



Διπλωματική Εργασία

Περιγραφή των μεταλλοφοριών της Αττικοκυκλαδικής μάζας με έμφαση στα κρίσιμα μέταλλα

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Παναγιώτης Βουδούρης

Ονοματεπώνυμο: Παναγιώτης Τσαλκικζής

AM:1114201200094

Αθήνα, 2024

Περίληψη

Η πτυχιακή αυτή πραγματεύεται την εμφάνιση κρίσιμων μετάλλων εντός της Αττικοκυκλαδικής μάζας. Κρίσιμα μέταλλα θεωρούνται τα μέταλλα τα οποία βρίσκονται περιορισμένα στην αγορά ενώ είναι απαραίτητα για σημαντικές τεχνολογικές ανάγκες. Στον Ελλαδικό χώρο έχουν αποτυπωθεί διάφορες ενδιαφέρουσες εμφανίσεις μετάλλων/μεταλλοειδών, όπως είναι το αντιμόνιο, το κοβάλτιο, το τελλούριο, η σπάνιες γαίες κλπ., οι οποίες όμως βρίσκονται σε ένα αρχικό στάδιο και κρίνεται η περαιτέρω έρευνά τους για τον προσδιορισμό τους ως προς την περιεκτικότητα και ως προς την έκταση που καλύπτουν.

Η Αττικοκυκλαδική μάζα παρουσιάζει εξαιρετικά ενδιαφέρουσα γεωλογία από την οποία αντιλαμβανόμαστε ότι έχουν διενεργηθεί διάφορα τεκτονικά καθεστώτα σε αυτήν. Η ιδιαιτερότητά της αυτή δημιούργησε μία αφθονία πετρωμάτων, στα οποία μπορούν να βρεθούν πολλά σπάνια και κρίσιμα μέταλλα. Έχουν γίνει κάποιες έρευνες ώστε να γίνει ο εντοπισμός τους, τόσο σε περιεκτικότητα, όσο και σε έκταση των εμφανίσεων αυτών.

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή αναφέρεται εκτενώς η Λαυρεωτική μάζα, η οποία περιέχει τα μέταλλα τελλούριο, ρήνιο, μολυβδαίνιο, γάλλιο, γερμάνιο, ίνδιο, χαλκός, βολφράμιο, σπάνιες γαίες, βισμούθιο, χρυσός κ.α. Εκτός από την Αττική, γίνεται λεπτομερής αναφορά και στα νησιά Μήλος και Εύβοια, στα οποία παρατηρούνται τα μέταλλα: αντιμόνιο, τελλούριο, μολυβδαίνιο, χαλκός, κ.α. Τέλος, θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί η Εύβοια, στην οποία περιέχονται τα μέταλλα: τελλούριο, άργυρος, χαλκός, σίδηρος, μόλυβδος, χρυσός κ.α.

Το σίγουρο είναι ότι κρίνεται αναγκαίο να γίνουν περαιτέρω έρευνες ώστε να ανακαλυφθούν οι πραγματικές περιεκτικότητες των κρίσιμων μετάλλων εντός των μεταλλοφοριών για να προσδιοριστούν στο εάν θα είναι ικανοποιητικά αποτελέσματα ώστε να ξεκινήσουν οι απαραίτητες εξορύξεις.

Abstract

The current thesis deals with the occurrence of critical metals within the Cycladic Massif. Critical metals are considered metals which are limited in the market while they are necessary for important technological needs. Various interesting occurrences of metals/metalloids, such as antimony, cobalt, tellurium, rare earth elements etc., have been recorded in Greece, however they are at an initial stage and their further research is vital to determine their composition and expansion in the formations.

The Atticocycladic massif presents an interesting geology with various tectonic history. This distinctive characteristic created an abundance of rocks, in which many rare and critical metals can be found. There are a few research over the years in order to identify the critical metals, both in terms of content and extent.

In the current thesis the most extensively mentioned area of study is the Laureotic mass, which contains the metals tellurium, rhenium, molybdenum, gallium, germanium, indium, copper, tungsten, rare earths, bismuth, gold, etc. Apart from Attica, there's a detailed mention on the islands of Milos and Evia, especially for the metals: antimony, tellurium, molybdenum, copper, etc. Last but not least, there is a remarkable mentioning in Evia, which contains the metals: tellurium, silver, copper, iron, lead, gold, etc.

It is necessary, without a doubt, to continue researching about these critical metals in order to discover the real contents of them within the mineralization in order to determine if the results will be sufficient enough to start the necessary mining.

Περιεχόμενα

Περίληψη	0
Abstract.....	2
Πρόλογος.....	4
1. Εισαγωγή	5
2. Κρίσιμα μέταλλα	6
3. Κρίσιμα μέταλλα στον Ελληνικό χώρο	9
3.1 Αντιμόνιο	12
3.2 Κοβάλτιο.....	13
3.3 Τελλούριο.....	14
3.4 Ρήνιο και Μολυβδαίνιο	16
3.5 Γάλλιο, Γερμάνιο και Ίνδιο	18
3.6 Βολφράμιο	19
3.7 Σπάνιες Γαίες.....	21
3.8 Μέταλλα ομάδας λευκόχρυσου ή πλατίνας	24
3.9 Ουράνιο.....	26
4. Αττικοκυκλαδική μάζα	28
4.1 Γεωλογία Ελλάδος.....	28
4.2 Γεωλογία Αττικοκυκλαδικής μάζας.....	31
5. Κρίσιμα μέταλλα στην Αττικοκυκλαδική ζώνη.....	35
5.1 Κρίσιμα μέταλλα στη Λαυρεωτική.....	35
5.2 Κρίσιμα μέταλλα στη Μήλο	37
Κρίσιμα μέταλλα στη Σέριφο	41
Συμπεράσματα.....	49
Βιβλιογραφία	1
Ελληνική Βιβλιογραφία	1
Βιβλιογραφία από ιστοσελίδες	17

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Περιγραφή των μεταλλοφοριών της Αττικοκυκλαδικής μάζας με έμφαση στα κρίσιμα μέταλλα» πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αθηνών. Η παρούσα μελέτη τοποθετείται στην Αττικοκυκλαδική μάζα, όπου αναλύονται εκτενώς τα ορυκτά και τα μέταλλα τα οποία σύμφωνα με το συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης τον Νοέμβριο του 2023 είναι κρίσιμα και μπορούν να βρεθούν μέσα σε μεταλλοφορίες της μάζας αυτής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, τον κύριο Παναγιώτη Βουδούρη, καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ο οποίος μου παρείχε την ευκαιρία να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου πάνω στα κρίσιμα ορυκτά της Αττικοκυκλαδικής μάζας δίνοντάς μου όποτε χρειάζεται την απαραίτητη επιστημονική καθοδήγηση με εξαιρετική διάθεση και μεταδοτικότητα.

Τέλος, θα ήθελα να δώσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου, οι οποίοι με στηρίζουν και με βοηθούν σε κάθε μου βήμα.

1. Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι τα ορυκτά παίζουν σημαντικό ρόλο στη ζωή των ανθρώπων, αφού σχετίζονται άμεσα με την οικονομική ευημερία τους και τη βελτίωση του επιπέδου διαβίωσής τους. Κάποια ορυκτά είναι σημαντικότερα για τη βιομηχανική παραγωγή, τις υποδομές και τις τεχνολογικές συσκευές και χρησιμοποιούνται κατά κόρον με αποτέλεσμα να είναι πιο εντατική η κατανάλωσή τους συγκριτικά με άλλα.

Ο Ελληνικός χώρος είναι γεμάτος από ιδιαίτερες γεωλογικές δομές και μέσα σε αυτές βρίσκονται μεταλλοφορίες οι οποίες δίνουν πολύ χρήσιμα ορυκτά για τη βιομηχανία. Πιθανολογείται ότι υπάρχουν αρκετές εμφανίσεις που μπορούν να γίνουν πηγή εκμετάλλευσης ώστε να προμηθεύσουν τη βιομηχανία της Ευρωπαϊκής Ένωσης με κρίσιμα μέταλλα υψηλής τεχνολογίας.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται λόγος για τις μεταλλοφορίες που βρίσκονται στην Αττικοκυκλαδική μάζα και ιδιαίτερα στα κρίσιμα μέταλλα που βρίσκονται σε αυτές. Αναφέρεται η γεωγραφική τοποθέτηση της Αττικοκυκλαδικής μάζας στο παρόν και το παρελθόν, η γεωλογική της ταυτότητα και φυσικά γίνεται η ανίχνευση των πολυπόθητων κρίσιμων ορυκτών μέσα από εργασίες άλλων επιστημόνων.

2. Κρίσιμα μέταλλα

Χρόνο με τον χρόνο η τεχνολογία εξελίσσεται και δημιουργεί επιθυμία για καινούρια καινοτόμα προϊόντα, όπως είναι οι ηλεκτρονικές συσκευές και η παραγωγή ενέργειας. Η δημιουργία των προϊόντων αυτών όμως χρειάζεται κάποιες πρώτες ύλες, διαφορετικές σε μορφή και όγκο απ'ότι ήταν αναγκαίες στο παρελθόν. Κάποιες περιοχές μπορούν να θεωρηθούν κοιτασματολογικά ευνοημένες, διότι έχουν πληθώρα των αναγκαίων αυτών ορυκτών, ενώ άλλες είναι λιγότερο «τυχερές» και εξαρτώνται από τις ευνοημένες περιοχές για να τις τροφοδοτήσουν με ορυκτά ώστε να καταφέρουν να παράξουν τα αντίστοιχα προϊόντα. Όταν λοιπόν τα ορυκτά και τα μέταλλα είναι δυσεύρετα επειδή η διάθεσή τους στην αγορά είναι σημαντικά περιορισμένη, ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη η παρουσία τους λόγω των τεχνολογικών αναγκών ονομάζονται «κρίσιμα».

Όπως είναι λογικό, σε κάθε περιοχή το ίδιο ορυκτό μπορεί να παρουσιάσει διαφορετικό βαθμό κρισιμότητας, μιας και αυτό εξαρτάται από τους γεωλογικούς της παράγοντες, της τεχνολογικής της εξέλιξης, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω της παραγωγής και της κατανάλωσης, την αντικατάσταση των ζητούμενων ορυκτών με αντίστοιχα που βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία κλπ. Επιπλέον, μπορεί το ίδιο ορυκτό να παρουσιάσει διαφορετικό βαθμό κρισιμότητας και όσον αφορά τον χρήστη (π.χ. στη βιομηχανία παραγωγής υβριδικών αυτοκινήτων είναι κρίσιμο μέταλλο το νεοδύμιο, ενώ αντίθετα ο χρυσός δεν είναι) (orykta.gr).

Πίνακας 1: Τα κρίσιμα μέταλλα και ορυκτά για την Ευρωπαϊκή Ένωση (Νοέμβριος 2023) (orykta.gr)

Τα κρίσιμα μέταλλα και ορυκτά για την Ευρωπαϊκή Ένωση (Νοέμβριος 2023)			
Αντιμόνιο	Κοβάλτιο	Χάφνιο	Νιόβιο
Αρσενικό	Οππίσιμος (Μεταλλουργικός) γαιάνθρακας [Coking coal]	Ηλιο	Νικέλιο (battery grade)
Βωξίτης/ Αλούμινα/ Αλουμίνιο	Χαλκός	- Βαριές σπάνιες γαίες (Heavy Rare Earth Elements) - Ελαφρές σπάνιες γαίες (Light Rare Earth Elements) κα	Μέταλλα Ομάδας Λευκοχρύσου (PGM)
Βαρίτης	Άστριοι	Λίθιο	Φωσφορίτης
Βηρύλλιο	Φθορίτης	Μαγνήσιο	Φωσφόρος
Βισμούθιο	Γάλλιο	Μαγγάνιο	Τιτάνιο
Βόριο	Γερμάνιο	Γραφίτης	Ταντάλιο
Σκάνδιο	Μεταλλικό πυρίτιο	Στρόντιο	Βολφράμιο

Τα μέταλλα και ορυκτά τα οποία έχουν κατηγοριοποιηθεί ως κρίσιμα για την Ευρωπαϊκή ένωση τον Νοέμβριο του 2023, με τα αντίστοιχα χημικά στοιχεία που επικρατούν στη χημική τους σύνθεση, είναι τα εξής (Πίνακας 1): Αντιμόνιο (Sb), Αρσενικό (As), Βωξίτης/Αλούμινα/Αλουμίνιο (Al), Βαρίτης (Ba), Βηρύλλιο (Be), Βισμούθιο (Bi), Βόριο (B), Σκάνδιο (Sc), Κοβάλτιο (Co), Οππίσιμος (Μεταλλουργικός) γαιάνθρακας (Coking coal) (C), Χαλκός (Cu), Άστριοι ($KAlSi_3O_8$, $NaAlSi_3O_8$, $CaAl_2Si_2O_8$), Φθορίτης (CaF_2), Γάλλιο (Ga), Γερμάνιο (Ge), Μεταλλικό πυρίτιο (Si), Χάφνιο (Hf), Ηλιο (He), Βαριές σπάνιες γαίες (Heavy Rare Earth Elements - HREE), Ελαφρές σπάνιες γαίες (Light Rare Earth Elements - LREE), Λίθιο (Li), Μαγνήσιο (Mg), Μαγγάνιο (Mn), Γραφίτης (C), Στρόντιο (Sr), Νιόβιο (Nb), Νικέλιο (Ni), Μέταλλα Ομάδας Λευκοχρύσου (PGM), Φωσφορίτης (P), Φωσφόρος (P), Τιτάνιο (Ti), Ταντάλιο (Ta) και Βολφράμιο (W). Τα βασικά χημικά στοιχεία τους διακρίνονται στην Εικόνα 1. Με πράσινο χρώμα διακρίνονται τα μέταλλα της ομάδας λευκόχρυσου (PGM), με γκρι οι βαριές σπάνιες γαίες (HREE) και με σκούρο μπλε οι ελαφρές σπάνιες γαίες (LREE).

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VIII B			IB	IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	
Lanthanides series		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Actinides series		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Εικόνα 1: Τα χημικά στοιχεία των κρίσιμων μετάλλων, όπου με πράσινο χρώμα διακρίνονται τα μέταλλα της ομάδας λευκόχρυσου (PGM), με γκρι οι βαριές σπάνιες γαίες (HREE) και με σκούρο μπλε οι ελαφρές σπάνιες γαίες (LREE), τροποποιημένο από dreamstime.com

Οι βασικοί παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν την κρίσιμότητα ενός υλικού για την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι:

1. **Η οικονομική σημασία** για θεμελιώδεις τομείς της ευρωπαϊκής οικονομίας, όπως είναι τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, οι περιβαλλοντικές τεχνολογίες, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η άμυνα, η υγεία και ο χάλυβας.
2. **Ο υψηλός κίνδυνος προσφοράς-ζήτησης**, λόγω της πολύ μεγάλης εξάρτησης από τις εισαγωγές και του υψηλού επιπέδου συγκέντρωσης καθορισμένων κρίσιμων πρώτων υλών σε συγκεκριμένες χώρες
3. **Η έλλειψη (βιώσιμων) υποκατάστατων**, λόγω των πολύ μοναδικών και αξιόπιστων ιδιοτήτων αυτών των υλικών για υπάρχουσες, καθώς και μελλοντικές εφαρμογές (crmalliance.eu)

Τα μαγματικά-υδροθερμικά συστήματα σε ζώνες υποβύθισης συμβάλλουν σημαντικά στην παγκόσμια παροχή κρίσιμων μετάλλων, όπως Χαλκός (Cu), χρυσός (Au), μόλυβδος (Pb), ψευδάργυρος (Zn), άργυρος (Ag) και μολυβδαίνιο (Mo) (Hedenquist and Lowenstern 1994). Επιπλέον, επιθερμικές και ηφαιστειογενείς σουλφιδικές αποθέσεις στον εξωτερικό φλοιό, οι οποίες συνδέονται με το ηφαιστειακό τόξο και με υβριδικά καθεστώτα κρυσταλλοποίησης, εμφανίζουν σημαντικό εμπλουτισμό μετάλλων και μεταλλοειδών με πτητική συγγένεια, όπως Αρσενικό (As), Αντιμόνιο (Sb), Θάλιο (Tl), Τελλούριο (Te) , Βισμούθιο (Bi), Υδράργυρος (Hg) και Σελήνιο (Se) (Saunders and Brueseke 2012; Goldfarb et al. 2016).

3. Κρίσιμα μέταλλα στον Ελληνικό χώρο

Η Ελλάδα ανήκει στην κατηγορία των σημαντικότερων μεταλλογενετικών περιοχών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Έχει μεγάλο αριθμό κοιτασμάτων από τα οποία μπορούν να εξαχθούν σπάνια και κρίσιμα μέταλλα χρήσιμα για την υψηλή τεχνολογία, το οποίο την καθιστά έναν δυνητικά καλό προμηθευτή για την ευρωπαϊκή βιομηχανία (Πίνακας 2). Όπως είναι γνωστό, η Ευρωπαϊκή Ένωση (αλλά και η διεθνής κοινότητα) έχει μεγάλες ανάγκες στα μέταλλα που μπορεί να παρέχει η Ελλάδα. Επομένως είναι εμφανής η ανάγκη για επιπλέον έρευνα στην περιοχή ώστε να βρεθούν οι ιδανικές κρίσιμες πρώτες ύλες. Οι πρώιμες έρευνες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια φαίνεται να δίνουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την παρουσία των κρίσιμων μετάλλων. Κάποια παραδείγματα αποτελούν τα: Αντιμόνιο (Sb), Κοβάλτιο (Co), Τελλούριο (Te), Ρήνιο (Re), Μολυβδαίνιο (Mo), Γάλλιο (Ga), Γερμάνιο (Ge), Ίνδιο (In), Σπάνιες γαίες (REE), Μέταλλα της ομάδας της Πλατίνας (PGM) και Ουράνιο (U) (Melfos and Voudouris 2012, Tsirambides and Filippidis 2012a, b, c, Voudouris et al. 2018, Stergiou 2021). Αυτά βέβαια αποτελούν μόνο ενδείξεις, γι' αυτό είναι σημαντικό να γίνουν επενδύσεις για εντατική έρευνα για τα μεταλλεύματα ώστε να φανεί η πραγματική ποσότητα των μετάλλων αυτών και εάν είναι ικανή για να είναι εκμεταλλεύσιμη (Μέλφος & Βουδούρης, 2022)

Παρακάτω αναφέρονται μερικά κρίσιμα μέταλλα που εντοπίζονται στον Ελληνικό χώρο. Θα αναφερθούν συγκεκριμένα λίγα πράγματα για τη χρησιμότητά τους, σε ποιες χώρες

εντοπίζονται ως μεταλλεύματα, με ποιον τρόπο βρίσκονται οι εμφανίσεις τους στη φύση και σε ποια μέρη στον Ελληνικό χώρο συναντώνται (Μέλφος & Βουδούρης, 2022):

Πίνακας 2: Κατανομή των κρίσιμων και σπάνιων μετάλλων υψηλής τεχνολογίας στους διάφορους τύπους κοιτασμάτων της Ελλάδας (τροποποιημένο από Melfos and Voudouris 2012).

Τύπος κοιτάσματος	Περιοχή	Τοποθεσία	Κύρια μέταλλα	Κρίσιμα και σπάνια μέταλλα
Ορθομαγματικά κοιτάσματα Cr-(±PGM)	Βέρμιο	Γάλακτος	Cr	PGM (Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd)
		Κορυδαλλός	Cr	PGM (Pt, Pd, Ru, Rh)
	Πίνδος	Μηλιά	Cr	PGM (Os, Ir, Ru)
		Χαλκιδική	Βάβδος-Γερακινή	Cr
Ηφαιστειογενή κοιτάσματα συμπλεγών σουλφιδίων	Πίνδος	Περιβόλι	Fe, Cu	Co
		Άγιοι Θεόδωροι	Fe, Cu, Ni, Co	Co
	Όθρυς	Λιμογάρδι	Fe, Cu, Ni, Co	Co
Κοιτάσματα που φιλοξενούνται σε μαγματικές διεισδύσεις	Κιλκίς	Πηγή Αξιούπολης	-	Mo, W, U
	Θράκη	Κιμμέρια/Ξάνθη	Fe, Cu, Bi	Mo, W
	Καβάλα-Δράμα	Παγγαίο	Au, Bi	Te, W
	Δράμα	Παρανέστι	-	U
	Καστοριά	Οξιά	-	U, Th
Κοιτάσματα από αντικατάσταση	Αττική	Μαύρες Πέτρες	Pb, Zn, Ag	Te, Ga
		Καμάρια/Λαύριο	Pb, Zn, Ag, Au	Ga, In, Ge
Πορφυριτικά κοιτάσματα	Θράκη	Παγώνη Ράχη	Cu, Au	Te, Re, Mo
		Κορυφές	Cu, Au, Mo	Te, Re
		Κόνος	Cu, Au	Te, Re, Mo
		Μαρώνεια	Cu, Au	Re, Mo
		Μύλοι/Αισύμη	Cu, Au	Re, Mo
		Μελίταινα	Cu	Re, Mo
	Χαλκιδική	Σκουριές	Cu, Au	Te, Mo, PGM (Pd, Pt)
	Κιλκίς	Γερακαριό	Cu, Au	Sb
		Βάθη	Cu, Au, Mo	Te, Co, W, REE (La, Ce, Pr, Nd), U
	Λήμνος	Φακός	Cu	Te
Αττική	Πλάκα/Λαύριο	-	Mo, W, REE	
Επιθερμικά κοιτάσματα	Θράκη	Λόφος Περάματος	Cu, As, Au, Bi	Te
		Μαυροκορυφή	Cu, Sb, Ag, Au	Te
		Άγιος Δημήτριος	Cu, As, Au, Ag	Te
		Αγία Βαρβάρα	Cu, Au, Ag	Te
		Άγιος Φίλιππος	Pb, As, Cu, Ag, Bi	In, Ga, Ge, U
		Πεύκα	Cu, As, Ag, Au	Te, In, Ga, Ge
		Καλλοντήρι	Pb, Zn, Cu, Au, Ag	Sb
	Αιγαίο	Τήνος	Cu, Pb, Au, Ag	Te
		Χίος	-	Sb
		Σάμος	-	Sb
Φλεβικά κοιτάσματα σε μεταμορφωμένα πετρώματα	Χαλκιδική	Στανός	Cu, Au, Bi	Te, Mo
	Λαχανάς	Ριζανά	-	Sb, W
	Κιλκίς	Λαοδικηνό		REE (La, Ce, Nd, Sm, Dy)
	Θεσσαλονίκη	Φιλαδέλφειο	Au	Sb
	Εύβοια	Καλλιανοί	Au, Ag	Te
Λατεριτικά κοιτάσματα Ni-Fe	Λοκρίδα	Άγιος Ιωάννης	Ni, Fe	Co
	Εύβοια	Κεντρική	Ni, Fe	Co
	Καστοριά	Ιεροπηγή	Ni, Fe	Co
Κοιτάσματα βωξίτη	Παρνασσός-Γκιώνα		Al	Co, REE, Sc
Προσχωματικά και ιζηματογενή κοιτάσματα	Βόρειο Αιγαίο	Παράκτια ζώνη	-	REE (Ce, La, Nd), U
	Αλιάκμονας		Au	PGM (Os, Ir, Ru, Rh, Pt)
	Ημαθία	Βεγόρα	P	Ga
	Ιωάννινα		P	U

3.1 Αντιμόνιο

Το Αντιμόνιο (Sb) είναι ένα σημαντικό στοιχείο στη βιομηχανική παραγωγή. Το βασικό ορυκτό που συναντάται είναι ο αντιμονίτης (stibnite - Sb_2S_3). Βρίσκεται συνήθως σε κράματα μαζί με άλλα μέταλλα σαν τον μόλυβδο, ο οποίος δημιουργεί μία αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων και κυρίως τη σκληρότητα του αντιμονίου.

Οι ιδιότητες του αντιμονίου είναι σημαντικές στις εξής εφαρμογές:

- Δίοδοι και ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας με σκοπό την κατασκευή ημιαγωγών.
- Μπαταρίες
- Χρωστικές και χρώματα
- Κεραμικά υλικά
- Γυαλί
- Αγγεία κ.ο.κ.
- Επιβραδυντικό φλόγας
- Κόλλες
- Καουτσούκ
- Υφάσματα

Η εξόρυξη αντιμονίτη σε παγκόσμιο επίπεδο γίνεται κατά κύριο λόγο στην Κίνα, αλλά σημαντικές πηγές είναι και η Νότιος Αφρική, η Βολιβία και το Τατζικιστάν.

Στον Ελληνικό χώρο εντοπίζεται μέσα σε χαλαζιακές φλέβες με τη μορφή αντιμονίτη, αλλά και σε πολλά θειοάλατα. Με τη μορφή αντιμονίτη εμφανίζεται στα παρακάτω σημεία:

- Στο Καλλυντήρι του Νομού Ροδόπης στο επιθερμικό σύστημα χαμηλής θεώσης. Στο σύστημα αυτό υπάρχουν εκτός από εμφανίσεις αντιμονίτη και εμφανίσεις των στοιχείων Pb, Zn, Cu, Au και Ag.
- Στα Ριζανά του Νομού Κιλκίς σε χαλαζιακές φλέβες οι οποίες έχουν διεισδύσει κατά μήκος μίας ζώνης διάτμησης (shear zone) στα μεταμορφωμένα πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας. Είναι αρκετά πιθανή περιοχή για μελλοντική εξόρυξη, μιας και το 1930-1950 γίνονταν εξορύξεις. Συγκεκριμένα, από την περιοχή αυτή εξορύχθηκαν περίπου 9.000 τόνοι μεταλλεύματος, όπου το 40% ήταν αντιμόνιο

(Tsirambides and Filippidis 2012a). Η μεταλλοφορία σήμερα υπολογίζεται περίπου 10 χιλιόμετρα σε μήκος και 2-4 χιλιόμετρα σε πλάτος. Πιθανολογείται ότι τα αποθέματα του μεταλλεύματος του αντιμονίου είναι πάνω από 50 τόνοι, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζουν και μικρότερες ποσότητες που εντοπίζονται σε βολφράμιο σε βολφραμίτες (Βασιλάτος κ.ά. 2001).

- Σε χαμηλές περιεκτικότητες σε: Χίο, Σάμο, Φιλαδέλφειο (Ν. Θεσσαλονίκης) και Γερακάριο (Ν. Κιλκίς) (Melfos and Voudouris 2017, Stergiou 2021).

Σε θειοάλατα εμφανίζεται σε διάφορα ορυκτά (τετραεδρίτης, φαματινίτης, χαλκοσιμπίτης, ζινκενίτης, βουρνονίτης και βουλανζερίτης) τα οποία είναι αρκετά σύνηθες να εμφανιστούν σε επιθερμικά και πορφυριτικά συστήματα που συναντώνται στις περιοχές: Μαρώνεια, Παγώνη Ράχη, Άγιος Φίλιππος, Μαυροκορφή, Πεύκα και Λόφος Περάματος. Επίσης, εμφανίζονται και σε φλεβικές μεταλλοφορίες στις περιοχές Καψαλίνα Θάσου και Παγγαίο Όρος. Σε ορισμένες εμφανίσεις έχει βρεθεί ότι τα πιθανά κοιτάσματα περιέχουν πάνω από 0.2% αντιμόνιο (Melfos and Voudouris 2012).

3.2 Κοβάλτιο

Το κοβάλτιο (Co) είναι αντίστοιχα ένα κρίσιμο μέταλλο όπως και το αντιμόνιο, το οποίο εξορύσσεται κατά κύριο λόγο ως υποπροϊόν σε κοιτάσματα χαλκού και νικελίου. Το βασικό ορυκτό που συναντάται είναι ο ασβολάνης (asbolane - $(\text{Ni,Co})_{2-x}\text{Mn}^{4+}(\text{O,OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), ενώ μπορεί να εμφανιστεί και σε θειούχα ορυκτά του κοβαλτίου, όπως είναι ο κοβαλτιούχος σιδηροπυρίτης (Cobalt-bearing Pyrite $(\text{Fe,Co})\text{S}_2$.) Οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται το κοβάλτιο είναι οι εξής:

- Βιομηχανία γυαλιού και πορσελάνης ως χρωστική ουσία
- Μπαταρίες ιόντων λιθίου
- Υπερκράματα
- Συστήματα πράσινης ενέργειας
- Μαγνήτες

Η εξόρυξη κοβαλτίου σε παγκόσμιο επίπεδο γίνεται κατά κύριο λόγο στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, στη Ζάμπια, στον Καναδά, στην Κούβα, στην Αυστραλία κ.α. Εισαγωγή κοβαλτίου γίνεται από την Κίνα, συγκεκριμένα εισάγει όλο το κοβάλτιο που

εξορύσσει η Δημοκρατία του Κονγκό, το οποίο με τη σειρά της το εξάγει εκ νέου στις ΗΠΑ και την Ευρωπαϊκή Ένωση αφού το μετατρέψει σε εξευγενισμένο κοβάλτιο.

Το κοβάλτιο στην Ελλάδα παρουσιάζεται σε λατεριτικές εμφανίσεις Fe-Ni. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται σε ζώνες πλούσιες σε σίδηρο, νικέλιο και μαγγάνιο. Οι συγκεντρώσεις κοβαλτίου στις ζώνες αυτές γίνεται στο Παλαιοχώρι Γρεβενών (<0,1%), στο Βέρμιο (<0,14%), στην Καστοριά (<0,16%) και στη Λοκρίδα (<0,22%) (Αποστολίκας 2000, Elioroulos and Economidou-Elioroulos 2000, Elioroulos et al. 2012, Herrington 2012).

Στην Ελλάδα γίνεται πυρομεταλλουργική επεξεργασία λατερίτη και παράγει κράμα Σιδήρου- Νικελίου από την κρατική εταιρεία ΛΑΡΚΟ στη Λάρυμνα που περιέχει κοβάλτιο, παρόλα αυτά η επεξεργασία αυτή δεν επιτρέπει ανάκτηση του κοβαλτίου. Μόνο με υδρομεταλλουργική επεξεργασία μπορεί να ανακτηθεί το κοβάλτιο, φαίνεται συνεπώς ότι η Ελλάδα έχει πράγματι τους κατάλληλους πόρους για μία πιθανή εξόρυξη κοβαλτίου ώστε να προμηθεύσει τη βιομηχανία της Ευρώπης ή και την παγκόσμια γενικότερα.

Το κοβάλτιο βρίσκεται επιπλέον και σε ηφαιστειογενείς μεταλλοφορίες συμπαγών σουλφιδίων, τα οποία υπάρχουν στα οφιολιθικά συμπλέγματα της Ελλάδας. Σε αυτές τις περιπτώσεις όμως η ποσότητα του κοβαλτίου είναι σαφώς περιορισμένη. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των μεταλλοφοριών αυτών είναι τα κοιτάσματα τύπου Κύπρου που τοποθετούνται στην Κύπρο και στην Όθρυ και η περιεκτικότητά τους είναι 0,23% κοβάλτιο (Economidou-Elioroulos et al. 2008).

3.3 Τελλούριο

Το Τελλούριο (Te) είναι ένα αρκετά σημαντικό και σπάνιο μέταλλο, με πολλές προοπτικές για άπειρες εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας στο μέλλον και γι' αυτόν τον λόγο συγκαταλέγεται στα κρίσιμα ορυκτά. Έχει πολλά ορυκτά στα οποία εντοπίζεται ως βασικό στοιχείο και αυτά είναι: αλταΐτης (altaite - PbTe), γιοσεΐτης-A (joséite-A - Bi₄(S,Te)₃), γκολντφιλντίτης (goldfieldite - (Cu₁₀Te₄S₁₃), εμπρεσσίτης (empressite - AgTe), εσσίτης (hessite - Ag₂Te), καλαβερίτης (calaverite - AuTe₂), κοστοβίτης (kostovite - CuAuTe₄), κολοραδοΐτης (coloradoite - HgTe), μελονίτης (melonite - NiTe₂), μερενσκυίτης (merenskyite - PdTe₂), κοτουλσκίτης (kotulskite - Pd(Te,Bi)), πετζίτης (petzite - Ag₃AuTe₂), σοπχεΐτης (sopcheite - Ag₄Pd₃Te₄), στουτζίτης (stützite - Ag₇Te₄), σουλβανίτης (sylvanite -

(Au,Ag)₂Te₄), τελλουροαντιμόνιο (tellurantimony - Sb₂Te₃), τετραδυμίτης (tetradymite - Bi₂Te₂S) και τσουμοϊίτης (tsumoite - BiTe). Στη σημερινή εποχή έχει διάφορες χρήσεις, εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι:

- Για κατασκευή κραμάτων με χάλυβα και χαλκό με σκοπό την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.
- Για την επεξεργασία καουτσούκ
- Για τους καταλύτες πετρελαίου
- Για τις μπαταρίες με σκοπό τη μείωση της διαβρωτικής δράσης του θειικού οξέος
- Ως χρωστική για γυαλιά και κεραμικά
- Για την κατασκευή ανιχνευτών
- Για φωτοβολταϊκά με σκοπό την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας των ηλεκτροπαραγωγών ηλιακών κυψέλων
- Ως ημιαγωγός καλής ποιότητας με ευαισθησία στην υπέρυθη ακτινοβολία (το οποίο γίνεται εκτός από τις ενώσεις τελλουρίου και στις ενώσεις κάδμιου και υδράργυρου.

Η εξόρυξη τελλουρίου γίνεται κατά κύριο λόγο στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία. Το τελλούριο παράγεται σχεδόν αποκλειστικά ως υποπροϊόν παραγωγής χαλκού και μολύβδου. Μάλιστα, υπάρχει εκτίμηση ότι τα κοιτάσματα του χαλκού παγκοσμίως περιέχουν γύρω στους 22 εκ. τόνους τελλούριο. Παρόλα αυτά, λόγω της εξάντλησης των μεταλλευμάτων υψηλής ποιότητας υπάρχει κίνδυνος και για την μελλοντική διαθεσιμότητα του τελλουρίου αντίστοιχα.

Στον Ελληνικό χώρο συναντάται το τελλούριο σε επιθερμικά κοιτάσματα χαλκού-χρυσού υψηλής και ενδιάμεσης θείωσης, σε κοιτάσματα πορφυριτικού τύπου ή σε μεταλλοφορίες που βρίσκονται σε μαγματικές διεισδύσεις και σε χαλαζιακές φλέβες. Οι περιοχές που συνήθως συναντάται σε κοιτάσματα χαλκού-χρυσού είναι: η Αγία Βαρβάρα/Κασσιτερών, ο Άγιος Δημήτριος/Σαπών, ο Άγιος Φίλιππος/Κίρκης, ο Λόφος Περάματος, η Μαυροκορυφή/Τάφος Πετρωτών, τα Πεύκα/Εβρου και ο Πάνορμος Τήνου. Οι περιοχές που παρουσιάζουν πορφυριτικού τύπου κοιτάσματα είναι: η Παγώνη Ράχη, οι Κορυφές/Κασσιτερών, ο Κώνος/Σαπών, οι Σκουριές, η Βάθη και ο Φακός Λήμνου. Οι περιοχές που έχουν μεταλλοφορίες μαγματικών διεισδύσεων είναι: η Παλαιά Καβάλα, το

Παγγαίο και τα Κιμμέρια, ενώ οι περιοχές που φιλοξενούν το τελλούριο σε χαλαζιακές φλέβες σε μεταμορφωμένα πετρώματα είναι ο Στανός και οι Καλλιανοί (Voudouris et al. 2005, 2007, 2011a, b, 2021, Voudouris 2006, 2011, Eliopoulos and Kiliass 2011, Fornadel et al. 2011, 2012, McFall et al. 2018, Mavrogonatos et al. 2018, 2019, 2020, Tombros et al. 2007, 2021, Stergiou 2021, Stergiou et al. 2021a, b). Σπανιότερα μπορεί να εντοπιστεί ως αυτοφυές μέταλλο, μικρών όμως συγκεντρώσεων, σε περιοχές όπως το Πέραμα, την Τήνο, τους Καλλιανούς Ευβοίας και την Παλαιά Καβάλα.

Το τελλούριο βρίσκεται σε διάφορες περιεκτικότητες σε κοιτάσματα, οι οποίες εξαρτώνται από την κατανομή των τελλουριδίων. Δηλαδή, τα κοιτάσματα με μεγάλες περιεκτικότητες σε τελλούριο περιέχουν στην Παγώνη Ράχη έως και 40g/t, στον Άγιο Φίλιππο έως 43g/t, στο Λόφο Περάματος έως 45g/t, στο Παγγαίο έως 60g/t και στα Πεύκα πάνω από 1000g/t. Τα μαγματικά πετρώματα τα οποία παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις τελλουρίου στα αντίστοιχα κοιτάσματα στον Ελληνικό χώρο έχουν ασβεσταλκαλικό έως σωσσονιτικό χαρακτήρα και έχουν προέλευση από τον μανδύα (Voudouris 2006).

3.4 Ρήνιο και Μολυβδαίνιο

Το ρήνιο (Re) είναι ένα μέταλλο που χαρακτηρίζεται από την ανθεκτικότητά του στη διάβρωση. Οι εφαρμογές που συναντάται συνήθως είναι οι εξής:

- Στην αεροναυπηγική και ειδικά σε υπερκράματα υψηλών θερμοκρασιών με σκοπό την κατασκευή κινητήριων αεροσκαφών
- Σε πηγές ακτίνων Χ ως βελτιωτικό των ιδιοτήτων του βολφραμίου και κραμάτων
- Σε θερμοστοιχεία με σκοπό τις μετρήσεις θερμοκρασιών (<2200°C)
- Σε νήματα
- Στη βιομηχανία πετρελαίου σε χημικούς καταλύτες
- Σε διαστημικά αεροσκάφη
- Σε επικαλύψεις
- Σε ηλεκτρικές επαφές
- Σε λάμπες φλας με σκοπό τη λήψη φωτογραφιών
- Στην πρόληψη και στη θεραπεία της επαναστένωσης και του καρκίνου στο ήπαρ, στο οποίο χρησιμοποιείται ραδιενεργό ρήνιο.

Οι βασικές εφαρμογές που χρησιμοποιείται το μολυβδαίνιο (Mo) είναι οι εξής:

- Σε κατασκευή ανοξειδωτου χάλυβα
- Σε χημικά (π.χ. λιπαντικά)
- Στη βιομηχανία κατασκευής μετάλλων, τα οποία προέρχονται από χυτοσίδηρο και μολυβδαίνιο.
- Σε υπερκράματα

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η μεγαλύτερη συγκέντρωση μολυβδαινίου και ρηνίου σε κοίτασμα τοποθετείται στο Mount Dore (στο Μέρλιν της Αυστραλίας). Τα μέταλλα αυτά απαντώνται κυρίως στο μολυβδαινίτη και με μικρότερες περιεκτικότητες στο χαλκοπυρίτη και το σιδηροπυρίτη και βρίσκονται σε μία σειρά από εξαλλοιωμένους μεταπηλίτες και φυλλίτες (Brown et al. 2010)

Στον ελληνικό χώρο ο μολυβδαινίτης συναντάται κατά κύριο λόγο σε τρεις τύπους μεταλλοφορίας (Voudouris et al. 2010):

- Μεταλλοφορίες πορφυριτικού κοιτάσματος Cu-Mo και $Mo\pm Cu$, οι οποίες εντοπίζονται στις περιοχές: Κώνος, Μαρώνεια, Μελίταινα, Μύλοι Αισύμης, Σαρδές, Σκουριές, Παγώνη Ράχης, Πλάκα Λαυρίου Στύψη και Φακός.
- Μεταλλοφορίες που συναντώνται σε μαγματικές διεισδύσεις, οι οποίες εντοπίζονται στην Κιμμέρια Ξάνθης, στην Πηγή Αξιούπολης και στην Σέριφο.
- Φλεβικές μεταλλοφορίες χαλκού- χρυσού – βισμούθιου – μολυβδαινίου σε ζώνες διάτμησης στον Στάνο Χαλκιδικής.

Κατά τον Β' Παγκόσμιο (1940-1944) γίνονταν εξορύξεις από τους Γερμανούς στα Κιμμέρια και στην Πηγή. Ιδιαίτερως η Πηγή παλαιότερα είχε το σημαντικότερο ελληνικό κοίτασμα μολυβδαινίτη, το οποίο εκμεταλλεύτηκε και εμπλούτισε η γερμανική εταιρεία KRUPP συνεργατικά με την εταιρεία «Μιχαηλίδης-Ζορμπάς» η οποία ήταν η ιδιοκτήτρια εταιρεία κατά την περίοδο 1937-1943. Το συνολικό εξορυχθέν μέταλλευμα ανέρχεται περίπου στους 10.000 τόνους, μέσης σύστασης 20-25% σε MoS_2 . Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το γεγονός ότι στην ίδια μεταλλοφορία διακρίνονται και ίχνη βολφραμίτη.

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu-Mo και $Mo\pm Cu$ στη Θράκη περιέχουν τις υψηλότερες περιεκτικότητες σε ρήνιο παγκοσμίως (από τους Μύλους Αισύμης που εντοπίζεται ρήνιο

στον μολυβδαινίτη έως 1.74% έως και την Παγώνη Ράχη που ρήνιο στον μολυβδαινίτη έως 4.7%) (Μέλφος κ.ά. 2001, Voudouris et al. 2009, 2010, 2013). Ενδιαφέρον παρουσιάζουν από τις περιοχές της Θράκης ο Κώνος και η Παγώνη Ράχη στις οποίες περιέχεται ο ρηνίτης, ένα εξαιρετικά σπάνιο ορυκτό. Στις μεταλλοφορίες αυτές απαντά κυρίως ο μολυβδαινίτης, ο οποίος φέρει τις υψηλότερες περιεκτικότητες σε ρήνιο παγκοσμίως.

Οι μολυβδαινίτες που συναντώνται σε άλλες πορφυριτικές εμφανίσεις περιέχουν ρήνιο, αλλά σε μικρότερες περιεκτικότητες. Οι περιοχές αυτές είναι: Στύψη Λέσβου (ρήνιο έως 1,06%), Σαρδές Λήμνου (ρήνιο έως 0,52%), Φακός Λήμνου (ρήνιο έως 0,22%), Πλάκα Λαυρίου (ρήνιο έως 0,13%) και στις Σκουριές Χαλκιδικής (ρήνιο έως 0,1%).

3.5 Γάλλιο, Γερμάνιο και Ίνδιο

Τα μέταλλα γάλλιο (Ga), γερμάνιο (Ge) και Ίνδιο (In) αποτελούν τις ορυκτές πρώτες ύλες υψίστης σημασίας, αφού είναι αναγκαία και αναντικατάστατα για την κατασκευή τεχνολογικών προϊόντων και υπολογίζεται ότι στο άμεσο μέλλον θα χρειαστούν μεγάλες ποσότητες των μετάλλων αυτών. Η σημαντικότερη εφαρμογή του γερμάνιου είναι στα οπτικά υλικά, ενώ το Ίνδιο βρίσκεται κυρίως στις οθόνες υγρών κρυστάλλων.

Το γερμάνιο και το Ίνδιο ανακτώνται από τα κοιτάσματα κατά τη διαδικασία παραγωγής ψευδαργύρου από το ορυκτό σφαλερίτης. Αντίθετα, το γάλλιο ανακτάται από τον βωξίτη, ως υποπροϊόν της επεξεργασίας του, και από κατάλοιπα επεξεργασίας ψευδαργύρου, παρόλα αυτά τα μεγαλύτερα αποθέματα εντοπίζονται στα φωσφορικά κοιτάσματα.

Οι κοιτασματολογικοί τύποι της Ελλάδας που θεωρούνται οι πιο ελπιδοφόροι για μελλοντική εκμετάλλευση των τριών αυτών μετάλλων είναι οι επιθερμικές πολυμεταλλικές φλέβες οι οποίες βρίσκονται στη μάζα της Ροδόπης. Μία ενδιάμεσης και υψηλής θείωσης πολυμεταλλική φλεβική μεταλλοφορία βρίσκεται στο κοίτασμα του Αγίου Φιλίππου της Κίρκης, το οποίο αποτελείται από μη συνηθισμένες ορυκτολογικές παραγενέσεις από θειοάλατα του μολύβδου, αρσενικού, χαλκού, βισμούθιου και κασσίτερου. Τα κύρια ορυκτά του ψευδαργύρου τα οποία περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε ίνδιο (<1.4%), γάλλιο (<0.4%) και γερμάνιο (<0,3%) είναι ο σφαλερίτης και ο βουρτσίτης. Σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις σε επιφανειακά δείγματα βρέθηκε ότι στο κοίτασμα του Αγίου

Φιλίππου υπάρχουν εξαιρετικά υψηλές περιεκτικότητες σε ίνδιο (<222g/t), γάλλιο (<466g/t) και γερμάνιο (>100g/t) (Voudouris et al. 2013, 2019, 2022).

Εκτός του κοιτάσματος του Αγίου Φιλίππου, εντοπίζονται υψηλές περιεκτικότητες των τριών κρίσιμων μετάλλων στα Πεύκα του Νομού Έβρου, στην υψηλής και ενδιαμέσης θείωσης επιθερμική φλεβική μεταλλοφορία, η οποία η υπολογίζεται ότι έχει ίνδιο έως 675 g/t In, γάλλιο έως 17 g/t και γερμάνιο έως 16 g/t (Voudouris et al. 2022). Σε αυτή τη μεταλλοφορία των Πευκών το ίνδιο περιέχεται στη χημική σύσταση του σφαλερίτη, αλλά και ορυκτών που περιέχεται στη σύστασή του ίνδιο, όπως είναι ο ροκουεσίτης (roquesite - CuInS_2) και ο ινδιούχος τενναντίτης (<6.5% ίνδιο).

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα κοιτάσματα αντικατάστασης και επιθερμικού τύπου που βρίσκονται στο Λαύριο ως προς τα τρία μέταλλα. Εντοπίζονται κατά κύριο λόγο με τα μεταλλοφόρα σώματα πλούσια σε μόλυβδο – ψευδάργυρο και χαλκό και οι περιεκτικότητές τους είναι έως 326g/t γάλλιο, έως 95 g/t ίνδιο και έως 7g/t γερμάνιο (Skarpelis et al. 2007, Bonsall et al. 2011, Melfos and Voudouris 2012, Zaimis et al. 2016, Frenzel et al. 2021). Στην Καμάριζα έχουν εντοπιστεί τα ορυκτά ροκουεσίτης και πετροκίτης (roquesite - CuInS_2 και petrukite - $(\text{Cu,Fe,Zn})_2(\text{Sn,In})\text{S}_4$ αντίστοιχα) τα οποία περιέχουν ίνδιο, ενώ έχει εντοπιστεί και γερμανίτης (germanite - $\text{Cu}_{13}\text{Fe}_2\text{Ge}_2\text{S}_{16}$) που είναι ορυκτό του γερμάνιου. Το γάλλιο βρίσκεται επίσης σε αρκετά υψηλές περιεκτικότητες (έως και 25g/t) στα συμπυκνώματα σφαλερίτη που βρίσκονται στο Στρατώνι Χαλκιδικής (Tzamos et al. 2019).

Στα φωσφορικά κοιτάσματα εντοπίζεται επίσης το γάλλιο, όμως σε χαμηλές περιεκτικότητες, της τάξεως του 0,01%-0,1%, παρόλα αυτά θεωρούνται τα σημαντικότερα αποθέματα του γαλλίου. Στον Ελληνικό χώρο οι υψηλότερες συγκεντρώσεις γαλλίου σε φωσφορικά πετρώματα είναι έως και 16g/t και αναφέρονται στη λεκάνη της Βεγόρας, που βρίσκεται 40 χιλιόμετρα ΒΔ από τη Βέροια (Stamatakis 2004).

3.6 Βολφράμιο

Το βολφράμιο (W) περιέχεται κυρίως στα ορυκτά βολφραμίτης (wolframite - $(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$) και σεελίτης (scheelite - $\text{Ca}(\text{WO}_4)$). Παρουσιάζει το υψηλότερο σημείο τήξης στους 3410°C συγκριτικά με τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία της φύσης. Αυτή του η ιδιαιτερότητα

κάνει τα κράματα του βολφραμίου ιδανικά για πολλές εφαρμογές, όπως και λόγω της μεγάλης σκληρότητας και πυκνότητάς του. Μερικές από τις εφαρμογές που χρησιμοποιείται είναι:

- Αεροδιαστημική βιομηχανία
- Αντιραδιενεργή θωράκιση
- Βιομηχανικοί καταλύτες
- Ηλεκτρόδια για συγκόλληση
- Σωλήνες ακτινών Χ
- Πολεμική βιομηχανία, ιδιαίτερα σε διατρητικά βλήματα και σφαίρες
- Προϊόντα υψηλής τεχνολογίας
- Υπερκράματα για εργαλεία εξόρυξης και τρυπάνια κ.α

Παλαιότερα το βολφράμιο χρησιμοποιούταν σε λαμπτήρες πυρακτώσεως και συγκεκριμένα στα νήματά τους, όμως έχουν τεθεί εκτός χρήσης πλέον στις περισσότερες χώρες.

Οι χώρες που εξάγουν κατά βάση το βολφράμιο είναι η Κίνα (πάνω από 80%) και η Ρωσία. Στην Ελλάδα υπάρχουν πολλές μεταλλοφορίες στις οποίες εντοπίζονται μικρές ποσότητες βολφραμίου, παρόλα αυτά δεν έχει γίνει συστηματική έρευνα ώστε να ανακαλυφθεί το δυναμικό του μετάλλου στη χώρα. Με τις παρούσες ελλιπείς έρευνες έχει παρατηρηθεί ότι οι εμφανίσεις βολφραμίου προέρχονται από μαγματικές διεισδύσεις. Στον Ελληνικό χώρο εντοπίζεται βολφράμιο:

- Στην Πηγή Αξιούπολης (Ν. Κιλκίς), το κοίτασμα μολυβδαινίου – βολφραμίου συνδέεται με τον γρανίτη του Φάνου ηλικίας Άνω Ιουρασικής, που φιλοξενείται σε Μεσοζωικούς οφιόλιθους και εκεί εντοπίζονται ίχνη βολφραμίτη (Melfos and Voudouris 2012).
- Στην Πλάκα Λαυρίου, το πορφυριτικό κοίτασμα μολυβδαινίου± βολφραμίου
- Στα Κιμμέρια Ξάνθης στη φλεβική πλουτωνιτική μεταλλοφορία Cu-Mo-W±Au±Bi με βολφράμιο έως 80g/t (στην ορυκτολογική σύσταση παίζουν ρόλο ο βολφραμίτης, το ρουτίλο και ο σεελίτης)
- Στα Κιμμέρια Ξάνθης στη μεταλλοφορία Fe-Cu-Bi-WAu τύπου skarn, όπου περιέχεται βολφράμιο έως 82 g/t και σεελίτης.

- Στο Πάγγαιο η πλουτωνική μεταλλοφορία Au-Ag±Bi±Te±W όπου εντοπίζεται περιεκτικότητα βολφραμίου έως 315 g/t.
- Στα Ριζανά (Ν. Κιλκίς) στη φλεβική μεταλλοφορία Sb-W, όπου τις δεκαετίες 1930-1950 εξορύχθηκαν 9.000 τόνοι μεταλλεύματος αντιμονίτη, μέσης περιεκτικότητας 40% αντιμονίου. Έγινε επίσης εκμετάλλευση βολφραμίτη το 1910 από τους Άγγλους και στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο από τους Γερμανούς.

3.7 Σπάνιες Γαίες

Οι σπάνιες γαίες (REE) είναι μία ομάδα 17 μετάλλων που διαχωρίζονται στις λανθανίδες, στο ύτριο και στο σκάνδιο. Ο λόγος της ομαδοποίησής τους είναι λόγω των παρόμοιων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους. Τα μέταλλα αυτά εντοπίζονται στη φύση υπό μορφή οξειδίων που παρουσιάζουν γαιώδη μορφή. Ένας επιπλέον χρήσιμος διαχωρισμός των σπάνιων γαιών είναι, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 2, σε:

- Ελαφριές σπάνιες γαίες (LREE) οι οποίες αποτελούνται από τα εξής μέταλλα: λανθάνιο, δημήτριο, πρασεοδύμιο, νεοδύμιο, προμήθειο, σαμάριο και ευρώπιο.
- Βαριές σπάνιες γαίες (HREE), οι οποίες είναι δυσεύρετες συγκριτικά με τις ελαφριές σπάνιες γαίες και αποτελούνται από τα εξής μέταλλα: γαδολίνιο, τέρβιο, δυσπρόσιο, όλμιο, ύτριο, έρβιο, θούλιο, υτέρβιο, λουτήσιο και σκάνδιο

Οι εφαρμογές που συναντώνται οι σπάνιες γαίες είναι:

- Κατασκευή προϊόντων υψηλής τεχνολογίας
- «Πράσινη» τεχνολογία (μπαταρίες ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων, φωτοβολταϊκά συστήματα, λαμπτήρες χαμηλής κατανάλωσης και στις τουρμπίνες ανεμογεννητριών)
- Κατασκευή ειδικών μαγνητών
- Αεροναυπηγική και διαστημική τεχνολογία
- Ακουστικά και ηχεία μικρού μεγέθους
- Σκληροί δίσκοι και DVD
- Ιατρική (Μαγνητική τομογραφία, ορθοδοντική ιατρικά λέιζερ, ακτινοβολία καρκινοπαθών, για χειρουργικές επεμβάσεις, βηματοδότες, όργανα ακτινογραφιών με ακτίνες X)

- Επεξεργασία γυαλιού και γυαλιών οράσεως
- Λείζερ
- Αμυντικό εξοπλισμό
- Κινητά τηλέφωνα
- Μεταλλουργία, κράμματα, κεραμικά
- Επίπεδες οθόνες υγρών κρυστάλλων
- Ηλεκτρονικά τσιγάρα
- Μαγνητικά φίλτρα
- Ηλεκτρικοί κινητήρες και καταλύτες μηχανοκίνητων
- Κινητήρες αεροσκαφών
- Ασύρματα εργαλεία
- Ραντάρ
- Πυρηνικοί αντιδραστήρες
- Διυλιστήρια πετρελαίου
- Δορυφόροι
- Οπτικές ίνες
- Παιχνίδια κ.α.

Οι συστηματικές έρευνες που γίνονται για τον εντοπισμό των σπάνιων γαιών στην Ελλάδα, ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία, έχουν δείξει ότι οι σπάνιες γαίες απαντώνται συχνά στη Βόρεια Ελλάδα και κυρίως από το Κιλκίς και τη Χαλκιδική έως και τον Έβρο σε γρανιτικά και ηφαιστειακά πετρώματα. Τα ορυκτά αλλανίτης, μοναζίτης, ζirkόνιο και απατίτης περιλαμβάνονται σε αυτά τα πετρώματα και είναι εμπλουτισμένα με σπάνιες γαίες. Όσο διαβώνονται τα πετρώματα, συμβαίνει απομάκρυνση των ορυκτών αυτών και μεταφορά τους μέσω ποταμών και χειμάρρων στις προσχώσεις κατά μήκος των ιζηματογενών ακτών (Perissoratis et al. 1988, Eliopoulos et al. 2014). Στα ιζήματα των προσχώσεων βρέθηκαν σπάνιες γαίες (κυρίως ελαφριές) σε περιεκτικότητα έως και 0.8g/t. Εκτός από τις αναζητήσεις στις προσχώσεις, έγιναν και γεωτρήσεις σε αυτές βάθους 5-7 μέτρων για την αποκάλυψη των σπάνιων γαιών, οι οποίες έδειξαν ότι υπάρχουν υψηλές περιεκτικότητες σε διάφορες περιοχές, όπως τον Κόλπο του Στρυμονικού, την υφαλοκρηπίδα από τον Στρυμόνα έως την Καβάλα, περιμετρικά της Σαμοθράκης και τα Δέλτα Έβρου και Νέστου. Ιδιαίτερα στην παράκτια ζώνη από τα

Λουτρά Ελευθερών έως τη Νέα Πέραμο (Ν. Καβάλας) εντοπίζονται γύρω στους 485 εκατομμύρια τόνους σπάνιων γαιών. Αυτοί περιέχονται στα ορυκτά: αλλανίτης, απατίτης, τιτανίτης, ζirkόνιο και σε αταύτιστη φάση του δημητρίου (Perissoratis et al. 1988, Elioroulos et al. 2014, Tzifas et al. 2019, Stouraiti et al. 2020). Η προέλευση των σπάνιων γαιών είναι πιθανότατα από τους πλουτωνίτες που βρίσκονται στην Καβάλα και στο όρος Πάγγαιο, μιας και εντοπίστηκε στο Παγγαίο σε μεταλλουργική σκωρία παλαιών φούρνων τήξεως οθωμανικής περιόδου ποσοστό συγκέντρωσης σπάνιων γαιών 2% κ.β. (λανθάνιο, δημήτριο, ευρώπιο, νεοδύμιο, σαμάριο και πρασεοδύμιο), παρόλα αυτά είναι καλό να ερευνηθεί περισσότερο η περιοχή ώστε να βρεθεί η πηγή τους.

Σπάνιες γαίες βρίσκονται και σε κοιτάσματα μαγματικών διεισδύσεων. Στην Πλάκα Λαυρίου με περιεκτικότητες σπάνιων γαιών έως και 0.15% συνδέονται συγκεκριμένα με αποφύσεις του γρανοδιορίτη, ενώ στη Βάθη (Ν.Κιλκίς) με περιεκτικότητες σπάνιων γαιών έως και 0.19% συνδέονται με το πορφυρικό σύστημα Cu-Au (Stergiou et al. 2021a).

Συγκεντρώσεις σπάνιων γαιών βρίσκονται και στο Λαοδικηνό του Νομού Κιλκίς στην πολυμεταλλική μεταλλοφορία Cu-Au-Ag-Te-Pb-Bi στα ορυκτά ξενότιμος και βασνεσίτης (Stergiou et al. 2021b). Βρίσκονται επίσης στο ορυκτό μοναζίτης που εντοπίζεται στην Οξυά Ν. Καβάλας.

Τέλος, στη ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας βρίσκονται τα βωξιτικά κοιτάσματα, που περιέχουν έως 0,6% σπάνιες γαίες και είναι μία πιθανή πηγή προς εκμετάλλευση. Ερευνώνται επίσης τα μεταλλευτικά απόβλητα που προέρχονται από την βιομηχανική εκμετάλλευση του βωξίτη και της μεταλλουργίας αλουμινίου. Τα απόβλητα αυτά αναφέρονται ως κόκκινη λάσπη λόγω του χρώματος και της σύστασής τους και υπολογίσθηκε ότι η μέση περιεκτικότητά τους σε σκάνδιο είναι 130 g/t ή 0,02% Sc_2O_3 .

Μέχρι στιγμής στη βιομηχανία είναι φανερό ότι υπάρχουν θετικές ενδείξεις και είναι σημαντικό να ερευνηθεί το ζήτημα των σπάνιων γαιών σε θέματα περιεκτικότητας, αλλά και σε θέμα επικινδυνότητας (λόγω των συγκεντρώσεων ραδιενεργών στοιχείων όπως το θόριο) ώστε να διαπιστωθεί εάν στον Ελληνικό χώρο έχουν την ευκαιρία να αξιοποιηθούν.

3.8 Μέταλλα ομάδας λευκόχρυσου ή πλατίνας

Τα μέταλλα της ομάδας του λευκόχρυσου (PGM) αποτελούνται από 6 μέταλλα (πλατίνα, παλλάδιο, ρόδιο, ρουθίνιο, ιρίδιο και όσμιο) τα οποία παρουσιάζουν παρόμοιες γεωχημικές ιδιότητες και σιδηρόφιλο χαρακτήρα. Είναι εξαιρετικά σπάνια μέταλλα, τα οποία σχηματίζουν κράματα είτε με σίδηρο είτε μεταξύ τους ή σε πιο σπάνιες περιπτώσεις σχηματίζουν ενώσεις ή σουλφίδια με το αρσενικό. Οι βασικότερες εφαρμογές τους είναι:

- Χημική βιομηχανία
- Διύλιση του πετρελαίου
- Καταλύτες αυτοκινήτων με σκοπό την επεξεργασία εκπομπών καυσαερίων
- Κοσμηματοποιία
- Ηλεκτρονική
- Ιατρική
- Κατασκευή υλικών ανθεκτικών στη διάβρωση και οξειδωση

Οι χώρες που παράγουν περισσότερο μέταλλα της ομάδας της πλατίνας είναι η Νότιος Αφρική (στην οποία γίνεται η μεγαλύτερη παραγωγή), η Ρωσία και ο Καναδάς και συνήθως η εξαγωγή τους γίνεται με τη μορφή υποπροϊόντων επεξεργασίας των μαγματικών κοιτασμάτων χαλκού- νικελίου.

Έχει παρατηρηθεί επίσης παλλάδιο και πλατίνα σε κοιτάσματα πορφυρικού τύπου στο Elatsite και στο Medet (Βουλγαρία), στο British Columbia (Καναδάς), στο Santo Tomas II (Φιλιππίνες), στη Μογγολία, στο Ουζμπεκιστάν, στο Καζακστάν, στη Ρωσία κ.α.

Στον ελληνικό χώρο οι υψηλότερες περιεκτικότητες των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας βρίσκονται σε δύο κοιτασματολογικούς τύπους:

- Στα κοιτάσματα πορφυρικού τύπου
- Στα οφιολιθικά κοιτάσματα χρωμίτη αλπικού τύπου

Στα κοιτάσματα πορφυρικού τύπου, όπως στο κοίτασμα των Σκουριών στη Βορειοανατολική Χαλκιδική, στο οποίο χαρακτηρίζεται από σημαντικό εμπλουτισμό σε παλλάδιο (έως 0,5g/t) και πλατίνα τόσο στο μέταλλευμα όσο και στα συμπυκνώματα επίπλευσης (3,3g/t σε χαλκοπυρίτη-βορνίτη). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι περιεκτικότητες στην περιοχή είναι υψηλότερες και έπειτα βρίσκεται το Medet Βουλγαρίας

(Economidou-Eliopoulos and Eliopoulos 2000, Kioussis et al. 2005). Τα μέταλλα αυτά εντοπίζονται στα ορυκτά κοτουλσκίτης (kotulskite - Pd(Te,Bi)), μερενσκυίτης (merenskyite - PdTe₂) και σοπχεϊίτης (sorcheite - Ag₄Pd₃Te₄), αλλά και από άλλες ορυκτές φάσεις των στοιχείων Pd, Ag, Sb, As, Bi, Te, σε μορφή εγκλεισμάτων στον βονίτη και χαλκοπυρίτη.

Στα οφιολιθικά κοιτάσματα χρωμίτη αλπικού τύπου, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλές περιεκτικότητες σε στοιχεία της ομάδας της πλατίνας, έως 0,5g/t και δεν έχουν οικονομική σημασία. Το βασικό μέταλλο στα κοιτάσματα αυτά είναι το ρουθίνιο, το οποίο περιέχεται στο ορυκτό λαουρίτη (laurite - RuS₂) που βρίσκεται σε ίχνη στο κοίτασμα (Garuti et al. 1999, Tsikouras et al. 2016). Υπάρχουν όμως δύο εξαιρέσεις στον Ελλαδικό χώρο, στους χρωμίτες της Βέροιας κοντά στο χωριό Χαράδρα στην τοποθεσία Γάλακτος και στους χρωμίτες στον Κορυδαλλό της Πίνδου (Economidou-Eliopoulos 1996, Tsoupras et al. 2008, Kapsiotis et al. 2010).

- Οι χρωμίτες της Βέροιας παρουσιάζουν συγκεντρώσεις της ομάδας της πλατίνας έως 25g/t, οι οποίες σχετίζονται με πολυάριθμους κόκκους ορυκτών της ομάδας της πλατίνας (>100) (Tsoupras et al. 2008), τα οποία ορυκτά (μεγέθος >1mm) είναι κυρίως κράματα Os-Ir-Ru-Fe.
- Οι χρωμίτες της Πίνδου παρουσιάζουν συγκεντρώσεις της ομάδας της πλατίνας έως 28g/t, κάτι που τους καθιστά τους χρωμίτες με την υψηλότερη συγκέντρωση PGM στην Ελλάδα και από τις υψηλότερες παγκοσμίως (Kapsiotis et al. 2010). Τα ορυκτά που περιέχονται στις μεταλλοφορίες αυτές είναι: ναλτρεπτίτης (naldrettite - Pd₂Sb), σπερρυλίτης (sperrylite - PtAs₂), αυτοφυής χρυσός και κράματα Pt-Fe-Ni και Pd-Cu. Κοντά στον Κορυδαλλό και συγκεκριμένα στη Μηλιά Πίνδου εντοπίστηκαν ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (Prichard et al. 2008).

Οι χρωμίτες των οφιολιθικών κοιτασμάτων στην Ανατολική Χαλκιδική (Βάβδος, Βασιλικά, Γερακίνη-Ορμύλια, Τριάδι) περιέχουν χαμηλές περιεκτικότητες των μετάλλων της ομάδας της πλατίνας, έως 0.5ppm, άρα είναι ευνόητο ότι δεν προσφέρουν οικονομική σημασία.

Τέλος, στον Αλιάκμονα εντοπίστηκαν κόκκοι ορυκτών PGM στα κράματα Os-Ir-Rh , Os-Ir-Ru, Os-Ir-Pt και Pt-Fe. Οι προσχωματικοί κόκκοι της ομάδας της πλατίνας στον Αλιάκμονα περιέχουν 19 ορυκτά τα περισσότερα εκ των οποίων βρίσκονται σε συμφύσεις μεταξύ τους (Χαριστός 2010). Η σπάνια όμως εύρεση των ορυκτών αυτών αποτελεί

εμπόδιο στην οικονομική τους εκμετάλλευση, επομένως δεν υπάρχει το ανάλογο οικονομικό ενδιαφέρον σε αυτά.

3.9 Ουράνιο

Το ουράνιο (U) είναι ένα ραδιενεργό στοιχείο, συνηθισμένο στον φλοιό της Γης το οποίο διασπάται και σχηματίζει διάφορα προϊόντα, όπως το ράδιο (Ra). Το ράδιο επίσης διασπάται και σχηματίζει το ραδόνιο (Rn, ευγενές αέριο), το οποίο χρησιμοποιείται ώστε να εντοπιστούν κοιτάσματα ουρανίου.

Περιέχεται κυρίως στα ορυκτά ουρανινίτης (uraninite- UO_2), ωτουνίτης ($Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10-12H_2O$), τορβερνίτης ($Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$), μετατορβερνίτης ($Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$), κοφφινίτης ($U(SiO_4) \cdot nH_2O$), ρεναρδίτης ($Pb(UO_2)_4(PO_4)_2(OH)_4 \cdot 7H_2O$ το οποίο είναι δευτερογενές ορυκτό του U) και ο πισσουρανίτης (pitchblende - UO_2/UO_3 το οποίο αποτελεί μία μη καθαρή ποικιλία του U, επομένως δεν αναγνωρίζεται ως ξεχωριστό ορυκτό). Εκτός από τα κύρια ορυκτά του, ουράνιο μπορεί να περιλαμβάνεται και σε μοναζίτη, αλλανίτη, τιτανίτη και απατίτη σε σχετικά υψηλές περιεκτικότητες. Τα ουρανιούχα ορυκτά φθορίζουν κάτω από το υπεριώδες φως.

Τα πετρώματα που είναι συνήθη στο να περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε ουράνιο είναι τα μαγματικά και τα ιζηματογενή. Για να θεωρηθεί μία εμφάνιση ουρανίου ως κοιτάσμα στα παραπάνω πετρώματα, θα πρέπει οι περιεκτικότητες τους σε U ή U_3O_8 να είναι πολύ μεγαλύτερες από τον μέσο όρο και να καλύπτουν μεγάλη έκταση.

Το ισότοπο του ουρανίου ^{235}U καθιστά το ουράνιο αρκετά σημαντικό στοιχείο, διότι χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη σε εργοστάσια παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, αλλά και ως σχάσιμο υλικό σε πυρηνικά όπλα. Το απεμπλουτισμένο U εφαρμόζεται στα εμπρηστικά βλήματα. Άλλες χρήσεις του είναι στην κατασκευή ειδικών τύπων γυαλιού και χρησιμοποιείται επίσης στην αεροναυπηγική. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν το γεγονός ότι οι εμφανίσεις U στην Ελλάδα περιλαμβάνουν υψηλές περιεκτικότητες σε σπάνιες γαίες και θόριο (ραδιενεργό στοιχείο που αντικαθιστά το ουράνιο σε πυρηνικούς αντιδραστήρες νέας τεχνολογίας).

Οι αναζητήσεις ουρανίου αλλά και άλλων ραδιενεργών ορυκτών άρχισαν από το 1948, όπου ερευνητές από Ελλάδα, Γαλλία και Αμερική στο πλαίσιο της Επιτροπής Ατομικής

Ενέργειας των Ηνωμένων Εθνών σε συνεργασία με το τωρινό ΕΑΓΜΕ (τ.ΙΓΜΕ), το οποίο ονομάζοταν Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους (ΙΓΕΥ). Κατά τη δεκαετία του '70 υπήρχαν εντατικές έρευνες από ερευνητές της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) «Δημόκριτος» και έπειτα πάλι από το ΕΑΓΜΕ. Ερευνήθηκε όλη η ελληνική επικράτεια, κυρίως από την ΕΕΑΕ, ειδικά σε περιοχές όπου υπήρχαν ευνοϊκοί γεωλογικοί σχηματισμοί για ουράνιο, με μία ιδιαίτερη καινοτόμο μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από την ΕΕΑΕ και χρησιμοποιήθηκε και σε παγκόσμιο επίπεδο από την Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας των Ηνωμένων Εθνών, που είναι να κάνει με ραδιομετρικές διασκοπήσεις με αυτογραφικό σπινθηρόμετρο σε αυτοκίνητο (Smith 1976). Για να εκτιμηθεί η συγκέντρωση U_3O_8 στα δείγματα, αυτά εξετάζονταν κάτω από υπεριώδες φως (για να φανεί εάν φθορίζουν τα ορυκτά), γίνονταν χημικές αναλύσεις με ραδιομετρική μέθοδο, φθορισμομετρική μέθοδο, ή ατομική απορρόφηση (Σταυροπόδης και Πουρνής 1971, Σταυροπόδης και Μπασσιάκος 1980, Μελιδώνης 1980). Παρόλα αυτά, οι μέθοδοι δεν ήταν τόσο εξελιγμένοι όσο οι σημερινές, επομένως οι μετρήσεις αποτελούν μόνο ενδείξεις.

Οι τότε έρευνες δηλώνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα (1.800 τόνοι U_3O_8 σε συνολικά βέβαια αποθέματα και 6.000 τόνοι U_3O_8 σε ενδεικτικά αποθέματα (Tsirambides and Filippidis 2012c)), ιδιαίτερος στο Παρανέστι, όπου είναι δυνατόν να γίνει εκμετάλλευση του ουρανίου αφού υπολογιστούν τα αποθέματα εκ νέου. Από την εμφάνιση του Παρανεστίου παρασκευάστηκε το Yellow Cake (συμπύκνωμα οξειδίου του ουρανίου κίτρινου χρώματος), στο οποίο εντοπίστηκαν, εκτός από ουράνιο, σπάνιες γαίες και ύτριο και έτσι ανεβαίνει η αξία του μεταλλεύματος (Περγαμαλής κ.ά 1998). Το 1995 συντάχθηκε μία οικονομοτεχνική μελέτη με σκοπό την εκμετάλλευση του κοιτάσματος αυτό, η οποία δεν έχει υλοποιηθεί ακόμα.

Οι εμφανίσεις ουρανίου στον Ελληνικό χώρο, σε σχέση με τους ξενιστές γεωλογικούς σχηματισμούς διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Εμφανίσεις U σε ιζηματογενή πετρώματα (αλλουβιακά ιζήματα, λιγνίτες, φωσφορίτες). Περιέχονται στα λιγνιτικά στρώματα της μάζας της Ροδόπης και της Δυτικής Μακεδονίας, στους φωσφορικούς ορίζοντες του Ιουρασικού της Ιόνιας ζώνης και στα αλλουβιακά ιζήματα στις κοίτες των παραποτάμων του Κρουσοβίτη

(κοντά στο Σιδηρόκαστρο), στις παράκτιες περιοχές της Νέας Περάμου και των Λουτρών Ελευθερών στην Καβάλα, όπως επίσης και στον κόλπο Τούζλα στο Αγγελοχώρι στη Θεσσαλονίκη.

- Εμφανίσεις U σε μαγματικά πετρώματα (ηφαιστίτες, πλουτωνίτες) και σε υδροθερμικές φλεβικές μεταλλοφορίες που συνδέονται με αυτά. Περιέχονται στη Λυκόφη και στην Κίρκη στον Έβρο, στον Λειβαδίτη στην Ξάνθη, στο Παρανέστι στη Δράμα, στο Άγκιστρο και στη Βροντού στις Σέρρες, στη Βάθη και στην Αξιούπολη στο Κιλκίς, στο όρος Σύμβολο στο Ν. Καβάλας και στην Οξυά στην Καστοριά.

4. Αττικοκυκλαδική μάζα

Η Αττικοκυκλαδική μάζα ή αλλιώς το Αττικοκυκλαδικό σύμπλεγμα αποτελεί μία θεμελιώδη γεωτεκτονική ζώνη της Ελλάδας η οποία χαρακτηρίζεται από πολλά μεταμορφικά καθεστώτα. Αποτελείται κατά κύριο λόγο από μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα, δολομίτες και σχιστόλιθους, γνεύσιους). Παρακάτω γίνεται μία συνοπτική αναφορά των γεωτεκτονικών ζωνών της Ελλάδας και έπειτα γίνεται μία εμβάθυνση στη ζώνη ενδιαφέροντός μας, δηλαδή στην Αττικοκυκλαδική.

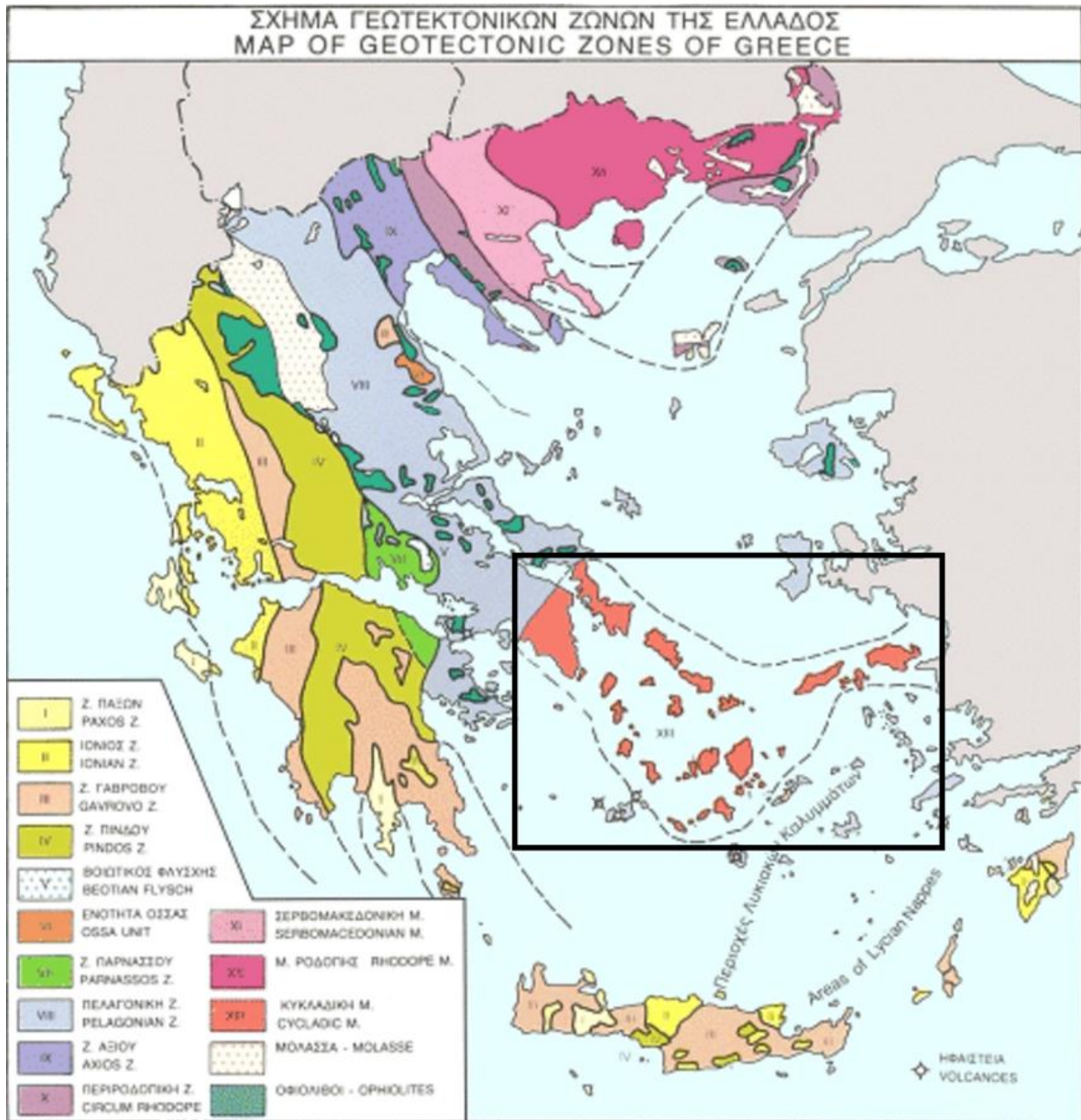
4.1 Γεωλογία Ελλάδος

Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές ενότητες: τις εξωτερικές και τις εσωτερικές Ελληνίδες. Οι κατηγοριοποίηση των δύο ενοτήτων έχει να κάνει με βάση τις ορογενέσεις που συνέβησαν στο παρελθόν. Συγκεκριμένα, στις εξωτερικές Ελληνίδες έλαβε χώρα η Αλπική ορογένεση. Αντίθετα, στις εσωτερικές Ελληνίδες έλαβαν χώρα εκτός από την Αλπική ορογένεση και παλαιότερες ορογενέσεις (Brunn, 1956).

Οι Εξωτερικές Ελληνίδες δομούνται κυρίως από θαλάσσια ιζηματογενή πετρώματα (βαθέων και ρηχών υδάτων) του Μεσοζωικού και του Καινοζωικού αιώνα. Τα πετρώματα αυτά χαρακτηρίζονται συνεχείς διεργασίες ιζηματογένεσης που καταλήγουν στην εναπόθεση φλύσχη ηλικίας Παλαιοκαίνου έως Μειοκαίνου. Σχηματίζουν ένα περίπλοκο ΝΔ με ΝΝΔ περιθώριο, μία λεπτή εφίππευση και ζώνη αναδίπλωσης από την Παλαιογενή

έως και τη Νεογενή περίοδο χωρίς σημαντικό μεταμορφισμό (Brunn, 1956, Aubouin, 1959, Zouros, 1991, Zouros, 1993, Kiliias, 2016). Εξαιτίας της Ολιγοκαινικής - Μειοκαινικής επώθησης μεταξύ των λιθοστρωματογραφικών περιοχών των εξωτερικών Ελληνίδων, δημιουργήθηκε μία μεταμορφική ζώνη υψηλής πίεσης/ χαμηλής θερμοκρασίας (HP/LT). Διακρίνονται στις ομάδες Πλακωδών Ασβεστολίθων (Plattenkalk), Φυλλίτη – Χαλαζίτη και Τριπόλεως τα οποία έχουν εκτεθεί στην επιφάνεια του εδάφους στη νότια Πελοπόννησο και Κρήτη (Seidel et al., 1982, Kiliias et al., 1994, Fassoulas et al., 1994, Jolivet et al., 1994, Stöckhert et al., 1999).

Οι Εσωτερικές Ελληνίδες από την άλλη, αποτελούνται από πετρώματα του Παλαιοζωικού και παλαιότερα στη βάση τους. Επάνω σε αυτά συναντώνται ανθρακικά ιζήματα ηλικίας Τριαδικού – Ιουρασικού, όπως επίσης και ιζηματογενείς σειρές ηπειρωτικής κατωφέρειας και ηπειρωτικού περιθωρίου, πάνω στα οποία επωθήθηκαν αρχικά οφιόλιθοι της Νέο-Τηθύος κατά τη διάρκεια του Μέσο-Άνω Ιουρασικής περιόδου. Οι Εσωτερικές Ελληνίδες χαρακτηρίζονται από έντονα τεκτονικά και μεταμορφικά καθεστώτα κατά την Αλπική ορογένεση, από το Ιουρασικό έως το Τεταρτογενές. Οι Εσωτερικές Ελληνίδες επώθησαν τις Εξωτερικές Ελληνίδες κατά το Ηώκαινο-Ολιγόκαινο (Kiliias et al., 2010, Burg, 2012, Robertson, 2012, Robertson, 2013, Kiliias et al., 2016, Godfriaux, 1968, Vergely, 1984, Schermer, 1990, Schermer, 1993, Bonev, 2006, Bonev, 2015, Bonev, 2018, Schenker, 2015).



Εικόνα 2: Γεωλογία Ελλάδος, σε μαύρο πλαίσιο Αττικοκυκλαδική μάζα, τροποποιημένο από orykta.gr

Από τα ανατολικά προς τα δυτικά υπάρχουν οι εξής τεκτονοστρωματογραφικές ζώνες που φαίνονται και στην Εικόνα 2, οι οποίες αποτελούν τις εξωτερικές και τις εσωτερικές Ελληνίδες αντίστοιχα (Kiliyas, 2023):

- Εξωτερικές Ελληνίδες: I. Ζώνη Παξών (ή Προαπούλια), II. Ιόνια ζώνη, III. Ζώνη Γαβρόβου - Τριπόλεως και IV. Ζώνη Ολωνού - Πίνδου, πιθανώς και η μονάδα Κόζιακα.
- Εσωτερικές Ελληνίδες: I. Πελαγονική ζώνη ή κάλυμμα (nappe) και υποπελαγονική ζώνη, II. Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας, III. Ζώνη Αξιού - Βαρδάρη, IV. Αττικοκυκλαδική μάζα, V. Περιοδοτική ζώνη, VI. Σερβομακεδονική μάζα, VII. Μάζα Ροδόπης.

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή θα γίνει εκτενής ανάλυση σε ένα κομμάτι των Εσωτερικών Ελληνίδων, και συγκεκριμένα στην Αττικοκυκλαδική μάζα.

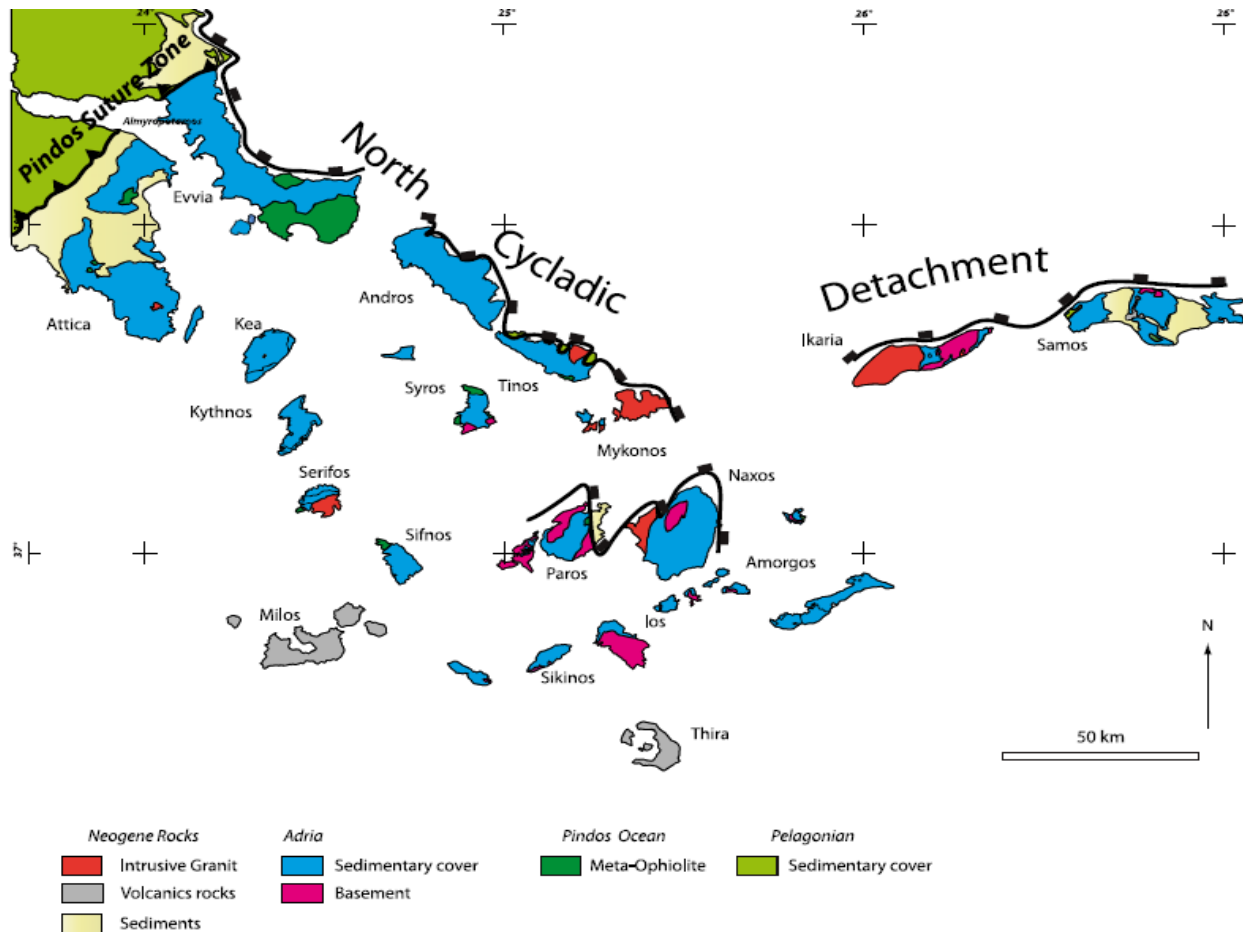
4.2 Γεωλογία Αττικοκυκλαδικής μάζας

Η Αττικοκυκλαδική μάζα αποτελεί ένα πολυμεταμορφικό σύμπλεγμα του Αλπικού ορογενούς των Εσωτερικών και Εξωτερικών Ελληνίδων που σχηματίστηκε ως αποτέλεσμα της σύγκλισης της Αφρικανικής με την Ευρασιατική ηπειρωτική πλάκα (Papanikolaou 1987, Jolivet and Brun 2010, Ring et al. 2010). Η σύγκλιση αυτή άρχισε από το τέλος της Ιουρασικής περιόδου, ενώ συνεχίζεται μέχρι και σήμερα πάνω από τη ζώνη υποβύθισης της ωκεάνιας λιθοσφαιρικής πλάκας η οποία βρίσκεται μεταξύ των δύο αυτών ηπείρων.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η Αττικοκυκλαδική τεκτονο-στρωματογραφία αναφέρεται μεν ως ενιαία, αλλά δε μπορεί να χαρτογραφηθεί σε μία μοναδική περιοχή. Αυτό συμβαίνει λόγω της εξέλιξης των διαφορετικών μερών της Αττικοκυκλαδικής μάζας, τα οποία διαχωρίζονται στα μικρά νησιά του Κεντρικού Αιγαίου (Κυκλάδες), στην χερσονήσο της Αττικής και στη Νότια Εύβοια (Wijbrans & McDougall, 1986, Bonneau, 1984, Altherr et al., 1982, Lister et al., 1984, Keay et al., 2001, Grasemann & Petrakakis, 2007, Iglseider et al., 2011, Roche et al., 2016, Ring et al., 2018, Linnros, 2019, Ring et al., 2001, Partzsch et al., 1998, Ring et al., 2010, Glodny & Ring, 2021). Στην Εικόνα 3 είναι φανερές οι ξεχωριστές λιθολογίες και οι κύριες τεκτονικές επαφές που κατανέμονται στην Αττικοκυκλαδική Μάζα. Ένας ακόμα πιο ξεκάθαρος διαχωρισμός στις βασικές ενότητες της μάζας αυτής με βάση την ορυκτολογία της είναι ο εξής:

1. Ενότητα Αττικής, η οποία αποτελείται από μάρμαρα, δολομίτες και σχιστόλιθους

2. Ενότητα Όχης η οποία βρίσκεται επωθημένη στην Ενότητα Αττικής
3. Ενότητα Στύρων που είναι υποκείμενη
4. Ενότητα Βορείων Κυκλάδων η οποία αποτελείται από μάρμαρα στη βάση, μεταφαιστειακά πετρώματα και κλαστικά ιζήματα και
5. Ενότητα Νοτίων Κυκλάδων, όπου συναντώνται κατά κύριο λόγο γνεύσιοι, αμφιβολίτες, σχιστόλιθοι, μάρμαρα και μεταφλύσχη με οφιολίθους (orykta.gr).



Εικόνα 3: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης με τις λιθολογίες και τις κύριες τεκτονικές επαφές που απαντούν στο χώρο της Αττικοκυκλαδικής Μάζας. (Philippou et al. 2012)

Ένας άλλος διαχωρισμός της Αττικοκυκλαδικής μάζας είναι με βάση τις γεωλογικές του ενότητες (Seman et al. 2017):

1. Ενότητα Βάσης
2. Ενότητα γλαυκοφανιτικών σχιστολίθων (CBU) ή Κυανοσχιστολίθων (σχιστόλιθοι Παλαιοκαίνου και γνεύσιοι του Λιθανθρακοφόρου) η οποία είναι επωθημένη πάνω

σε μία μεταμορφωμένη ηφαιστειοιζηματογενή ακολουθία ηλικίας Παλαιοκαίνου – Άνω Κρητιδικού (Jolivet et al. 2013, Seman et al. 2017).

3. Ανώτερη Τεκτονική ενότητα (μη μεταμορφωμένα πυροκλαστικά πετρώματα, οφιόλιθοι και ανθρακικά πετρώματα, ηλικίας Άνω Περμίου - Ιουρασικού, μεταμορφωμένα πετρώματα πρασινοσχιστολιθικής φάσης ηλικίας Κρητιδικού - Τριτογενούς, και μεταμορφωμένα πετρώματα και γρανιτικές διεισδύσεις ηλικίας Άνω Κρητιδικού (Reinecke et al. 1982)) η οποία εντοπίζεται στο υπερκείμενο τέμαχος των ρηγμάτων αποκόλλησης των Κυκλάδων.

Το βαθύτερο τμήμα της Αττικοκυκλαδικής μάζας αποτελείται από Ερκύνια ή παλαιότερη βάση από σχιστόλιθους και γνεύσιους, όπως και λιθανθρακοφόρα γρανιτοειδή (~300 Ma) και άφθονους μιγματίτες και γρανίτες Ολιγοκαινικής – Μειοκαινικής εποχής. Αποτελεί τα πιο βαθιά ανεσκαμμένα κομμάτια των Ελληνίδων που ανήκουν στην Απούλια βάση των Εξωτερικών Ελληνίδων, πιθανότατα αντίστοιχη με τη μάζα Menderes (Jolivet et al., 2004, Ring et al., 2001, Ring et al., 2010).

Το Αττικοκυκλαδικό υπόβαθρο επικαλύπτεται από ένα Μεταερκύνιο, Αλπικό ιζηματογενές κάλυμμα, το οποίο περιέχει μάρμαρα, μεταπηλίτες και ηφαιστειακές παρεμβολές του Κάτω Τριαδικού, που αποτελούν τη μεταμορφική συνέχεια του παθητικού περιθωρίου της Απουλίας, ισοδύναμο με την ακολουθία της ανθρακικής πλατφόρμας του Γαβρόβου στην ηπειρωτική Ελλάδα. Τα μάρμαρα περιέχουν σμύριδα και μεταβωξίτες σε κάποια μέρη, όπως για παράδειγμα στη Νάξο (Jolivet et al., 2004, Ring et al., 2010, Ring et al., 2007).

Τεκτονικά, στην ακολουθία του παθητικού περιθωρίου των Άλπεων βρίσκεται η ζώνη υψηλής πίεσης Παλαιόκαινου-Ηώκαινου η οποία αποτελείται από μάρμαρα, μεταπηλίτες, εκλογίτες και παρεμβολές μεταβασιτών, και στις Κυκλάδες. Σε αυτή τη ζώνη υψηλής πίεσης Παλαιόκαινου-Ηώκαινου συνήθως ενσωματώνονται οφιολιθικά mélanges υψηλής πίεσης που περιέχουν λεπτά στρώματα (slivers) ωκεάνιου φλοιού (ηλικίας ~80-70 Ma) (Keay, 1998, Tomaschek, 2003). Θεωρούνται τα βορειοανατολικά υποβιβασμένα τμήματα ενός μικρού ωκεάνιου φλοιού της Πίνδου/Κυκλάδων κάτω από τον κάλυμμα της Πελαγονικής (Jahn-Awe et al., 2010, Froitzheim et al., 2014, Ring & Layer, 2003). Επιπλέον, όλες οι λιθολογίες από τη βάση έως το μετα-Ερκύνιο ιζηματογενές κάλυμμα δείχνουν τη μεταμορφική επικάλλυψη υψηλής πίεσης Παλαιόκαινου-Ηώκαινου (Wijbrans

& McDougall, 1986, Okrusch & Broecker, 1990, Broecker et al., 1993, Grasemann & Petrakakis, 2007, Glodny & Ring, 2021).

Πάνω στην Αττικοκυκλαδική ζώνη υψηλής πίεσης τοποθετήθηκε τεκτονικά κατά το Παλαιόκαινο-Ηώκαινο, το Πελαγονικό κάλυμμα (nappe) όπου επωθήθηκαν οι οφιόλιθοι της Νέο-Τηθύος του Μέσου-Ύστερου Ιουρασικού. Σήμερα, λόγω του εντατικού εφελκυσμού του Αιγαίου (Ολιγόκαινο-Μειόκαινο), απογυμνώθηκαν τεκτονικά και διαβρώθηκαν, ενώ σώζονται μόνο μικρά υπολείμματα ή κλαστικά συσσωματώματα στα ιζήματα των λεκανών του Νεογενούς (Bonneau, 1984, Reinecke et al., 1982, Sanchez-Gomez et al., 2002).

Η Αττικοκυκλαδική ζώνη υψηλής πίεσης αποτελεί ένα τυπικό σύμπλεγμα μεταμορφωμένου πυρήνα που εκθάφτηκε κατά τον εφελκυσμό Ολιγόκαινου-Μειόκαινου στις Ελληνίδες κατά μήκος κανονικών ρηγμάτων που σχετίζονται με σχηματισμό μυλονιτών και μεταμορφισμό υψηλής θερμοκρασίας στα βαθύτερα τεκτονικά επίπεδα (Jolivet et al., 2004, Jolivet et al., 2010, Lister et al., 1984, Keay et al., 2001, Grasemann et al., 2007, Iglseder et al., 2011, Ring et al., 2018, Linnros et al., 2019, Partzsch et al., 1998, Gessner et al., 2001, Ustaszewski et al., 2009, Tomaschek et al., 2003).

5. Κρίσιμα μέταλλα στην Αττικοκυκλαδική ζώνη

Όπως φάνηκε και από το Κεφάλαιο 3, τα κρίσιμα μέταλλα που βρίσκονται σε διάφορα είδη πετρωμάτων εντός της Αττικοκυκλαδικής ζώνης είναι:

- Το **αντιμόνιο** σε χαλαζιακές φλέβες με τη μορφή αντιμονίτη σε χαμηλές περιεκτικότητες στη Σάμο.
- Το **τελλούριο** σε μορφή τελλουριδίων εντός πολυμεταλλικών μεταλλοφοριών που συνδέονται με χαλαζιακές φλέβες που τέμνουν μεταμορφωμένα πετρώματα στη Πάνορμο Τήνου), ή ως αυτοφυές μέταλλο μικρών συγκεντρώσεων στις παραπάνω μεταλλοφορίες.
- Το **ρήνιο** σε μεταλλοφορίες πορφυριτικού κοιτάσματος $Mo\pm Cu$ σε μικρή περιεκτικότητα στην Πλάκα Λαυρίου (ρήνιο έως 0,13% στο μολυβδαινίτη) και σε μεταλλοφορίες μαγματικών διεισδύσεων στη Σέριφο που χαρακτηρίζονται επίσης από μολυβδαινίτη.
- Τα μέταλλα **γάλλιο, γερμάνιο και ίνδιο** σε κοιτάσματα αντικατάστασης και επιθερμικού τύπου, κυρίως σε μεταλλοφόρα σώματα πλούσια σε μόλυβδο – ψευδάργυρο και χαλκό στο Λαύριο. Οι περιεκτικότητές τους είναι έως 326g/t γάλλιο, έως 95 g/t ίνδιο και έως 7g/t γερμάνιο.
- Το **βολφράμιο** στο πορφυριτικό κοιτάσμα μολυβδαινίου± χαλκού στην Πλάκα Λαυρίου
- Οι **σπάνιες γαίες** σε κοιτάσματα μαγματικών διεισδύσεων και συγκεκριμένα αποφύσεων του γρανοδιορίτη στην Πλάκα Λαυρίου με περιεκτικότητες σπάνιων γαιών έως και 0.15%.

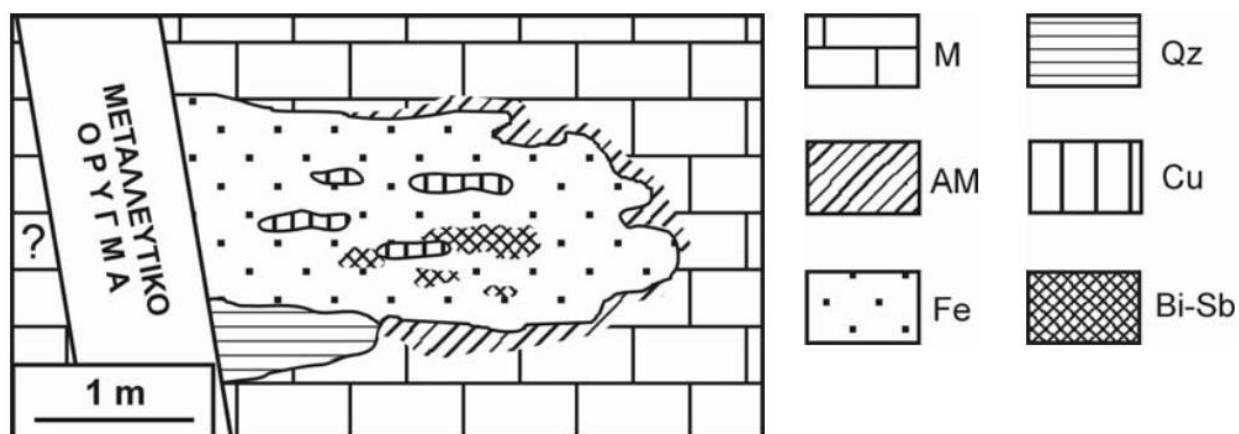
Εκτός από τις πληροφορίες που εκμαιεύθηκαν από το τρίτο Κεφάλαιο, υπάρχουν επιπλέον έρευνες για τα κρίσιμα μέταλλα που αξίζει να αναφερθούν στην πτυχιακή. Στα παρακάτω υποκεφάλαια λοιπόν, γίνεται ένας εντοπισμός των κρίσιμων μετάλλων και των περιεκτικότητων τους στη Λαυρεωτική, στη Μήλο και στην Εύβοια.

5.1 Κρίσιμα μέταλλα στη Λαυρεωτική

Η κύρια μεταλλοφορία που παρατηρείται στη Λαυρεωτική σύμφωνα με Σολωμός κ.α. (2004), Skarpelis (2007), Voudouris et al. (2008a,b), είναι η μεταλλοφορία των μεικτών

θειούχων. Τα ορυκτά που περιέχονται σε αυτή είναι αρσενοπυρίτης, γαληνίτης, σιδηροπυρίτης, σφαλερίτης, χαλκοπυρίτης και σε μικρότερες ποσότητες άλλα θειούχα ορυκτά και θειοάλατα τα οποία φέρουν μεταλλοφορία, ενώ τα σύνδρομα ορυκτά που συναντώνται είναι ασβεστίτης, ανκερίτης-δολομίτης, φθορίτης, βαρίτης και χαλαζίας. Το μεγαλύτερο μέρος της μεταλλοφορίας έχει υποστεί οξείδωση και λόγω διεργασιών έκπλυσης και υπεργενετικού εμπλουτισμού σχηματίστηκαν επιπλέον δευτερογενή ορυκτά. Τα ορυκτά αυτά είναι πάρα πολλά, εάν αναλογιστεί κανείς ότι έχουν βρεθεί και περιγραφεί από τα μεταλλεία του Λαυρίου συνολικά πάνω από 750 διαφορετικά ορυκτά (Κατερινόπουλος & Ζησιμοπούλου 1994, Wendel & Markl 1999, Baumgärtl & Burow 2002, Voudouris et al. 2021).

Ως προς τα κρίσιμα μέταλλα που εντοπίστηκαν στην Καμάριζα, παρατηρείται ότι ο χαλκός (3-6%κ.β.) και το αντιμόνιο (8700 ppm) είναι τα πλέον διαδεδομένα μέταλλα, ενώ επίσης εμφανίζονται το βισμούθιο (>1000 ppm) και ο χρυσός (>100 ppm) (Μαρίνος & Petrascheck 1956, Skarpelis 2002, Voudouris & Economou-Eliopoulos 2003, Voudouris et al. 2018). Υπάρχουν και κάποιες αναφορές για τις περιοχές Τραχυγκέρα, Μερκάτι και Καμάριζα για τον εντοπισμό χρυσού με βισμούθιούχα ορυκτά και για δευτερογενή ορυκτά του βισμούθιου, παρόλα αυτά είναι πολύ γενικές και δεν αναφέρουν λεπτομέρειες (Κόκκορος 1955, Μαρίνος & Petrascheck 1956, Κατερινόπουλος & Ζησιμοπούλου 1994, Voudouris & Economou-Eliopoulos 2003, Wendel & Markl, 1999, Baumgärtl & Burow, 2002).



Εικόνα 4: Σχηματική τομή της εμφάνισης βισμούθιου – χαλκού – αντιμονίου. M: μάρμαρο, AM: ανκεριτωμένο μάρμαρο, Fe: οξείδια – υδροξείδια σιδήρου, Qz: χαλαζίας, Cu: χαλκούχος παραγένεση, Bi-Sb: βισμούθιούχος – αντιμονιούχος παραγένεση (Solomos et al. 2004)

Η εμφάνιση του οξειδωμένου μεταλλεύματος έχει περιορισμένες διαστάσεις (Εικόνα 4) και τοποθετείται στο χωριό Άγιος Κωνσταντίνος και συγκεκριμένα στον τομέα Ιλάριο του κοιτάσματος Καμάριζας. Βρίσκεται εντός του σχηματισμού του Κατώτερου Μαρμάρου. Είναι μία τυπική μορφή υδροθερμικής μεταλλοφορίας από αντικατάσταση ανθρακικών πετρωμάτων η οποία έχει ως χαρακτηριστικό την στρωματόμορφη ανάπτυξη.

Αρχικά φαίνεται ότι η εμφάνιση αυτή περιείχε σιδηροπυρίτη ± αρσενοπυρίτη, τα οποία οξειδώθηκαν και δημιούργησαν έτσι ερυθρά οξείδια και υδροξείδια σιδήρου, που συνοδεύονται από χαλαζία. Η μάζα των οξειδίων σιδήρου φιλοξενεί τρία είδη διαφορετικών παραγενέσεων, εκ των οποίων τα ορυκτά φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 Δευτερογενή ορυκτά της βισμούθιούχου και αντιμονιούχου παραγένεσης από την περιοχή μελέτης (Σολωμός κ.α., 2004).

Ορυκτό	Χημικός τύπος	Ορυκτό	Χημικός τύπος
Βισμίτης	Bi_2O_3	Μιξίτης	$\text{BiCu}_6(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Βισμουτίτης	$(\text{BiO})_2\text{CO}_3$	Στιμπικονίτης	$\text{Sb}_3\text{O}_6(\text{O},\text{OH})$
Κετνερίτης	$\text{CaBiOCO}_3\text{F}$	Μπιντχαιμίτης	$\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_6\text{OH}$
Μπεϋερίτης	$(\text{Ca},\text{Pb})(\text{BiO})_2(\text{CO}_3)_2$	Μιμετίτης	$(\text{Pb},\text{Ca})_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
Πραΐσινγκερίτης	$\text{Bi}_3(\text{AsO}_4)_2\text{OOH}$	Γκαρτρελίτης	$\text{Pb}(\text{Cu},\text{Fe}^{+3})_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH},\text{H}_2\text{O})_2$
Ρουσβελτίτης	BiAsO_4		

Οι παραγενέσεις αυτές παρουσιάζονται σαν συγκεντρώσεις υποκίτρινων και υποπράσινων λεπτόκοκκων ορυκτών και είναι:

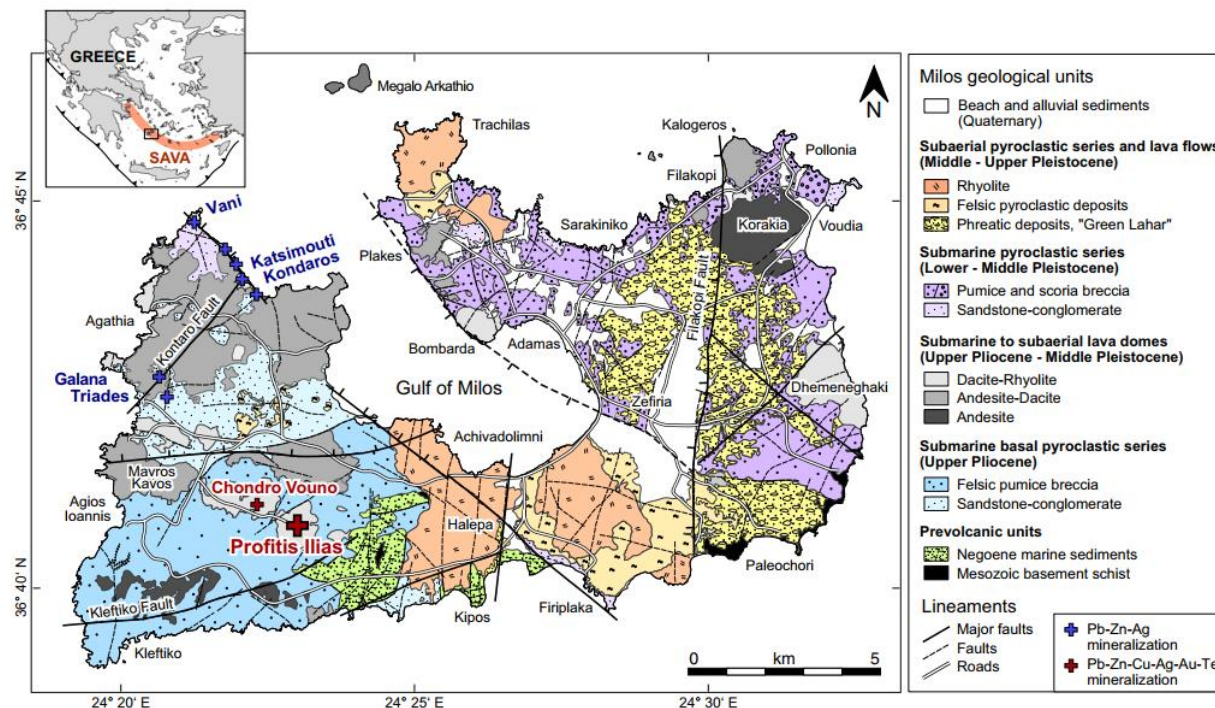
1. Χαλκούχος παραγένεση με μορφή μικρών φακόμορφων ή ακανόνιστων συμπαγών σωμάτων
2. Βισμούθιούχος παραγένεση
3. Αντιμονιούχος παραγένεση

Μεταξύ ρωγμών και κοιλότητων της μεταλλοφορίας έχει γίνει ανάπτυξη δευτερογενών ορυκτών χαλκού και βισμούθιου, τα οποία δημιουργήθηκαν εξαιτίας της άμεσης κρυστάλλωσης από υπεργενετικά διαλύματα και δεν πρέπει να συγχέονται με τα παραγενετικά δευτερογενή ορυκτά.

5.2 Κρίσιμα μέταλλα στη Μήλο

Η Μήλος είναι τμήμα της Απτικοκυκλαδικής μάζας το οποίο χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες μεταλλοφορίες με κρίσιμα μέταλλα. Η δημοσίευση των Alfieris et al. (2013) και Grosche

et al. (2023) δίνει χρήσιμες πληροφορίες για αυτές, μιας και λήφθησαν δείγματα γεωτρήσεων από την περιοχή του Προφήτη Ηλία στη φλεβική μεταλλοφορία Μολύβδου - Ψευδαργύρου - Χαλκού - Αργυρού - Χρυσού (Pb-Zn-Cu-Ag-Au).



Εικόνα 5: Γεωλογικός χάρτης της Μήλου (τροποποιημένο από Stewart and McPhie 2006; Schaarschmidt et al. 2021a) που υποδεικνύει τις τοποθεσίες υδροθερμικών φλεβικών μεταλλευμάτων. Ο Προφήτης Ηλίας βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο του νησιού και φιλοξενεί φλεβική μεταλλοφορία Pb-Zn-Cu-Ag-Au. Το ένθετο δείχνει τη θέση της Μήλου στο ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου (South Aegean Volcanic Arc, SAVA)

Το νησί αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από πλειοκαινικές έως πρόσφατες ηφαιστειακές και ηφαιστειοκλαστικές μονάδες που επωθούνται στη μεταμορφωμένη βάση και ορισμένα νεογενή θαλάσσια ιζήματα (Fytikas et al. 1986). Στη βάση αυτή επικρατούν μεταιζήματα μεσοζωικού πρασινοσχιστολιθικής έως κυανοσχιστολιθικής φάσης της Ενότητας γλαυκοφανιτικών σχιστολίθων CBU Μονάδας Κυκλαδικού Κυανοσχιστικού (Liakopoulos et al. 1991; Grasemann et al. 2018). Η υδροθερμική δραστηριότητα οδήγησε στο σχηματισμό αρκετών φλεβικών μεταλλοφοριών υβριδικού επιθερμικού-VMS τύπου Pb-ZnCu-Ag-Au στη δυτική Μήλο (Naden et al. 2005; Alfieris et al. 2013; Schaarschmidt et al. 2021a). Υδροθερμική δραστηριότητα εντοπίζεται κατά μήκος της ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης ρηξιγενούς ζώνης, στην τεκτονικά ενεργή τάφρο που σχηματίζεται στην περιοχή (ιδιαίτερα

στον κόλπο του Παλαιοχωρίου που βρίσκεται νοτιοανατολικά του νησιού και εντοπίζεται στην Εικόνα 5) (Valsami-Jones et al. 2005).

Ο Προφήτης Ηλίας αντιπροσωπεύει το υψηλότερο σημείο του νησιού (748m) και παρουσιάζει φλεβική μεταλλοφορία, η οποία μελετήθηκε για Au κατά τη διάρκεια ενός προγράμματος γεωτρήσεων το 1994. Η μεταλλοφορία Pb-ZnCu-Ag-Au στον Προφήτη Ηλία έχει υπολογιστεί ότι περιέχει πέντε εκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος με 4,4 g/t Au και 43 g/t Ag και έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών κατά το παρελθόν (Kilias et al. 2001, Naden et al. 2005, Alfieris et al. 2013).

Τα εξαλλοιωμένα ηφαιστειακά πετρώματα από τον Προφήτη Ηλία χαρακτηρίζονται απο γενικό εμπλουτισμό σε Zn, As, Tl, Sn και Pb και μια ασθενή εξάντληση των Au, Ag, Cu και Te σε σχέση με το λιγότερο αλλοιωμένο δείγμα του ιγνιβρίτη (Grosche et al., 2023). Ωστόσο, τα εξαλλοιωμένα δείγματα δείχνουν έναν ισχυρό εμπλουτισμό Pb, Au, Ag, Cu και Te συγκριτικά με τη μη εξαλλοιωμένη λάβα της Μήλου, η οποία έχει μόνο ~ 10 μg/g Pb και Cu, πολύ χαμηλές περιεκτικότητες σε Ag, Au, και συγκεντρώσεις Te κάτω από το όριο ανίχνευσης (< 0,08, < 0,002, < 0,001 μg/g) (Grosche et al., 2023).

Οι συγκεντρώσεις χρυσού και Ag σε δείγματα μεταλλεύματος εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε ρηχά επίπεδα άνω των 500m, με τις μέγιστες περιεκτικότητες να είναι στα 57 μg/g Au και 1200 μg/g Ag στα 621 m (Naden et al. 2003).

Πίνακας 4: Συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων σε πυρίτη και μαρκασίτη από το υδροθερμικό πεδίο Καλυπού (N. Ζηλανδία) και τον κόλπο Παλαιοχωρίου

Vent field/Min. Type		Co [ppm]	Cu [ppm]	Zn [ppm]	As [ppm]	Mo [ppm]	Ag [ppm]	Sb [ppm]	Hg [ppm]	Tl [ppm]	Pb [ppm]
Calypso SE	Min	0.24	1.19	209	14,545	22.4	0.03	0.07	2.40	0.66	0.17
py fine-grained	Max	11.5	8.19	321	35,538	40.0	0.07	0.30	85.7	3.11	3.61
n = 8	Geomean	0.61	2.34	272	28,383	30.5	0.05	0.16	15.6	1.59	0.49
	GSD	3.45	2.97	1.15	1.33	1.19	1.46	2.11	3.56	1.74	3.12
Calypso SE	Min	0.11	b.d.l.	32.0	2599	18.6	0.05	0.22	10.6	2.09	0.10
py vein-type	Max	0.14	b.d.l.	284	32,529	47.3	0.05	16.2	2037	554	1.37
n = 10	Geomean	0.12	n/a	76.2	6511	28.9	0.05	1.33	554	215	0.20
	GSD	1.20	n/a	2.09	2.27	1.36	n/a	4.53	4.27	5.19	2.45
Calypso SE	Min	5.34	8.15	278	575	4.81	0.10	1.55	17.9	13.5	7.08
mic fine-grained	Max	81.3	127	832	4387	59.1	0.57	27.7	246	384	882
n = 9	Geomean	20.6	43.3	464	1334	18.4	0.28	8.05	104	119	117
	GSD	3.04	2.68	1.47	1.85	2.16	1.92	2.50	2.33	3.80	4.07
Calypso SW	Min	0.17	1339	577	307	2.13	1068	305	12.2	52.4	3614
py fine-grained	Max	12.4	5515	22,897	10,650	127	10,680	11,239	366	9190	23,747
n = 18	Geomean	1.28	2527	3269	1903	15.2	3246	1808	63.5	1136	10,315
	GSD	3.81	1.45	3.33	2.73	3.34	2.04	2.92	2.99	4.84	1.64
Calypso SW	Min	0.72	63.95	19.5	15.5	5.83	0.02	0.83	1.45	0.24	1.51
mic fine-grained	Max	512	388	29,144	353	64.0	0.27	42.3	30.4	7.08	45.8
n = 22	Geomean	34.5	141	82.9	75.1	24.3	0.07	4.03	12.0	2.35	10.2
	GSD	4.20	1.70	5.42	2.08	1.94	2.13	2.43	2.12	2.14	2.77
Calypso N	Min	0.11	1.45	1.88	15.2	0.05	0.03	0.40	0.20	0.01	2.38
py fine-grained	Max	96.7	76.6	338	5665	35.3	1.97	44.6	217	26.7	269
n = 18	Geomean	6.90	15.4	8.78	592	1.95	0.34	9.86	15.9	4.24	35.2
	GSD	6.99	3.07	4.59	5.51	5.09	3.16	2.86	5.02	5.89	3.93
Calypso N	Min	0.10	2.96	16.9	0.40	0.13	0.04	0.20	0.90	0.05	0.30
mic fine-grained	Max	60.0	95.0	255	534	8.86	2.68	0.36	1.95	0.40	44.0
n = 10	Geomean	1.47	15.4	47.9	4.37	0.71	0.46	0.27	1.42	0.18	1.46
	GSD	9.81	3.42	2.42	12.2	5.33	4.65	1.52	1.43	1.86	4.54
Paleochori bay	Min	0.77	2.19	48.5	272	1.94	0.06	1.02	0.93	5.40	6.64
py colloform	Max	93.5	179	227	4250	10.8	20.3	13.4	3008	107	613
n = 10	Geomean	6.59	8.26	103	1141	4.43	0.30	5.69	6.07	32.2	59.1
	GSD	5.04	3.65	1.83	2.59	1.83	7.60	2.19	15.1	2.58	4.35
Paleochori bay	Min	0.19	0.41	16.5	181	0.70	0.01	1.04	0.58	0.40	0.28
mic colloform	Max	97.1	13.6	177	11,122	14.8	1.78	64.8	155	75.8	3863
n = 31	Geomean	1.80	3.01	57.6	1051	3.14	0.13	7.76	17.0	9.76	13.1
	GSD	3.99	2.79	1.91	3.00	2.09	3.62	2.71	5.54	4.07	9.12
Paleochori bay	Min	10.7	2.86	53.1	9828	5.53	0.05	170	7.21	4738	280
py semi-massive	Max	58.9	56.4	328	25,732	19.9	0.48	2670	178	8868	3407
n = 7	Geomean	31.2	13.8	124	17,607	10.8	0.23	996	56.5	6482	1402
	GSD	1.76	2.81	2.26	1.43	1.48	2.25	2.60	2.88	1.28	2.41
Paleochori bay	Min	0.51	0.22	80.1	456	6.05	0.03	4.21	0.34	639	3.44
mic semi-massive	Max	28.7	28.2	3234	12,257	78.5	0.19	754	147	5112	1408
n = 14	Geomean	4.74	2.59	310	1469	16.8	0.05	23.3	1.30	1816	23.9
	GSD	3.02	4.90	2.72	2.51	2.06	2.08	3.48	4.80	1.74	4.47

The full data set is presented in the **Supplementary Table S2**. Abbreviations: py, pyrite; mic, marcasite; GSD, Geometric Standard Deviation, b.d.l., below detection limit.

Ο εμπλουτισμός του χρυσού σχετίζεται με τον αυτοφυές χρυσό και το ήλεκτρο (φυσικό κράμα αργύρου και χρυσού) σε δείγματα άνω των 430m (Kilias et al. 2001; Alfieris et al. 2013). Η σχιστολιθική μεταμορφική βάση δείχνει έναν πιο αδύναμο, αλλά παρόμοιο εμπλουτισμό από As, Au, Ag, Sb, και Te συγκριτικά με το UCC, ενώ το Pb και το Cu είναι σχεδόν εξαντλημένο.

Ο εμπλουτισμός του τελλουρίου σε σουλφίδια και η παρουσία του στον Προφήτη Ηλία είναι χαρακτηριστική, η οποία προέρχεται από την προσθήκη Te από ηφαιστειακά αέρια, η οποία με τη σειρά της προϋποθέτει έναν ρηχό θάλαμο μάγματος κάτω από τη

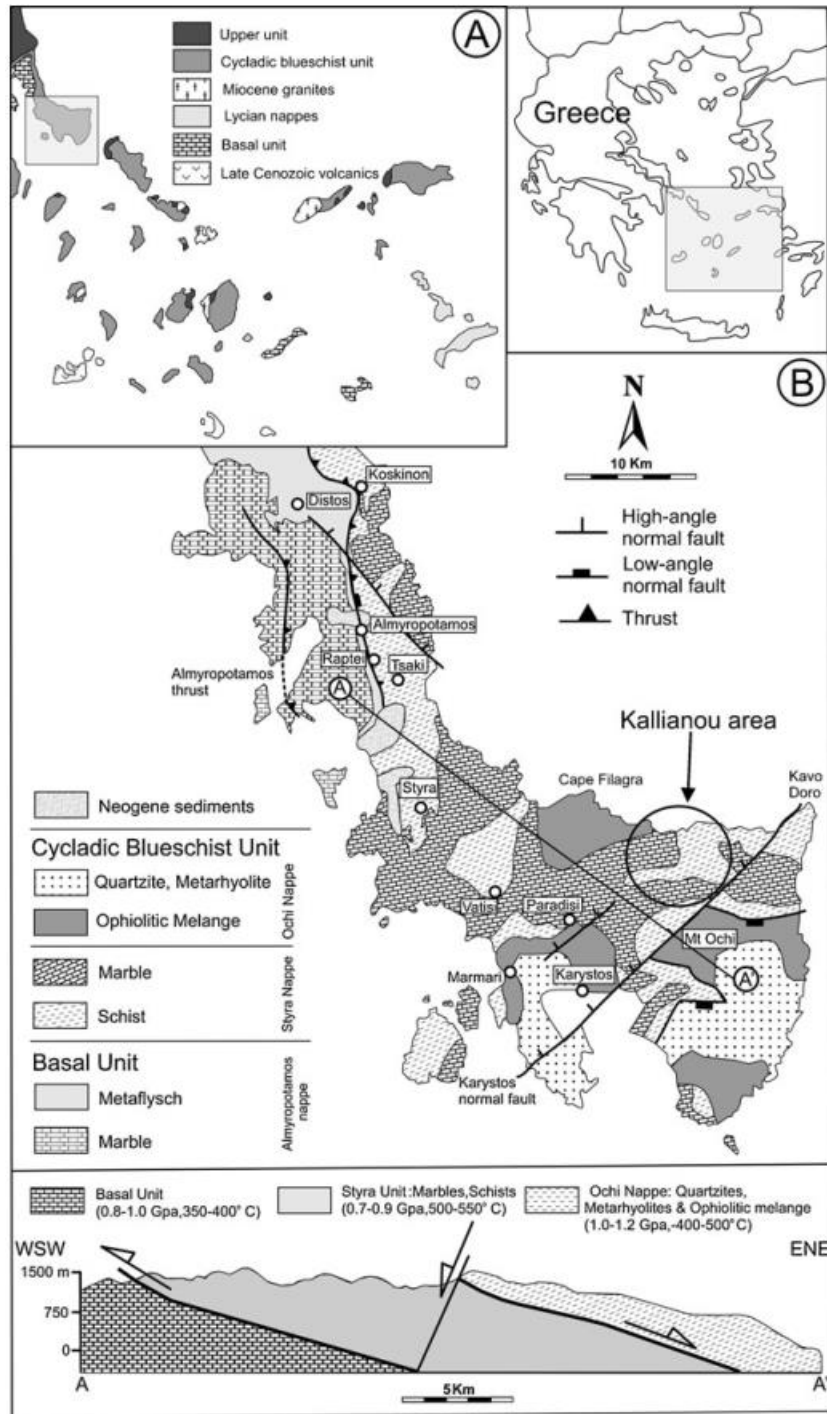
νοτιοδυτική Μήλο. Δεν μπορούμε να αποκλείσουμε ότι το μάγμα παρείχε επίσης άλλα στοιχεία όπως As, Se ή Bi στο υδροθερμικό σύστημα. Παρόλα αυτά, σε αντίθεση με το Te, η συγκέντρωση αυτών των στοιχείων παρουσιάζει μικρή διακύμανση στα ρηχά μέρη όλων των φλεβικών συγκεντρώσεων στη δυτική Μήλο.

Ο εμπλουτισμός Au του Προφήτη Ηλία υποδιαιρείται γενετικά σε ένα ανώτερο τμήμα (>400–500m υψόμετρο), όπου ο αυτοφυής χρυσός Au εμπλουτίστηκε στο έδαφος και ένα χαμηλότερο τμήμα (<300 m), όπου το Au φιλοξενείται εντός θειούχων σουλφιδίων (έως 2 μg/g Au) και συνδέεται επίσης με εγκλείσματα Ag-Au-τελλουριδίων στον σιδηροπυρίτη που αποτέθηκε κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της μαγματικής-υδροθερμικής δραστηριότητας.

5.3 Κρίσιμα μέταλλα στην Εύβοια

Η Εύβοια έχει επίσης μελετηθεί κατά κόρον για την εύρεση κρίσιμων μετάλλων, ιδιαίτερα η περιοχή Καλλιάνος Ευβοίας (Εικόνα 6). Στον Καλλιάνο έχει παρατηρηθεί ότι η μεταλλοφορία αποτελείται κυρίως από σουλφίδια Fe-Pb-Cu-Zn (Alexouli-Livaditi, 1978, Theophilopoulos & Vakondios, 1982, Perlikos, 1989, Vavelidis and Michailidis, 1990, Voudouris et al. 2011a, Tombros et al. 2021). Τα πετρώματα ξενιστές των σουλφιδίων είναι οι μεταπηλίτες (μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι) και μάρμαρα από το κάλυμμα των Στυρών. Το υπογενετικό μέταλλευμα περιέχει έως και 30 g/t Au (Theophilopoulos & Vakondios 1982).

Στοές, φρεάτια και χώροι απόρριψης πετρωμάτων υποδηλώνουν έντονη μεταλλευτική δραστηριότητα από τα αρχαία χρόνια. Τα λατυποπαγή εντός των μαρμάρων αποτελούνται από σπασμένα γωνιακά θραύσματα του μητρικού πετρώματος, το οποίο βρίσκεται συνεκτικοποιημένο κυρίως από χαλαζία, χλωρίτη, αλβίτη και ασβεστίτη. Ογκώδεις έως διασπαρμένοι πορφυροβλάστες γαληνίτη είναι διασκορπισμένοι μεταξύ ρηγμάτων χαμηλής γωνίας, ιδιαίτερα σε ζώνες λατυποπαγών σε μια συνδετική ύλη που αποτελείται από ασβεστίτη-χλωρίτη-χαλαζία.



Εικόνα 6: (α) Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της μεταλλευτικής περιοχής των Καλλιανών που δείχνει τη θέση της στο κάλυμμα επώθησης στα Στύρα (τροποποιήθηκε από Voudouris et al. 2011a, Ring et al. 2007) (β) Τομή μέσω της CBU στην Εύβοια, που δείχνει την επαφή επώθησης στη βάση του καλύμματος επωθήσεως στα Στύρα και την κανονική επαφή του ρήγματος στην κορυφή του (τροποποιήθηκε από Voudouris et al. 2011a, Ring and Glodny 2010)

Οι μεταλλοφορίες απαντούν κυρίως εντός ρηξιγενών ζωνών και χαλαζιακών φλεβών οι οποίες τέμνουν τις μεταμορφικές δομές των σχιστολίθων και μαρμάρων της Ενότητας Στύρων. Οι φλέβες χαλαζία (έως 3m πάχος και 100m μήκος) κατευθύνονται ΒΔ-ΝΑ και είναι τέμνουν υπό μεγάλη γωνία τις μεταμορφικές δομές (Theophilopoulos and Vakondios 1982; Perlikos 1989; Vavelidis and Michailidis 1990). Οι φλέβες έπονται της πλαστικής παραμόρφωσης, που σχετίζεται με μεταμορφισμό υψηλής P- χαμηλής T, η οποία σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια του Ηώκαινου-Ολιγόκαινου, και σχηματίσθηκαν κατά τη διάρκεια του Μειόκαινου (Tombras et al. 2021). Δομικές και μικροδομικές μελέτες παρόμοιων μη μεταλλοφόρων χαλαζιακών φλεβών σε μεταμορφωμένα πετρώματα της Ενότητας Στύρας - Όχη της νότιας Εύβοιας (Nüchter & Stöckhert, 2007) πρότειναν ότι οι φλέβες χαλαζία σχηματίστηκαν κοντά στην πλαστικό-θραυσιγενή μετάβαση. Οι χαλαζιακές φλέβες που φέρουν σουλφίδια περιέχουν έως και 52 g/t Au και 242 g/t Ag (Alexouli-Livaditi 1978).

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες από αντιπροσωπευτικά δείγματα ορυκτών και οι περιεκτικότητές τους σε κρίσιμα μέταλλα:

Πίνακας 5: Αντιπροσωπευτικές αναλύσεις ηλεκτρονικών μικροσκοπίων των ορυκτών που μοιάζουν με κερβελλείτη (cervelleite)

wt%	Ag	Cu	Fe	Pb	Au	Bi	Sb	S	Te	Se	Total	Calculated formula (to 6 atoms)
1	64.75	0.54	0.00	1.02	0.00	0.13	0.00	7.11	27.12	0.05	100.82	(Ag _{3.429} Cu _{0.050}) _{3.479} Te _{1.214} S _{1.267}
2	67.37	2.64	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	5.72	25.24	0.01	101.00	(Ag _{3.593} Cu _{0.239}) _{3.832} Te _{1.138} S _{1.026}
3	68.59	2.54	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	5.82	25.01	0.01	102.02	(Ag _{3.619} Cu _{0.227}) _{3.846} Te _{1.115} S _{1.033}
4	69.06	1.92	0.05	0.00	0.13	0.00	0.03	5.49	25.16	0.04	101.86	(Ag _{3.690} Cu _{0.174}) _{3.864} Te _{1.136} S _{0.986}
5	64.45	0.34	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	5.68	28.84	0.01	99.38	(Ag _{3.561} Cu _{0.032}) _{3.593} Te _{1.347} S _{1.056}
6	69.34	1.94	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	5.40	23.37	0.00	100.09	(Ag _{3.761} Cu _{0.178}) _{3.939} Te _{1.072} S _{0.985}
7	67.75	0.28	0.00	0.24	0.15	0.00	0.01	5.99	24.07	0.00	98.48	(Ag _{3.732} Cu _{0.026}) _{3.758} Te _{1.121} S _{1.109}
8	64.11	0.69	0.00	0.20	0.12	0.05	0.01	2.86	32.17	0.02	100.23	(Ag _{3.759} Cu _{0.068}) _{3.827} Te _{1.595} S _{0.564}
9	63.90	0.14	0.00	0.06	0.00	0.00	0.05	5.70	30.79	0.13	100.76	(Ag _{3.498} Cu _{0.013}) _{3.511} Te _{1.425} S _{1.050}
10	63.69	0.25	0.02	0.00	0.06	0.04	0.04	5.69	31.70	0.05	101.57	(Ag _{3.464} Cu _{0.023}) _{3.487} Te _{1.457} S _{1.042}

Πίνακας 6: Αντιπροσωπευτικές αναλύσεις ηλεκτρονικών μικροσκοπιών των of Ag_2CuTeS (1-17) and $(Ag,Cu)_2TeS$

wt%	Ag	Cu	Fe	Pb	Au	Bi	Sb	S	Te	Se	Total	
<i>Ag₂CuTeS</i>												Calculated formula (to 5 atoms)
1	47.92	14.03	0.01	0.40	0.00	0.00	0.00	7.12	29.91	0.00	99.47	Ag _{1.975} Cu _{0.982} Te _{1.045} S _{0.988}
2	47.64	14.29	0.13	0.40	0.01	0.08	0.00	7.71	28.38	0.08	98.73	Ag _{1.945} Cu _{0.990} Te _{0.979} S _{1.060}
3	48.30	13.80	0.12	0.48	0.00	0.00	0.00	7.11	29.21	0.02	99.08	Ag _{1.997} Cu _{0.969} Te _{1.021} S _{0.989}
4	48.81	14.53	0.87	0.31	0.00	0.00	0.00	7.34	29.58	0.04	101.47	Ag _{1.951} Cu _{0.986} Te _{0.999} S _{0.987}
5	49.32	13.20	0.56	0.58	0.00	0.02	0.00	6.86	30.08	0.04	100.69	Ag _{2.026} Cu _{0.921} Te _{1.044} S _{0.948}
6	48.16	13.73	0.01	0.43	0.00	0.00	0.00	7.19	28.57	0.04	98.14	Ag _{2.005} Cu _{0.970} Te _{1.005} S _{1.007}
7	47.91	13.83	0.00	0.71	0.09	0.05	0.05	7.04	28.99	0.03	98.72	Ag _{1.993} Cu _{0.977} Te _{1.020} S _{0.985}
8	46.59	14.80	0.03	0.67	0.00	0.00	0.00	8.04	29.41	0.03	99.59	Ag _{1.877} Cu _{1.012} Te _{1.002} S _{1.089}
9	47.46	16.92	0.00	0.00	0.02	0.00	0.07	6.67	28.39	0.00	99.53	Ag _{1.934} Cu _{1.171} Te _{0.978} S _{0.915}
10	46.71	18.21	0.00	0.00	0.02	0.02	0.06	6.53	27.99	0.00	99.54	Ag _{1.894} Cu _{1.253} Te _{0.959} S _{0.891}
11	49.39	13.07	0.00	0.20	0.10	0.00	0.06	7.06	29.98	0.00	99.86	Ag _{2.043} Cu _{0.918} Te _{1.048} S _{0.983}
12	49.28	13.56	0.73	0.00	0.00	0.00	0.04	7.03	30.44	0.00	101.09	Ag _{2.001} Cu _{0.935} Te _{1.045} S _{0.960}
13	48.23	12.99	0.09	0.00	0.00	0.00	0.11	6.98	29.98	0.00	98.41	Ag _{2.019} Cu _{0.923} Te _{1.061} S _{0.984}
14	49.00	13.35	0.03	0.27	0.07	0.03	0.05	7.19	29.78	0.00	99.78	Ag _{2.019} Cu _{0.933} Te _{1.037} S _{0.997}
15	48.80	13.48	0.02	0.05	0.00	0.00	0.08	7.03	29.94	0.00	99.39	Ag _{2.019} Cu _{0.947} Te _{1.048} S _{0.979}
16	48.72	14.55	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	7.46	29.72	0.00	100.48	Ag _{1.970} Cu _{0.998} Te _{1.016} S _{1.016}
17	48.49	13.75	0.02	0.00	0.08	0.00	0.07	7.03	29.88	0.00	99.33	Ag _{2.009} Cu _{0.964} Te _{1.045} S _{0.978}
<i>(Ag,Cu)₂TeS</i>												Calculated formula (to 4 atoms)
18	42.58	12.40	0.01	0.42	0.00	0.05	0.01	8.28	36.09	0.00	99.83	(Ag _{1.393} Cu _{0.688}) _{2.081} Te _{0.998} S _{0.912}
19	42.85	12.98	0.03	0.22	0.00	0.07	0.00	8.28	35.40	0.00	99.85	(Ag _{1.394} Cu _{0.718}) _{2.112} Te _{0.974} S _{0.907}
20	43.61	10.89	0.02	0.61	0.07	0.00	0.00	7.74	35.10	0.01	98.10	(Ag _{1.474} Cu _{0.625}) _{2.099} Te _{1.003} S _{0.881}
21	40.31	13.33	0.10	1.41	0.14	0.00	0.11	8.69	35.21	0.00	99.30	(Ag _{1.310} Cu _{0.735}) _{2.045} Te _{0.968} S _{0.951}
22	40.90	12.58	0.04	0.00	0.23	0.02	0.14	8.58	36.07	0.00	98.57	(Ag _{1.341} Cu _{0.700}) _{2.041} Te _{0.999} S _{0.947}
23	42.98	12.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	8.20	36.74	0.00	100.34	(Ag _{1.409} Cu _{0.679}) _{2.088} Te _{0.989} S _{0.897}
24	41.30	12.95	0.05	0.00	0.03	0.00	0.12	8.63	36.52	0.00	99.60	(Ag _{1.339} Cu _{0.713}) _{2.052} Te _{1.000} S _{0.941}

Τα μεταλλοφόρα ορυκτά στις χαλαζιακές φλέβες του Καλλιάνου εμφανίζονται από μάζες (μέχρι 10 vol %) έως και διασπορές, σαν συνδετική ύλη θραυσμάτων χαλαζία. Τα κύρια σύνδρομα ορυκτά περιλαμβάνουν χαλαζία και ασβεσίτη, ενώ η εξαλλοίωση των πετρωμάτων αποτελείται από χλωρίτη, μοσχοβίτη, αλβίτη και ασβεσίτη. Τα μεταλλικά ορυκτά περιλαμβάνουν σιδηροπυρίτη, αρσενοπυρίτη, λολλινγκινίτη, σφαλερίτη, χαλκοπυρίτη, τετραεδρίτη, τενναντίτη, γαληνίτη, χρυσό, περσεΐτη, σουλβανίτη, αργεντίτη, ήλεκτρο, αυτοφυή άργυρο, μια φάση που παρόμοια με κερβελλεΐτη, δύο άλλα μέλη του συστήματος Ag-Cu-Te-S [Ag_2CuTeS and $(Ag,Cu)_2TeS$], εσσίτη και Te-πολυβασίτη (Alexouli-Livaditi 1978; Vavelidis & Michailidis 1990; Voudouris & Spry 2008, Voudouris et al. 2011, Tombros et al. 2021).

Ο σιδηροπυρίτης, ο χαλκοπυρίτης και ο γαληνίτης είναι τα πιο κοινά μεταλλικά ορυκτά. Στην μεταλλοφορία που φιλοξενείται στο μάρμαρο, ο γαληνίτης σχηματίζει

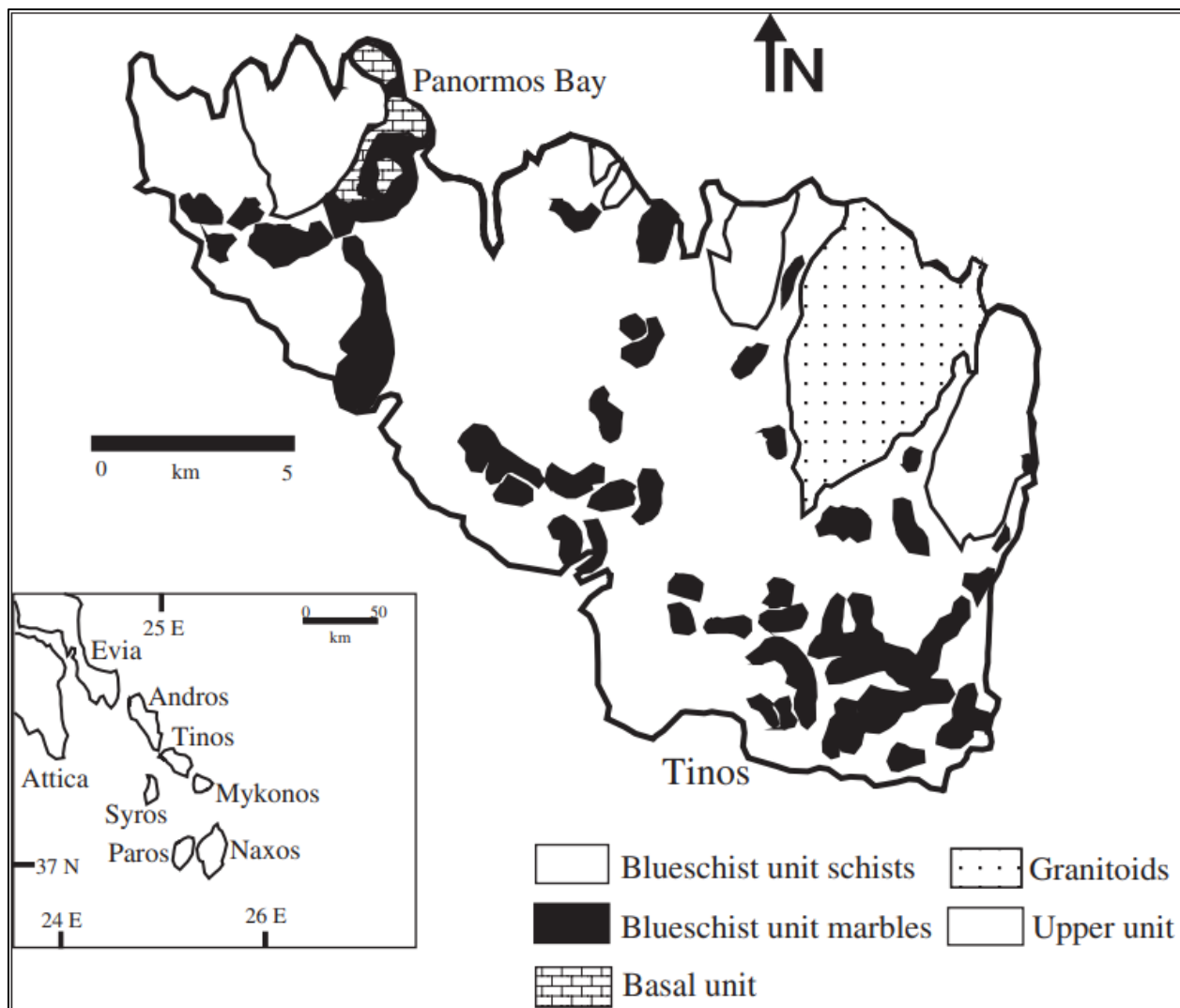
μονοορυκτολογικά συσσωματώματα. Και στους δύο τύπους μεταλλεύματος, ο γαληνίτης είναι απαλλαγμένος από Ag, Sb και Bi, υποδηλώνοντας ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε Ag των μεταλλευμάτων που φέρουν γαληνίτη οφείλεται στην παρουσία εγκλεισμάτων Ag θειοαλάτων, σουλφοτελλουριδίων και εσσίτη. Μία απλή ανάλυση ενός δείγματος γαληνίτη περιέχει 50 ppm Sb, 450 ppm Ag, και 6,5 ppm Bi (Agiorgitis & Becker 1975).

5.4 Κρίσιμα μέταλλα στην Τήνο

Η Τήνος αποτελεί μέρος της Αττικοκυκλαδικής ζώνης, η οποία αποτελεί ένα πακέτο αλπικών καλυμμάτων που βρίσκεται κάτω από μία πυριγενή βάση Βαρουσκανικής ηλικίας (περίπου 300 Ma) όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 7 (Okrusch and Bröcker, 1990). Η περιοχή Πανόρμου-Λαρδιάδων της Τήνου συγκεκριμένα, αποτελεί ένα τεκτονικό παράθυρο στο οποίο αποκαλύπτονται:

- Η ενότητα βάσης, η οποία σχηματίζεται από μετά-Βαρουσκανικά πετρώματα τα οποία περιέχουν μία διαδοχή δολομιτών, φυλλιτών και χαλαζιτών Ύστερης Τριαδικής έως Ύστερης Κρητιδικής περιόδου (Avigad and Garfunkel, 1989)
- Η ενότητα κυανοσχιστολίθων, ήταν αρχικά ένα μεσοζωικό ηπειρωτικό περιθώριο και αποτελείται από την προαλπιδική βάση (Gautier et al., 1993· Bröcker and Franz, 1998), που επικαλύπτεται από μια μεταφαιστειακή ιζηματογενή ακολουθία (Avigad και Garfunkel, 1989· Bröcker και Franz, 2000)

Οι ενότητες αυτές τέμνονται από φλεβικό σύστημα τριάντα χαλαζιακών φλεβών κατά προσέγγιση) και εμφανίζει μία αρκετά ενδιαφέρουσα μεταλλοφορία αργύρου (Ag) – χρυσού (Au) – τελλουρίου (Te) (Τόμπρος & Σέυμουρ, 2001). Η μεταλλοφορία αυτή συνδέεται γενετικά με τον λευκογρανίτη της Τήνου, ηλικίας Μειοκαίνου και συγκεκριμένα 14 M.y. (Mastrakas & Seymour, 2000).



Εικόνα 7: Χάρτης με τη γενικευμένη γεωλογία της Τήνου και τη θέση της μεταλλοφορίας Au-Ag-Te στον κόλπο του Πανόρμου (τροποποιήθηκε μετά τους Mastrakas and St. Seymour, 2000 και Tombros et al., 2007b).

Οι φλέβες χαλαζία που φέρουν Au-Ag-Te στον κόλπο του Πανόρμου εμφανίζουν ασυνήθιστα υψηλές συγκεντρώσεις τελλουρίου σε μια ποικιλία θειούχων ορυκτών. Τα ορυκτά αυτά κυριαρχούν στα στάδια II, III και VI (στον Πίνακα 7 διακρίνονται αναλυτικά τα στάδια ανάπτυξης της μεταλλικής παραγένεσης). Στο στάδιο II ο τετραεδρίτης, ο τενανίτης και ο χρυσοτετραεδρίτης που φέρει σίδηρο περιέχουν έως και 0,7, 0,5 και 2,5 αρφu τελλουρίου (atoms per formula unit). Στο στάδιο III ο χαλκοπυρίτης και ο βορνίτης περιέχουν έως και 0,5 και 1,5 αρφu τελλουρίου, αντίστοιχα, και στο στάδιο VI ο γαλήνης περιέχει έως και 0,16 αρφu τελλουρίου (Tombros et al., 2010).

Πίνακας 7: Στάδια ανάπτυξης μεταλλικής παραγένεσης (πληροφορίες από Τόμπρος & Σέιμουρ, 2001)

Στάδια ανάπτυξης μεταλλικής παραγένεσης		Ορυκτά
Στάδιο I		σιδηροπυρίτης + αρσενοπυρίτης (κ. β. % As = 46,045) + μαγνητοπυρίτης (Εξαγωνικός MC)
Στάδιο II		τετραεδρίτης + τενναντίτης + γκολφιλντίτης (κ. β. % Te = 18,1 - 18,35)
Στάδιο III		βορνίτης (Κυβικός) + χαλκοπυρίτης
Στάδιο IV		μαουσονίτης + στανίτης + βουλανζερίτης + βουρνονίτης + λουτσονίτης + φαματινίτης + λαγγισίτης + νικέλινης + γερσορφίτης
Στάδιο V	Στάδιο τελλουριδίων	εσσίτης (Κυβικός) + στουετζίτης + καλαβερίτης + σιλβανίτης + ρικαρδίτης + βουλκανίτης + βείσσιτης + αλταίτης + κρεννιερίτης + κοστοβίτης + Αυτοφυές τελλουριο (κ. β. % Te = 98,9 - 99,7) + μελονίτης + νέες συνθέσεις + περζίτης (Ορθορομβικός)
Στάδιο VI		γαληνίτης + αργεντίτης (Κυβικός) + μπετεκινίτης
Στάδιο VII		σφαλερίτης (moles % Fe < 0,044) + γκρηνοκίτης + μαγνητίτης + σιδηρίτης + σμιθσονίτης
Στάδιο VIII	Στάδιο αυτοφυών και πολύτιμων μετάλλων	Αυτοφυής Au (κ. β. % Au = 99,2 - 99,7) + Αυτοφυής Ag (κ. β. % Ag = 98,6 - 99) + Αυτοφυής Cu (κ. β. % Cu = 93,6) + Αυτοφυές As + στρομεγερίτης (Κυβικός) + πυραργυρίτης
Στάδιο IX	Υπεργενετικό στάδιο	χαλκοσίνης (Εξαγωνικός) + διγενίτης (Κυβικός) + κοβελλίνης + μπλε παραμένων κοβελλίνης + ιδαίτης + αζουρίτης + μαλαχίτης + δελαφοσίτης + κυπρίτης + τενορίτης + γκαϊτίτης + λεπιδόκροκκίτης + αιματίτης + κερουσίτης + αγγλεσίτης

Συνολικά, το επιθερμικό σύστημα της Τήνου αναγνωρίζεται ως χαμηλής θείωσης σύστημα από πολλούς επιστήμονες (Barnes, 1979, Casadevall & Ohmoto, 1977, Choi et al., 1998, Cooke et al., 1996, Henley & Ellis, 1983, Shelton et al., 1990, So et al., 1997, Spry et al., 1996, White & Hedenquist, 1995, Zhang & Spry, 1994). Ο χαρακτηρισμός αυτός γίνεται λόγω κάποιων σημαντικών παρατηρήσεων στο ύπαιθρο, λόγω της παρουσία ή απουσίας συγκεκριμένων ορυκτών. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι (Τόμπρος & Σέιμουρ, 2001):

- Παρουσία μεταλλικών ορυκτών, όπως: 1. Ήλεκτρο (Περιοχή Απηγανιάς, Tombros & Seymour, 1998), 2. Αυτοφυής χρυσός 3. Τελλουρίδιο 4. Γαληνίτης και 5. Χαλκοπυρίτης.

- Απουσία ή περιορισμός μεταλλικών ορυκτών, όπως: 1. Γκολντφιλντίτης - Τετραεδρίτης -Τενναντίτης, 2. Εναργίτης - Αουτσονίτης και 3. Σφαλερίτης - Βουρσίτης – Γκρηνοκίτης διότι τα ορυκτά αυτά, ιδιαίτως στα αρχικά στάδια απόθεσης, αναγνωρίζονται σε υψηλής θεΐωσης επιθερμικό σύστημα, το οποίο μεταβαΐνει προς αυτό της χαμηλής θεΐωσης (Zhang & Spry, 1994, White & Hedenquist, 1995, Cooke et al., 1996).
- Παρουσία σύνδρομων υδροθερμικών ορυκτών σε ζώνες εξαλλοΐωσης, όπως: 1. Ασβεστίτης, 2. Τάλκης και 3. Βαρύτης
- Απουσία σύνδρομων υδροθερμικών ορυκτών σε ζώνες εξαλλοΐωσης, όπως: Αλοϋνίτης, το οποίο πιστοποιήθηκε με τη συμβολή του XRD.
- Κυρίαρχη παρουσία σε φλέβες και ιστούς ανάπτυξης σε κενό χώρο
- Μικρό ποσοστό εμφάνισης της μεταλλοφορίας (σε τύπο αντικατάστασης ή διάσπαρτο)

Συμπεράσματα

- Τα περισσότερα κρίσιμα μέταλλα την Αττικοκυκλαδική ζώνη συνδέονται με μαγματικές διεισδύσεις.
- Η κρισιμότητα των μετάλλων καθιστά αναγκαία την πρόσθετη μελέτη των εμφανίσεών τους με σκοπό να διευκρινιστεί εάν υπάρχουν πράγματι οι κατάλληλες περιεκτικότητες, αλλά και εκτάσεις για να γίνει η εξόρυξή τους.
- Οι μέχρι τώρα έρευνες δηλώνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα ώστε να προχωρήσουν πιο εντατικές μελέτες ιδιαίτερα στην αναζήτηση τελλουρίου, το οποίο εμφανίζεται σε πάρα πολλές περιοχές εντός της Αττικοκυκλαδικής ζώνης.
- Στη Λαυρεωτική μάζα παρατηρούνται τα: τελλούριο, ρήνιο, μολυβδαίνιο, γάλλιο, γερμάνιο, ίνδιο, χαλκός, βολφράμιο, σπάνιες γαίες, βισμούθιο, χρυσός κ.α.
- Στα νησιά του Αιγαίου παρατηρούνται τα κρίσιμα μέταλλα: αντιμόνιο, τελλούριο, μολυβδαίνιο, χαλκός, κ.α.
- Στην Εύβοια παρατηρούνται κυρίως τα: τελλούριο, άργυρος, χαλκός, σίδηρος, μόλυβδος, χρυσός κ.α.
- Σε περίπτωση που κριθεί οικονομικά εκμεταλλεύσιμο το έκαστο κοίτασμα τότε θα πρέπει να μελετηθεί επιπλέον το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, ιδιαίτερα στα μέταλλα που είναι ή συνδέονται με ραδιενέργεια, ώστε να αποφευχθεί η υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία

1. Agiorgitis G, Becker R (1975) Trace elements in pyrite, chalcopyrite and galena from Kallianou, Evia district, Greece. *Chem Erde* 34:239–243 (in German)
2. Alexouli-Livaditi K (1978) Mixed sulphide ores of Kallianou area, southern Evia. PhD Nat Tech Univ Athens (in Greek)
3. Alfieris D, Voudouris PC, Spry PG (2013) Shallow submarine epithermal Pb-Zn-Cu-Au-Ag-Te mineralization on western Milos Island, Aegean Volcanic Arc, Greece: mineralogical, geological and geochemical constraints. *Ore Geol Rev* 53:159–180. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.007>
4. Altherr, R., Kreuzer, H., Wendt, I., Lenz, H., Wagner, G.-A., Keller, J., Harre, W., Hohndorf, A. (1982). A late Oligocene/early Miocene high temperature belt in the Attico-Cycladic crystalline complex (SE Pelagonian, Greece). *Geol. Jahrb.*, E23, 97-164.
5. Aubouin, J. (1959). Contribution a l' étude géologique de la Grèce septentrional: Les confins de l' Epire et de la Thessaly. *Ann. Géol. Pays Helléniques* 10, 1–525.
6. Avigad, D., and Garfunkel, Z., 1989, Low angle faults underneath and above a blueschist belt—Tinos Island, Cyclades, Greece: *Terra Nova*, v. 2, p. 182–187
7. Barnes, L. H., 1979. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits: Sec. Edit.* John Wiley and Sons inc., New York, 800 pp.
8. Baumgärtl, U. and Burow, J. (2002). Laurion, *Aufschluss*, 53, 5/6, 245-362.
9. Bonev, N., Burg, J.P., Ivanov, Z. (2006). Mesozoic-Tertiary structural evolution of an extensional gneiss dome-The Kesebir-Kardamos dome, eastern Rhodope (Bulgaria-Greece). *Int. J. Earth Sci.* 95, 318– 340. doi:10.1007/s00531-005-0025-y.
10. Bonev, N., Marchev, P., Moritz, R., Collings, D., 2015. Jurassic subduction zone tectonics of the Rhodope Massif in the Thrace region (NE Greece) as revealed by new U–Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Evros ophiolite and high-grade basement rocks. *Gondwana Research*, 27, 760–775.
11. Bonev, N., Moritz, R., Borisova, M., Filipov, P., 2018. Therma-Volvi-Gomati complex of the Serbo- Macedonian Massif, Northern Greece: A Middle Triassic

- continental margin ophiolite of Neotethyan origin. *Journal of the Geological Society*. doi:org/10.1144/jgs2017-130.
12. Bonsall, T. A., Spry, P. G., Voudouris, P. C., Tombros, S., Seymour, K. S., Melfos, V. (2011). The geochemistry of carbonate-replacement Pb-Zn-Ag mineralization in the Lavrion district, Attica, Greece: Fluid inclusion, stable isotope, and rare earth element studies. *Economic Geology*, 106(4), 619-651.
 13. Bröcker, M., and Franz, L., 1998, Rb-Sr isotope studies on Tinos Island (Cyclades, Greece): Additional time constraints for metamorphism, extent of infiltration-controlled overprinting and deformational activity: *Geological Magazine*, v. 135, p. 369–382
 14. Bröcker, M., and Franz, L., 2000, The contact aureole of Tinos, Cyclades, Greece: Tourmaline-biotite geothermometry and Rb-Sr geochronology: *Mineralogy and Petrology*, v. 70, p. 257–283
 15. Broecker, M., Kreuzer, H., Matthews, A., Okrusch, M., 1993. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and oxygen isotope studies of polymetamorphism from Tinos Island, Cycladic blueschist belt, Greece. *Journal of Metamorphic Geology*, 11, 223-240.
 16. Brown, M., Lazo, F., Carter, P., Goss, B., Kirwin, D. (2010). The geology and discovery of the Merlin Mo-Re zone of the mount Dore deposit, mount Isa Inlier, NW Queensland, Australia. *SGA News*, 27(1), 9-15.
 17. Brunn, J.H. 1956. Contribution à l'étude géologique du Pinde septentrional et d'une partie de la Macédoine occidentale. *Ann. Géol. Pays Helléniques* 1956, 7, 1–358.
 18. Bonneau, M., 1984. Correlation of the Hellenides Nappes in the south-east Aegean and their tectonic reconstruction. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 517–527.
 19. Burg, J.P., 2012. Rhodope: From mesozoic convergence to cenozoic extension. Review of petro-structural data in the geochronological frame. *J. Virtual Explor.* 42. doi:10.3809/jvirtex.2011.00270.
 20. Casadevall, T., & Ohmoto, H., 1977. Sunnyside Mine, Eureka Mining District, San Juan Country, Colorado: Geochemistry of gold and base metal ore deposition in a volcanic environment: *Economic Geology*, 72, 1285-1320.

21. Choi, S. H., So, C. S., Yun, S. J., & Shelton, K., 1998. Geochemistry and genesis of the hydrothermal Cu deposits in the Gyeongang Basin, Korea, Masan mineralized area: *N. Jb. Miner. Abh.*, 173, 189-206.
22. Cooke, R., Mc Phail, D., & Bloom, M., 1996. Epithermal gold mineralization, Acupan, Baguio district, Phippines: Geology, mineralization, alteration and the thermochemical environment of ore deposition: *Economic Geology*, 94, 243-272.
23. Economou-Eliopoulos, M. (1996). Platinum-group element distribution in chromite ores from ophiolite complexes: implications for their exploration. *Ore Geology Reviews*, 11(6), 363-381.
24. Economou-Eliopoulos, M., Eliopoulos, D. G. (2000). Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance. *Ore Geology Reviews*, 16(1-2), 59-70.
25. Eliopoulos, D. G., Economou-Eliopoulos, M. (2000). Geochemical and mineralogical characteristics of Fe-Ni and bauxitic-laterite deposits of Greece. *Ore Geology Reviews*, 16(1-2), 41-58.
26. Economou-Eliopoulos, M., Eliopoulos, D. G., Chryssoulis, S. (2008). A comparison of high-Au massive sulfide ores hosted in ophiolite complexes of the Balkan Peninsula with modern analogues: Genetic significance. *Ore Geology Reviews*, 33(1), 81-100.
27. Eliopoulos, D. G., Economou-Eliopoulos, M., Apostolikas, A., Golightly, J. P. (2012). Geochemical features of nickel-laterite deposits from the Balkan Peninsula and Gordes, Turkey: The genetic and environmental significance of arsenic. *Ore Geology Reviews*, 48, 413-427.
28. Eliopoulos, D. G., Kiliass, S. P. (2011). Marble-hosted submicroscopic gold mineralization at Asimotrypes area, mount Pangeon, southern Rhodope core complex, Greece. *Economic Geology*, 106(5), 751-780.
29. Eliopoulos, D., Economou, G., Tzifas, I., Papatrechias, C. (2014). The potential of rare earth elements in Greece. In *Proceedings of the ERES2014: First European Rare Earth Resources Conference*, Milos, Greece, 4-7.

30. Fassoulas, C., Kiliyas, A., Mountrakis, D., 1994. Postnappe stacking extension and exhumation of high-pressure/low-temperature rocks in the island of Crete, Greece. *Tectonics* 13, 127–138. doi:10.1029/93TC01955.
31. Fytikas M, Innocenti F, Kolios N, Manetti P, Mazzuoli R, Poli G, Rita F, Villari L (1986) Volcanology and petrology of volcanic products from the island of Milos and neighbouring islets. *J Volcanol Geotherm Res* 28:297–317
32. Fornadel, A. P., Spry, P. G., Melfos, V., Vavelidis, M., Voudouris, P. C. (2011). Is the Palea Kavala Bi-Te-PbSb±Au district, northeastern Greece, an intrusion-related system?. *Ore Geology Reviews*, 39(3), 119- 133.
33. Fornadel, A. P., Voudouris, P. C., Spry, P. G., Melfos, V. (2012). Mineralogical, stable isotope, and fluid inclusion studies of spatially related porphyry Cu and epithermal Au-Te mineralization, Fakos Peninsula, Limnos Island, Greece. *Mineralogy and Petrology*, 105(1), 85-111.
34. Frenzel, M., Voudouris, P., Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Gilbert, S., & Wade, B. P. (2021). Evolution of a hydrothermal ore-forming system recorded by sulfide mineral chemistry: a case study from the Plaka Pb–Zn–Ag Deposit, Lavrion, Greece. *Mineralium Deposita*, 1-22.
35. Froitzheim, N., Jahn-Awe, S., Frei, D., Wainwright, A.N., Maas, R., Georgiev, N., Nagel, T.J., Pleuger, J., 2014. Age and composition of meta-ophiolite from the Rhodope Middle Allochthon (Satovcha, Bulgaria): A test for the maximum-allochthony hypothesis of the Hellenides. *Tectonics*, 33, 1477–1500. doi:10.1002/2014TC003526.
36. Garuti, G., Zaccarini, F., Economou-Eliopoulos, M. (1999). Paragenesis and composition of laurite from chromitites of Othrys (Greece): implications for Os-Ru fractionation in ophiolitic upper mantle of the Balkan peninsula. *Mineralium Deposita*, 34(3), 312-319.
37. Gautier, P., Brun, J.P. and Jolivet, L., 1993, Structure and kinematics of upper Cenozoic extensional detachment of Naxos and Paros (Cyclades Islands, Greece): *Tectonics*, v. 12, p. 1180–1194.
38. Gessner, K.; Piazzolo, S.; Güngör, T.; Ring, U.; Kröner, A.; Passchier, C.W. Tectonic significance of deformation patterns in granitoid rocks of the Menderes nappes,

- Anatolide belt, southwest Turkey. *Int. J. Earth Sci.* 2001, 89, 766–780. <https://doi.org/10.1007/s005310000106>
39. Glodny, J., Ring, U., 2021. The Cycladic Blueschist Unit of the Hellenic subduction orogen: Protracted high- pressure metamorphism, decompression and reimbrication of a diachronous nappe stack. *Earth-Science Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.10388>.
40. Godfriaux, I., 1968. Étude géologique de la region de l'Olympe (Grèce). *Ann. Géolog. des Pays Helléniques*, 19, 1–281.
41. Grasemann, B.; Petrakakis, K. Evolution of the Serifos Metamorphic Core Complex. *J. Virtual Explor.* 2007, 27. doi:10.3809/jvirtex.2007.00170
42. Grasemann B, Huet B, Schneider DA, Rice AHN, Lemonnier N, Tschegg C (2018) Miocene postorogenic extension of the Eocene synorogenic imbricated Hellenic subduction channel: New constraints from Milos (Cyclades, Greece). *Bull Geol Soc Am* 130:238–262. <https://doi.org/10.1130/B31731.1>
43. Grosche A., Klemd R., Denkel K., Keith M., Haase M. K., Voudouris P., Alfieris D., Wiedenbeck M., (2023) Sources, transport, and deposition of metal(loid)s recorded by sulfide and rock geochemistry: constraints from a vertical profile through the epithermal Profitis Ilias Au prospect, Milos Island, Greece
44. Henley, Richard W. and A. J. Ellis, 1983, “Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review.” *Earth-Science Reviews* 19, 1-50.
45. Herrington, R. (2012). Potential for cobalt recovery from lateritic ores in Europe. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 14, p. 13888.
46. Iglseider, C.; Grasemann, B.; Rice, A.H.N.; Petrakakis, K.; Schneider, D.A. Miocene south directed low-angle normal fault evolution on Kea Island (West Cycladic Detachment System, Greece). *Tectonics* 2011, 30, TC4013. <https://doi.org/10.1029/2010TC002802>
47. Jahn-Awe, S., Froitzheim, N., Nagel, T.J., Frei, D., Georgiev, N., Pleuger, J., 2010. Structural and geochronological evidence for Paleogene thrusting in the western Rhodopes, SW Bulgaria: Elements for a new tectonic model of the Rhodope Metamorphic Province. *Tectonics*, 29, 1–30. doi:10.1029/2009TC002558.

48. Jolivet, L.; Brun, J.-P. Cenozoic geodynamic evolution of the Aegean. *Int. J. Earth Sci.* 2010, 99, 109–138. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0366-4>.
49. Jolivet, L., Goffé, B., Monié, P., Truffert-Luxey, C., Patriat, M., Bonneau, M., 1994. Miocene detachment in Crete and exhumation P-T-t paths of high-pressure metamorphic rocks. *Tectonics*, 15(6), 1129–1153. doi.org/10.1029/96TC01417.
50. Jolivet, L.; Rimmelé, G.; Oberhänsli, R.; Goffé, B.; Candan, O. Correlation of syn-orogenic tectonic and metamorphic events in the Cyclades, the Lycian nappes and the Menderes massif. Geodynamic implications. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 2004, 175, 217–238. <https://doi.org/10.2113/175.3.217>.
51. Kapsiotis, A., Grammatikopoulos, T. A., Tsikouras, B., Hatzipanagiotou, K. (2010). Platinum-Group Mineral Characterization in Concentrates from High-Grade PGM Al-rich Chromitites of Korydallos Area in the Pindos Ophiolite Complex (NW Greece). *Resource geology*, 60(2), 178-191.
52. Karageorgiou, E., Marinos, G., Williams, F.J., Henderson, J.G. (1954). Reconnaissance for uranium in Greece. United States, Atomic Energy Commission, Division of Raw Materials, RME-4049, 45 p.
53. Keay S. 1998. The geological evolution of the Cyclades, Greece: constraints from SHRIMP U-Pb geochronology. PhD thesis. Aust. Natl. Univ., Canberra, 1-335.
54. Keay, S.; Lister, G.; Buick, I. The timing of partial melting, Barrovian metamorphism and granite intrusion in the Naxos metamorphic core complex, Cyclades, Aegean Sea, Greece. *Tectonophysics* 2001, 342, 275–312. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00168-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00168-8)
55. Kiliias, A., Fassoulas, C., Mountrakis, D., 1994. Tertiary extension of continental crust and uplift of Psiloritis metamorphic core complex in the central part of the Hellenic Arc (Crete, Greece). *Geol. Rundschau*, 83, 417–430. [doi:10.1007/BF00210555](https://doi.org/10.1007/BF00210555).
56. Kiliias, A., Frisch, W., Avgerinas, A., Dunkl, I., Falalakis, G., Gawlick, H.-J., 2010. Alpine architecture and kinematics of deformation of the northern Pelagonian nappe pile in the Hellenides. *Austrian J. Earth Sci.*, 103, 4–28 <https://doi.org/10.1080/09853111.1998.11105326>.

57. Kilias SP, Naden J, Cheliotis I, Shepherd TJ, Constandinidou H, Crossing J, Simos I (2001) Epithermal gold mineralisation in the active Aegen volcanic arc: the Profitis Ilias deposits, Milos Island, Greece. *Miner Depos* 36:32–44. <https://doi.org/10.1007/s001260050284>
58. Kilias, A., Thomaidou, E., Katrivanos, E., Vamvaka, A., Fassoulas, Ch., Pipera, K., Falalakis, G., Avgerinas, S., Sfeikos, A., 2016. A geological cross-section through northern Greece from Pindos to Rhodope Mountain Ranges: a field guide accross the External and Internal Hellenides. In: (Eds.) Kilias, A. and Lozios, S., *Geological field trips in the Hellenides*, Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition, 50, 1. doi: 10.3809/jvirtex.2016.08685.
59. Kioussis, G., Economou-Eliopoulos, M., Paspaliaris, I., Mitsis, I. (2005). Gold, palladium and platinum recovery, as by-products, from the Skouries porphyry Cu-Au deposit, Chalkidiki area, northeastern Greece - preliminary results. In *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting, Beijing, China, 18-21 August 2005; pp. 991-994.
60. Liakopoulos A, Katerinopoulos A, Markopoulos T, Boulegue J (1991) A mineralogical petrographic and geochemical study of samples from wells in the geothermal field of Milos Island (Greece). *Geothermics* 20:237–256. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(91\)90035-T](https://doi.org/10.1016/0375-6505(91)90035-T)
61. Linnros, H.; Hansman, R.; Ring, U. The 3D geometry of the Naxos detachment fault and the three-dimensional tectonic architecture of the Naxos metamorphic core complex, Aegean Sea, Greece. *Int. J. Earth Sci.* 2019, 108, 287–300. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1654-2>
62. Mastrakas, N., & Seymour, St. K., 2000. Geochemistry of Tinos granite: A window to the Miocene micropate tectonics of the Aegean region: *N. Jb. Miner. Abh.* 175, 295-315.
63. Mavrogenatos, C., Voudouris, P., Spry, P.G., Melfos, V., Klemme, S., Berndt, J., Baker, T., Moritz, R., Bissig, T., Monecke, T., Zaccarini, F. (2018). Mineralogical study of the advanced argillic alteration zone at the Konos Hill Mo-Cu-Re-Au porphyry prospect, NE Greece. *Minerals*, 8, 479, 18 p.

64. Mavrogenatos, C., Voudouris, P., Berndt, J., Klemme, S., Zaccarini, F., Spry, P.G., Melfos, V., Tarantola, A., Keith, M., Klemd, R., Haase, K. (2019). Trace Elements in Magnetite from the Pagoni Rachi Porphyry Prospect, NE Greece: Implications for Ore Genesis and Exploration. *Minerals*, 9, 725, 21 p.
65. Mavrogenatos, C., Voudouris, P., Zaccarini, F., Klemme, S., Berndt, J., Tarantola, A., Melfos, V., Spry, P.G. (2020). Multi-Stage Introduction of Precious and Critical Metals in Pyrite: A Case Study from the Konos Hill and Pagoni Rachi Porphyry/Epithermal Prospects, NE Greece. *Minerals*, 10, 784, 29 p.
66. McFall, K. A., Naden, J., Roberts, S., Baker, T., Spratt, J., McDonald, I. (2018). Platinum-group minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit. *Ore Geology Reviews*, 99, 344-364.
67. Melfos, V., Voudouris, P. C. (2012). Geological, mineralogical and geochemical aspects for critical and rare metals in Greece. *Minerals*, 2(4), 300-317.
68. Naden J, Kiliass SP, Darbyshire DPFF (2005) Active geothermal systems with entrained seawater as modern analogs for transitional volcanic-hosted massive sulfide and continental magmato-hydrothermal mineralization: the example of Milos Island, Greece. *Geology* 33:541–544. <https://doi.org/10.1130/G21307.1>
69. Nüchter JA, Stöckhert B (2007) Vein quartz microfabrics indicating progressive evolution of fractures into cavities during postseismic creep in the middle crust. *J Struct Geol* 29:1445–1462
70. Naden J, Kiliass SP, Leng MJ, Cheliotis I, Shepherd TJ (2003) Do fluid inclusions preserve $\delta^{18}\text{O}$ values of hydrothermal fluids in epithermal systems over geological time? Evidence from paleo- and modern geothermal systems, Milos Island, Aegean Sea. *Chem Geol* 197:143–159. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00289-9)
71. Okrusch, M., Broecker, M., 1990. Eclogites associated with highgrade blueschists in the Cycladic archipelago, Greece: a review. *European Journal of Mineralogy*, 2, 451-478.
72. Partzsch, J.H.; Oberhansli, R.; Candan, O.; Warkus, F. The evolution of the central Menderes massif, West Turkey: A complex nappe pile recording 1.0Ga of geological history. *Freib. Forsch* 1998, C-471, 166–168.

73. Perlikos P (1989) Some new aspects on the geology and metallogeny of southern Euboea. *Bull Geol Soc Greece* 23:327–344 (in Greek)
74. Perissoratis, C., Moorby, S. A., Angelopoulos, I., Cronan, D. S., Papavasiliou, C., Konispoliatis, N., Sakellariadou, F., Mitropoulos, D. (1988). Mineral concentrations in the recent sediments off eastern Macedonia, northern Greece: geological and geochemical considerations. In *Mineral Deposits within the European Community*; Boissonnas, J., Omenetto, P., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 1988; pp. 530-552.
75. Ring, U., Glodny, J., Will, T., Thomson, S., 2010. The Hellenic Subduction System: High-Pressure Metamorphism, Exhumation, Normal Faulting, and Large-Scale Extension. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 38, 45–76. doi:10.1146/annurev.earth.050708.170910.
76. Ring U, Glodny J, Will T, Thomson S (2010) The Hellenic subduction system: high-pressure metamorphism, exhumation, normal faulting, and large-scale extension. *Ann Rev Earth Planet Sci* 38:45–76
77. Ring, U.; Glodny, J.; Peillod, A.; Skelton, A. The timing of hightemperature conditions and ductile shearing in the footwall of the Naxos extensional fault system, Aegean Sea, Greece. *Tectonophysics* 2018, 745, 366–381. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.09.001>
78. Ring, U., Layer, P.W., 2003: High-pressure metamorphism in the Aegean, eastern Mediterranean: underplating and exhumation from the Late Cretaceous until the Miocene to recent above the retreating Hellenic subduction zone. *Tectonics*, 22(3), 1022.
79. Ring, U., Layer, P.W., Reischmann, T., 2001. Miocene high-pressure metamorphism in the Cyclades and Crete, Aegean Sea, Greece: Evidence for large-magnitude displacement on the Cretan detachment. *Geology*, 29(5), 395–398.
80. Ring, U., Will, T., Glodny, J., Kumerics, C., Gessner, K., et al., 2007. Early exhumation of high-pressure rocks in extrusion wedges: Cycladic blueschist unit in the eastern Aegean, Greece, and Turkey. *Tectonics* 26:TC2001.
81. Reinecke, T., Altherr, R., Hartung, B., Hatzipanagiotou, K., Kreuzer, H., Harre, W., Klein, H., Keller, J., Geenen, E., Boeger H., 1982. Remnants of Late Cretaceous

- high temperature belt on the island of Anafi (Cyclades, Greece), *Neus Jahrb. Mineral. Abh.*, 145, 157–182.
82. Robertson, A.H.F., 2012. Late Palaeozoic–Cenozoic tectonic development of Greece and Albania in the context of alternative reconstructions of Tethys in the Eastern Mediterranean region. *Int. Geol. Rev.*, 54, 373–454. doi:10.1080/00206814.2010.543791.
83. Robertson, A.H.F., Trivić, B., Derić, N., Bucur, I.I., 2013. Tectonic development of the Vardar ocean and its margins: Evidence from the Republic of Macedonia and Greek Macedonia. *Tectonophysics*, 595–596, 25– 54. doi:10.1016/j.tecto.2012.07.022.
84. Sanchez-Gomez, M., Avigad, D., Heimann, A., 2002. Geochronology of clasts in allochthonous Miocene sedimentary sequences on Mykonos and Paros Islands: implications for back-arc extension in the Aegean Sea. *Journal of the Geological Society*, 159 (1), 45-60.
85. Schaarschmidt A, Haase KM, Klemm R, Keith M, Voudouris PC, Alfieris D, Strauss H, Wiedenbeck M (2021) Boiling effects on trace element and sulfur isotope compositions of sulfides in shallow-marine hydrothermal systems: evidence from Milos Island, Greece. *Chem Geol* 583:120457. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120457>
86. Schenker, F.L., Fellin, M.G., Burg, J.P., 2015. Polyphase evolution of Pelagonia (northern Greece) revealed by geological and fission-track data. *Solid Earth*, 6, 285–302. doi:10.5194/se-6-285-2015.
87. Schermer, E.R., 1990. Mechanisms of blueschist creation and preservation in an A-type subduction zone, Mount Olympos region, Greece. *Geology*, 18, 1130-1133. doi:10.1130/0091-7613(1990)018<1130:MOBCAP>2.3.CO;2.
88. Schermer, E.R., 1993. Geometry and kinematics of continental basement deformation during the Alpine orogeny, Mt. Olympos region, Greece. *J. Struct. Geol.*, 15, 571–591. doi:10.1016/0191-8141(93)90149-5.
89. Seidel, E., Kreuzer, H., Harre, W., 1982. A Late Oligocene/Early Miocene high pressure belt in the external Hellenides. *Geol. Jahrb.*, 23, 165–206.

90. Seman S., Stocklie D. F., & Soukis K. (2017). The provenance and internal structure of the Cycladic Blueschist Unit revealed by detrital zircon geochronology, Western Cyclades, Greece. *Tectonics*, 36, 1–22.
91. Shelton, L.K., So, C.S., Haeussler, T., Chi, S. J., & Lee, K.Y. 1990. Geochemical studies of the Tongyoung Gold-Silver deposits, Republic of Korea: Evidence of meteoric water dominance in a Te-bearing epithermal system: *Economic Geology*, 85, 1114-1132.
92. Skarpelis, N., 2002. Geodynamics and evolution of the miocene mineralization in the Cycladic - Pelagonian belt, Hellenides. *Δελτίο Ελλ. Γεωλ. Εταιρείας*, XXXIV, 6, 2191-2206.
93. Skarpelis, N. (2007). The Lavrion deposit (SE Attica, Greece): Geology, mineralogy and minor elements chemistry. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 183(3), 227-250.
94. Sklavounos, S., Filippidis, A. (1989). Meta-autunite and autunite occurrence in the Dipotama granite. Drama, North Greece, *Geologica Rhodopica*, 1, 431-437.
95. Smith, A.Y., Armour Brown, A., Ofsen, H., Lunberg, B., Niesen, P.L. (1976). The role of geochemical prospecting in phased uranium exploration, a case history. *International Symposium on Exploration of Uranium Ore Deposits*. IAEA, Vienna, 575-599.
96. So, C S., Choi, S. H., & Shelton, L.K., 1997. Geochemistry and genesis of hydrothermal Cu deposits in the Gyeongsang Basin (Andong Area), Korea: A link between porphyry and epithermal systems: *N. Jb. Miner. Abh.*, 171, 281-307
97. Stamatakis, M. G. (2004). Phosphate deposits of Neogene age in Greece. Mineralogy, geochemistry and genetic implications. *Geochemistry*, 64(4), 329-357.
98. Stergiou, A. C., Rentzeperis, P. J. (1993). Refinement of the crystal structure of metatorbernite. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 205(1-2), 1-8.
99. Stergiou, C. L. (2021). Critical and rare metals in Cenozoic magmatic-hydrothermal deposits at the SerboMacedonian metallogenic province in Greece (Vathi, Gerakario, Laodikino, Kolchiko, Aspra Chomata). Ph.D. Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki.

100. Stergiou, C., Melfos, V., Voudouris, P. (2016) Rare metals and uranium enrichment at the Vathi porphyry, CuAu±U±Mo mineralization, N. Greece, International Workshop “Recent advances in W-Sn and Rare Metal deposit metallogenesis”, Université de Lorraine, Nancy, France, November 30-December 1, 2016.
101. Stergiou, C., Melfos, V., Voudouris, P., Spry, P.G., Papadopoulou, L., Chatzipetros, A., Giouri, K., Mavrogonatos, C., Filippidis, A. (2021a). The Geology, geochemistry and origin of the porphyry Cu-Au-(Mo) system at Vathi, Serbo-Macedonian Massif, Greece. *Applied Sciences*, 11, 479.
102. Stergiou, C., Melfos, V., Voudouris, P., Papadopoulou, L., Spry, P.G., Peytcheva, I., Dimitrova, D., Stefanova, E., Giouri, K. (2021b) Rare and critical metals in pyrite, chalcopyrite, magnetite and titanite from the Vathi Porphyry Cu-Au±Mo deposit, Northern Greece. *Minerals*, 11, 630.
103. Stewart AL, McPhie J (2006) Facies architecture and Late Pliocene - Pleistocene evolution of a felsic volcanic island, Milos, Greece. *Bull Volcanol* 68:703–726. <https://doi.org/10.1007/s00445-005-0045-2>
104. Theophilopoulos D, Vakondios I (1982) Geological and ore mineralization research of the Kallianou area, SE Evia. *Miner Wealth* 19:27–50 (in Greek)
105. Tomaschek, F., Kennedy, A. K., Villa, I. M., Lagos, M., Ballhaus, C., 2003. Zircons from Syros, Cyclades, Greece-Recrystallization and mobilization of zircon during high-pressure metamorphism, *J. Petrol.*, 44, 1977–2002. doi:10.1093/petrology/egg067.
106. Tomaschek, F.; Kennedy, A.K.; Villa, I.M.; Lagos, M.; Ballhaus, C. Zircons from Syros, Cyclades, Greece--Recrystallization and Mobilization of Zircon During High-Pressure Metamorphism. *J. Pet.* 2003, 44, 1977–2002.
107. Tombros, S.F., Kokkalas, S., Seymour, K.S., Voudouris, P.C., Williams-Jones, A.E., Zhai, D., Liu, J., Fitros, M.G. (2021). The Kallianos Au-Ag-Te mineralization, Evia Island, Greece: a detachment-related distal hydrothermal deposit of the Attico-Cycladic Metallogenic Massif. *Mineralium Deposita*, 56, 665-684.

108. Tombros, S., St. Seymour, K., 1998, Applied Geothermometry of the Hydrothermal Au-Ag Vein Mineralization, Apigania, Tinos. Paper in Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXII/3, 165-172, 1998 Proceedings of the 8th International Congress, Patras, May 1998.
109. , and Williams- Jones, A.E., 2010, Controls on tellurium in base, precious, and telluride minerals in the Panormos Bay Ag-Au-Te deposits, Tinos Island, Cyclades, Greece: *Economic Geology*, v. 105, p. 1097–1111. <https://doi.org/10.2113/econgeo.105.6.1097>
110. Tombros, S., St. Seymour, K., Spry, P.G., and Williams-Jones, A., 2007b, The genesis of epithermal Au-Ag-Te mineralization, Panormos Bay, Tinos Island, Cyclades, Greece: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 102, p. 1269–1294
111. Tsikouras, B., Ifandi, E., Karipi, S., Grammatikopoulos, T. A., Hatzipanagiotou, K. (2016). Investigation of platinum-group minerals (PGM) from Othrys chromitites (Greece) using superpanning concentrates. *Minerals*, 6(3), 94.
112. Tsirambides, A., Filippidis, A. (2012a). Metallic mineral resources of Greece. *Open Geosciences*, 4(4), 641-650.
113. Tsirambides, A., Filippidis, A. (2012b). Exploration key to growing Greek industry. *Industrial Minerals*, 533, 44-47.
114. Tsirambides, A., Filippidis, A. (2012c). Energy mineral resources of Greece. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 1, 709-719.
115. Tsoupas, G., Economou-Eliopoulos, M. (2008). High PGM contents and extremely abundant PGM-minerals hosted in chromitites from the Veria ophiolite complex, northern Greece. *Ore Geology Reviews*, 33(1), 3-19.
116. Tzamos, E., Papadopoulos, A., Grieco, G., Stoulos, S., Bussolesi, M., Daftsis, E., Godelitsas, A. (2019). Investigation of trace and critical elements (including actinides) in flotation sulphide concentrates of Kassandra mines (Chalkidiki, Greece). *Geosciences*, 9(4), 164.
117. Tzifas, I. T., Godelitsas, A., Magganas, A., Androulakaki, E., Eleftheriou, G., Mertzimekis, T. J., Perraki, M. (2014). Uranium-bearing phosphatized limestones of NW Greece. *Journal of Geochemical Exploration*, 143, 62-73.

118. Tzifas, I. T., Papadopoulos, A., Misaelides, P., Godelitsas, A., Göttlicher, J., Tsikos, H., Hatzidimitriou, A. (2019). New insights into mineralogy and geochemistry of allanite-bearing Mediterranean coastal sands from Northern Greece. *Geochemistry*, 79(2), 247-267.
119. Ustaszewski, K.; Schmid, S.M.; Lugovi'c, B.; Schuster, R.; Schaltegger, U.; Bernoulli, D.; Hottinger, L.; Kounov, A.; Fügenschuh, B.; Schefer, S. Late Cretaceous intra-oceanic magmatism in the internal Dinarides (northern Bosnia and Herzegovina): Implications for the collision of the Adriatic and European plates. *Lithos* 2009, 108, 106–125.
120. Vavelidis M, Michailidis M (1990) Gold composition in the Fe-PbCu-(Ag-Zn) hydrothermal quartz veins of Kallianou area, Southern Euboea (Greece). *Bull Geol Soc Greece* 22:87–96
121. Valsami-Jones E, Baltatzis E, Bailey EH, Boyce AJ, Alexander JL, Magganas A, Anderson L, Waldron S, Ragnarsdottir KV (2005) The geochemistry of fluids from an active shallow submarine hydrothermal system: Milos Island, Hellenic Volcanic Arc. *J Volcanol Geotherm Res* 148:130–151. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.03.018>
122. Vekios, P., Kelepertzis, A., Bourithi, I., & Mparlas, K. (2002). The hydrothermal Na-Ca alteration at the marginal part of the Florina granite and the associated magnetite-hematite bands with thorium and uranium mineralization. *Chinese Journal of Geochemistry*, 21(2), 97-106.
123. Vergely, P., 1984. Tectoniques des ophiolites dans les Hellénides Internes déformation, métamorphisme et phénomènes sédimentaires. Conséquences sur l' évolution des région Téthysiennes Occidentales. PhD Thesis, University Paris-Sud, Orsay, 1-560.
124. Voudouris, P. (2006). A comparative mineralogical study of Te-rich magmatic-hydrothermal systems in northeastern Greece. *Mineralogy and Petrology*, 87(3-4), 241-275.
125. Voudouris, P. (2011). Conditions of formation of the Mavrokoryfi high-sulfidation epithermal Cu-Ag-Au-Te mineralization (Petrota graben, NE Greece). *Mineralogy and Petrology*, 101(1), 97-113.

126. Voudouris, P. & Economou-Eliopoulos, M., 2003. Mineralogy and chemistry of Cu-rich ores from the Kamariza carbonate-hosted deposit (Lavrion), Greece. *Mineral Exploration and Sustainable Development*, 499-502.
127. Voudouris P, Spry PG (2008) A new occurrence of cervelleite-like phases and Te-polybasite from gold-bearing veins in metamorphic rocks of the Cycladic Blueschist Unit, Greece. 33rd International Geological Congress, MRD-09 Au-Ag tellurideselenide deposits, CD-ROM, Abstract
128. Voudouris, P., Papavasiliou, C., Melfos, V. (2005). Silver mineralogy of St. Philippos deposit (NE Greece) and its relationship to a Te-bearing porphyry-Cu-Mo mineralization. *Geochemistry, Mineralogy And Petrology*, Bulgarian Academy of Sciences, 43, 155-160.
129. Voudouris, P., Spry, P. G., Melfos, V., & Alfieris, D. (2007). Tellurides and bismuth sulfosalts in gold occurrences of Greece: mineralogical and genetic considerations. *Geol. Survey Finland Guide*, 53, 85-94. https://tupa.gtk.fi/julkaisu/opas/op_053.
130. Voudouris P, Melfos V, Spry PG, Bonsall T, Tarkian M, Economou-Eliopoulos M (2008a) Mineralogy and fluid inclusion constraints on the evolution of the Plaka intrusion-related ore system, Lavrion, Greece. *Mineralogy and Petrology* 93, 79-110, <https://doi.org/10.1007/s00710-007-0218-0>
131. Voudouris P, Melfos V, Spry PG, Bonsall TA, Tarkian M, Solomos Ch (2008b) Carbonate-replacement Pb-Zn-Ag±Au mineralization in the Kamariza area, Lavrion, Greece: Mineralogy and thermochemical conditions of formation. *Mineralogy and Petrology*, 94, 85-106, <https://doi.org/10.1007/s00710-008-0007-4>
132. Voudouris, P. C., Melfos, V., Spry, P. G., Bindi, L., Kartal, T., Arikas, K.,... Ortelli, M. (2009). Rhenium-rich molybdenite and rheniite (ReS₂) in the Pagoni Rachi-Kirki Mo-Cu-Te-Ag-Au deposit, Northern Greece: Implications for the rhenium geochemistry of porphyry style Cu-Mo and Mo mineralization. *Canadian Mineralogist*, 47, 1013-1036.
133. Voudouris, P., Melfos, V., Moritz, R., Spry, P. G., Ortelli, M., Kartal, T. (2010). Molybdenite occurrences in Greece: mineralogy, geochemistry and depositional environment. In: *Proceedings of the XIX CBGA Congress*, 369-378.

134. Voudouris, P., Spry, P.G., Sakellaris, G.A., Mavrogonatos, C. (2011a). A cervelleite-like mineral and other Ag-Cu-Te-S minerals [Ag₂CuTeS and (Ag,Cu)₂TeS] in gold bearing veins in metamorphic rocks of the Cycladic Blueschist Unit, Kallianou, Evia Island, Greece. *Mineral. Petrol.* 101, 169-183.
135. Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Moritz, R., Papavassiliou, C., Falalakis, G. (2011b). Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrota Graben, NE Greece. *Mineralogy and Petrology*, 103, 79-100.
136. Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P. G., Bindi, L., Moritz, R., Orтели, M., Kartal, T. (2013). Extremely Re-rich molybdenite from porphyry Cu-Mo-Au prospects in northeastern Greece: Mode of occurrence, causes of enrichment, and implications for gold exploration. *Minerals*, 3(2), 165-191.
137. Voudouris P, Mavrogonatos C, Rieck B, Kolitsch U, Spry P.G, Scheffer Ch, Tarantola A, Vanderhaeghe O, Galanos E, Melfos V, Zaimis S, Soukis K, Photiades A (2018) The Gersdorffite-Bismuthinite-Native Gold Association and the Skarn-Porphyry Mineralization in the Kamariza Mining District, Lavrion, Greece. *Minerals*, 8, 531, <https://doi.org/10.3390/min8110531>
138. Voudouris P, Melfos M, Mavrogonatos C, Photiades A, Moraiti E, Rieck B, Kolitsch U, Tarantola A, Scheffer C, Morin D, Vanderhaeghe O, Spry PG, Ross J, Soukis K, Vaxevanopoulos M, Pekov IV, Chukanov NV, Magganas A, Kati M, Katerinopoulos A, Zaimis S (2021) The Lavrion mines: a unique site of geological and mineralogical heritage, *Minerals*, 11, 76, <https://doi.org/10.3390/min11010076>
139. Voudouris, P., Repstock, A., Spry, P. G., Frenzel, M., Mavrogonatos, C., Keith, M., Tarantola, A., Melfos, V., Tombros, S., Zhai, D., Cook, N., Ciobanu, C.L., Schaarschmidt, A., Rieck, B., Kolitsch, U., Falkenberg, J. (2022). Physicochemical constraints on indium, tin-, germanium-, gallium-, gold-, and telluriumbearing mineralizations in the Pefka and St Philippos polymetallic vein-and breccia-type deposits, Greece. *Ore Geology Reviews*, 104348.
140. Wendel, W. and Markl, G., 1999. Lavrion, *Mineralogische Klassiker und Raritäten für Sammler*, Lapis, 24, 7/8, 34-52.

141. White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995, Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics and Exploration. SEG Newsletter, 23, 9-13.
142. Wijbrans, J.R., McDougall, I., 1986. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of white micas from an Alpine high-pressure metamorphic belt on Naxos (Greece): the resetting of the argon isotopic system. Contrib. to Mineral. Petrol., 93, 187–194. doi:10.1007/BF00371320.
143. Zaimis, S., Gutzmer, J., Voudouris, P., Melfos, V. (2016). Indium, germanium and gallium enrichments in the carbonate-replacement Pb-Zn-Ag ore deposit at Kamariza, Lavrion (NE Attica, Greece). In the Abstract Volume of the 1st Postgraduate Conference on the “Geology of Ore Deposits”, Freiberg, Germany, March 15-18, 2016, p. 25.
144. Zhang, X., & Spry, P., 1994. Petrological, mineralogical, fluid inclusions and stable isotopes studies of the Gies gold-silver telluride deposit, Judith Mountains, Montana: Economic Geology, 89, 602-627
145. Zouros, N.; Mountrakis, D. The thrusting of the Pindos zone and the relationship between the External geotectonic zones in Metsovo-eastern Zagori area (NW Greece). Bull. Geol. Soc. Greece 1991, 25, 245–262.
146. Zouros, N. Study of the Tectonic Structures Connected with the Pindos Nappe in Epirus (NW Greece). Ph.D. Thesis, University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, 1993; p. 630.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αποστολίκας, Α., Φρογουδάκης, Ε., Μαγκλάρας, Κ. (2000). Νικελιούχα κοιτάσματα στη Δυτική Μακεδονία. Παρόν και προοπτικές. Πρακτικά του 1ου Συνεδρίου της Επιτροπής Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας και Γεωχημείας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας με θέμα «Ορυκτός πλούτος και περιβάλλον στη Δυτική Μακεδονία», Κοζάνη, 11-14.
2. Βασιλάτος, Χ., Μπάρλας, Κ., Σταματάκης, Μ., Τσιβιλής, Σ. (2001). Βολφραμίτης-αντιμονίτης Ριζανών Λαχανά Νομού Κιλκίς. Δυνατότητα χρήσης τους ως

- ευτηκτικών στην Παρασκευή τσιμέντου. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 34, 827-834.
3. Κατερινόπουλος, Α. & Ζησιμοπούλου Ε. (1994). Τα ορυκτά των μεταλλείων του Λαυρίου. Αθήνα, Έκδοση Συλλόγου Ελλήνων Συλλεκτών Ορυκτών και Απολιθωμάτων, 304σ.
 4. Κόκκορος, Π., (1955). Παρατηρήσεις επί ορυκτών πινών της Λαυρεωτικής. Δελτίο Ελλ. Γεωλ. Εταιρείας, II, 13-17.
 5. Μαρίνος, Γ. & Petrascheck, W. E. (1956). Λαύριον, Γεωλ. Γεωφ. Μελ., ΙΓΜΕ, IV, 1, 246σ.
 6. Μελιδώνης, Ν.Γ. (1980). Γεωλογική δομή της Παλαιοτριτογενούς λεκάνης Αιμονίου-Κοτύλης και της γειτονικής της πειοχής (Δ. Θράκη). Μελέτη του κοιτάσματος ουρανιούχου λιθάνθρακα. Γεωλογικές και Γεωφυσικές Έρευνες, ΙΓΜΕ, XXII/2, 70 σελ.
 7. Μέλφος, Β., Βουδούρης, Π., Αρίκας, Κ., Βαβελίδης, Μ. Κ. (2001). Ψηλές περιεκτικότητες ρηνίου (Re) σε μολυβδαινίτες από μεταλλοφορίες πορφυριτικού Mo±Cu στη Θράκη (ΒΑ Ελλάδα). Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 34(3), 1015-1022.
 8. Μέλφος, Β., & Βουδούρης, Π. (2022). Κοιτάσματα της Ελλάδας [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.
 9. Περγαμαλής, Φ., Καραγεωργίου, Δ. Ε., Κουκουλής, Α., Κατσίκης, Ι. (2001). Ορυκτολογική και χημική σύσταση μεταλλεύματος άμμων παράκτιας ζώνης Νέας Περάμου-Λουτρών Ελευθέρων Ν. Καβάλας. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 34(3), 845-850.
 10. Σταυροπόδης, Ι.Δ., Κοτοπούλη, Κ. (1972). Ο ωτουνίτης. Εν νέον δια την Ελλάδα ορυκτόν ουρανίου. ΕΕΑΕ, DEMO 72/4G, Αθήνα, 17.
 11. Σταυροπόδης, Ι.Δ., Μπασσιάκος, Ι.Ε. (1980). Εφαρμογές ραδιομετρικής διασκόπησης με αυτογραφικό σπινθηρόμετρο σε αυτοκίνητο στην Ελλάδα. *Annales Geologiques de Pays Helleniques*, XXX/1, 185-205
 12. Σταυροπόδης, Ι.Δ. Πουρνής (1971). Ραδιομετρική διασκόπηση δι' αυτογραφικού σπινθηρομέτρου εις Βόρεια Ελλάδα. ΕΕΑΕ, DEMO 71/22G, Αθήνα.

13. Σολωμός Χ., Βουδούρης Π., και Κατερινόπουλος Α. (2004) Ορυκτολογική Μελέτη Μεταλλοφορίας Βισμούθιου – Χρυσού – Αντιμονίου Στην Περιοχή Καμαριζας Λαυρίου, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004
14. Τόμπρος Στ., Σέυμουρ Κ.Στ., 2001, Υπολογισμός των φυσικοχημικών παραμέτρων ΣS, ΣC, αΗ₂Ο, Ι και του περιεχομένου σε πετρογενετικά και μεταλλικά ιόντα, του υδροθερμικού ρευστού, της πολυμεταλλικής μεταλλοφορίας Au-Ag-Te της περιοχής Πανόρμου - Λαρδιαδών, Τήνου, Κυκλάδες
15. Χαριστός, Β. Δ. (2010). Μελέτη προσχωματικού χρυσού στις περιοχές Σερβίων Κοζάνης και των ποταμών Αλιάκμονα και Αξιού. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 372.

Βιβλιογραφία από ιστοσελίδες

<https://www.orykta.gr/zitisi-orykton-ylon>

<https://www.crmalliance.eu/critical-raw-materials>