊόν πολλών χωρών. Το 2005, η Αφρική ήταν υπεύθυνη για το 90% της παγκόσμιας παραγωγής ρουμπινιού (Κένυα (52%), Τανζανία (28%) και Μαδαγασκάρη (9%)) επιπλέον παρήγαγε το 42% του ζαφειριού (Σχ. 2) (Giuliani et al., 2012).



Σχ. 2. Παγκόσμια παραγωγή των ζαφειριών (A) και ρουμπινιών (B) το 2005 (Giuliani et al. 2012)

Σήμερα η υψηλή παραγωγή και ποιότητα των ρουμπινιών της Μοζαμβίκης (σε μικρότερη έκταση στην Μαδαγασκάρη) άλλαξε τον τρόπο της εμπορίας τους και προκάλεσε την κατάρρευση της παραγωγή σε άλλες περιοχές (π.χ. το ορυχείο Rockland στην Κένυα σταμάτησε την παραγωγή). Στην Αφρική τα ρουμπίνια εξορύσσονται στην Κένυα, Τανζανία, Μαλάουι, Μαδαγασκάρη και Μοζαμβίκη. Το Montepuez είναι το πιο καλά εξοπλισμένο

ορυχείο ρουμπινιών στον κόσμο. Τέλος, έχει αρχίσει η εξόρυξη ρουμπινιών στα νότια της Γροιλανδίας (Giuliani et al. 2020).

Παρόλο που είναι γνωστές οι χώρες από τις οποίες προέρχονται οι πολύτιμοι λίθοι, τα στατιστικά στοιχεία δεν είναι ακριβή και στηρίζονται στην προσφορά και τη ζήτηση της διεθνούς αγοράς. Δυστυχώς ο προσδιορισμός της γεωγραφικής προέλευσης έχει όρια. Τα όρια αυτά προέρχονται από τρεις παράγοντες:

1. Περιορισμένη γνώση γεωλογικών συνθηκών και δημιουργίας των πολύτιμων λίθων.
2. Ύπαρξη παρόμοιων γεωλογικών περιβαλλόντων που παράγουν πολύτιμους λίθους με παρόμοιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά σε διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες.
3. Τέλος, η ανακάλυψη πολυάριθμων υψηλής ποιότητας πολύτιμων λίθων σε διαφορετικούς και αντίθετους τύπους κοιτασμάτων κατά το τέλος του προηγούμενου αιώνα και στις αρχές του 21^{ου} αιώνα (Giuliani et al. 2012).

Για τον προσδιορισμό της προέλευσης των ρουμπινιών παίζουν ρόλο οι συγκεντρώσεις στοιχείων όπως, Fe, Ti, Ga, Cr, V και Mg σε συνδυασμό με τα ισότοπα οξυγόνου. Τα ισότοπα οξυγόνου διαχωρίζουν τα ρουμπίνια σε αυτά που φιλοξενούνται σε μάρμαρα, σε John Saul τύπου ορυχεία (φιλοξενούνται σε πηγματίτες που συνδέονται με διατμημένους γνευσίους, βασικά και υπερβασικά πετρώματα) και σε βασικά-υπερβασικά. Γενικά η γεωγραφική προέλευση των ρουμπινιών είναι δύσκολο να προσδιορισθεί εκτός από σπάνιες περιπτώσεις όπως τα ρουμπίνια Mong Hsu που δεν έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία. Η δημιουργία ρουμπινιών σε κοιτάσματα από το Αφγανιστάν έως το Βιετνάμ μέσα σε μάρμαρα είναι παρόμοια και οι γεωλογικές συνθήκες πανομοιότυπες (Giuliani et al. 2012).

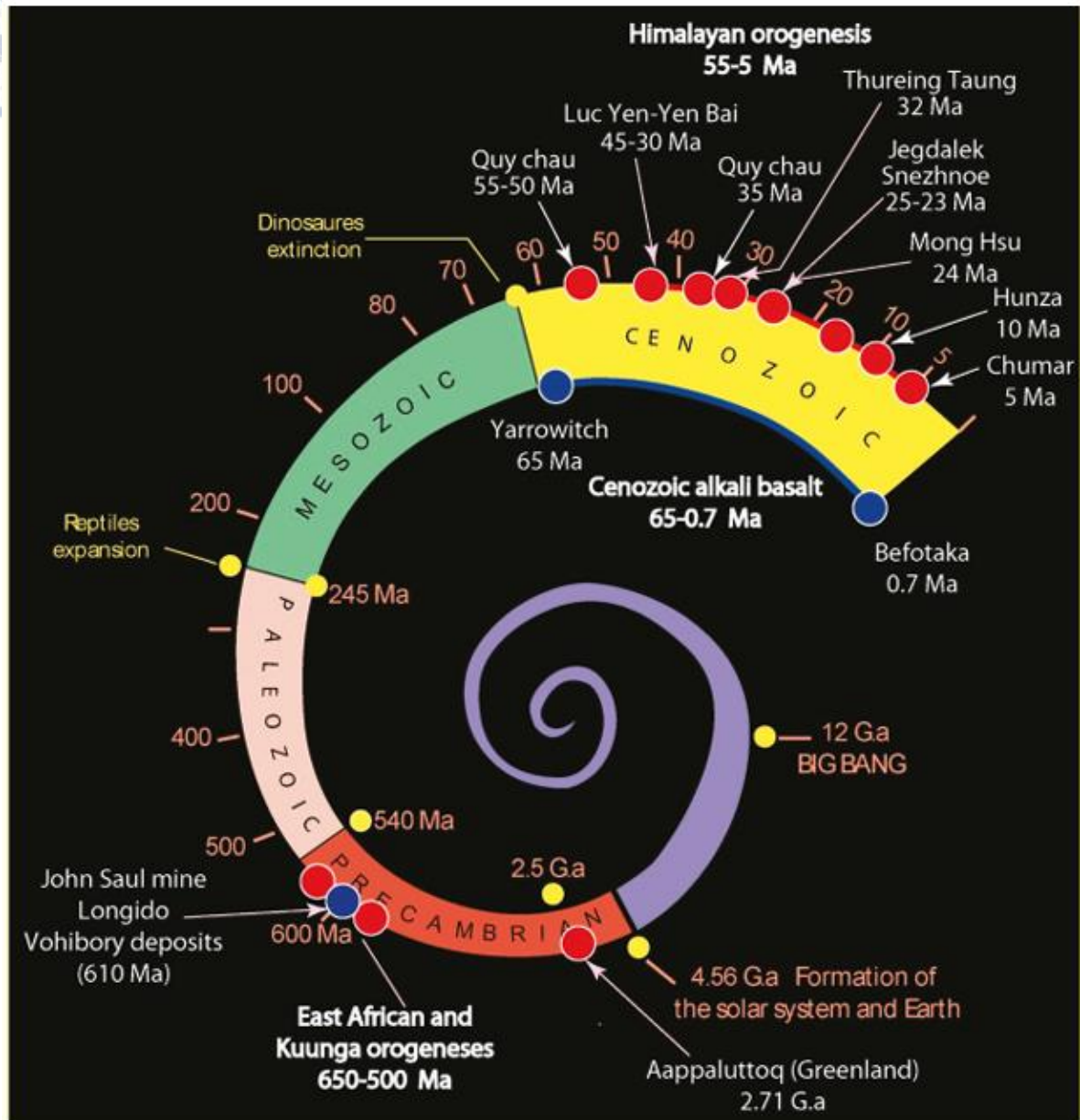
Η ποικιλία των μπλε και άλλων χρωμάτων ζαφειριών εξορύσσονται σε προσχωματικά κοιτάσματα σε τροπικές περιοχές και σε αποθέσεις χαμηλού υψομέτρου. Τα πρωτογενή κοιτάσματα στη Σρι Λάνκα είναι σπάνια και για τον προσδιορισμό της γεωλογικής τους προέλευσης, μελετώνται οι γεωλογικές ιδιότητες, τα στερεά και ρευστά εγκλείσματα καθώς και οι γεωχημικές και ισοτοπικές ιδιότητες που αντιστοιχούν σε ζαφείρια σε προσχωματικές αποθέσεις. Όσον αφορά τα μπλε ζαφείρια, η εξέταση σε μικροσκόπιο είναι σημαντική για το διαχωρισμό βασικών χαρακτηριστικών, όπως οι συχνές εμφανίσεις ρουτιλίου μέσα στους κρυστάλλους του ζαφειριού έναντι ζωνών και δομών ανάπτυξης. Τα χημικά δεδομένα που προσδιορίζονται από αναλύσεις LA-ICP-MS δεν δίνουν στοιχεία που θα μπορούσαν να βοηθήσουν το διαχωρισμό ζαφειριών, που προέρχονται από διαφορετικά μεταμορφωμένα περιβάλλοντα. Τα πεδία σύστασης που καθορίστηκαν για τη μεταμορφική προέλευση περιλαμβάνουν κυρίως ζαφείρια που προέρχονται από προσχωματικές αποθέσεις, για αυτό το λόγο αυτά θεωρούνται μεταμορφικής προέλευσης (Giuliani et al., 2012).

Συμπερασματικά, ο προσδιορισμός της γεωγραφικής προέλευσης των ρουμπινιών και των ζαφειριών για αυτόν τον τύπο κοιτασμάτων δεν είναι δυνατός, Παράδειγμα αποτελούν τα ρουμπίνια από το Bo-Rai στην Ταϊλάνδη και το Pailin στην Καμπότζη, τα οποία ανήκουν στην ίδια ηφαιστειακή επαρχία. Οι ισοτοπικές συνθέσεις οξυγόνου είναι παρόμοιες (Giuliani et al., 2012).

6. ΗΛΙΚΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΚΟΡΟΥΝΔΙΟΥ

Η παγκόσμια διανομή των πολύτιμων λίθων συνδέεται στενά με ρήγματα, υποβυθίσεις και συγκρούσεις τεκτονικών πλακών ηλικίας πάνω από 3 δισεκατομμύρια χρόνια (Giuliani et al. 2012). Υπάρχουν τέσσερις κύριες περίοδοι που παρατηρείται η δημιουργία των κορούνδιων με βάση μεθόδους έμμεσης χρονολόγησης (Σχ. 3):

1. Το παλαιότερο κοίτασμα είναι το Aappaluttoq στη Γροιλανδία όπου τα ρουμπίνια σχηματίστηκαν στον Αρχαιοζωικό (2,71 Ga).
2. Κατά την Παναφρικανική ορογένεση (750-450 Ma). Πρωτογενή κοιτάσματα συνδέονται με την μεταμορφική ζώνη της Μοζαμβίκης όπου ήταν αποτέλεσμα μιας ύστερης Νεοπροτεροζωικής σύγκρουσης ηπειρωτικού τύπου ανάμεσα στα ανατολικά και δυτικά κομμάτια της Γκοντβάνας που ακολούθησαν το κλείσιμο του ωκεανού της Μοζαμβίκης. Η ζώνη των πολύτιμων λίθων της ανατολικής Αφρικής είναι σημαντική όχι μόνο για τα ρουμπίνια αλλά και για τα ζαφείρια της.
3. Κατά την ορογένεση των Ιμαλαίων στην κεντρική και ανατολική Ασία (45-5 Ma). Ρουμπίνια κρυσταλλώνονται μέσα σε μάρμαρα κατά την καινοζωική σύγκρουση της Ινδίας με την Ασία.
4. Κατά τον Καινοζωικό (65-1,65 Ma). Οι ηπειρωτικές εξωθήσεις των αλκαλι-βασαλτών μετέφεραν ξενοκρυστάλλους πράσινων-μπλε-κίτρινων ζαφειριών και ρουμπινία στην επιφάνεια. Οι αλκαλι-βασάλτες συνδέονται με ηπειρωτική διάρρηξη πάνω από ανερχόμενο μανδύα που με τη σειρά τους σχετίζονται με δραστηριότητα θερμών κηλίδων (hot spot). Οι λάβες αυτές που περιείχαν κορούνδια διαβρώθηκαν και οι κρύσταλλοι συγκεντρώθηκαν ως προσχωματικά κοιτάσματα. Αυτές οι αποθέσεις αποτελούν μεγάλο μερίδιο στο εμπόριο του ζαφειριού (Giuliani et al., 2020).



Σχ. 3. Σπειροειδές διάγραμμα χρόνου του σχηματισμού του κορούνδιου (Giuliani et al., 2020).

7. ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΟΨΗΣ

7.1 Διάχυση βηρυλλίου (Beryllium diffusion)

Ο μηχανισμός με τον οποίον άτομα ή ιόντα κινούνται δια μέσου των στερεών είναι γνωστός ως διάχυση. Το ερώτημα είναι πως ένα άτομο κινείται μέσα σε ένα στερεό. Έχει αποδειχθεί ότι ακόμη και οι πιο τέλει κρύσταλλοι έχουν στο πλέγμα τους κενές θέσεις από άτομα που λείπουν. Το κορούνδιο αποτελείται από άτομα αργιλίου και οξυγόνου. Άτομα αυτών των δυο στοιχείων λείπουν ακόμη και από το πιο τέλει δείγμα κρυστάλλου κορούνδιου και όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο περισσότερα άτομα λείπουν. Αυτό

έχει ως αποτέλεσμα, ένα ξένο ιόν να πηδά από μια κοινή θέση στην άλλη μέσα σε έναν κρύσταλλο. Επειδή οι κενές θέσεις έχουν μια τυχαία κατανομή (στον κρύσταλλο) το ιόν θα κινείται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Τα ιόντα κινούνται από περιοχές μεγάλης συγκέντρωσης ιόντων διάχυσης προς περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης. Τα άλματα χρειάζονται ενέργεια την οποία δίνει η θερμότητα. Όσο υψηλότερες είναι οι θερμοκρασίες τόσο περισσότερα άλματα στο δευτερόλεπτο κάνουν τα ιόντα. Η θερμική επεξεργασία του κορουνδίου βασίζεται στη διάχυση. Η διάχυση μπορεί να γίνει από ιόντα που φιλοξενεί το κορούνδιο (φυσική διαδικασία). Γίνεται όμως και από ξένα στοιχεία, όπως το βηρύλλιο και αυτό ονομάζεται επεξεργασία διάχυσης αναφερόμενη στον τεχνητό χρωματισμό του κορουνδίου (Emmett et al., 2003).

8. ΧΡΗΣΕΙΣ ΡΟΥΜΠΙΝΙΩΝ ΚΑΙ ΖΑΦΕΙΡΙΩΝ

Δύσκολα μπορεί να βρεθεί κλάδος της επιστήμης και της τεχνολογίας όπου δεν χρησιμοποιείται το ζαφείρι. Στην αεροδιαστημική χρησιμοποιούνται υλικά που αντέχουν στην ακτινοβολία, στις υψηλές θερμοκρασίες, στις υψηλές πιέσεις και στα μηχανικά φορτία. Ανάμεσα στα υλικά που αντέχουν είναι υλικά που περιέχουν το ζαφείρι (Dobrovinskaya et al., 2009).

Η κατασκευή του πρώτου λέιζερ το 1960 από τον Maiman στηρίχτηκε στο ρουμπίνι. Από τότε η απόδοση του λέιζερ βελτιώθηκε και σήμερα παίζει σημαντικό ρόλο στις επιστήμες και στην καθημερινή ζωή (Hecht, 2010).

Τα ρουμπίνια και τα ζαφείρια χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κοσμημάτων και διακοσμητικών, από το παρελθόν μέχρι και σήμερα (Frederick et al., 2020).

9. ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στο ελληνικό ορογενές υπάρχουν πολύτιμοι λίθοι μέσα σε διάφορους τύπους πετρωμάτων. Συναντώνται κυρίως σε τέσσερις τεκτονικές ζώνες: της Ροδόπης, την Πελαγονική, την Αττικοκυκλαδική και στην ενότητα φυλλιτών-χαλαζιτών της Κρήτης. Οι πολύτιμες ποικιλίες του κορουνδίου συνδέονται με μεταμορφικές-μετασωματικές διεργασίες (Voudouris et al., 2019b).

Πρωτογενή κοιτάσματα κορουνδίου στον ελλαδικό χώρο (Σχ. 4, 5) συναντώνται στο Παρανέστι Δράμας και Γοργόνα Ξάνθης (μάζα Ροδόπης), στην Ικαρία και στον Κινίδαρο της Νάξου (Αττικοκυκλαδική) (Karantoni et al., 2021).

Οι εμφανίσεις του κορούνδιου στην Ελλάδα παρουσιάζουν μια χρωματική ποικιλία που κυμαίνεται από βαθύ κόκκινο, ροζ, μοβ, μπλε μέχρι άχρωμο και τα μεγέθη των κρυστάλλων φτάνουν τα 5 cm. Μερικά κορούνδια από τη Γοργόνα Ξάνθης και τα ζαφείρια που φιλοξενούνται σε πλουμασίτη της Νάξου εμφανίζουν αξιοσημείωτη διαφάνεια και ομοιογένεια χρώματος και θα πρέπει να διερευνηθεί αν έχουν τη δυνατότητα κοπής ως πολύτιμοι λίθοι. Κάποια κορούνδια, ειδικά οι έντονες αποχρώσεις, θα μπορούσαν να κοπούν ως καμποσόν. Αν και οι πολύτιμες ποικιλίες κορούνδιου θεωρείται ότι απουσιάζουν στα κοιτάσματα σμύριδας, εντούτοις τα μπλε ζαφείρια της Νάξου και ιδιαίτερα της Ικαρίας είναι υψηλής ποιότητας γεγονός που είναι άτυπο για κορούνδια που φιλοξενούνται σε μετα-βωξίτες.

Αναγκαίο είναι να γίνουν άλλες έρευνες για να εδραιωθεί η δυνατότητα οικονομικής εκμετάλλευσης των περιοχών της Ελλάδας που έχουν κορούνδια. Προσβλέποντας βέβαια την Ελλάδα σαν μια νέα χώρα παραγωγής πολύτιμων ποικιλιών κορούνδιου στον κόσμο. Επίσης μπλε έως άχρωμα ζαφείρια από τους πλουμασίτες της Νάξου είναι εμπλουτισμένα σε βηρύλλιο (Be). Αυτό το χαρακτηριστικό έχει αναφερθεί μόνο για τα ζαφείρια από τις περιοχές Πακάκα της Μαδαγασκάρης, Sar-e-sang του Αφγανιστάν και Weldborough της Τασμανίας. Τα πλουμασιτικά ζαφείρια της Νάξου, τα φιλοξενούμενα σε μάρμαρα ζαφείρια της Ξάνθης και των μετα-βωξιτών της Ικαρίας εμφανίζουν πολύ υψηλές τιμές σε νιόβιο (Nb), ταντάλιο (Ta), βολφράμιο (W) και κασσίτερο (Sn). Η περαιτέρω μελέτη των συγκεντρώσεων των στοιχείων αυτών και ιδιαίτερα του βηρυλλίου (Be) στα κορούνδια της Ελλάδας θα βοηθούσε στο να προσδιορίσουμε την προέλευσή τους (Voudouris et al., 2019a).

Η μελέτη δειγμάτων και από τις τέσσερις περιοχές, με πολωτικό μικροσκόπιο, έδειξε ότι όλα είχαν κοινά χαρακτηριστικά, όπως διαχωρισμό, διδυμίες, θραυσμό και χρωματικές ζώνες (η χρωματική ζώνη παρατηρήθηκε σε όλα τα δείγματα και ιδιαίτερα στα ζαφείρια από τον Κινίδαρο όπου παρουσιάζεται σαν ένας μπλε πυρήνας που περιβάλλεται από μια άχρωμη ζώνη ή ένας άχρωμος πυρήνας που περιβάλλεται από μια μπλε ζώνη). Τα περισσότερα από αυτά οφείλονται στην παραμόρφωση θραυσμού μετά την κρυστάλλωση. Το γεγονός αυτό μειώνει την ποιότητά τους σαν πολύτιμους λίθους. Η φασματοσκοπική μέθοδος FTIR (φασματοφωτομετρία υπέρυθρου με μετασχηματισμό fourier) έδειξε την παρουσία εγκλεισμάτων μπαιμίτη, διάσπορου, γκαιτίτη, μαρμαρυγία και/ή χλωρίτη μαζί με διοξείδιο του άνθρακα σε ρευστά εγκλείσματα. Τα εγκλείσματα του μπαιμίτη και του διάσπορου δεν παρατηρούνται στο μικροσκόπιο. Η φασματοσκοπία υπεριώδους έδειξε ότι το ροζ χρώμα δειγμάτων από το Παρνεόστι και την Γοργόνα οφείλεται στην παρουσία Cr^{+3} , ενώ το μπλε

χρώμα των δειγμάτων από τη Γοργόνα, την Ικαρία και τον Κινίδαρο στην παρουσία Fe^{+2} και Ti^{+4} . Η παρουσία του γαλλίου διαφέρει σε δείγματα της ίδιας περιοχής. Για παράδειγμα, τα μπλε ζαφείρια της Γοργόνας έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε γάλλιο από τα ροζ της ίδιας περιοχής (Karantoni et al., 2021). Τα ρουμπίνια από το Παρανέστι είναι αδιαφανή έως διαφανή και παρουσιάζουν ελασματοειδείς διδυμίες. Τα ζαφείρια από τον πλουμασίτη της Νάξου είναι σχήματος βαρελιού (Voudouris et al., 2019a).

9.1. Περιοχές εύρεσης κοιτασμάτων

9.1.1. Παρανέστι Δράμας

Τα ρουμπίνια και τα ροζ ζαφείρια στο Παρανέστι της Δράμας βρίσκονται μέσα σε μπουντινάζ (Boudinage) αμφιβολιτικών σχιστολίθων που φιλοξενούνται σε γνεύσιους οι οποίοι περιέχουν κυανίτες (Σχ. 6 (b,c)) (Karantoni et al., 2021). Τα ρουμπίνια του Παρανεστίου περιβάλλονται από μαργαρίτη, μοσχοβίτη, χλωρίτη και χρωμιούχο σπινέλιο. Εμφανίζονται μαζί με παργασίτη σχηματίζοντας μια παρόμοια εικόνα με τα ρουμπίνια της Τανζανίας τα οποία περιτριγυρίζονται από ζοϊσίτη. Οι κρύσταλλοι του ρουμπινιού συνυπάρχουν τοπικά με κυανίτη (Σχ. 6 (f)). Τα ρουμπίνια του Παρανεστίου έχουν μέγεθος που κυμαίνεται από μικρότερο του 1 mm και φθάνει έως 50 mm. Κατά μέσο όρο το μέγεθός τους είναι 5 mm έως 10 mm και το χρώμα τους από απαλό ροζ έως βαθύ κόκκινο (Σχ. 6 (d,e)) (Voudouris et al., 2019a). Ο δευτερεύων σχηματισμός μαργαρίτη γύρω από το ρουμπίνι καθώς και η παρουσία σιλιμανίτη υποδηλώνουν την παλαιότερη μεταμορφική ιστορία στο Παρανέστι. Το κορούνδιο στο Παρανέστι σχηματίστηκε κάτω από πίεση 4-7kbar και θερμοκρασία από 580-750 °C (Wang et al. 2017).

9.1.2. Ξάνθη

Η εμφάνιση κορουνδίου στη Γοργόνα Ξάνθης είναι στρωματόμορφη και κατανεμημένη σε στρώματα μαρμάρου που εναλλάσσονται με εκλογιτικούς αμφιβολίτες και γνεύσιους (Σχ. 5 (a)). Οι κρύσταλλοι του κορουνδίου έχουν ερυθρό και κυανό χρώμα και το μέγεθος τους μπορεί να φτάσει έως τα 4 cm (Σχ. 6 (a-c)). Οι παραπάνω εμφανίσεις είναι παράλληλες προς τη ζώνη συρραφής του Νέστου (Voudouris et al., 2019a). Η ζώνη συρραφής του Νέστου είναι μια ζώνη υψηλής παραμόρφωσης. Εκτείνεται σε μήκος περίπου 100 χιλιομέτρων από τη Ξάνθη (ανατολικό όριο) έως τα βουλγαρικά σύνορα (δυτικό όριο) (wang et al.,2017).

Τα ζαφείρια της Ξάνθης συνοδεύονται από ασβεσίτη, δολομίτη, μπλε και καφέ σπινέλιο και νικελιούχο τουρμαλίνη. Τα ζαφείρια της Ξάνθης έχουν χρώμα ροζ, πορτοκαλί, μοβ και μπλε (Voudouris et al., 2019a).

9.1.3. Νάξος

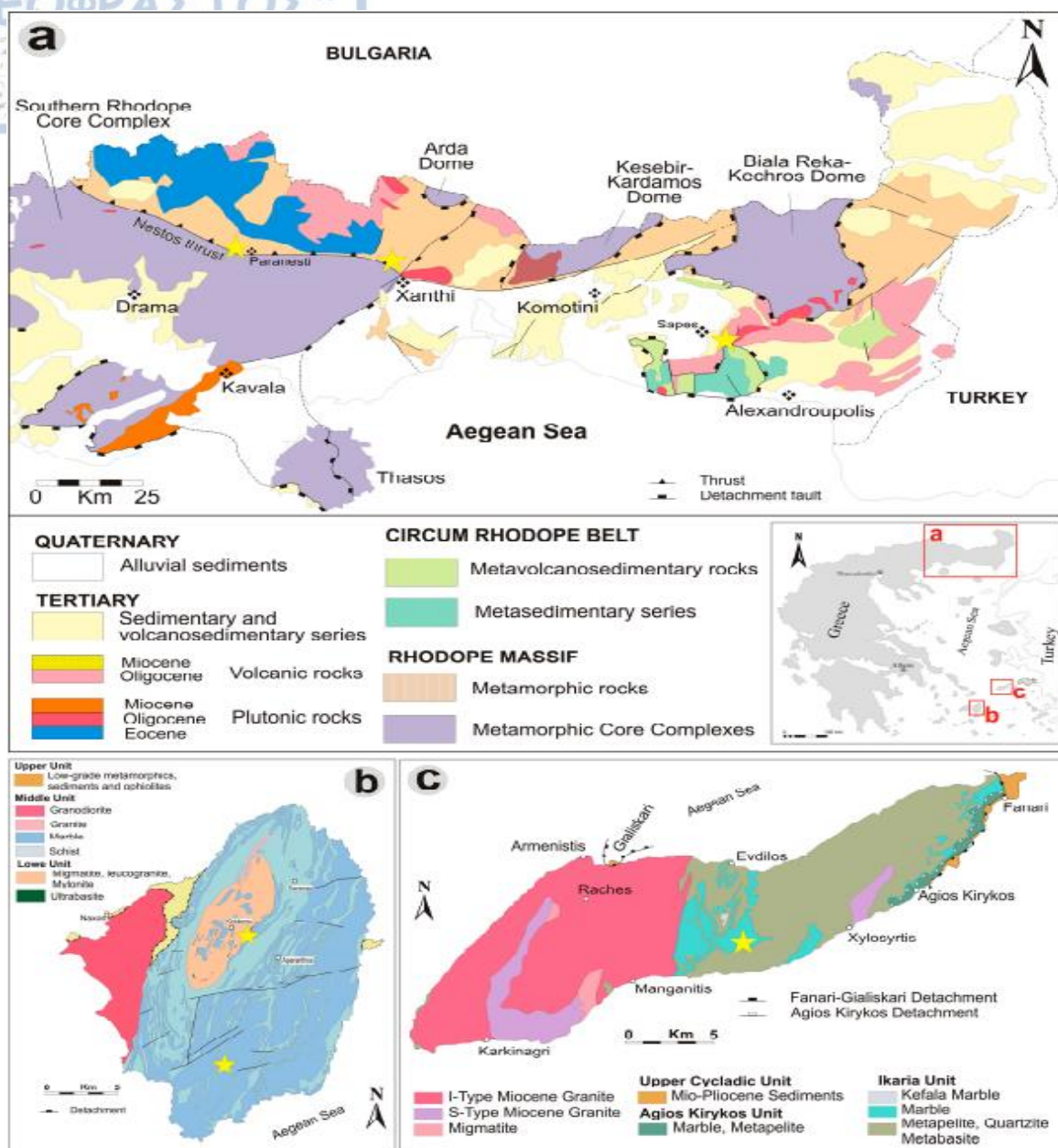
Στο κεντρικό τμήμα της Νάξου κοντά στο χωριό Κινίδαρος, μια προεξοχή με ροζ-μπλε έως άχρωμα ζαφείρια βρέθηκε σε αποπυριτιομένο πηγματίτη (π.χ. πλουμασίτη) που διεισδύει σε ένα υπερβασικό πέτρωμα και που συνδέεται με μετασωματικές ζώνες αντίδρασης (Σχ. 5 (d,e,f)). Αυτά τα ζαφείρια χαρακτηρίζονται από εγκλείσματα μαργαρίτη, διάσπορου, φλογοπίτη, χλωρίτη, απατίτη και ζirkονίου (Σχ. 6 (g,h)) (Karantoni et al., 2021). Στο νότιο τμήμα του νησιού κοντά στο λόφο Καβαλάρη ένα πέτρωμα που ονομάστηκε "κορουνδίτης" από τους Feenstra και Wunder αποτελείται από μπλε κορούνδιο (Σχ. 5 (g)) (Σχ. 6 (i)). Είναι ορυκτά ογκώδη, αδιαφανή έως ημιδιαφανή, κατάλληλα μόνο για κοπή καμποσόν (Voudouris et al., 2019b).

9.1.4. Ικαρία

Τα ζαφείρια της Ικαρίας βρίσκονται μέσα σε εκτεταμένες ρωγμές μεσοζωικών μετά-βωξιτών ενσωματωμένων σε μάρμαρα (Σχ. 5 (h,i)) (Karantoni et al., 2021). Συνοδεύονται από σιδηρούχο χλωρίτη, αιματίτη, ρουτίλιο και διάσπορο. Το κορούνδιο περιέχει εγκλείσματα ιλμενίτη, αιματίτη, ουλβοσπινέλιου, ρουτιλίου και ζirkονίου (Σχ. 6 (j,k)) (Voudouris et al., 2019b).

9.1.5. Κασσιτερά Σαπών

Επίσης, εκτός από τις παραπάνω τοποθεσίες κορούνδιο έχει αναφερθεί στο λόφο Κορυφές το οποίο είναι σε ένα πορφυρό-επιθερμικό σύστημα που φιλοξενείται μέσα σε τριτογενή γρανιτοειδή στα Κασσιτερά Σαπών Ροδόπης, στο νότιο τμήμα του όγκου της Ροδόπης (Σχ. 4) (Voudouris et al., 2019a).



Σχ. 4. (α) Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της ανατολικής μάζας της Ροδόπης (Ελλάδα) δείχνει τις κύριες τεκτονικές ζώνες και την κατανομή των καινοζωικών πυριγενών πετρωμάτων (κατά Μέλφο και Βουδούρη), δείχνει τις τοποθεσίες των κορουνδίων στην Ξάνθη, Παρανέστι και Κασσιτερά/Σάπες (αστέρια). (β) Γεωλογικός χάρτης του νησιού της Νάξου που δείχνει τις τοποθεσίες των ζαφειριών στους πλουμασίτες στον Κινίδαρο και στους μετα-βωξίτες στον λόφο Καβαλάρη (αστέρια) (κατά Duchene et al., μορφοποίηση κατά Ottens και Βουδούρης) (γ) Γεωλογικός χάρτης του νησιού της Ικαρίας που δείχνει την τοποθεσία των μπλε ζαφειριών στην περιοχή της Ατσίδας. Τα κίτρινα αστέρια αντιπροσωπεύουν τις περιπτώσεις όπου έγιναν μελέτες για τα κορούνδια (Voudouris et al., 2019a).



Σχ. 5. Φωτογραφίες πεδίου που δείχνουν το περιβάλλον στο οποίο συναντώνται τα ρουμπίνια και τα ζαφείρια στην Ελλάδα. (a) Στρώσεις μαρμάρου σε εναλλαγές με εκλογιτικούς αμφιβολίτες στη Γοργόνα Ξάνθης. (b) Κεροστιλβικός σχιστόλιθος που έχει υποστεί παραμόρφωση, που παρεμβάλλεται μέσα σε εκλογιτικούς αμφιβολίτες, μάρμαρα και μετα-πηγματίτες στο Παρανέστι Δράμας. (c) Ρουμπίνια Παρανεστίου. Το πηγματιτικό σώμα στο κάτω μέρος της εικόνας δεν φαίνεται να έχει υποστεί αποπυριτίωση. (d,e) Υπερβασικά πετρώματα ανάμεσα σε μιγματίτη σε μορφή πυρήνα που μοιάζει με θόλο και τον υπερκείμενο κυανιτικό-σιλλιμανιτικό σχιστόλιθο και μάρμαρα στις δύο πλουμασιτικές περιοχές στα ανατολικά του νησιού Νάξος. (f) Πλουμασίτες που περιέχουν κορούνδια στη γενική περιοχή που φαίνεται και στο σχήμα 2(e). (g) Πανοραμική θέα των μαρμάρων που φιλοξενούν μετα-βωξίτες στο λόφο Καβαλάρη στα νότια του νησιού Νάξος. (h) Πανοραμική θέα των μαρμάρων που φιλοξενούν μετα-βωξίτες της ενότητας της Ικαρίας. (i) Φακοί μετα-βωξιτών που φιλοξενούν κορούνδια μέσα σε μάρμαρα στην ενότητα της Ικαρίας (Voudouris et al., 2019a).



Σχ. 6. Φωτογραφίες πεδίου και δειγμάτων κρυστάλλων κορούνδιου από την Ελλάδα: (a-c) Ροζ, μπλε έως μοβ ζαφείρια μέσα στα μάρμαρα της Ξάνθης, (d,e) Ρουμίνια με βαθύ κόκκινο χρώμα μέσα σε παραγασιτικό σχιστόλιθο από το Παρανεστί Δράμας. (f) Ρουμίνια σχετιζόμενα (αντικατάσταση) με κυανίτη από το Παρανεστί Δράμας. (g) Μπλε και άχρωμα ζαφείρια που φιλοξενούνται μέσα σε αποπυριτιομένους πηγματίτες που είναι πλούσιοι σε ανορθίτη (πλουμασίτης) και σχετίζονται με φλογοπίτη και τουρμαλίνη από τον Κινίδαρο της Νάξου. (h) Μοβ έως ροζ ζαφείρια μέσα σε πλουμασίτες και αργότερα περικλειόμενα από φλογοπίτη στο αριστερό κομμάτι από τον Κινίδαρο της Νάξου. (i) Μπλε ζαφείρια σε ρωγμές σε μετα-βωξίτες στο λόφο Καβαλάρη της νότιας Νάξου. (j,k) Μπλε ζαφείρια και μαργαρίτης, πιθανής υδροθερμικής προέλευσης μέσα στις ρωγμές των μετα-βωξιτών στην Ικαρία (Voudouris et al., 2019a).

9.2. Ισότοπα οξυγόνου στα ρουμπίνια του Παρανεστίου

Το οξυγόνο είναι από τα πλέον διαδεδομένα στοιχεία στο φλοιό και τον μανδύα της Γης και στα ρευστά. Το οξυγόνο έχει τρία φυσικά ισότοπα:

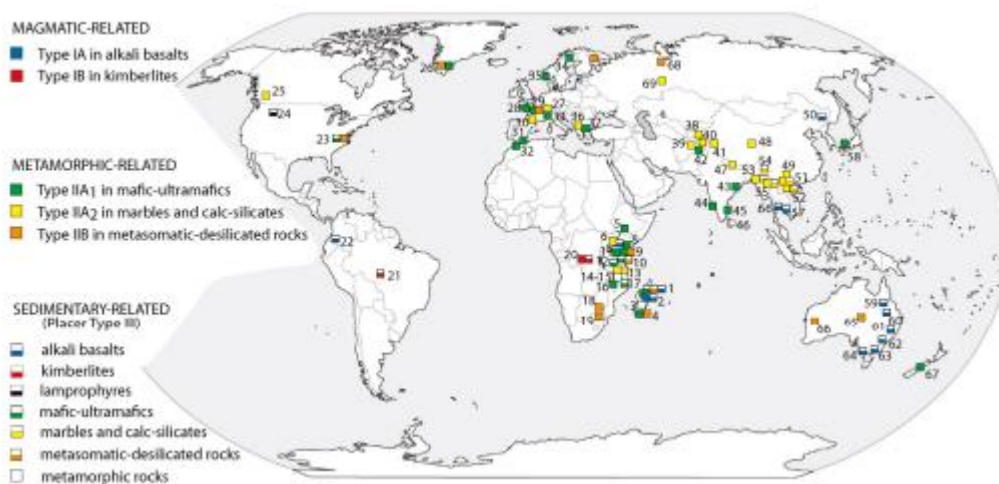
1. ^{16}O (99,76%)
2. ^{17}O (0,04%)
3. ^{18}O (0,2%) (Wang et al. 2019).

Το κριτήριο των ισοτόπων οξυγόνου στα έγχρωμα κορούνδια (ζαφείρια, ρουμπίνια) έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της γεωλογικής προέλευσής τους. Το ισότοπο ^{18}O έχει μεγάλη χρησιμότητα όταν η πρωτογενής γεωλογική προέλευση είναι αβέβαιη. Η περιεκτικότητα στο ισότοπο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τις γεωλογικές διεργασίες για αυτό χρειάζεται μεγάλη προσοχή όταν χρησιμοποιείται. Εξαιτίας αυτού σε λίγες περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί τα αποτυπώματα των ισοτόπων οξυγόνου. Είναι σημαντικό ότι η ανάλυση ισοτόπων οξυγόνου πολύτιμων λίθων κορούνδιων επιτόπου με τη μέθοδο SIMS (φασματομετρία μάζας δευτερογενών ιόντων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κορούνδια που είναι αναγκαία η αναγνώριση της γεωγραφικής προέλευσής τους. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το σημείο ανάλυσής του μπορεί να γυαλιστεί ξανά. Χρειάζεται να γίνουν και άλλες έρευνες ώστε η μέθοδος αυτή να παίζει σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία κοσμημάτων και να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά και για άλλους πολύτιμους λίθους (Wang et al. 2019).

Ποζ προς κόκκινα ρουμπίνια από το Παρανέστι εξετάστηκαν επιτόπου με τη μέθοδο SIMS και με τεχνικές φθορίωσης με λέιζερ (Voudouris et al., 2019a). Τα ρουμπίνια του Παρανεστίου έχουν ένα στενό εύρος τιμών ^{18}O που κυμαίνεται μεταξύ 0-1‰ και αντιπροσωπεύει μια από τις λίγες περιπτώσεις παγκοσμίως όπου η παρουσία του ισοτόπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τα διακρίνει από άλλες τοποθεσίες. Οι SIMS αναλύσεις και άλλες εργασίες υποστηρίζουν ότι αυτά τα ρουμπίνια σχηματίστηκαν κάτω από μεταμορφικές/μετασωματικές συνθήκες που προϋποθέτουν βαθιά διείσδυση μετεωρικού νερού κατά μήκος μεγάλων δομών φλοιού που σχετίζονται με τη ζώνη συρραφής του Νέστου (Nestos suture zone) (Voudouris et al., 2019a).

10. ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ

Οι κυριότερες χώρες παραγωγής ρουμπινιών βρίσκονται στην κεντρική και νοτιοανατολική Ασία. Στην Αφρική παράγονται πολύτιμοι λίθοι κορουνδίου στην Τανζανία, Κένυα και Μαδαγασκάρη. Παραδοσιακές χώρες παραγωγής μπλε ζαφειριών είναι: η Αυστραλία, Καμπότζη, Κίνα, Λάος, Μαδαγασκάρη, Νιγηρία, Η.Π.Α. και Ταϊλάνδη. Πρόσφατα, ανακαλύφθηκαν κοιτάσματα ζαφειριού στην Τανζανία. Υπάρχουν και χώρες που παράγουν κατά καιρούς πολύτιμες ποικιλίες κορουνδίου, όπως η Βραζιλία, ο Καναδάς, η Κολομβία, το Μαλάουι, Η.Π.Α. και Ρωσία (Σχ. 7) (Giuliani et al., 2007).

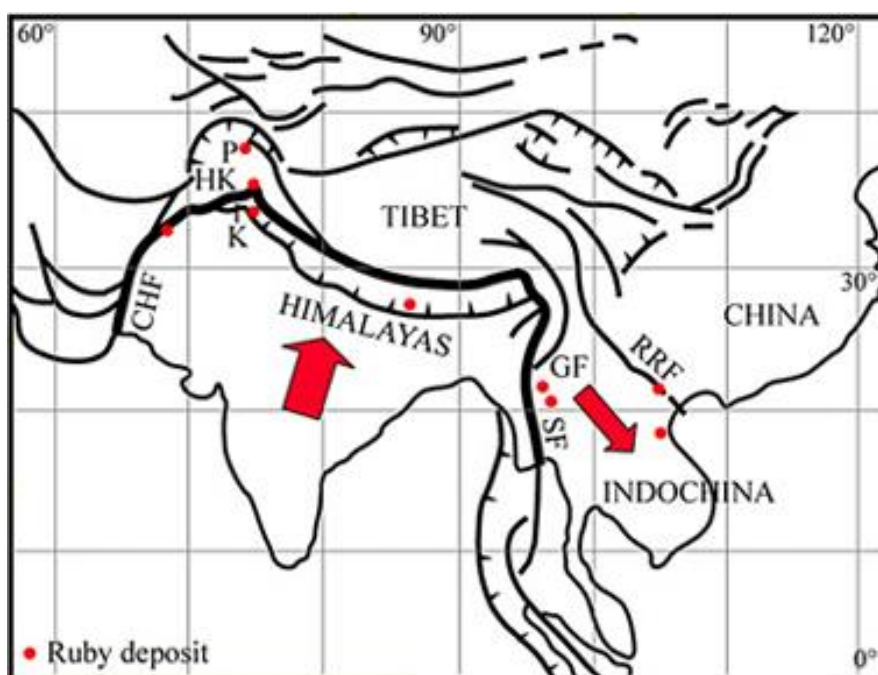


Σχ. 7. Οι μεγαλύτερες και οι μικρότερες πηγές ρουμπινιών παγκοσμίως τοποθετημένες πάνω στο χάρτη σύμφωνα με τους γεωλογικούς τους τύπους (Giuliani et al. 2020).

10.1. Ασία-Ωκεανία

Τα ρουμπίνια που φιλοξενούνται σε μάρμαρα είναι η σπουδαιότερη πηγή έγχρωμων πολύτιμων λίθων της κεντρικής και νοτιοανατολικής Ασίας. Στον κόσμο της γεωλογίας πολύ συχνά αναφέρονται στους "big three" δηλαδή για τους τρεις έγχρωμους πολύτιμους λίθους το ζαφείρι, το ρουμπίνι και το σμαράγδι (αυτά για τον δυτικό κόσμο, διότι για πολλές περιοχές της Ασίας ο πιο σημαντικός πολύτιμος λίθος είναι ο ίασπις) (Palke, 2020). Αυτά τα κοιτάσματα βρίσκονται στη ζώνη της οροσειράς των Ιμαλαΐων η οποία σχηματίστηκε κατά την διάρκεια του Τριτογενούς από τη σύγκρουση της Ινδικής με την Ευρασιατική πλάκα. Σχετίζονται με γρανιτοειδείς διεισδύσεις και περιέχονται σε ανθρακικές σειρές που υπέστησαν υψηλού βαθμού μεταμόρφωση.

Όλες οι αποθέσεις βρίσκονται κοντά στους κύριους τεκτονικούς σχηματισμούς που δημιουργήθηκαν κατά την ορογένεση των Ιμαλαΐων, απευθείας στις ζώνες συρραφής ή σε διατμητικές ζώνες που οδηγούν στην εξώθηση της χερσονήσου της Ινδοκίνας μετά την σύγκρουση με τη νοτιοανατολική Ασία (Σχ. 8). Τα κοιτάσματα βρίσκονται στο Αφγανιστάν, Πακιστάν, Κασμίρ, Τατζικιστάν, Νεπάλ, Μιανμάρ, βόρειο Βιετνάμ και στη νότια Κίνα. Τα ορυχεία του Αφγανιστάν είναι μεταξύ των παλαιότερων στον κόσμο και τα εκμεταλλεύονται τα τελευταία 700 χρόνια (Garnier et al. 2008).



Σχ. 8. Σύγκρουση της Ινδίας με την πλάκα της Ευρασίας (Garnier et al., 2008).

10.1.1. Μονγκ Κοκ (Μιανμάρ)

Το Μονγκ Κοκ (η χώρα των ρουμπινιών) στη Μιανμάρ ήταν για τουλάχιστον 800 χρόνια η σημαντικότερη πηγή ρουμπινιών κορυφαίας ποιότητας. Επίσης στο Μονγκ Κοκ παράγονται σημαντικές ποσότητες εκλεκτής ποιότητας ζαφείρια. Ενώ στη σύγχρονη εποχή παγκοσμίως η παραγωγή εκλεκτών ρουμπινιών και ζαφειριών έχει μειωθεί, οι πολύτιμοι αυτοί λίθοι εξακολουθούν να γοητεύουν καθώς συνδέονται με τους θρύλους των πολύτιμων λίθων της Μιανμάρ. Οι αποθέσεις τους βρίσκονται στη ζώνη μεταμόρφωσης Μονγκ Κοκ, η οποία δημιουργήθηκε κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης της Ινδικής με την Ευρασιατική πλάκα.

Τα ρουμπίνια Μονγκ Κοκ βρίσκονται σε υψηλής ποιότητας, σχετικά καθαρά μάρμαρα, και ερμηνεύεται ότι σχηματίστηκαν από φακούς λιωμένων εβαποριτικών αλάτων που

κινητοποίησαν και κρυστάλλωσαν αλουμίνα και χρώμιο που ήταν απαραίτητα για τον σχηματισμό των ρουμπινιών. Η δημιουργία των ζαφειριών είναι λιγότερο κατανοητή. Εντούτοις, τα μπλε ζαφείρια είναι γνωστό ότι σχετίζονται με διεισδύσεις συνηθισμένων πετρωμάτων μέσα σε γνεύσιους και άλλα μεταμορφωμένα πετρώματα (Palke, 2020).

10.1.2. Τατζικιστάν

Τα ρουμπίνια από τα όρη του Pamir βρίσκονται σε κοιτάσματα τύπου μαρμάρου. Το όνομα της περιοχής που παράγει τα ρουμπίνια είναι Tarakuloma και απέχει έξι χιλιόμετρα από τα κινεζικά σύνορα. Το πλέον γνωστό ορυχείο είναι το Snejnaya σε υψόμετρο 3,500 μέτρα. Τα ορυχεία σε αυτήν την περιοχή δουλεύουν περίπου από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο διότι τον υπόλοιπο χρόνο οι καιρικές συνθήκες είναι δύσκολες. Τα ρουμπίνια και τα ροζ ζαφείρια του Pamir είναι παρόμοια με πολύτιμους λίθους από τα κοιτάσματα Quy Chau στο κεντρικό Βιετνάμ. Εντούτοις ο συνδυασμός παράλληλων διευθετήσεων εγκλεισμάτων ασβεστίου και οι στηλώδεις συγκεντρώσεις από μικρές βελόνες και κομματάκια ρουτιλίου χαρακτηρίζουν τα ρουμπίνια και τα ροζ ζαφείρια του Pamir.

Αντίθετα, ενσωματωμένα χαρακτηριστικά, που παρατηρούνται σε ρουμπίνια προερχόμενα από κοιτάσματα τύπου μαρμάρου άλλων περιοχών, δεν παρατηρούνται στα ρουμπίνια και τα ροζ ζαφείρια του Pamir. Τέτοια ενσωματωμένα χαρακτηριστικά είναι δομές στροβιλιζόμενης ανάπτυξης χρωματικές ζώνες και συγκεντρώσεις βελονών ρουτιλίου που μοιάζουν με φωλιές. Τα παραπάνω είναι χαρακτηριστικά των ρουμπινιών του Μονγκ Κοκ (Μιανμάρ). Επίσης δεν παρατηρούνται ενσωματωμένα μοτίβα πυκνών γραμμοσκιάσεων ή μορφών νιφάδων και χαρακτηριστικές δομές ανάπτυξης όπως στα ρουμπίνια από το Mong Hsu (Μιανμάρ).

Επίσης δεν παρατηρούνται διάφοροι σχηματισμοί μικρών φλεβών ή δομές που μοιάζουν με σύννεφα που συνήθως συναντώνται στα ρουμπίνια από το βόρειο Βιετνάμ και το Νεπάλ. Τέλος, δεν υπάρχουν εμφανίσεις συμπλεγμάτων ορυκτών εγκλεισμάτων που είναι τυπικά των ρουμπινιών της ανατολικής Αφρικής (Smith, 1998).

10.1.3. Karnataka (Ινδία)

Η μελέτη δειγμάτων κορουνδίου από την Karnataka (Ινδία) του Hunsur της περιοχής Mysore με όλες τις γνωστές μεθόδους έδειξαν ότι το χρώμιο (Cr) έχει προσδώσει ένα έντονο κόκκινο χρώμα στον κρύσταλλο αλλά η διαφάνεια του επηρεάστηκε από τις ανεπιθύμητες προσμίξεις. Έχουν παρατηρηθεί ρωγμές στην επιφάνεια των κρυστάλλων. Όλα τα παραπάνω

στοιχεία συνηγορούν στο γεγονός ότι τα ρουμπίνια της περιοχής είναι ημιπολύτιμης ποιότητας (Kumar and Swamy, 2017).

10.1.4. Κασμίρ

Τα ζαφείρια του Κασμίρ στα Ιμαλάια είναι μοναδικής ομορφιάς. Μετά την ανακάλυψή τους (1881) άρχισε εντατική εξόρυξή τους στην περιοχή. Η παραγωγή τις τελευταίες δεκαετίες έχει επιβραδυνθεί και η πλειονότητα των κορουνδίων είναι βιομηχανικής ποιότητας. Η εκμετάλλευσή τους εμποδίζεται από το δυσπρόσιτο της περιοχής και από πολιτικούς παράγοντες. Αστριούχοι πηγματίτες διεισδύουν σε στρώματα από μάρμαρο που εναλλάσσονται με βιοτιτικούς γνεύσιους και σχιστόλιθους. Όπου αυτές οι διεισδύσεις είναι ελεύθερες από πυρίτιο και περιβάλλονται από ακτινολιθικά-τρεμολιθικά σώματα, τα ζαφείρια εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις (Atkinson et al., 1983).

10.1.5. Νεπάλ

Οι πρώτες εμφανίσεις ρουμπινιών και ζαφειριών έγιναν στις αρχές του 1980 με τα κοιτάσματα Chumar και Ruyil να είναι τα πιο γνωστά για την παραγωγή εμπορικών και υψηλής ποιότητας ρουμπινιών και ροζ ζαφειριών στο Νεπάλ. Τα κοιτάσματα κορουνδίου βρίσκονται στην νοτιοδυτική πλευρά του Ganesh Himal μέσα σε δολομιτικά μάρμαρα. Σε δείγματα που είχαν γυαλιστεί από την περιοχή, τα κορούνδια έχουν χρώμα "καθαρό" κόκκινο ή ροζ έως μοβ-ροζ. Ακόμη, τα μη γυαλισμένα και τα γυαλισμένα δείγματα είχαν έντονη χρωματική ζώνωση. Κάποια χαρακτηρίζονται ως δίχρωμα (κόκκινα και πολύ σκούρα βιολετί-μπλε) κορούνδια και κάποια είχαν άχρωμες ή ροζ ζώνες. Τέλος, χαρακτηρίζονται διαφανή έως ημιδιαφανή ανάλογα με τα περιεχόμενα εγκλείσματα, καθώς και το χρώμα (Σχ. 9). (Smith et al., 1997).

10.1.6. Σρι Λάνκα

Η Σρι Λάνκα είναι η μόνη χώρα που παράγει ζαφείρια όλων των χρωμάτων και εξαιρετικής ποιότητας, τέτοια όπως τα περίφημα padparadscha και τα πράσινα ζαφείρια. Η ποικιλία κορουνδίου με χρώμα πορτοκαλί ροζ ονομάζεται padparadscha που προέρχεται από την σανσκριτική padmaraga που υποδηλώνει το χρώμα του άνθους του λωτού (Giuliani et al., 2014).



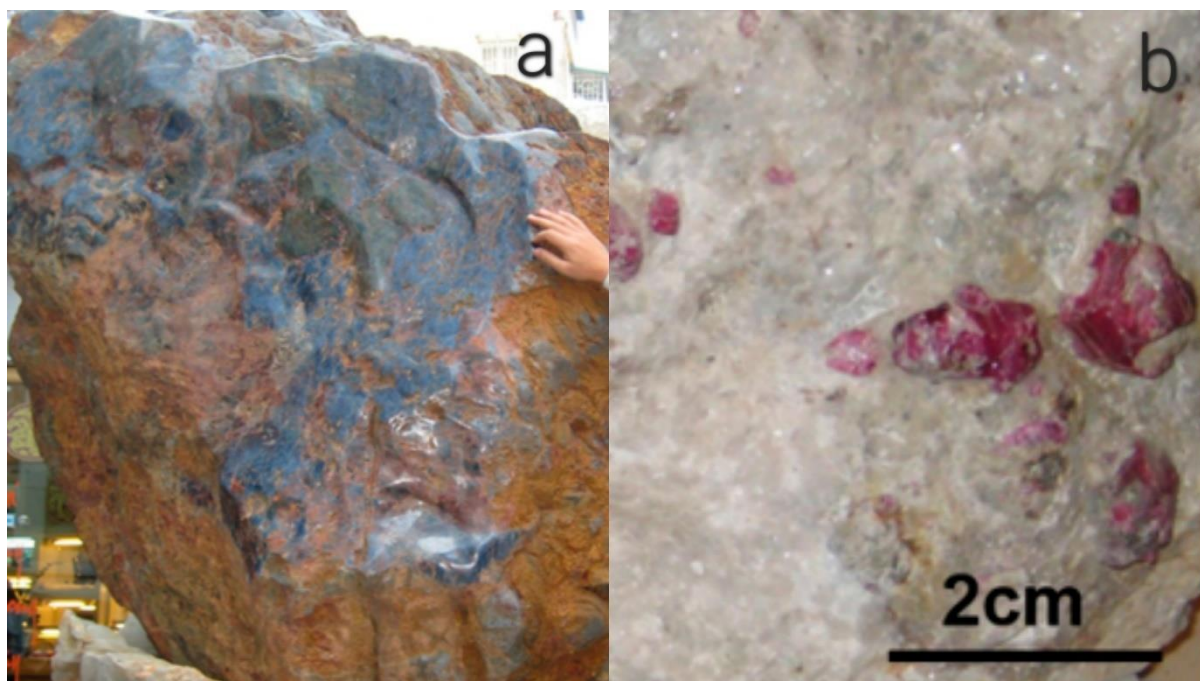
Σχ. 9. Διακριτή χρωματική ζώνωση είναι παρούσα στα περισσότερα από τα δείγματα ρουμπινιών και ζαφειριών από το Νεπάλ. Άχρωμες, κόκκινες/ροζ και σκούρες βιολετί μπλε ζώνες γεμίζουν μεγάλα τμήματα των πολύτιμων λίθων, σε μορφή μπάντας, ή μεγάλες σφηνοειδείς μορφές. Τέτοια χρωματική ζώνωση έδωσε σε πολλούς πολύτιμους λίθους δίχρωμη εμφάνιση (Smith et al., 1997).

10.1.7. Βιετνάμ

Δύο κυρίως τύποι πολύτιμων ποικιλιών κορουνδίου βρέθηκαν στο Βιετνάμ. Ρουμπίνια και ζαφείρια σε μεταμορφωμένα πετρώματα (βόρειο Βιετνάμ) και μπλε, πράσινα, κίτρινα ζαφείρια σε βασάλτες (νότιο Βιετνάμ) (Σχ 10). Πολλοί κρύσταλλοι του κορουνδίου που περιέχονται σε μάρμαρα είναι μπλε χρώματος, έχουν ζώνες και εγκλείσματα ρουτιλίου, ανυδρίτη και αλάτων. Τα σπουδαιότερα ρευστά εγκλείσματα συντίθενται από διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο και ορυκτά της ομάδας του διάσπορου.

Τα ζαφείρια σε κοιτάσματα από βασάλτη χαρακτηρίζονται από εγκλείσματα κολουμβίτη, πυρόχλωρο, βαδελείτη. Τα ιχνοστοιχεία του κορουνδίου επιτρέπουν τη διάκριση ανάμεσα στα ρουμπίνια των μαρμάρων και στα ζαφείρια του βασάλτη και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Η γεωλογική προέλευση των κορουνδίων του Βιετνάμ

μπορεί να προσδιοριστεί από την ισοτοπική σύνθεση του δομικού οξυγόνου (Long et al., 2004).



Σχ. 10. a) Ζαφείρι 12 τόνων από το Βιετνάμ. b) Ρουμπίνια σε μάρμαρο από το Βιετνάμ (Dill, 2018).

10.1.8. Καμπότζη-Ταϊλάνδη

Τα ρουμπίνια στην Ταϊλάνδη και στην Καμπότζη βρίσκονται στην γενική περιοχή των συνόρων ανάμεσα στις δύο χώρες, στην περιοχή Pailin (Καμπότζη) και Chanthaburi-Bo Rai-Trad (Ταϊλάνδη). Τα ρουμπίνια αυτά μαζεύονται για πάνω από 100 χρόνια, όμως η εξόρυξη έγινε πιο έντονη από 1960 έως το 1990. Σήμερα, η παραγωγή έχει μειωθεί κατά πολύ αλλά μικρής κλίμακας εξορύξεις αποκαλύπτουν ρουμπίνια τα οποία βρίσκονται κυρίως στην πλευρά της Καμπότζης. Τα κοιτάσματα πολύτιμων λίθων στα σύνορα Καμπότζης-Ταϊλάνδης σχετίζονται με αλκαλι-βασάλτες. Αυτά τα βασικά πετρώματα σχηματίστηκαν βαθιά μέσα στη γη και συνέλλεξαν το κορούνδιο στην διαδρομή τους προς την επιφάνεια. Τα ρουμπίνια και τα ζαφείρια δεν σχηματίστηκαν σε αυτούς του βασάλτες. Σχεδόν όλη η παραγωγή των ρουμπινιών συλλέγεται από αποθέσεις ποταμών, διότι οι πολύτιμοι λίθοι του κορούνδιου βρίσκονται είτε στην κοκκινωπή λάσπη (κολλουβιακά) είτε σε χαλίκια που συγκεντρώνονται από τη ροή του νερού (αλλουβιακά). Τέλος η παρουσία του νικελίου (Ni) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει αυτούς του πολύτιμους λίθους από άλλα ρουμπίνια με υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο (Fe) (Sangsawong et al., 2017).

10.1.9. Καμπότζη-Αυστραλία

Στην ανατολική Αυστραλία και στη νοτιοανατολική Ασία γίνεται εκμετάλλευση των πλούσιων κοιτασμάτων κορουνδίου από τα βασαλτικά πετρώματα. Υπάρχουν σημαντικά ορυχεία και βιομηχανίες επεξεργασίας και κοπής. Η ανατολική Αυστραλία παράγει ζαφείρια και σπάνια ρουμπίνια ενώ η νοτιοανατολική Ασία παράγει και τα δύο σε αφθονία. Δύο διακριτές συνθέσεις πολύτιμων ποικιλιών κορουνδίου εμφανίζονται σε ελλουβιακές και αλλουβιακές αποθέσεις από το βασάλτη του Barrington στην Νέα Νότια Ουαλία, μια τυπική των ζαφειριών της ανατολικής Αυστραλίας και μια άλλη σχετική με ρουμπίνια.

Στο δυτικό Pailin (Καμπότζη) εμφανίζονται οι πολύτιμες ποικιλίες του κορουνδίου σε ελλουβιακές/κολουβιακές αποθέσεις στο περιθώριο του βασάλτη. Και οι δύο περιοχές δίνουν παρόμοια "μεταμορφικά" κορούνδια (συμπεριλαμβανομένων των ρουμπινιών) και "βασαλτικού" τύπου μπλε κορούνδια. Αυτά αντιπροσωπεύουν διαφορετικές υποκείμενες πηγές (Sutherland, 1998)

10.2. Αφρική

10.2.1. Τανζανία

Η περιοχή Tunduru της Τανζανίας είναι μεγάλη παραγωγός ζαφειριών και ρουμπινιών και άλλων εξωτικών πολύτιμων λίθων. Το Tunduru βρίσκεται στη νοτιοανατολική Τανζανία. Τα κοιτάσματα της ανατολικής Αφρικής είναι αρκετά νέα σε σύγκριση με τα ανατολικά, συγγενικά τους, της Σρι Λάνκα και της Ινδίας. Τα κοιτάσματα στην περιοχή Tunduru βρέθηκαν σχετικά πρόσφατα σε αντίθεση με τα κοιτάσματα της Ασίας που έχουν πιστοποιηθεί από αιώνες ή ακόμη και χιλιετίες. Όλα τα ζαφείρια είναι από αλλουβιακές και ελλουβιακές αποθέσεις και η γεωλογική τους προέλευση μπορεί μόνο να υποτεθεί. Πολλά από τα παραγόμενα ζαφείρια είναι κορυφαίας ποιότητας και χρώματος. Στο μέλλον το Tunduru μπορεί να κατέχει μια ξεχωριστή θέση ανάμεσα στις παγκόσμιες τοποθεσίες παραγωγής ζαφειριών.

Οι πολύτιμοι λίθοι του μπορεί να προέρχονται από μια πηγή που διαβρώθηκε πλήρως για πάνω από εκατομμύρια χρόνια, από κοιτάσματα που δεν έχουν ακόμη ανακαλυφθεί, από γνωστά κοιτάσματα σε άλλες τοποθεσίες σαν προϊόν διάβρωσης και μεταφοράς από το νερό ή από έναν συνδυασμό αυτών. Τα κοιτάσματα κορουνδίου της ανατολικής Αφρικής έχουν πολλές γεωλογικές ομοιότητες με της Μαδαγασκάρης, της νότιας Ινδίας και της Σρι Λάνκα. Τα ζαφείρια είναι μεταμορφωμένα στη φύση τους και πιθανώς μετασωματικά. Τα πιο κοινά εγκλείσματα στα ζαφείρια Tunduru είναι ο φλογοπίτης και ο μοναζίτης. Τα περισσότερα

περιέχουν ρουτίλιο. Επίσης περιέχουν ζirkόνιο το οποίο βρίσκεται και με τη μορφή μεμονωμένων κρυστάλλων, συχνά με άλλα μικρότερα εγκλείσματα μέσα.

Το ζirkόνιο προσφέρει στους γεωλόγους ένα πλήθος πληροφοριών για το κορούνδιο που το φιλοξενεί. Είναι ένα σίγουρο σημάδι της φυσικής του προέλευσης. Επίσης, είναι υψηλής σημασίας διαγνωστικό στοιχείο στον προσδιορισμό της θερμικής επεξεργασίας. Ο φλογοπίτης είναι ένα ορυκτό το οποίο υποδηλώνει την καταγωγή του ζαφειριού από μεταμορφωσιγενείς δράσεις. Μοναζίτης και ύτριο ανήκουν στις σπάνιες γαίες και η ύπαρξή τους φανερώνει την παρουσία λανθανίδων κατά τον σχηματισμό των ζαφειριών (Chitty et al., 2009).

10.2.2. Μαδαγασκάρη

Τα κοιτάσματα κορούνδιου Marosely βρίσκονται στην περιοχή Ranotsara στα κεντρικά και νότια της Μαδαγασκάρης και είναι ελλουβιακά. Τα χρώματα ποικίλουν από το κόκκινο έως το μπλε, συνήθως είναι ζωνώδη, με γενικό χρώμα το μοβ.

Η ποικιλομορφία του γεωλογικού περιβάλλοντος της Μαδαγασκάρης, διαφορετικοί τύποι κορούνδιου και η διαφορετική προέλευση των κοιτασμάτων τους (π.χ. βασालτικοί, skarn, μετασωματικοί) παρουσιάζει ευκαιρίες για τον προσδιορισμό της προέλευσης του κορούνδιου. Οι περισσότεροι κρύσταλλοι από αυτό το κοίτασμα είναι θραύσματα και λίγα μόνο από αυτά είναι καλοσχηματισμένα. Μεταμορφωσιγενή κοιτάσματα κορούνδιου έχουν αναφερθεί στην περιοχή.

Τα υψηλής μεταμόρφωσης κορούνδια του Marosely πιθανόν να έχουν υποστεί σημαντική μεταγενέστερη μετασωματική αλλοίωση. Τα κυριότερα εγκλείσματα είναι το ζirkόνιο, ο μαρμαρυγίας και το ρουτίλιο. Μερικές φορές μπορεί να βρεθεί σιλλιμανίτης, ασβεστίτης, διάσπορο, άστριοι και σπινέλιοι. Τα περισσότερα δείχνουν ανομοιόμορφη χρωματική ζώνη και τα όρια μεταξύ σκοτεινότερων μπλε χρωμάτων και πιο κόκκινο χρωμάτων διαχωρίζουν τις ζώνες ανάπτυξης. Επειδή, όλοι οι λίθοι δεν δείχνουν χρωματική ζώνη, τα περιθώρια των περισσότερων κρυστάλλων είναι πιο κόκκινα από τα κέντρα (Cartier, 2009).

10.2.3. Κένυα

Το κοίτασμα Dusí (Garba Tula) στην κεντρική Κένυα ανακαλύφθηκε από νομάδες στη δεκαετία του 1960. Το κοίτασμα είναι ένα περίπου κατακόρυφο ανάχωμα, αρκετά μέτρα παχύ, με μια πιθανή οριζόντια προέκταση αρκετών χιλιομέτρων. Είναι σε επαφή με βιοτιτικό-κεροσιλβικό γνεύσιο. Το ανάχωμα καλείται λευκοκρατικός μονζονίτης και

αποτελείται από μικροκλινή και αλβίτη σε ίσα ποσοστά, βιοτίτη, ζirkόνιο και μαγνητίτη. Η μέθοδος γεωχρονολόγησης ουρανίου-μολύβδου (U-Pb) στους κρυστάλλους του ζirkονίου δείχνει χρονολογία κρυστάλλωσης του αναχώματος 580Ma, η οποία ανταποκρίνεται σε ένα από τα τεκτονικά συμβάντα της μεταμορφικής ζώνης της Μοζαμβίκης. Τα ισότοπα στροντίου (Sr) νεοδυμίου (Nd) δείχνουν ότι ο μονζονίτης προέρχεται από το μανδύα, με μικρή ή καθόλου συμμετοχή κρυσταλλικών συστατικών. Οι πολύτιμοι λίθοι έχουν ένα χρώμα που κυμαίνεται από το βαθύ μπλε έως το χρυσαφί κίτρινο, με όλες τις αποχρώσεις του μπλε, πράσινου και κίτρινου (Giuliani et al., 2014).

10.3. Αμερική

10.3.1. Η.Π.Α.

Ζαφείρια είχαν ανακαλυφθεί στη Μοντάνα των Η.Π.Α. από το 1894. Τα ζαφείρια φιλοξενούνται από έναν Ηωκαινικό υπερβασικό λαμπροφύρη με μορφή διεισδύσεων και από υδροθερμικά λατυποπαγή,. Ο λαμπροφύρης διεισδύει σε ασβεστόλιθους και σχιστόλιθους. Τα ζαφείρια είναι διάσημα για το μπλε (κυανό) χρωματισμό τους, τη σπανιότητα των εγκλεισμάτων τους, τις ζώνες και τη λαμπρότητα τους κάτω από τεχνητό και φυσικό φως (Giuliani et al., 2014).

10.3.2. Κολομβία (Mercaderes, Rio Mayo)

Τα εγκλείσματα των αλλουβιακών κορουνδίων (99% ζαφείρια, 1% ρουμπίνια) και των μεγακρυστάλλων ζirkονίου από την περιοχή Rio Mayo μελετήθηκαν με την μέθοδο χρονολόγησης U-Pb. Επειδή οι κρύσταλλοι ζirkονίου ήταν νεαρής ηλικίας και χαμηλής περιεκτικότητας σε U τα αποτελέσματα από τα ζirkόνια ήθελαν στατιστική επεξεργασία. Τα αποτελέσματα από τα εγκλείσματα ζirkονίου, φθοριούχου απατίτη και αλλανίτη έδειξαν ηλικία κρυστάλλωσης του κορουνδίου 8-11Ma που σχετίζεται με την ανύψωση και τον μαγματισμό των βόρειων Άνδεων στο Μειόκαινο.

Οι μεγακρύσταλλοι του ζirkονίου έδειξαν μια νεότερη ηλικία κρυστάλλωσης 0,6 Ma που δεν σχετίζεται με τη γένεση του κορουνδίου. Γεωχημικές παράμετροι υποδηλώνουν μεταμορφική/μετασωματική προέλευση του κορουνδίου. Ο αλλανίτης, εξαιρετικά σπάνιος σαν εγκλείσμα σε κορούνδια άλλων περιοχών είναι χαρακτηριστικό για τα κορούνδια του Rio Mayo (Sutherland et al., 2008).

10.3.3. Κολομβία (Mercaderes, Cauca)

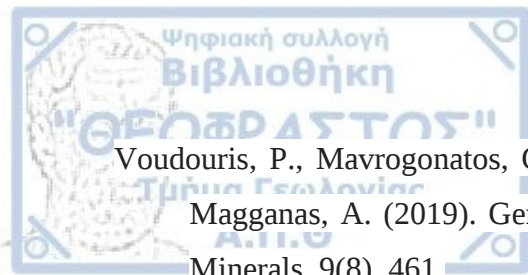
Σε έρευνα με σκοπό την αναγνώριση εγκλεισμάτων μέσα σε κορούνδια από το Mercaderes, Cauca, Colombia βρέθηκαν κυρίως ζirkόνια και δεύτερον, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον χαρακτηρισμό της δομικής κατάστασης (δηλαδή βαθμός βλάβης από την ακτινοβολία) των εγκλεισμάτων ζirkονίου και πιθανές επιπτώσεις του στρες στα δείγματα (Zeug et al., 2017).

Η έρευνα έγινε σε κορούνδια από αλλούβια άμμο με χρώμα από γκρι έως ανοιχτό μπλε. Τα περισσότερα από αυτά περιέχουν εγκλείσματα που φαίνονται με γυμνό μάτι ενώ εμφανίζουν χαρακτηριστικά μηχανικής τριβής και διάβρωσης στην επιφάνεια τους το οποίο ήταν ο λόγος που χάθηκε η διαφάνεια τους. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εμφανίζονται λόγω της μεταφοράς των κορουνδίων μέσα στο ποτάμι.

Ακόμη βρέθηκαν πλούσια σε ρευστά εγκλείσματα ενώ από στερεά τα πιο συχνά είναι το ζirkόνιο και το ρουτίλιο και λιγότερο συχνή είναι η εμφάνιση απατίτη, αστρίου και ορυκτά από την ομάδα του επιδότου. Τέλος, βρέθηκε ότι σε δείγματα με εγκλείσματα ζirkονίου θα πρέπει να αποφευχθεί η θερμική επεξεργασία, διότι οι κρύσταλλοι ζirkονίου, λόγω ραδιενέργειας, μπορούν να επιφέρουν προβλήματα στο κρύσταλλο του κορουνδίου (Zeug et al., 2017).

- Atkinson, D., & Kothavala, R. Z. (1983). Kashmir sapphire. *Gems and Gemology*, 19(2), 64-76.
- Cartier, L. (2009). Ruby and sapphire from Marosely, Madagascar. *Journal of Gemmology*, 31, 171-180.
- Chitty, W. (2009). A study of sapphires and rubies from Tanzania's Tunduru district (Doctoral dissertation, Kingston University, London).
- Dill, H. G. (2018). Gems and placers—A genetic relationship par excellence. *Minerals*, 8(10), 470.
- Dobrovinskaya, E. R., Lytvynov, L. A., & Pishchik, V. (2009). Sapphire: material, manufacturing, applications. Springer Science & Business Media.
- Emmett, J. L., Scarratt, K., McClure, S. F., Moses, T., Douthit, T. R., Hughes, R.,... & Kane, R. E. (2003). Beryllium diffusion of ruby and sapphire. *Gems & Gemology*, 39(2), 84-135.
- Garnier, V., Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Fallick, A. E., Dubessy, J., Banks, D.,... & Schwarz, D. (2008). Marble-hosted ruby deposits from Central and Southeast Asia: Towards a new genetic model. *Ore Geology Reviews*, 34(1-2), 169-191.
- Giuliani, G., Groat, L. A., Fallick, A. E., Pignatelli, I., & Pardieu, V. (2020). Ruby deposits: A review and geological classification. *Minerals*, 10(7), 597.
- Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Fallick, A. E., Groat, L., & Fagan, A. J. (2014). The geology and genesis of gem corundum deposits.
- Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Fallick, A. E., Groat, L., & Feneyrol, J. (2012). Geographic origin of gems linked to their geological history. In *Color*, 19, 16-27.
- Hecht, J. (2010). Short history of laser development. *Optical engineering*, 49(9), 091002-091002.
- Karantoni, V., Karampelas, S., Voudouris, P., Melfos, V., Papadopoulou, L., Soldatos, T., & Mavrogonatos, C. (2021). Spectroscopy and Microscopy of Corundum from Primary Deposits Found in Greece. *Minerals*, 11(7), 750.
- Krebs, M. Y., Hardman, M. F., Pearson, D. G., Luo, Y., Fagan, A. J., & Sarkar, C. (2020). An evaluation of the potential for determination of the geographic origin of ruby and sapphire using an expanded trace element suite plus Sr–Pb isotope compositions. *Minerals*, 10(5), 447.

- Kumar, S. S., & Swamy, S. N. (2017). Mineralogical investigations on corundum from Hunsur area of Mysore district, Karnataka, India. *Journal of Atoms and Molecules*, 7(4), 1076.
- Palke, A. C. (2020). Coexisting rubies and blue sapphires from major world deposits: A brief review of their mineralogical properties. *Minerals*, 10(5), 472.
- Phan, T. M. D. (2015). Internal characteristics, chemical compounds and spectroscopy of sapphire as single crystals (Doctoral dissertation).
- Rakotondrazafy, A. F. M., Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Fallick, A. E., Rakotosamizany, S., Andriamamonjy, A.,... & Ratrimo, V. (2008). Gem corundum deposits of Madagascar: A review. *Ore Geology Reviews*, 34(1-2), 134-154.
- Sangsawong, S., Vertriest, W., Saeseaw, S., Pardieu, V., Muyal, J., Khowpong, C.,... & Weeramonkhonlert, V. (2017). A study of rubies from Cambodia and Thailand. *GIA Research News*.
- Schwarz, D., Pardieu, V., Saul, J. M., Schmetzer, K., Laurs, B. M., Giuliani, G.,... & Ohnenstetter, D. (2008). Rubies and sapphires from Winza, central Tanzania. *Gems & Gemology*, 44(4), 322-347.
- Simonet, C., Fritsch, E., & Lasnier, B. (2008). A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. *Ore Geology Reviews*, 34(1-2), 127-133.
- Smith, C. P. (1998). Rubies and pink sapphires from the Pamir Mountain Range in Tajikistan, former USSR. *Gemmology*, 104.
- Smith, C. P., Gübelin, E. J., Bassett, A. M., & Manandhar, M. N. (1997). Rubies and fancy-color sapphires from Nepal. *Gems & Gemology*, 33(1), 24-41.
- Sutherland, F. L., Duroc-Danner, J. M., & Meffre, S. (2008). Age and origin of gem corundum and zircon megacrysts from the Mercaderes–Rio Mayo area, South-west Colombia, South America. *Ore Geology Reviews*, 34(1-2), 155-168.
- Sutherland, F. L., Schwarz, D., Jobbins, E. A., Coenraads, R. R., & Webb, G. (1998). Distinctive gem corundum suites from discrete basalt fields: a comparative study of Barrington, Australia, and West Pailin, Cambodia, gemfields. *Gemmology*, 66.
- Van Long, P., Quang Vinh, H., Garnier, V., Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Lhomme, T.,... & Trong Trinh, P. (2004). Gem corundum deposits in Vietnam. *Journal of Gemmology*, 29(3), 129-147.
- Voudouris, P., Mavrogonatos, C., Graham, I., Giuliani, G., Melfos, V., Karampelas, S.,... & Lampridis, A. (2019). Gem corundum deposits of Greece: Geology, mineralogy and genesis. *Minerals*, 9(1), 49.



Voudouris, P., Mavrogonatos, C., Graham, I., Giuliani, G., Tarantola, A., Melfos, V.,... & Magganas, A. (2019). Gemstones of Greece: geology and crystallizing environments. *Minerals*, 9(8), 461.

Wang, K. K., Graham, I. T., Lay, A., Harris, S. J., Cohen, D. R., Voudouris, P.,... & Greig, A. (2017). The origin of a new pargasite-schist hosted ruby deposit from Paranesti, Northern Greece. *The Canadian Mineralogist*, 55(4), 535-560.

Wang, K. K., Graham, I. T., Martin, L., Voudouris, P., Giuliani, G., Lay, A.,... & Fallick, A. (2019). Fingerprinting Paranesti rubies through oxygen isotopes. *Minerals*, 9(2), 91.

Yui, T. F., Zaw, K., & Wu, C. M. (2008). A preliminary stable isotope study on Mogok Ruby, Myanmar. *Ore Geology Reviews*, 34(1-2), 192-199.

Zeug, M., Rodríguez Vargas, A. I., & Nasdala, L. (2017). Spectroscopic study of inclusions in gem corundum from Mercaderes, Cauca, Colombia. *Physics and Chemistry of Minerals*, 44, 221-233.