



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



ΓΑΙΤΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ
ΑΕΜ 5880

ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Rare Earth Elements		Y	La	Ce
	Sc	Pr	Nd	Pm
Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
Ho	Er	Tm	Yb	Lu

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2024





ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΓΑΪΤΑ

ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Παναγιώτα Γάϊτα, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

© Παναγιώτα Γάϊτα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας,
Κοιτασματολογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Σπάνιες Γαίες στην Ελλάδα – *Διπλωματική Εργασία*

© Panagiota Gaita, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology,
2024

All rights reserved.

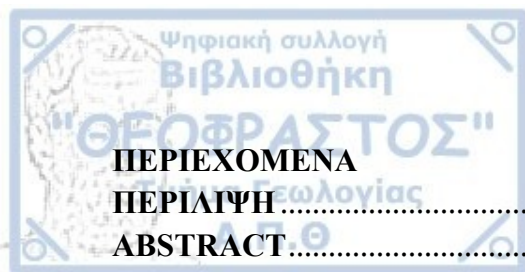
Rare Earth Elements in Greece– *Bachelor Thesis*



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

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

Εικόνα Εξωφύλλου: <https://chivine-us.com/rare-earths/>



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	7
2.1 Ορυκτά.....	7
3. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ	11
3.1 Θράκη	11
3.1.1 Μαρώνεια.....	11
3.1.2 Άνω Βυρσίνη	13
3.1.3 Σαμοθράκη.....	14
3.1.4 Ξάνθη	14
3.2 Μακεδονία	16
3.2.1 Καβάλα	16
3.2.2 Παρανέστι	18
3.2.3 Αγγελοχώρι.....	19
3.2.4 Χαλκιδική	21
3.2.5 Κιλκίς.....	23
3.2.6 Φλώρινα	25
3.3 Ήπειρος.....	26
3.4 Στερεά Ελλάδα.....	28
3.4.1 Βοιωτία	28
3.4.2 Λάρυμνα και Εύβοια.....	29
3.5 Πελοπόννησος.....	30
3.6 Κυκλάδες	32
3.7 Δωδεκάνησα	34
3.8 Κρήτη.....	36
4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	37
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	38



ΠΕΡΙΛΙΨΗ

Σπάνιες γαίες στην Ελλάδα

Παναγιώτα Γάϊτα

Οι σπάνιες γαίες έχουν χαρακτηριστεί ως κρίσιμες ορυκτές πρώτες ύλες λόγω των σημαντικών τους ιδιοτήτων και τη συνεισφορά τους στην πράσινη ενέργεια. Με την αύξηση του εύρους χρήσης τους αυξάνεται και η ζήτηση. Με την συνεχόμενη αύξηση της ζήτησης των σπάνιων γαιών στην αγορά, αυξάνονται και οι έρευνες αναζήτησης νέων αποθεμάτων. Η Ελλάδα με την πολύπλοκη γεωλογία της δεν αποτελεί εξαίρεση. Η παρούσα διπλωματική έχει σκοπό την αναζήτηση των περιοχών που έχουν ερευνηθεί ως τώρα, την αναφορά των αποτελεσμάτων δημιουργώντας τελικά έναν χάρτη αναφοράς.

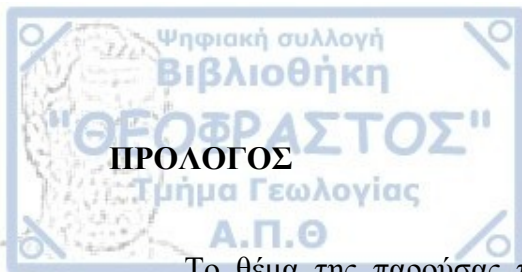


ABSTRACT

Rare Earth Elements in Greece

Panagiota Gaita

Rare earth elements are considered as critical mineral raw materials for their important properties and their contribution to green energy. With the expansion of their usage range the demand also rises. With the rising of the demand on the market more research for supplies is being conducted. Greece with its complicated geology is no exception. The purpose of the current diploma thesis is the research of the already studied areas of Greece resulting into a reference map.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο τον Δεκέμβριο του 2023.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η έρευνα και αναφορά των περιοχών μελέτης και εύρεσης σπανίων γαιών στην Ελλάδα καθώς και των συμπερασμάτων των μελετών αυτών.

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

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως σπάνιες γαίες (Rare-Earth Elements - REE), στην διεθνή βιβλιογραφία, αναφέρονται τα 15 στοιχεία της σειράς των λανθανίδων συμπεριλαμβανομένων και των στοιχείων σκάνδιο (Sc) και ύτριο (Y) που έχουν παρόμοιες χημικές και φυσικές ιδιότητες (Σχ. 1.1). Αναλυτικότερα η ομάδα των λανθανίδων είναι μια από τις δύο επιπρόσθετες σειρές του περιοδικού πίνακα και περιέχει, με αύξουσα σειρά ατομικού αριθμού, τα στοιχεία: λανθάνιο (La), δημήτριο (Ce), πρασεοδύμιο (Pr), νεοδύμιο (Nd), προμήθειο (Pm), σαμάριο (Sm), ευρώπιο (Eu), γαδολίνιο (Gd), τέρβιο (Tb), δυσπρόσιο (Dy), όλμιο (Ho), έρβιο (Er), θούλιο (Tm), υτέρβιο (Yb), λουτήσιο (Lu) (IUPAC 2005, Καλαθά 2017).

H	Rare Earth Elements																He
by Geology.com																	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
Lanthanides																	
La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu																	
Actinides																	
Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr																	

Σχ. 1.1 Θέση των σπάνιων γαιών στον περιοδικό πίνακα (Geology.com).

Σύμφωνα με την έκθεση της Ευρωπαϊκής ένωσης για τις κρίσιμες ορυκτές πρώτες ύλες οι σπάνιες γαίες χωρίζονται σε δύο κύριες ομάδες τις ελαφριές σπάνιες γαίες (LREE) από το λανθάνιο μέχρι το σαμάριο και τις βαριές σπάνιες γαίες (HREE) από το ευρώπιο μέχρι και το λουτήσιου συμπεριλαμβανομένου και του ύτριου (ENTR 2014).

Στην φύση οι σπάνιες γαίες δεν εμφανίζονται ως αυτοφυή στοιχεία αλλά ως οξείδια με γαιώδη μορφή βάση της οποίας πήραν το όνομα τους. Τα ορυκτά στα οποία συναντώνται ξεπερνούν σε αριθμό τα 250 παγκοσμίως, με τις πιο βασικές κατηγορίες να είναι τα

φωσφορικά, τα πυριτικά, τα ανθρακικά, καθώς επίσης τα οξείδια και τα αλογονίδια (Dushyantha et al. 2020).

Αντιθέτως της ονομασίας τους δεν είναι ούτε σπάνιες αλλά και ούτε γαίες. Ο όρος «σπάνιες» χρονολογείται μεταξύ 18^{ου} και 19^{ου} αιώνα όπου θεωρούνταν σπάνιες στον γήινο φλοιό ενώ ο όρος «γαίες» προέρχεται από την γεώδη εμφάνιση που έχουν σαν οξείδια και ομοίως με υλικά όπως ο ασβεστόλιθος η αλουμίνα και η μαγνησία. Μάλιστα μερικές από τις σπάνιες γαίες είναι ποιο συνηθισμένες από τον χρυσό και τον άργυρο ενώ το λανθάνιο το δημήτριο και το ύτριο είναι ποιο άφθονα από το μόλυβδο το κασσίτερο και το ουράνιο. Από τις φυσικές σπάνιες γαίες το ποιο άφθονο μέχρι στιγμής είναι το δημήτριο (Hoatson et al., 2011, Καλαθά 2017).

Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες των στοιχείων μοιάζουν αρκετά μεταξύ τους ώστε να καθιστούν δύσκολη την διάκριση τους. Οι ιδιότητες αυτές περιλαμβάνουν αργυρά, αργυρόλευκα, φαιά μεταλλικά χρώματα, ελατές και όλκιμες συμπεριφορές, υψηλή λάμψη που γρήγορα μαυρίζει στον αέρα, υψηλές ηλεκτρικές αγωγιμότητες, αντιδράσεις προς δημιουργία REO (Rare Earth Oxides), και πολύ μικρές διαφορές στην διαλυτότητα (Hoatson et al., 2011, Καλαθά 2017).

Ιστορικά, τα στοιχεία των σπάνιων γαιών ανακαλύφθηκαν μεταξύ του 1794 και του 1945, με το πρώτο ανακαλυφθέν στοιχείο να είναι το ύτριο και το τελευταίο το τεχνητά δημιουργημένο προμήθειο. Η ανακάλυψη τους ήταν δύσκολη και γεμάτη σύγχυση καθώς όπως προαναφέρθηκε οι πολύ όμοιες χημικές τους ιδιότητες καθιστούν την διάκρισή τους δύσκολη. Η ανακάλυψη της φασματικής ανάλυσης και η καθίδρυσή του περιοδικού πίνακα σε συνδυασμό με την δημιουργία πολύ καθαρών δειγμάτων βοήθησαν στην λύση του προβλήματος (Hoatson et al., 2011, Καλαθά 2017).

Πληθώρα εφαρμογών βρίσκουν οι σπάνιες γαίες από εξειδικευμένους τομείς όπως η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας μέχρι και αγαθά που καταναλώνουμε καθημερινά όπως τα τυριά. Η κύρια χρήση τους στη βιομηχανία είναι ως καταλύτες ενώ μεγάλη κατανάλωση έχουν και στους μαγνήτες. Ακόμη βρίσκουν χρήση στην μεταλλουργία ως κράματα, στα κεραμικά και γυάλινα είδη και στη στίλβωση (Σχ. 1.2). Μια ενδιαφέρουσα πληροφορία είναι πως οι σπάνιες γαίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο της αυθεντικότητας των οίνων και στην εργαστηριακή επιβεβαίωση της προέλευσης των τροφίμων (Θεωδόρου 2016, Πασβάνκα 2020, American geosciences institute 2024).



Σχ.1.2. Χρήσεις σπάνιων γαιών στην Αμερική το 2021 (Geology.com, τροποποιημένο από Γάϊτα).

2. ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

2.1 Ορυκτά

Ως ορυκτά σπάνιων γαιών ορίζονται όλα τα ορυκτά που περιέχουν σημαντική ποσότητα των στοιχείων αυτών στην χημική τους σύσταση ακόμα και εάν δεν αποτελούν κύρια στοιχεία για το ορυκτό αυτό (Kazanawa and Kamitani 2006, Μιχαήλοβιτς 2017).

Η περιεκτικότητα και ο τρόπος που κατανέμονται οι σπάνιες γαίες στα ορυκτά εξαρτώνται κυρίως από την ιοντική ακτίνα και σε μικρότερο βαθμό από το κρυσταλλικό σύστημα του εκάστοτε ορυκτού. Αναλυτικότερα οι παράγοντες αυτοί είναι ή διαθεσιμότητα των στοιχείων με την κατάλληλη ιοντική ακτίνα κατάλληλες δυνάμεις των δεσμών και το σθένος. Λόγω της διαφοράς των ιοντικών ακτινών των ελαφριών σπάνιων γαιών και των βαριών σπάνιων γαιών συμβαίνει μερικός εμπλουτισμός των ορυκτών είτε σε LREE είτε σε HREE. Οι ελαφριές σπάνιες γαίες, καταλαμβάνουν θέσεις με μεγαλύτερο αριθμό σύνταξης (7-11) ενώ οι βαριές της θέσης να μικρότερο αριθμό σύνταξης (6-8) (Henderson 1984, Μιχαήλοβιτς 2017). Όπως προαναφέρθηκε τα ορυκτά σπάνιων γαιών που έχουν εντοπιστεί προς το παρόν είναι 250. Ο Henderson (1984) τα χωρίζει σε αλογονίδια, ανθρακικά με φθόριο, οξειδία, βορικά, πυριτικά, πυριτικά με άλλα ανιόντα, φωσφορικά, αρσενίδια και θειικά άλατα. Παρόλο τον μεγάλο αριθμό ορυκτών που φέρουν σπάνιες γαίες ελάχιστα είναι τα εκμεταλλεύσιμα γεγονός που οφείλεται στην δυσκολία της διάσπασης καθώς πολλά από αυτά τα ορυκτά είναι πολύ ανθεκτικά. Ακόμη ύπαρξη ραδιενεργών στοιχείων σε σημαντική ποσότητα δυσχεραίνει περαιτέρω την πιθανότητα εκμετάλλευσης. Προς το παρόν πιο ευνοϊκά προς εκμετάλλευση είναι τα ανθρακικά και οι άργιλοι που έχουν προσροφήσει REE. Με βάση τη σημερινή τεχνολογία τα πιο οικονομικά εκμεταλλεύσιμα είναι ο μονζονίτης και ο μπαστναιζίτης (Henderson 1984, Μιχαήλοβιτς 2017).

Εν συντομία, τα πιο σημαντικά από αυτά τα ορυκτά είναι.

- Μπαστναιζίτης [(Ce,La)(CO₃)F]

Ο μπαστναιζίτης (Bastnaesite) είναι μια ομάδα των ανθρακικών ορυκτών των λανθανιδών με φθόριο. Τα ορυκτά αυτής της ομάδας κρυσταλλώνονται είτε στο εξαγωνικό είτε στο τριγωνικό σύστημα και διαφοροποιούνται ανάλογα με την ύπαρξη διαφόρων στοιχείων στη δομή τους όπως το ύτριο, το ασβέστιο και το βάριο. Ο μπαστναιζίτης είναι η πιο διαδεδομένη ομάδα ορυκτών σπάνιων γαιών καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό LREE και κατ' επέκταση REE προέρχονται από τα κοιτάσματα του στην Κίνα και την Αμερική. Συχνά εμφανίζεται σε πηγματίτες, ζώνες μεταμόρφωσης επαφής και φλεβικές αποθέσεις. Ακόμα εμφανίζεται σε

ανθρακικά-πυριτικά πετρώματα με πλήρωση σε αλκάλια, χαλαζιακές φλέβες, φλέβες που φέρουν φθορίτη και ψαμμίτες του Περμίου πληρωμένους με breccia (Henderson 1984, Λυμπεροπούλου 1996, Μιχαήλοβιτς 2017, Dushyantha et al. 2020).

- Μοναζίτης $[(\text{Ce}, \text{La})\text{PO}_4]$

Ο μοναζίτης (Monazite) αποτελεί μέρος της ομάδας των φωσφορικών ορυκτών. Κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα και συχνά εμφανίζεται εμπλουτισμένος σε LREE, με την εξαίρεση τους μοναζίτες σε πηγματίτες προερχόμενους από διαφοροποίηση γρανιτικών πετρωμάτων. Οι μοναζίτες εντοπίζονται σε γρανίτες, καρμπονατίτες, αλκαλικά πετρώματα, πηγματίτες που συνδέονται με γρανιτικά πετρώματα και σε μεταμορφωμένα πετρώματα. Ο μοναζίτης σχετίζεται με βαρέα ορυκτά όπως ο ιλμενίτης, ο μαγνητίτης, το ρουτίλιο, και το ζirkόνιο λόγω της αντοχής του στην αποσάθρωση (Henderson 1984, Μιχαήλοβιτς 2017, Dushyantha et al. 2020).

- Αλλανίτης $[(\text{Ce}, \text{Ca}, \text{Y})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})]$

Ο αλλανίτης (Allanite) είναι ένα πυριτικό ορυκτό που κατατάσσεται στην ομάδα του επιδότου. Κρυσταλλώνεται στο μονόκλινές σύστημα και στο κρυσταλλικό του πλέγμα μπορεί να γίνει αντικατάσταση του ασβεστίου από ελαφριές σπάνιες γαίες ή ύτριο. Σπάνια εμπεριέχει αρκετή ποσότητα σε REE ώστε να δημιουργήσει μετάλλευμα. Εμφανίζεται ως επουσιώδες ορυκτό σε γρανίτες, γρανοδιορίτες, συηνίτες, διορίτες, πηγματίτες και μονζονίτες (Henderson 1984, Λυμπεροπούλου 1996, Μιχαήλοβιτς 2017, Dyshuantha et al. 2020).

- Ξενότιμο (YPO_4)

Το ξενότιμο (Xenotime) είναι ένα φωσφορικό ορυκτό που κρυσταλλώνεται στο τετραγωνικό σύστημα. Συχνά στο κρυσταλλικό του πλέγμα οι HREE αντικαθιστούν το ύτριο καθιστώντας το ένα πολύ σημαντικό ορυκτό για την εκμετάλλευση βαριών σπάνιων γαιών. Συχνή είναι και η συνύπαρξή του με τον μονζονίτη. Εμφανίζεται ως επουσιώδες ορυκτό σε πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα και όπως και ο μονζονίτης είναι πολύ ανθεκτικό στην αποσάθρωση (Henderson 1984, Lumpkin and Geisher-Wierwille 2012, Μιχαήλοβιτς 2017, Frances Wall 2021).

- Ευξενίτης $[(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{TaTi})_2\text{O}_6]$

Ο ευξενίτης (Euxenite) είναι ένα σύνηθες ορυκτό οξειδωσης. Κρυσταλλώνεται στο ρομβικό σύστημα και εμφανίζεται σε γρανίτες και πηγματίτες (Dushyantha et al. 2020).

2.2 Κοιτάσματα

Τα κοιτάσματα σπάνιων γαιών χωρίζονται σε πρωτογενή και δευτερογενή σύμφωνα με την Βρετανική Γεωλογική Υπηρεσία (Rare earth elements 2011, Μιχαήλοβιτς 2017)

2.2.1 Πρωτογενή κοιτάσματα σπάνιων γαιών

- Κοιτάσματα σπάνιων γαιών σε καρμπονατίτες

Ως καρμπονατίτες ορίζονται τα πυριγενή πετρώματα η σύσταση των οποίων περιέχει πάνω από 50% ποσοστό ανθρακικών ορυκτών. Η προέλευση των πετρωμάτων αυτών είναι άνω μανδυακή από μάγματα φτωχά σε SiO_2 και πλούσια σε CO_2 . Η ύπαρξη σπάνιων γαιών σε αυτά τα κοιτάσματα οφείλεται στην συγκέντρωσή τους σε ορυκτά όπως ο απατίτης και ο ασβεστίτης. Κατά την ψύξη του πετρώματος, η αντικατάσταση του ασβεστίτη από άλλα ορυκτά απελευθερώνει σπάνιες γαίες από το πλέγμα του οι οποίες μετέπειτα κρυσταλλώνονται σε ορυκτά όπως ο μπαστναϊζίτης, ο μοναζίτης, και ο παρασίτης. Το πιο γνωστό κοίτασμα αυτής της κατηγορίας είναι το Mountain Pass που βρίσκεται στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ και θεωρείται το δεύτερο μεγαλύτερο κοίτασμα σπάνιων γαιών παγκοσμίως (Rare Earth Elements 2011, Μιχαήλοβιτς 2017, Dushyantha et al. 2020).

- Κοιτάσματα σπάνιων γαιών που συνδέονται με αλκαλικά πετρώματα.

Τα κοιτάσματα αυτά μπορούν να προκύψουν είτε από μαγματικές διαδικασίες εμπλουτισμού είτε από υδροθερμική δράση. Ο ακριβής τρόπος γένεσής τους δεν είναι απόλυτα κατανοητός. Τα αλκαλικά πετρώματα προκύπτουν από μάγματα εμπλουτισμένα σε αλκάλια με αποτέλεσμα να κρυσταλλώνονται ορυκτά όπως οι άστριοι οι οποίοι εμφανίζονται μόνο σε αυτόν τον τύπο πετρωμάτων. Πετρώματα βασικής έως και όξινης σύστασης μπορούν να χαρακτηριστούν ως αλκαλικά και εμπλουτίζονται σε Zr, Y, REE και Ti. Το κοίτασμα Lovozero στη χερσόνησο Kola της Ρωσίας θεωρείται το μεγαλύτερο κοίτασμα και φιλοξενείται σε συνηνίτες (Μιχαήλοβιτς 2017, Dushyantha et al. 2020).

- Κοιτάσματα που δεν συνδέονται με αλκαλικά πετρώματα

Πολλοί είναι οι διαφορετικοί τύποι κοιτασμάτων που εμπεριέχονται σε αυτήν την κατηγορία. Ο πιο σημαντικός τύπος είναι τα κοιτάσματα οξειδίων σιδήρου, γνωστά ως IOCG (Iron Oxide Copper Gold) με το μεγαλύτερο κοίτασμα REE στον κόσμο να είναι το Bayan Obo της Κίνας. Άλλοι τύποι κοιτασμάτων είναι τα κοιτάσματα REE σε μεταμορφωμένα πετρώματα. Ένα

παράδειγμα κοιτασμάτων αυτών των τύπων είναι το κοίτασμα φθορίτη σε ιζηματογενή πετρώματα στην περιοχή Rock Canyon Creek στον Καναδά (Rare Earth Elements 2011, Μιχαήλοβιτς 2017, Dushyantha et al. 2020).

2.2.2 Δευτερογενή κοιτάσματα σπάνιων γαιών

- Λατεριτικά κοιτάσματα

Τα λατεριτικά κοιτάσματα δημιουργούνται με τον μηχανισμό της χημικής αποσάθρωσης των πετρωμάτων σε συνθήκες θερμού και υγρού κλίματος, έντονης βλάστησης και ήπιου ανάγλυφου. Κατά τη διαδικασία αυτή που ονομάζεται λατερίωση, γίνεται ένας φυσικός διαχωρισμός των στοιχείων, οπότε στην περίπτωση που το μητρικό πέτρωμα είναι εμπλουτισμένο σε σπάνιες γαίες όπως παραδείγματος χάρη καρμωνατίτες, μπορούμε να έχουμε δημιουργία κοιτάσματος σπάνιων γαιών. Τα ορυκτά η διάσπαση των οποίων απελευθερώνει REE στα κοιτάσματα αυτά είναι ο απάτητης, ο ασβεστίτης και ο δολομίτης (Rare Earth Elements 2011, Μιχαήλοβιτς 2017).

- Προσχωματικά κοιτάσματα

Τα κοιτάσματα αυτά δημιουργούνται από τη διάσπαση βαρέων ορυκτών, κυρίως χρυσού και την μεταφορά αυτών μέσω ποταμών ή θαλάσσιων ρευμάτων όπου και αποτίθενται. Τα ορυκτά σπάνιων γαιών που εμπεριέχονται σε αυτό τον τύπο κοιτασμάτων είναι ο μοναζίτης ο οποίος λόγω της περιεκτικότητάς του σε Th καθιστά τα υπολείμματα της επεξεργασίας του δύσκολα στην περιβαλλοντική διαχείριση και πλέον η εκμετάλλευσή του αυτού του τύπου κοιτασμάτων δεν είναι σημαντική σε παγκόσμιο επίπεδο (Rare Earth Elements 2011, Μιχαήλοβιτς 2017).

3. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ ΜΕ REE

Τα τελευταία χρόνια γίνονται όλο και περισσότερες έρευνες στον ελληνικό χώρο για την εύρεση κοιτασμάτων σπάνιων γαιών. Παρά τη μεγάλη συχνότητα εύρεσης τους στην Ελλάδα δεν έχει βρεθεί προς στιγμή κάποια περιοχή όπου με βάση τις σημερινές τεχνολογίες να υπάρχει οικονομικό συμφέρον στην αξιοποίησή τους. Στην περίπτωση όμως που μελλοντικά αναπτυχθούν νέες μεθοδολογίες παρακάτω γίνεται αναφορά όλων των μέχρι σήμερα περιοχών, ταξινομημένες ανά γεωγραφικά διαμερίσματα, όπου έχουν βρεθεί σπάνιες γαίες.

3.1 Θράκη

3.1.1 Μαρώνεια

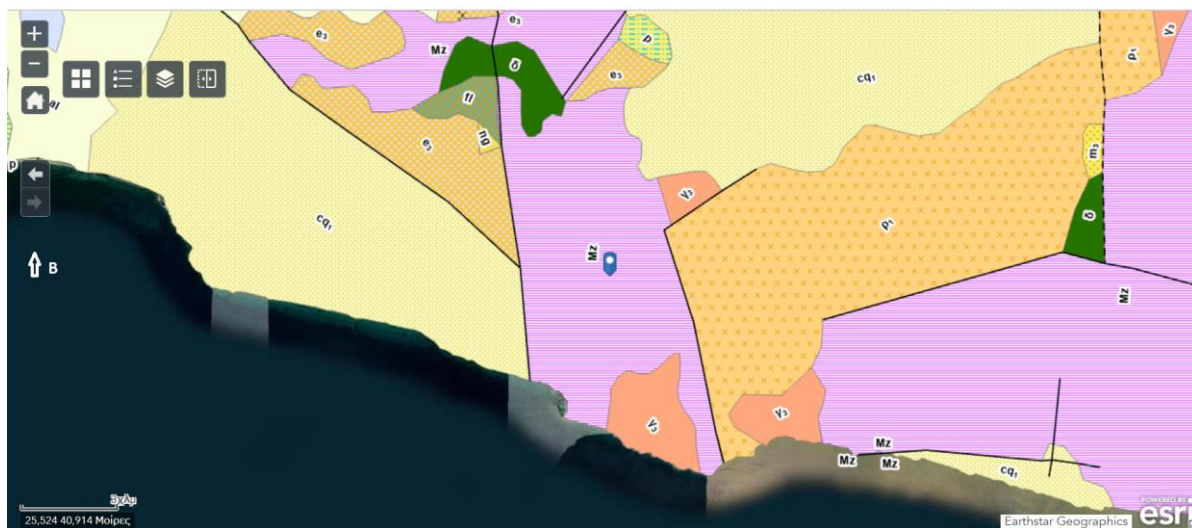
Η Μαρώνεια είναι ένα χωριό του νομού Ροδόπης νοτιοανατολικά της πόλης της Κομοτηνής. Την περιοχή έχουν ερευνήσει οι Papadopoulos (2019) και Vasilatos and Papoutsas (2023). Σε δείγματα από μονζονιοίτη που εξέτασαν οι Vasilatos and Papoutsas (2023) βρήκαν συνολικά 165 με 186 ppm συγκέντρωσης σπάνιων γαιών (Papadopoulos et al. 2019, Vasilatos and Papoutsas 2023).

Τα ορυκτά σπάνιων που προσδιορίστηκαν είναι ο τσεβκινίτης-(Ce), ο αλλανίτης-(Ce) ο μοναζίτης-(Ce) και ο ζirkονόλιθος. Ο τσεβκινίτης είναι το κύριο μέλος μιας υποομάδας ορυκτών με γενικό χημικό τύπο $A_2BC_2D_2(Si_2O_7)_2O_8$, όπου την θέση A καταλαμβάνουν στοιχεία όπως REE, Ca, Y, U και Th, τη θέση B στοιχεία όπως ο Fe, τη θέση C στοιχεία όπως Al, Ti, Fe, Mn, Zr και την θέση D καταλαμβάνει κυρίως το Ti. Ο τσεβκινίτης έχει εντοπιστεί σε ένα μεγάλο εύρος πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Εμφανίζεται κάτω από διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Στη Μαρώνεια οι Vasilatos and Papoutsas (2023) ταυτοποίησαν κρυστάλλους με χημικό τύπο $(REE,Ca,Th)_{3,97}Fe(Fe,Al,Ti)_{1,8}Ti_2(SiO_7)_2O_8$ αλλά λόγω έλλειψης δεδομένων τα αναφέρουν όλα ως τσεβκινίτη-(Ce) (Vasilatos and Papoutsas 2023).

Ο αλλανίτης-(Ce) στα δείγματα εμφανίζεται με δυο τρόπους, ως ανεξάρτητος κόκκος διάσπαρτους στο πέτρωμα και ως άνυδρος κρύσταλλος οριοθετημένος από σπασίματα ή αναπτυγμένους ενδιάμεσα στα κενά των κύριων ορυκτών του πετρώματος. Οι κρύσταλλοι του αλλανίτη μπορεί να εμφανίζουν ζώνωση, υποδεικνύοντας μετάβαση από αλλανίτη σε επίδοτο εμπλουτισμένο με REE. Συμπερασματικά ο μονζονιοίτης της Μαρώνειας έχει δυο γενιές αλλανίτη, μία από ένα αρχικό στάδιο κρυστάλλωσης και μια από ένα μεταγενέστερο (Vasilatos and Papoutsas 2023).

Ο ζirkονολίτης στα δείγματα εμφανίζεται και αυτός με δυο τρόπους, ως απλώς ζirkονολίτης και ως ζirkονολίτης εμπλουτισμένος με ύτριο. Και οι δυο τύποι μοιράζονται παρόμοια χαρακτηριστικά υφής παρόλο που ο δεύτερος είναι λιγότερο συχνός και κρυσταλλώνεται ενδιάμεσα σε μαγνητίτη-(V) και μαγνησίουχο ιλμενίτη με εγκλείσματα απατίτη (Vasilatos and Papoutsas 2023).

Ο πλουτωνίτης της Μαρώνιας αποτελείται από μια ομάδα γάββρων, μια ομάδα μονζογάββρων, χαλαζιακούς μονζογάββρους με επιπρόσθετο χαλαζιακό μονζονίτη και μια ομάδα γρανίτη και απλιτικές φλέβες (Σχ. 3.1.1). Με βάση τη χρονολόγηση του ζirkονίου (29,7 Ma) και την ηλικία των ιχνών σχάσης του απατίτη (29,3 Ma) οι πλουτωνίτες υπέστησαν γρήγορη ανύψωση. Την περίοδο αυτή τα ρήγματα αποκόλλησης προκάλεσαν την εκταφή του δόμου Κεχρού και συσχετίστηκαν χωρικά με την διείσδυση του νεότερου μικρογρανίτη Μαρώνιας που ήταν τοποθετημένος στο κάτω τέμαχος (Melfos et al. 2021). Η τοποθέτηση του μικρογρανίτη ήταν ταυτόχρονη της διάτμησης κατά μήκος μιας όλκιμης ζώνης διάτμησης. Η μεταλλοφορία Cu-Mo-Re-Au με μολυβδαινίτη που περιέχει πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε Re πορφυριτικού τύπου συνδέεται με τον μικρογρανίτη (Melfos et al. 2021).

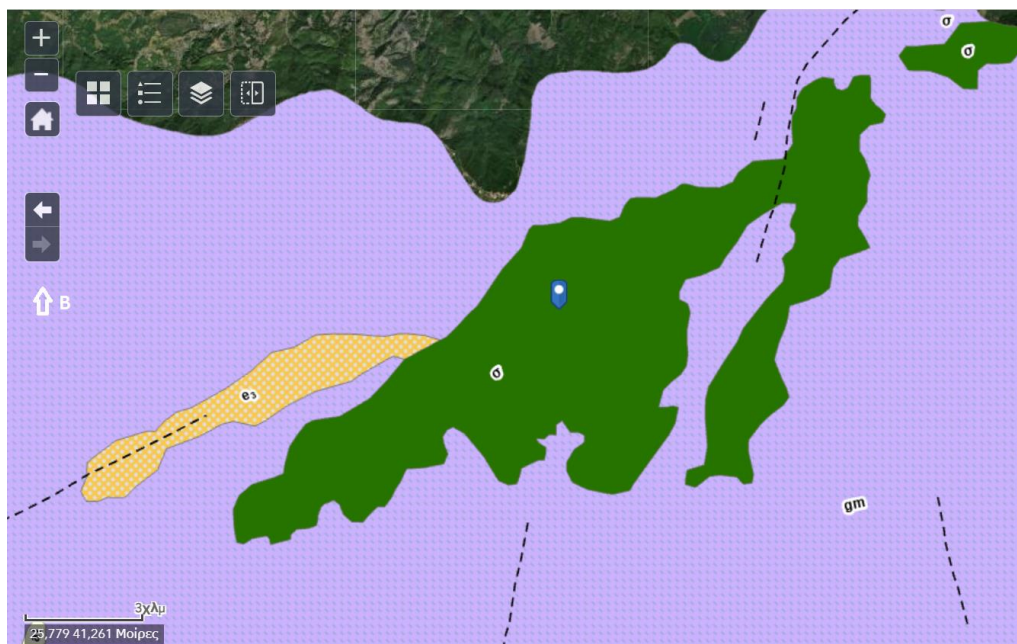


Σχ. 3.1.1. Γεωλογικός χάρτης ΝΑ Θράκης. Ο δείκτης δείχνει την Μαρώνια. Όπου **Mz**-μάρμαρα και φυλλίτες, όπου **γ3**-γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες Τριτογενείς, όπου **δ**-διαβάσεις, όπου **ρ1**-ρυόλιθοι, ρυοδακίτες, δακίτες, ανδεσίτες, τραχειανδεσίτες, τραχείτες Ηωκαίνου-Ολιγόκαινου, όπου **cqi**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα, κ.λ.π, όπου **e3**-ιζήματα, μολάσσα: κροκαλοπαγή, μάργες, ψαμμίτες, στη Θράκη με ασβεστόλιθους και λιγνίτες, όπου **ng**-λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις: ιζήματα κλαστικά όπως τα παραπάνω (κυρίως μολάσσα), όπου **fl**-στρώματα Δρυμού - Μελίας στη Θράκη. Κλαστικά ιζήματα (φλυσχοειδή) όπου **p**-θαλάσσιες

αποθέσεις: τα προηγούμενα κλαστικά ιζήματα (κροκαλοπαγή, άμμοι, άργιλοι κ.α.), ενίοτε και στρώματα γύψου. Περιλαμβάνονται και αποθέσεις υφάλμυρης φάσεως, όπου **m3**-Λιμναίες αποθέσεις: τα προηγούμενα κλαστικά ιζήματα (μάργες, ψαμμίτες κ.α.), τοπικά με στρώματα λιγνιτών. Οι έντονες γραμμές συμβολίζουν κανονικά ρήγματα ενώ οι διακεκομμένες πιθανά κανονικά ρήγματα (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.1.2 Άνω Βυρσίνη

Μεταμορφωμένα πετρώματα της οφιολιθικής σειράς της Άνω Βυρσίνης στην ανατολική Ροδόπη εμπεριέχουν ορυκτά REE όπως ο αλλανίτης, ο μοναζίτης, το ζirkόνιο, το ξενότιμο και ο απατίτης (Σχ. 3.1.2). Τα πετρώματα αυτά βρίσκονται στις ζώνες διάτμησης και χαρακτηρίζονται ως υπερμυλωνίτες και υπερκατακλαστίτες. Το πάχος τους φτάνει τα 10 m και ακολουθούν την διεύθυνση κλίσης του υπερβασικού σώματος. Η μορφή τους συσχετίζεται με την κίνηση ώθησης των οφιολιθικών πετρωμάτων που κατακλύζουν περιοχή 95 km². Οι κρύσταλλοι του ξενότιμου περιέχουν ΣREO(Y, Nd, Sm, Tb, Dy) μέχρι και 59,23% ενώ οι κρύσταλλοι μοναζίτη ΣREO(La, Ce, Nd, Sm) μέχρι και 56,64% (Eliopoulos et al. 2014).



Σχ. 3.1.2 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής ΒΑ Θράκης. Ο δείκτης δείχνει την Άνω Βυρσίνη. Όπου **σ**-σερπεντινίτες παλαιοζωικοί, όπου **gm**-αμφιβολίτες, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι με ενστρώσεις μαρμάρων (Ροδόπη), όπου **e3**-μολάσσα: κροκαλοπαγή, μάργες, ψαμμίτες. Στη Θράκη με ασβεστόλιθους και λιγνίτες. Οι διακεκομμένες έντονες γραμμές συμβολίζουν πιθανά κανονικά ρήγματα (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.1.3 Σαμοθράκη

Δείγματα από άμμους με βαρέα μέταλλα γειτονικά με πλουτωνίτες που συγκέντρωσαν οι Papadopoulos et al. (2019) έδειξαν χαμηλές συγκεντρώσεις REE σε αλλανίτη. Η χαμηλή συγκέντρωση σε REE εξηγείται ως αποτέλεσμα υψηλής διάλυσης από τα πυριτικά ορυκτά χαλαζία, αστρίους και κεροστίλβη (Papadopoulos et al. 2019).

Κατά τους Eliopoulos et al. (2014) η περιοχή ενδιαφέροντος είναι στο νοτιοδυτικό κομμάτι του νησιού που αποτελείται από αλλοιωμένα ηφαιστειακά πετρώματα τραχειτικής και δακιτικής σύστασης με πορφυριτικό ιστό (Σχ. 3.1.3). Τα ορυκτά σπάνιων γαιών είναι ο αλλανίτης ο τιτανίτης και το ζirkόνιο. Χημικές αναλύσεις των κρυστάλλων αλλανίτη δείχνουν αυξημένες περιεκτικότητες σε Ce, La και Nd. Οι ποσότητες των σπάνιων γαιών στους κρυστάλλους μπορούν να φτάσουν ποσοτικά 20% (Eliopoulos et al. 2014).



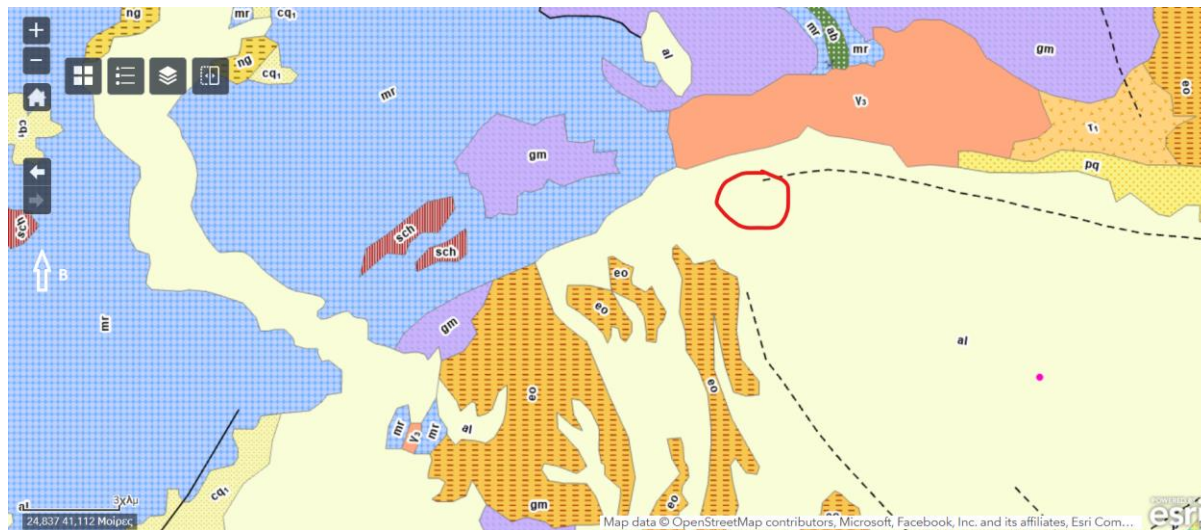
Σχ 3.1.3. Γεωλογικός χάρτης Σαμοθράκης. Όπου **δ**-διαβάσεις, όπου **γ3**-Γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες τριτογενείς όπου **ρ1**-ρυόλιθοι, ρυοδακίτες, δακίτες, ανδεσίτες, τεχειανδεσίτες, τραχείτες Ηωκαίνου – Ολιγόκαινου, όπου **τ1**-πυροκλαστικά: τόφφοι, ιγκνιμβρίτες Ηωκαίνου – Ολιγόκαινου, όπου **mp**-θαλάσσιες αποθέσεις: τα παραπάνω κλαστικά ιζήματα και ενίοτε στρώματα γύψου. Συνήθως απουσιάζουν τα κοκκινοχώματα. Περιλαμβάνονται και αποθέσεις υφάλμυρης φάσης, όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **e3**- μολάσσα: κροκαλοπαγή, μάργες, ψαμμίτες. Στη Θράκη με ασβεστόλιθους και λιγνίτες, όπου **q2**-παλαιοί και νέοι κώνοι κορημάτων. Όπου **fl**-στρώματα Δρυμού - Μελίας στη Θράκη. Κλαστικά ιζήματα (φλυσχοειδή). Η ροζ τελεία συμβολίζει θερμή μεταλλική πηγή (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.1.4 Ξάνθη

Στα Fe-skarn της Ξάνθης που ανήκουν στην Μάζα Ροδόπης έχει ανακαλυφθεί συχνή παρουσία με επίδοτο-(Ce) το οποίο σηματοδοτεί και συχνή παρουσία REE. Το skarn αυτό βρίσκεται στη ζώνη διάτμησης του Νέστου. Κατά τους Fitros et al. (2020) ο σχηματισμός αυτός δημιουργήθηκε στα όρια σύγκλισης με υψηλή γεωθερμική βαθμίδα brittle fracturing, άνοδο μη αναμείξιμου ρευστού προς τα πάνω και διαδικασία μετατροπής σε skarn (Fitros et al. 2020).

Ο πλουτωνίτης της Ξάνθης (Σχ. 3.1.4) θεωρείται μια Ολιγοκαινική γρανοδιοριτική διείδυση που έλαβε τόπο μετά την σύγκρουση των πλακών και τοποθετήθηκε κατά μήκος μιας μεγάλης ζώνης ρήγματος κατά τον εφελκυσμό του άνω φλοιού της υπερισχύουσας πλάκας λόγω του αυξανόμενου ρυθμού του roll back της πλάκας στο διάστημα Ηώκαινο-Ολιγόκαινο (Fitros et al. 2020).

Η κύρια πηγή εμπλουτισμού σε Ce στο skarn είναι η επανακινητοποίηση των REE από τον Ι-τύπο γρανοδιορίτη της Ξάνθης με απόσπαση του Ce από τον γρανοδιορίτη και ενσωμάτωση του στο επίδοτο μέσω αντικατάστασης αλκαλίων κύριος Ca υπό συνθήκες συγκεκριμένης θερμοκρασίας και πίεσης. Η οξείδωση του Ce από Ce^{3+} σε Ce^{4+} βοήθησε περαιτέρω στον εμπλουτισμό του επιδότου σε Ce (Fitros et al. 2020).



Σχ. 3.1.4. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής της ΒΔ Θράκης. Κυκλωμένη είναι η περιοχή της πόλης της Ξάνθης. Όπου **gm**-αμφιβολίτες, γενέσιοι, σχιστόλιθοι με ενστρώσεις μαρμάρων (Ροδόπη), όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **pg**-λιμναίες αποθέσεις: άμμοι, κροκαλοπαγή, άργιλοι, στρώματα τύρφης ή λιγνίτη, ενίοτε κοκκινοχώματα. Περιλαμβάνονται και ποταμολιμναίες αποθέσεις, όπου **cq1**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα κ.λ.π, όπου **ab**-αμφιβολίτες: Στη Χαλκιδική Παλαιοζωικοί. Στην υπόλοιπη χώρα πιθανώς Μεσοζωικοί, όπου **mr**-μάρμαρα ή κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, όπου **eo**-

μολασσικοί σχηματισμοί στη Βόρεια Ελλάδα. Στη Θράκη και με λιγνίτες, όπου **ng**-λιμναίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάργες, άργιλοι, μερικές φορές με στρώματα λιγνίτη, όπου **sch**- σχιστόλιθοι χλωριτικοί, μαρμαρυγιακοί, χαλαζιακοί, συχνά με ενστρώσεις μαρμάρων, όπου **γ3**-γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες τριτογενείς, όπου **τ1**-πυροκλαστικά: τόφφοι, ιγκνιμβρίτες Ηωκαίνου–Ολιγόκαινου. Οι έντονες γραμμές συμβολίζουν κανονικά ρήγματα. Η ροζ τελεία συμβολίζει θερμή μεταλλική πηγή (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.2 Μακεδονία

3.2.1 Καβάλα

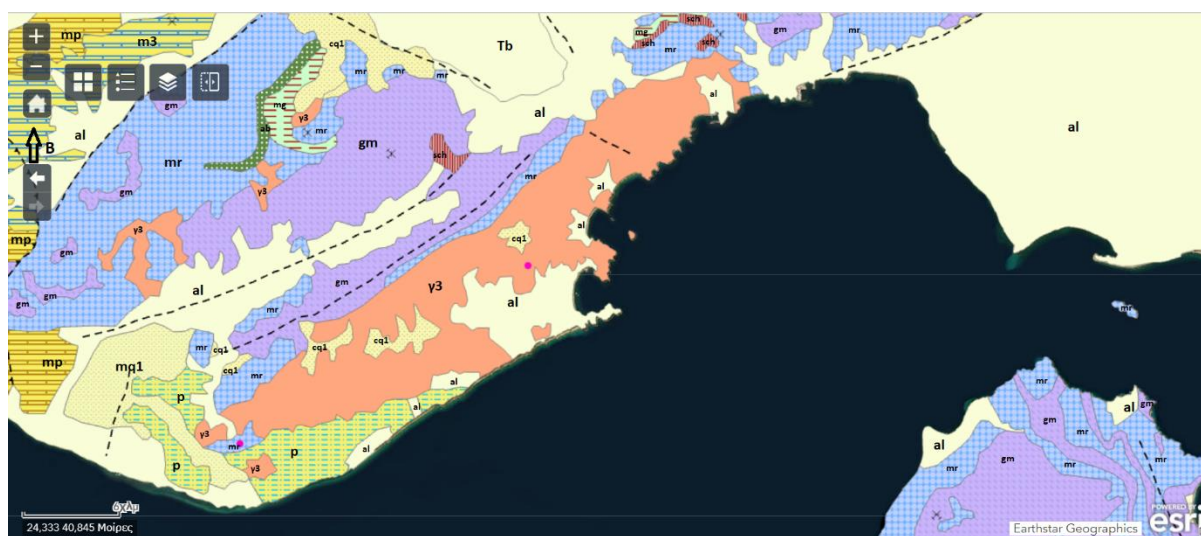
Τα προσχωματικά κοιτάσματα στις νοτιοδυτικές ακτές της Καβάλας έχουν γίνει αντικείμενο πολλών ερευνών τα τελευταία χρόνια λόγω της έντονης παρουσίας σπάνιων γαιών. Στις ακτές αυτές έχουν δημιουργηθεί στρώματα μαύρης άμμου (black sands) το μαύρο χρώμα των οποίων προέρχεται από τα βαριά ορυκτά που εμπεριέχουν όπως ο μαγνητίτης, ο ιλμενίτης, ο γρανάτης, ο μοναζίτης κ.ά. που έχουν σκούρο χρώμα (Eliopoulos et al. 2014, Papadopoulos et al. 2019, Tzifas et al. 2019, Peristeridou et al. 2022).

Τα κύρια ορυκτά που φέρουν σπάνιες γαίες στα κοιτάσματα είναι ο αλλανίτης και ο τιτανίτης ενώ σε μικρότερες συγκεντρώσεις υπάρχουν και ο μοναζίτης, το ζirkόνιο και ο απατίτης που επίσης φέρουν σπάνιες γαίες. Σε έρευνες που έκαναν οι Papadopoulos et al. (2019) εντόπισαν μια φωσφοριτική φάση εμπλουτισμένη σε Ce την οποία προσδιόρισαν είτε ως μοναζίτη είτε ως ξενότιμο με μέγεθος λιγότερο από 10μm πιθανώς δευτερογενής αλλοίωση αλλανίτη. Χημικές αναλύσεις δείχνουν ότι τα ποσοστά LREE υπερσχύουν με διαφορά τον HREE γεγονός αναμενόμενο αφού ο αλλανίτης είναι το κύριο ορυκτό σπάνιων. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στα κοιτάσματα αυτά υπάρχουν μεγάλες συγκεντρώσεις θορίου και ουρανίου στοιχεία τα οποία είναι ραδιενεργά γεγονός το οποίο δυσχεραίνει την αξιοποίησή τους. Άλλα σημαντικά οικονομικά μέταλλα που έχουν καταγραφεί είναι το νιόβιο και το βανάβιο με συγκεντρώσεις μεταξύ 26-118 mg/kg και 342-835 mg/kg και σε μικρότερες περιεκτικότητες τα άφνιο (8-54 mg/kg), το ταντάλιο (3-10 mg/kg) και το γάλλιο (2-18 mg/kg) (Papadopoulos 2019, Tzifas et al. 2019).

Οι μαύρη άμμοι δημιουργήθηκαν από την αποσάθρωση μεταφορά και απόθεση στοιχείων του πλουτωνίτη Καβάλας ο οποίος διείσδυσε στα μεταμορφωμένα πετρώματα της Μάζας Ροδόπης με μια νοτιοδυτική-βορειοανατολική διεύθυνση (Σχ. 3.2.1). Αποτελείται από I-τύπου καλιούχα-αλκαλιούχα γρανιτικά πετρώματα. Πετρολογικά ο κύριος τύπος είναι ένας μεσόκοκκος βιοτιτικός-κεροστιλβικός γρανοδιορίτης με ενστρώσεις διοριτικής και

τοναλτικής σύστασης. Φλέβες απλίτη είναι επίσης παρούσες. Ο γρανοδιορίτης εμφανίζεται ανοιχτόχρωμος προς σκουρόχρωμος και χαρακτηρίζεται από μυλωνιτώση. Υπάρχουν επίσης μικρές εμφανίσεις βιοτιτικού-κεροσιλβικού τοναλίτη και βιοτιτικού μονζογρανίτη.

Φλέβες πλούσιες σε τουρμαλίνη και breccia εμφανίζονται στο χαμηλότερο μέρος του πλουτωνίτη. Τα ορυκτά που αποτελούν τον πλουτωνίτη της Καβάλας είναι χαλαζίας, άστριοι, βιοτίτες, κεροσίλβη, τιτανίτης, αλλανίτης, ζirkόνιο, μοναζίτης και απατίτης. Ποσοτικά ο χαλαζίας εμπεριέχεται σε 21-33%, οι άστριοι 63-70% ο βιοτίτης και η κεροσίλβη από 3% έως 8% το καθένα ενώ τα επουσιώδη ορυκτά δεν ξεπερνούν το 0,5% (Tzifas et al. 2019).



Σχ. 3.2.1 Γεωλογικός χάρτης των ακτών της Καβάλας. Όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **p**-θαλάσσιες αποθέσεις: τα προηγούμενα κλαστικά ιζήματα (κροκαλοπαγή, άμμοι, άργιλοι κ.α.), ενίοτε και στρώματα γύψου. Περιλαμβάνονται και αποθέσεις υφάλμυρης φάσεως, όπου **γ3**-γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες τριτογενείς, όπου **eq1**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα κ.λ.π, όπου **mq1**-θαλάσσιες αποθέσεις: μάργες, άργιλοι, άμμοι κροκαλοπαγή, παράκτιες αναβαθμίδες, όπου **mp**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, άμμοι, μάργες, κοκκινοχώματα, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, άργιλοι και ενίοτε λιγνίτες, όπου **mr**-μάρμαρα ή κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, όπου **gm**-αμφιβολίτες, γενεύσιοι, σχιστόλιθοι με ενστρώσεις μαρμάρων (Ροδόπη), όπου **mg**-μάρμαρα με παρεμβολές γενεύσιων, όπου **sch**-σχιστόλιθοι χλωριτικοί, μαρμαρυγιακοί, χαλαζιακοί, συχνά με ενστρώσεις μαρμάρων, όπου **Tb**-τύρφη Φιλίππων, όπου **m3**-θαλάσσιες αποθέσεις: τα παραπάνω κλαστικά ιζήματα και ενίοτε στρώματα γύψου. Συνήθως απουσιάζουν τα κοκκινοχώματα. Περιλαμβάνονται και αποθέσεις υφάλμυρης φάσης, όπου **ab**-Μεσοζωικοί αμφιβολίτες. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν πιθανά κανονικά ρήγματα. Η ροζ τελεία συμβολίζει θερμή μεταλλική πηγή (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.2.2 Παρανέστι

Στο γρανίτη του Παρανεστίου στην περιοχή Παρανέστι του νομού Δράμας (Σχ. 3.2.2) η Μιχαήλοβιτς (2017) εξέτασε την πιθανότητα ύπαρξης σπάνιων γαιών. Τα ορυκτά σπάνιων γαιών που εντοπίστηκαν είναι ο μοναζίτης ο αλλανίτης και απροσδιόριστες ορυκτές φάσεις REE σε στενή σύμφυση με οξείδια Ti. Τα δείγματα είναι εμπλουτισμένα σε LREE σε σχέση με τις HREE. Στα συμπεράσματα του η Μιχαήλοβιτς αναφέρει ότι τα στοιχεία δεν είναι αρκετά ώστε να επιβεβαιώσουν την ύπαρξη ή όχι κοιτασμάτων REE στην περιοχή.

Επίσης αναφέρει ότι μια πιθανή ερμηνεία της περιορισμένης παρουσίας REE στα δείγματα του είναι η απόσπαση των σπάνιων γαιών από τα αρχικά ορυκτά μέσω της δράσης μεταμαγματικών ρευστών και η απόθεση τους σε βάθος υπό αναγωγικές συνθήκες. Τέλος τονίζει πως περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη στην περιοχή μελέτης με περισσότερα δείγματα από θέσεις όπου έχει εντοπιστεί παρουσία ουρανιούχων ορυκτών για τον καθορισμό της σχέσης της ουρανιούχου μεταλλοφορίας με τις REE (Μιχαήλοβιτς 2017).

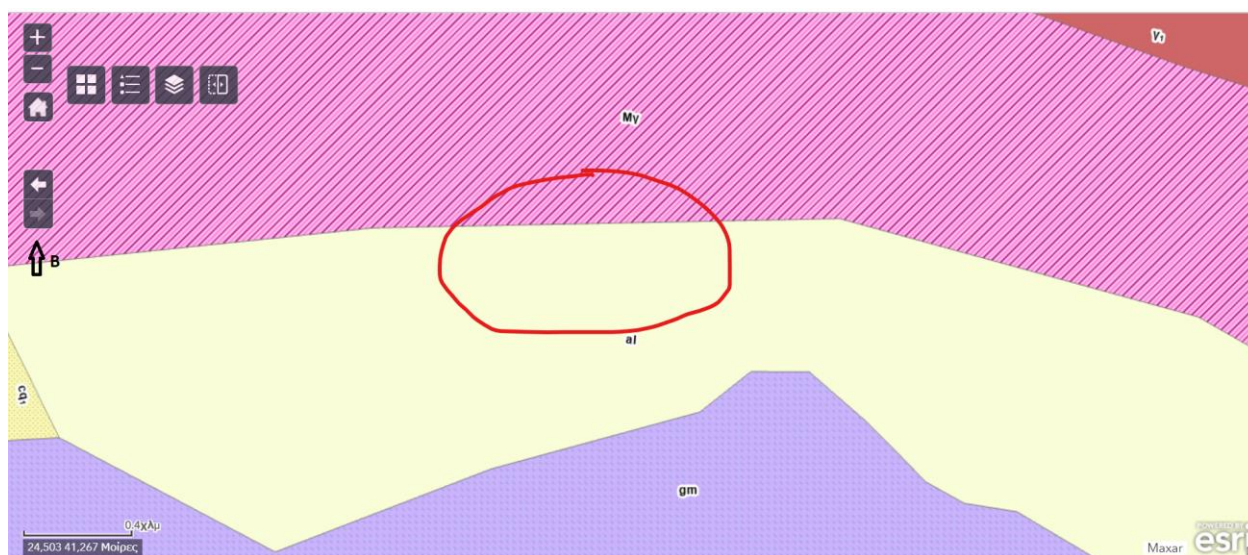
Ο γρανίτης Παρανεστίου είναι μέρος της Μάζας Ροδόπης η οποία βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Ελλάδος Βόρεια της Δράμας βρίσκεται ένας ενιαίος πλουτωνικός όγκος ονόματι BBESP όπου, BB είναι για τον πλουτωνικό όγκο Barutin-Buynovo στη Βουλγαρία, E είναι για τον πλουτωνίτη της Ελατιάς κεντρικόδυτικά της Δράμας, S για τον πλουτωνίτη Σκαλωτής που καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα και P για τον πλουτωνίτη του Παρανεστίου ανατολικά της Δράμας. Στην περιοχή του Παρανεστίου ο μαγματικός όγκος διείσδυσε μέσα σε αμφιβολίτες, διμαρμαρυγιακούς γνεύσιους και μάρμαρα. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως καθόλη την έκταση της διείσδυσης, κυρίως στον πλουτωνίτη Παρανεστίου και στο νότιο τμήμα του πλουτωνίτη Ελατιάς παρατηρούνται πηγματιτικές, απλιτικές και λευκογρανιτικές φλέβες (Soldatos et al. 2008, Μιχαήλοβιτς 2017).

Πετρογραφικά ο γρανίτης Παρανεστίου προσδιορίζεται ως διμαρμαρυγιακός. Ορυκτολογικά ως κύρια ορυκτά περιέχει πλαγιόκλαστα με σύσταση ολιγόκλαστου, ορθόκλαστο, χαλαζία, βιοτίτη και μοσχοβίτη. Εμφανής είναι η ζωνώδης δομή και οι διδυμίες στα ολιγόκλαστα ενώ το ορθόκλαστο παρουσιάζει περθιτικές συμφύσεις. Ένα ακόμη είδος σύμφυσης που εμφανίζεται είναι η μιρμηκιτική. Ο βιοτίτης υπάρχει σε μικρή αναλογία στο πέτρωμα ενώ ο μοσχοβίτης σε ακόμα μικρότερη. Ως επουσιώδη ορυκτά βρέθηκαν χλωρίτης, απατίτης, ασβεστίτης, ζirkόνιο, τιτανίτης και επίδοτο. Από μεταλλικά ορυκτά υπάρχουν ο μαγνητίτης και πολύ μικρή ποσότητα σιδηροπυρίτη.

Στις πηγματιτικές φλέβες έχουν εντοπιστεί τα ουρανιούχα ορυκτά, ουρανινίτης, πισσουρανίτης, ωτουνίτης. Μικροσκοπικά παρατηρείται σιδηροπυρίτης να αντικαθίσταται

από το τον πισσουρανίτη και τον ουρανινίτη. Ακόμη μέσα στον σιδηροπυρίτη εντοπίστηκαν σε ίχνη γαληνίτης και μαγνητοπυρίτης (Μιχαήλοβιτς 2017).

Κατά τους Θεοδόσογλου κ.ά. (2001) η πηγή προέλευσης είναι τήξη υλικού του φλοιού. Με βάση τα γεωχημικά και ισοτοπικά δεδομένα οι τρεις πλουτωνίτες (Σκαλωτής, Ελατιάς, Παρανεστίου) προέρχονται από διαφορετικά μάγματα και όχι από τη διαφοροποίηση ενός αρχικού, δηλαδή δεν είναι συνμαγματικά πετρώματα. Σχετικά με τον υπολογισμό της ηλικίας του συμπλέγματος BBESP υπάρχουν διαφορετικές απόψεις. Ο Σκλαβούνος (1981) με την μέθοδο K-Ar καθόρισε την ηλικία ως Άνω Ηώκαινική-Κάτω Ολιγοκαινική. Ωστόσο νέα δεδομένα οδήγησαν τους Soldatos et al. (2008) να προτείνουν ηλικία $55,93 \pm 0,28$ Ma (Παλαόκαινο-Ηώκαινο) (Σκλαβούνος 1981, Θεοδόσογλου κ.ά. 2001, Soldatos et al. 2008, Μιχαήλοβιτς 2017).

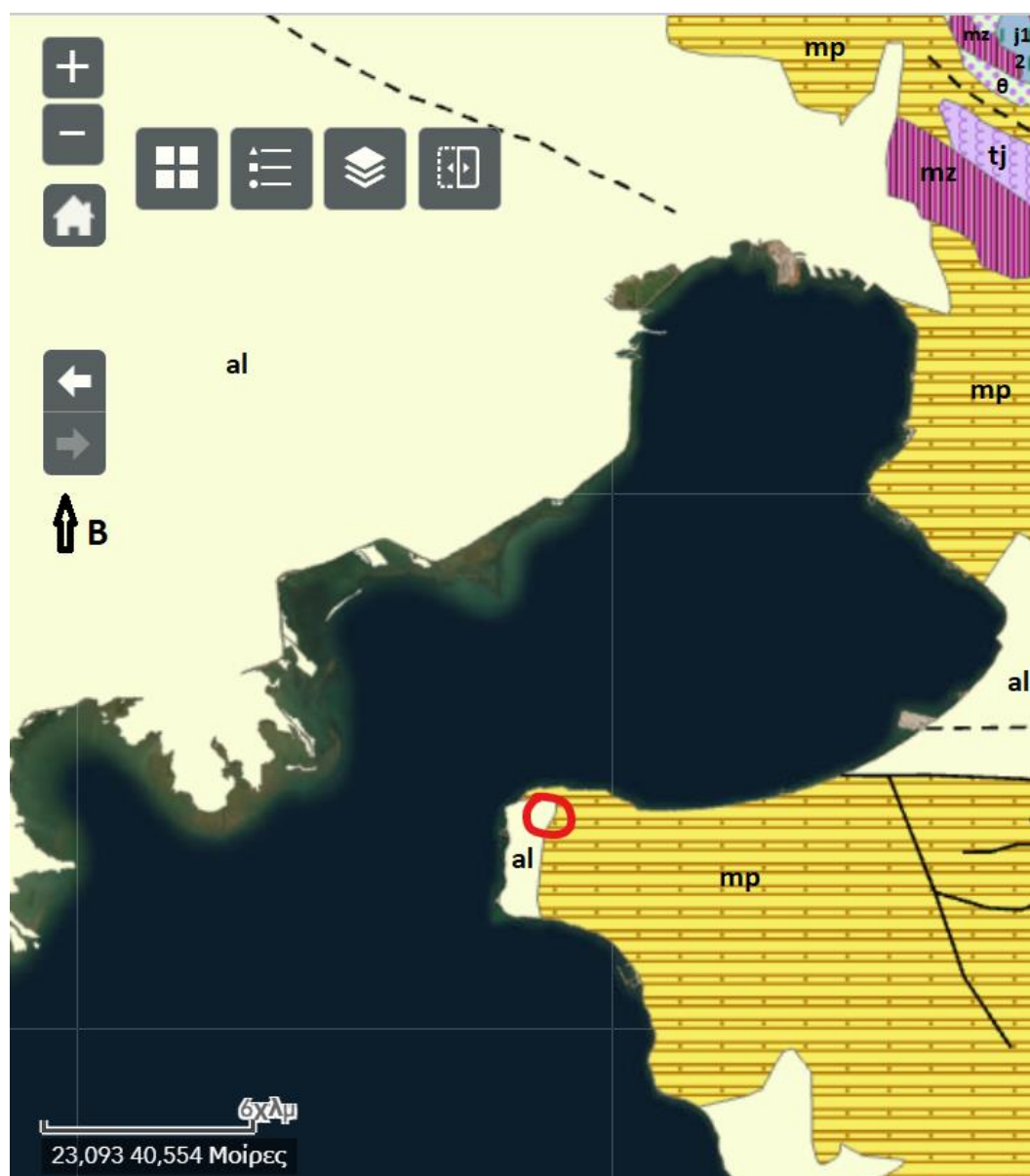


Σχ. 3.2.2. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Παρανεστίου (Κυκλωμένο είναι το χωριό του Παρανεστίου). Όπου **gm**-αμφιβολίτες, γενεύσιοι, σχιστόλιθοι με ενστρώσεις μαρμάρων (Ροδόπη), όπου **al**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα, όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **My**-μιγματίτης όπου **γ1**-γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες Παλαιοζωικοί (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.2.3 Αγγελοχώρι

Νοτιοδυτικά της Θεσσαλονίκης στην παραλία Αγγελοχωρίου έχουν βρεθεί μαύρες άμμοι που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες (Σχ. 3.2.3). Τις άμμους αυτές εξέτασαν οι Papadopoulos et al. (2021). Στα συμπεράσματά τους αναφέρουν ότι τα ποσοστά σπάνιων γαιών στην

συγκεκριμένη τοποθεσία είναι τα χαμηλότερα στην Ελλάδα μεταξύ των προσχηματικών κοιτασμάτων και πως η δυνατότητα οικονομικής αξιοποίησης είναι πολύ περιορισμένη (Papadopoulos et al. 2021).



Σχ. 3.2.3. Γεωλογικός χάρτης Θερμαϊκού κόλπου, κυκλωμένο είναι το χωριό του Αγγελοχωρίου. Όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **mp**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, άμμοι, μάργες, κοκκινοχώματα, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, άργιλοι και ενίοτε λιγνίτες, όπου **mz**-μαγματική σειρά Χορτιάτη. Πρασινοσχιστόλιθοι (χλωριτικοί, σερικιτικοί, κεροστιλβικοί), όπου **tj**-σχιστόλιθοι, ψαμμίτες, μάρμαρα ή χαλαζίτες, φυλλίτες, διαβάσες, ασβεστόλιθοι (σειρά Σβούλας), όπου **θ**-βασικά και υπερβασικά. Γάββροι, σπιλίτες, pillow-lavas, όπου **j1,2**-φυλλίτες, αμμούχες μάργες, κερατόλιθοι. Οι έντονες γραμμές συμβολίζουν κανονικά ρήγματα ενώ οι διακεκομμένες πιθανά κανονικά ρήγματα (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

Όσον αφορά την ορυκτολογική σύσταση τα δείγματα τους περιέχουν κυρίως χαλαζία (22-40 wt%), αστρίους (πλαγιόκλαστο και K-άστριους, 18-30 wt%) και φυλλοπυριτικά ορυκτά (μαρμαρυγίες και χλωρίτη, 13-44 wt%). Ακόμη βρήκαν πυρόξενο (1-4 wt%), αμφίβολο (1-3 wt%), δολομίτη (2-3 wt%) και βαρέα ορυκτά όπως μαγνητίτη (5-9 wt%), ζirkόνιο (2-3 wt%), αιματίτη (2 wt%), ιλμενίτη (2 wt%) ρουτίλιο (4 wt%) και τιτανίτη (2-5 wt%) (Papadopoulos 2021).

Η ύπαρξη ορυκτών πλούσια σε σίδηρο και μαγνήσιο (πυρόξενοι, αμφιβολίτες, χλωρίτες) όπως και τα υψηλά ποσοστά αστρίων (κυρίως πλαγιοκλάστων) υποδεικνύουν ορυκτολογική ανωριμότητα και περιορισμένη επεξεργασία του υλικού διάσπασης στην λεκάνη απόθεσης με αποτέλεσμα μεγάλο απόθεμα στο ποταμιαίο σύστημα της περιοχής δειγματοληψίας σε μικρά χρονικά διαστήματα και γρήγορη μετακίνηση και ιζηματογενείς απόθεση. Το κλίμα του άνω Πλειόκαινο ήταν υποτροπικό με εναλλαγές υγρών και ξηρών περιόδων γεγονός το οποίο δεν ήταν υπέρ των κύριων αλλοιώσεων (Papadopoulos et al. 2021).

Επιπρόσθετα η ύπαρξη απατίτη, βιοτίτη, κεροσιτίλβης, μαγνητίτη και ζirkονίου έντονα δείχνει πως το μητρικό πέτρωμα ήταν πυριγενές. Μετά από σύγκριση των συστάσεων σε REE, μεγάλη ομοιότητα παρουσιάζεται με το γρανίτη του Μονοπήγαδου αποτέλεσμα το οποίο αντιφάσκει τη σειρά ροής των παλαιορευμάτων των χειμάρρων. Η σημερινή εμφάνιση του πλουτωνίτη του Μονοπήγαδου βρίσκεται χαμηλότερα από τα εναποτιθέμενα ποτάμια ιζήματα με βάση την ροή του παλαιού ρεύματος. Είτε μια γρανιτική εμφάνιση όμοια του Μονοπήγαδου υπήρχε ανάντη των ιζημάτων είτε μια πιο πολύπλοκη ροή ρευμάτων υπήρχε στην περιοχή έρευνας (Papadopoulos et al. 2021).

3.2.4 Χαλκιδική

Έρευνες στη Χαλκιδική για σπάνιες γαίες έχουν διεξαχθεί μέχρι στιγμής στις περιοχές Σιθωνία, Στρατόνι, Ιερισσός, Ουρανούπολη. Σημαντικές ποσότητες REE εντοπίστηκαν στη Σιθωνία (Papadopoulos et al. 2019, Vasilatos and Papoutsas 2023).

Οι ακτές της Σιθωνίας έχουν ερευνηθεί από τους Papadopoulos et al., σύμφωνα με τους οποίους, περιέχουν υψηλές περιεκτικότητες σε REE 15-6450 mg/kg, με τις LREE να έχουν συγκεντρώσεις από 660mg/kg έως και 5810 mg/kg ενώ οι HREE να έχουν συγκεντρώσεις από 3,1 mg/kg έως και 9,8 mg/kg. Πέρα από τις σπάνιες γαίες άλλα στοιχεία που βρέθηκαν με οικονομική σημασία και σε σημαντικές ποσότητες είναι το νιόβιο (μέσος όρος 485 mg/kg) και το ταντάλιο (μέσος όρος 39 mg/kg) (Papadopoulos 2019).

Το ορυκτά σπάνιων γαιών που συναντώνται είναι ο μοναζίτης, ο τιτανίτης, το επίδοτο και ο αλλανίτης. Ο μοναζίτης και ο αλλανίτης έχουν καθοριστικό λόγο στις LREE ενώ το ζirkόνιο έχει καθοριστικό λόγο για τις HREE. Το μητρικό πέτρωμα των ακτών είναι ένα πλουτωνικό σύμπλεγμα που διεισδύει το μεταμορφικό σύμπλεγμα της Σιθωνίας. Βαρέα ορυκτά έχουν επίσης βρεθεί στο νοτιοανατολικό κομμάτι της χερσονήσου της Σιθωνίας που συσχετίζονται με κεροστιλβικό-βιοτιτικό γρανοδιορίτη (Papadopoulos et al. 2021).

Οι περιοχές της Ιερισσού του Στρατωνίου και της Ουρανούπολης βρίσκονται στη βορειοανατολική Χαλκιδική και χαρακτηρίζονται από πληθώρα πλουτωνικών πετρωμάτων κοντά στην ακτογραμμή (Σχ.3.2.4). Οι τρεις αυτές περιοχές είναι μέρος της Σερβομακεδονικής μάζας μιας σειράς μεταμορφωμένων πετρωμάτων που υποδιαιρείται στις γεωτεκτονικές ενότητες των άνω Κερδυλλίων και του κάτω Βερτίσκου αποτελούμενη κυρίως από γνεύσιους, αμφιβολίτες και μάρμαρα (Papadopoulos et al. 2019).

Στο Τριτογενές γρανιτοειδή διείσδυσαν στη Σερβομακεδονική μάζα. Τη διείσδυση του γρανοδιορίτη Στρατωνίου (29 Ma) ακολούθησε μια πορφυριτική διείσδυση και συνδέεται με μαγματική υδροθερμική δραστηριότητα και με εμφάνιση διαφόρων σχετικών κοιτασμάτων μεταλλευμάτων. Και οι τρεις περιοχές (Ιερισσός, Ουρανούπολη, Στρατώνι) χαρακτηρίζονται από παράλια προσχωματικά κοιτάσματα χωρίς όμως σημαντικές ποσότητες σπάνιων γαιών (Papadopoulos et al. 2019).



Σχ. 3.2.4. Γεωλογικός χάρτης Χαλκιδικής. Η μαύρη τελεία δείχνει την Ουρανούπολη, η πράσινη την Ιερισσό ενώ η μπλέ το Στρατώνι. Όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **mp**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, άμμοι, μάργες, κοκκινοχώματα, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, άργιλοι και ενίοτε λιγνίτες, όπου **mp1**-θαλάσσιες αποθέσεις: τα παραπάνω κλαστικά ιζήματα και ενίοτε στρώματα γύψου. Συνήθως απουσιάζουν τα κοκκινοχώματα. Περιλαμβάνονται και αποθέσεις υφάλμυρης φάσης, όπου **Mz**-μαγματική σειρά Χορτιάτη.

Πρασινοσχιστόλιθοι (χλωριτικοί, σερικιτικοί, κεροστιλβικοί), όπου **j3**-σειρά ασβεστολίθων, σχιστολίθων, πηλιτών, κερατοφυρών, πορφυροειδών. Επίσης ασβεστόλιθοι, pillow-lavas και ψαμμίτες, όπου **ab**-αμφιβολίτες: Στη Χαλκιδική Παλαιοζωικοί, όπου **γ2**-γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες Μεσοζωικοί όπου **gm**- Σερβομακεδονική μάζα, όπου **θ**- βασικά και υπερβασικά. Γάββροι, σπιλίτες, pillow-lavas, όπου **σ**- σερπεντινίτες, όπου **q2**-πλευρικά κορήματα όπου, όπου **Mγ**-μιγματίτης, όπου **cq1**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα κ.λ.π, όπου **tj1**-ασβεστόλιθοι κρυσταλλικοί Γκόλα - Τσούκα. Ασβεστόλιθοι Ντεβέ - Κοράν (Ιουρασικού). Τριαδικά μάρμαρα (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.2.5 Κιλκίς

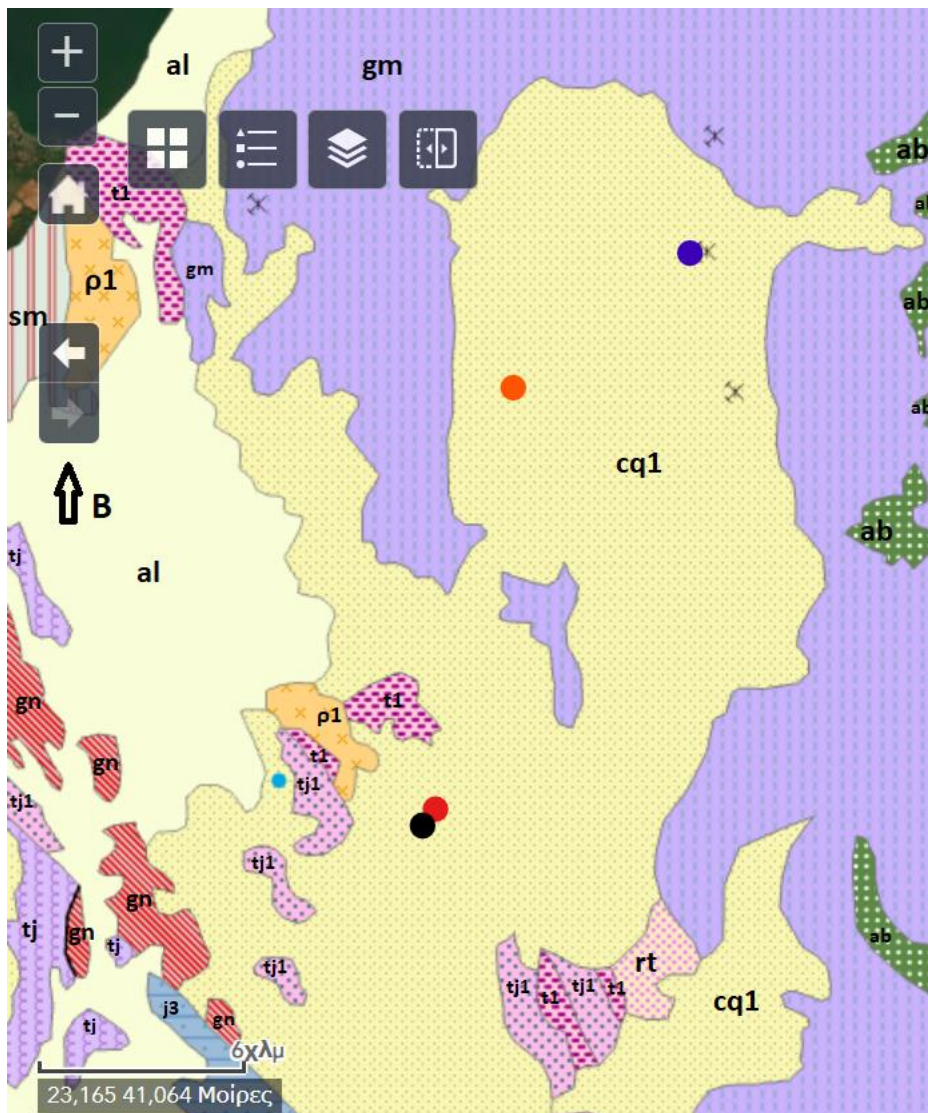
Σε τρεις περιοχές του νομού Κιλκίς ο Στεργίου (2022) αναζήτησε κρίσιμα και σπάνια μέταλλα με τις περιοχές αυτές να είναι το Λαοδικηρό το Γερακαριό και η Βάθη (Stergiou 2022). Στη Βάθη εξέτασε οχτώ δείγματα από τα οποία τρία ήταν από χαλαζιακό μονζονίτη και πέντε από λατερίτη. Τα κύρια ορυκτά σπάνιων γαιών είναι ο μοναζίτης και ο τιτανίτης. REE πιθανώς να εμπεριέχονται και στα ορυκτά αλλοιώσής τους (επίδοτο, άστριοι). Ο σχετικά νέος και μη οξειδωμένος χαλαζιακός μονζονίτης εμπεριέχει τις υψηλότερες περιεκτικότητες σε Ce, Gd, La, Nd και Sm. Οι περιεκτικότητες αυτές (Ce 894 ppm, La 613 ppm, Nd 211 ppm, Sm 23 ppm) σχετίζονται με σερικιτική αλλοίωση και βρίσκονται συγκεντρωμένες κυρίως σε φρεατικά breccia (Stergiou 2022).

Στο Γερακαριό εξετάστηκαν δυο δείγματα από φλέβες χαλαζία-αντιμονίτη. Ο αντιμονίτης περιέχει μικρή ποσότητα REE με τη μέγιστη περιεκτικότητα να είναι 86 ppm λανθάνιου. Η μεταλλοφορία του Γερακαριού σχηματίστηκε από υδροθερμικά ρευστά με χαμηλή έως μέση περιεκτικότητα σε σουλφίδια σε ένα επιθερμικό στάδιο που προκλήθηκε από ρήγμα περιφερειακά του πορφυριτικού συστήματος του Γερακαριού. Η διείδυση συνηνίτη σχετίζεται με την πορφυριτική και επιθερμική μεταλλοφορία στο Γερακαριού ενώ ο γρανοδιορίτης και τα γειτονικά μεταμορφωμένα πετρώματα είναι τα πετρώματα-ξενιστές. Η τοπική τεκτονική ενίσχυσε την κυκλοφορία των υδροθερμικών ρευστών και την ανάμιξή τους με μετεωρικό νερό. Ως αποτέλεσμα στα μεταμορφωμένα πετρώματα δημιουργήθηκε μεταλλοφορία (Stergiou 2022).

Στο Λαοδικηρό εξετάστηκαν οχτώ δείγματα δύο προερχόμενα από πολυμεταλλική χαλαζιακή φλέβα δυο από πλούσιους σε μαγνητίτη φακούς και τέσσερα από υδροθερμικά εξαλλοιωμένα μεταμορφωμένα πετρώματα. Τα δείγματα ήταν γενικά φτωχά σε σπάνιες γαίες με τις μεγαλύτερες περιεκτικότητες να είναι Ce<58 ppm, Gd<6,8 ppm, La<30 ppm Nd<31

ppm, και $Sm < 6,9$ ppm στα δείγματα από τους μαγνητικούς φακούς. Πέντε διαφορετικοί τύποι φλεβικής μεταλλοφορίας έχουν αναφερθεί στο Λαοδικηνό (Stergiou 2022).

Τα πετρώματα υποβάθρου των τριών αυτών περιοχών είναι Παλαιοζωικοί γνεύσιοι και σχιστόλιθοι με εξαίρεση το Γερακαριό που αντί για σχιστόλιθο έχει σερπεντινωμένους περιδοτίτες του Βερτίσκου (Σχ. 3.2.5). Τα πετρώματα της Βάθης αποτελούνται από γρανιτοειδή με πορφυριτικές και χαλαζιακές φλέβες. Τα πετρώματα του Γερακαριού αποτελούνται από γρανοδιορίτες, συηνίτες και διορίτες ενώ τα πετρώματα του Λαοδικηνού αποτελούνται από μεταηφαίστειο-ιζηματογενή, ασβεστόλιθους και άλλα μεταμορφωμένα πετρώματα (Stergiou 2022).



Σχ. 3.2.5. Γεωλογικός χάρτης του νομού Κιλκίς. Η κοκκινή τελεία δείχνει τη πόλη του Κιλκίς, η μαύρη το Λαοδικηνό, η πορτοκαλί το Γερακαριό και η μωβ τη Βάθη. Η μπλε τελεία συμβολίζει κρύα μεταλλική πηγή. Όπου **cq1**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα κ.λ.π, όπου **rt**-χαλαζίτες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, σερικιτικοί σχιστόλιθοι, όπου **t1**-

ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά και χαλαζίτες, όπου **tj**- όπου **tj1**-ασβεστόλιθοι κρυσταλλικοί Γκόλα-Τσούκα. Ασβεστόλιθοι Ντεβέ-Κοράν (Ιουρασικού). Τριαδικά μάρμαρα, όπου **gn**-γενέσιοι γενικώς, όπου **j3**-κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι, όπου **ab**-αμφιβολίτες: Στη Χαλκιδική Παλαιοζωικοί. Στην υπόλοιπη χώρα πιθανώς Μεσοζωικοί, όπου **gm**-Σερβομακεδονική μάζα, όπου **p1**-ρυόλιθοι, ρυοδακίτες, δακίτες, ανδεσίτες, τεχειανδεσίτες, τραχείτες Ηωκαίνου-Ολιγόκαινου, όπου **sm**-σχιστόλιθοι και μάρμαρα ενίοτε με αμφιβολίτες. Η έντονη γραμμή συμβολίζει κανονικό ρήγμα (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γαΐτα).

3.2.6 Φλώρινα

Στο λιγνίτη της περιοχής Αχλάδας της Φλώρινας ο Αναστασίου (2021) μελέτησε γεωχημικά τα κύρια στοιχεία και τα ιχνοστοιχεία. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι δεκατρία από την περιοχή της Αχλάδας και προέρχονται από ήδη θρυμματισμένα δείγματα από τους πυρήνες δέκα γεωτρήσεων (Αναστασίου 2021).

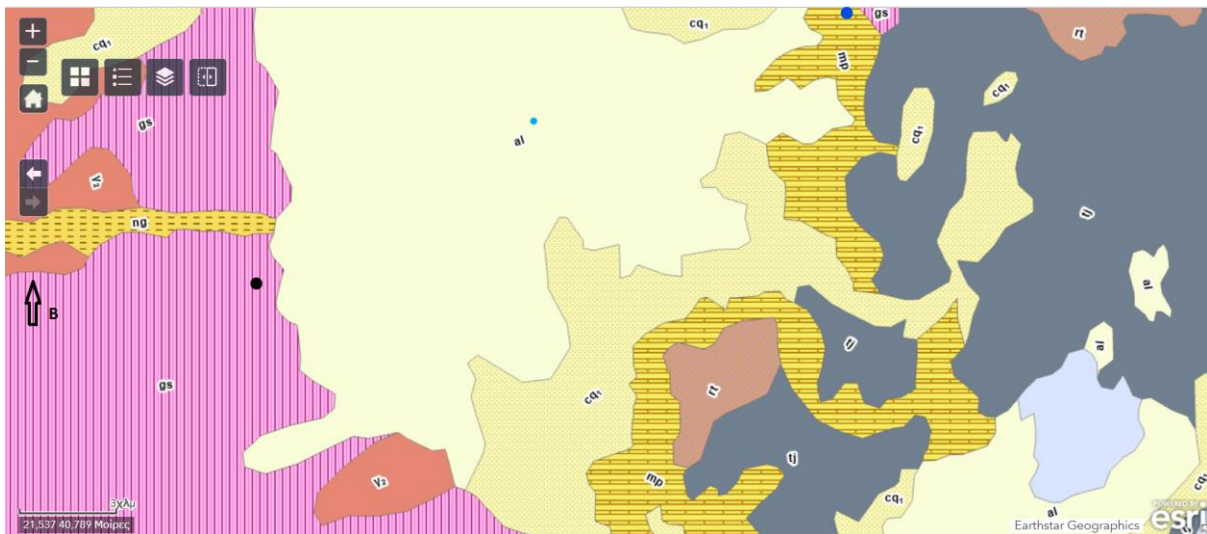
Στα δείγματα βρέθηκαν όλες οι σπάνιες γαίες. Γενικά τα δείγματα τέφρας εμφανίζουν εμπλουτισμό σε LREE ενώ τα δείγματα λιγνίτη εμφανίζουν εμπλουτισμό σε HREE με εξαίρεση κάποια στοιχεία που δεν εμφανίζουν καθόλου εμπλουτισμό. Τα στοιχεία Y, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy και Yb εμφανίζουν μείωση της συγκέντρωσης τους με το βάθος στα λιγνιτικά δείγματα. Τέλος ο Αναστασίου παρατήρησε πως στα δείγματα χαμηλού ποσοστού υγρασίας τα Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb και Lu έχουν την τάση να δημιουργούν οργανική σχέση με το λιγνίτη (Αναστασίου 2021).

Η προέλευση των στοιχείων είναι αλλόχθονη και σχετίζεται με αποσαθρωμένα τμήματα πετρωμάτων της περιοχής (Σχ. 3.2.6). Τα στοιχεία συνδέονται με την πετρολογία της περιοχής μελέτης η οποία είναι πέρα των ιζημάτων, των ασβεστόλιθων και των κροκαλοπαγών, σχιστόλιθοι (μαρμαρυγικοί, γρανιτικοί, χλωριτική και επιδοτιτικοί) και ορθογενέσιοι (μαρμαρυγικοί, οφθαλμογενέσιοι, γενέσιοι με σχιστώδης δομή) καθώς και μεταμορφωμένα βασικά εκρηξιγενή πετρώματα (αμφιβολιτικοί γενέσιοι, μεταγάββροι, πρασινίτες) (Georgakopoulos 2010, Αναστασίου 2021).

Η περιοχή των δειγμάτων βρίσκεται κοντά στο χωριό Αχλάδα στο νομό Φλώρινας. Το χωριό βρίσκεται βορειοδυτικά της πόλης της Φλώρινας. Η περιοχή αποτελεί ένα τμήμα της επιμήκους τεκτονικής τάφρου Κοζάνης-Πτολεμαΐδας-Φλώρινας. Η λεκάνη έχει διεύθυνση BBA-NNΔ παράλληλα με τις Ελληνίδες οροσειρές (Αναστασίου 2021).

Στη λεκάνη της Φλώρινας συναντάται το υπερυψωμένο τμήμα από νεογενή ιζήματα στην περιοχή της Βεύης. Εκεί εμφανίζονται τα λιγνιτικά στρώματα Μειοκαινικής ηλικίας και

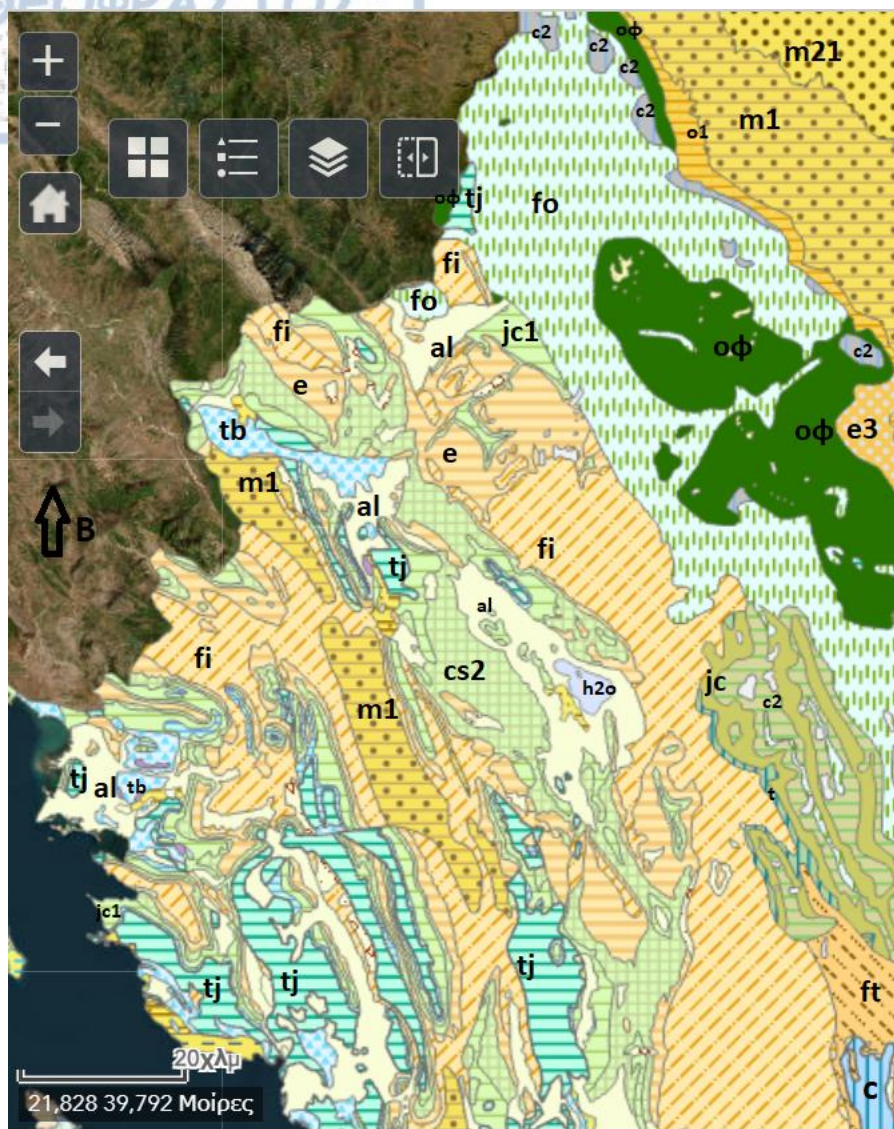
η ενδορρινή κοιλάδα Αχλάδας-Φλώρινας παρουσιάζοντας ιδιαίτερη σημασία στην νεοτεκτονική εξέλιξη της περιοχής (Αναστασίου 2021).



Σχ. 3.2.6. Γεωλογικός χάρτης που απεικονίζει την Φλώρινα (μαύρη τελεία) και την περιοχή της Αχλάδας (μπλε τελεία). Η γαλάζια κουκίδα απεικονίζει κρύα μεταλλική πηγή. Όπου **cq1**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα κ.λ.π, όπου **γ2**-γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες Μεσοζωικοί, όπου **gs**-οφθαλμογενέσιοι, γενέσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες. Στη Πελαγονική, Παλαιοζωικοί-Τριαδικοί, όπου **ng**- λιμναίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάργες, άργιλοι, μερικές φορές με στρώματα λιγνίτη, **mp**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, άμμοι, μάργες, κοκκινοχώματα, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, άργιλοι και ενίοτε λιγνίτες, όπου **rt**-ασβεστόλιθοι, γραουβάκες, σχιστόλιθοι, πρασινίτες, ηφαιστίτες, όπου **tj**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρίτες) και δολομίτες (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.3 Ήπειρος

Οι Tzifas et al. (2014) ερευνώντας τους φωσφορικούς ασβεστόλιθους εμπλουτισμένους σε οργανική ύλη της βορειοδυτικής Ελλάδας για ουράνιο βρήκαν μέσα στους ασβεστόλιθους της Ηπείρου σπάνιες γαίες σε απατίτες και οργανική ύλη (Σχ. 3.3). Οι REE εμφανίζουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα στην οργανική ύλη (195,5 ppm) από ότι στους απατίτες (34,5 ppm) (Tzifas et al. 2014).



Σχ. 3.3 Γεωλογικός χάρτης Ηπείρου. Όπου **m21**-στη Μεσοελληνική Αύλακα (σειρά Τσοτυλίου), μολάσσα: κυρίως κροκαλοπαγή και ψαμμίτες, όπου **m1**-στη Μεσοελληνική Αύλακα (σειρά Πενταλόφου), μολάσσα: κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ερυθρά αργιλοαμμώδη υλικά (Ακουϊτάνιο). Στη Δυτ.Ελλάδα: κυανές μάργες και οργανογενείς ψαμμούχοι ασβεστόλιθοι (Βουρδιγάλιο), όπου **o1**-στη Μεσοελληνική Αύλακα (Σειρά Επταχωρίου), μολάσσα: κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, όπου **οφ**-οφιόλιθοι γενικά, όπου **c2**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρίτες), όπου **fo**-φλύσχης ζώνης Πίνδου, όπου **tj**-ασβεστόλιθοι φάσεως "Παντοκράτορος". Τοπικά στην κορυφή ασβεστόλιθοι φάσεως "Σινιών", όπου **fi**-φλύσχης Ιονίου ζώνης, όπου **jc1**-πλακώδεις ασβεστόλιθοι με πυριτολίθους φάσεως "Βιγλών". Ενίοτε και πυριτικοί σχιστόλιθοι του Βαθωνίου με "Ποσειδώνιες", όπου **e3**- μολάσσα: κροκαλοπαγή, μάργες, ψαμμίτες, όπου **cs2**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιομικρουδίτες), όπου **jc**-ο "πρώτος φλύσχης" καθώς και η σειρά πηλινών και ραδιολαριτών με ψαμμίτες και ενίοτε λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους, όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **e**-ασβεστόλιθοι (βιομικρουδίτες, μικρουδίτες), όπου **t**-πυριτικοί σχιστόλιθοι και ασβεστόλιθοι με "Halobia", καθώς και

ο υποκείμενος φλύσχης κατά τόπους όπου **tb**-τριαδικά λατυποπαγή: υπολείμματα από τη διάλυση γύψου, όπου **h2o**-ύδατα, όπου **c**- ασβεστόλιθοι (κυρίως μικρουδίτες), συχνά με Hippurites (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.4 Στερεά Ελλάδα

3.4.1 Βοιωτία

Αντικείμενο μελέτης για σπάνιες γαίες έχουν γίνει τα βωξιτικά κοιτάσματα στην περιοχή Νησί στη μεταλλευτική περιοχή του Αγίου Ιωάννη σε απόσταση 4km ΔΝΔ του κοιτάσματος του Αγίου Ιωάννη (Σχ.3.4.1) στην περιφερειακή ενότητα Βοιωτίας της Υποπελαγονικής ζώνης (Καλαθά 2017).

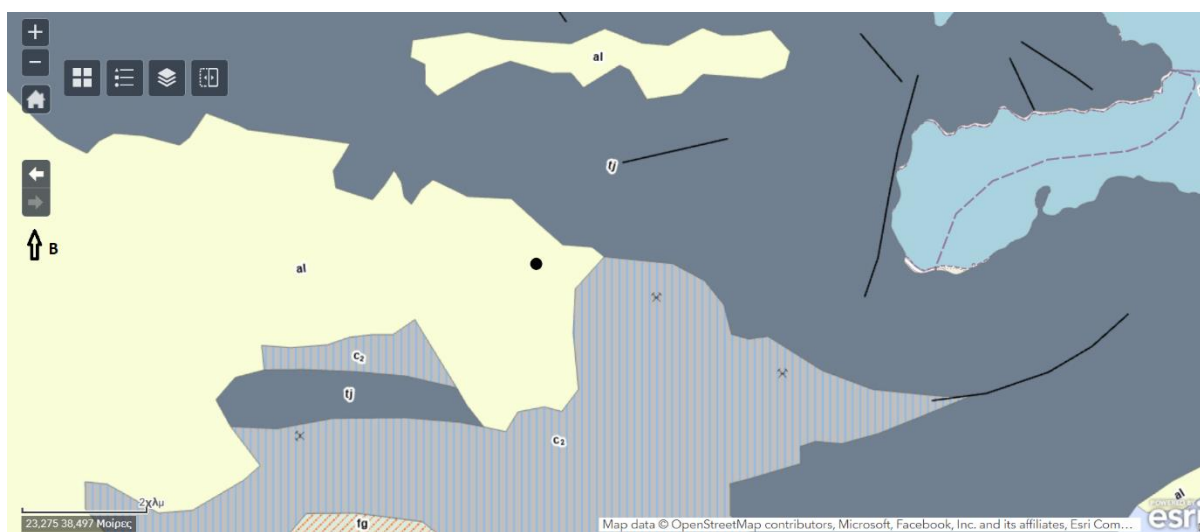
Η Καλαθά (2017) ερευνήσε τέσσερις θέσεις στην περιοχή αυτήν (Νησί I, Νησί II, Νησί III Νησί IV). Στην θέση Νησί I, μετρήθηκαν συγκεντρώσεις ΣREE από 101ppm έως και 164ppm με λόγο ΣLREE/ΣHREE 2,36 έως 3,85 ενώ στη θέση Νησί II μετρήθηκαν συγκεντρώσεις ΣREE 56ppm-144ppm και λόγος ΣLREE/ΣHREE 2,46 έως και 3,46. Συγκριτικά με τις θέσεις αυτές τα δείγματα από τις θέσεις Νησί III και Νησί IV παρουσιάζουν αρκετά υψηλότερες περιεκτικότητες ειδικά με τη θέση Νησί III όπου στο δείγμα Τομή III₂ μετρήθηκαν μέση τιμή REE 5200PPM και σημαντικές περιεκτικότητες La (έως 2370 ppm) και Nd (έως 2010 ppm) και στο δείγμα Τομή III₁ μετρήθηκαν συγκεντρώσεις REE από 166ppm έως 845ppm και λόγος LREE/HREE από 0,82 έως 4,96. Στη θέση Νησί IV στα δείγματα F1 και F2 οι συγκεντρώσεις μετρήθηκαν 503 ppm και 684 ppm και ο λόγος LREE/HREE 2,62 και 2,72 αντίστοιχα (Καλαθά 2017).

Οι Gamaletsos et al. (2019) σε έρευνές τους στα ορυχεία του βωξιτών της ζώνης Παρνασσού -Γκιώνας βρήκαν υψηλές περιεκτικότητες σε LREE από 166 ppm έως και 913 ppm και χαμηλές περιεκτικότητες σε HREE από 45 ppm έως και 179 ppm. Συνολικά ΣREE από 192 ppm έως και 1109ppm. Σημαντική διαφορά παρατήρησαν μεταξύ των Fe-βωξιτών (μέση τιμή REE 569ppm) με των βωξιτών(μέση τιμή REE 268ppm). Τη διαφορά αυτή αποδίδουν στη μεγαλύτερη συμμετοχή REE ορυκτών κυρίως LREE-φθοριοανθρακικά. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τα κατάλοιπα των μεταλλείων και οι ερυθρές άργιλοι (red mud) έχουν σχεδόν διπλάσιες συγκεντρώσεις σε σχέση με τα μητρικά πετρώματα (Tzifas et al. 2019, Gamaletsos et al. 2019).

Τα κοιτάσματα στην περιοχή Νησί συνιστώνται από μια σειρά φακών που μπορεί να εμφανίζονται είτε μεμονωμένα σαν τυπικά Fe-Ni μετάλλευμα (Νησί I, Νησί II) ή βωξιτικούς

λατερίτες (Νησί IV) είτε σαν συνύπαρξη νικελιούχου βωξιτικού λατερίτη στα κατώτερα τμήματα στο κοίτασμα όπως στο κοίτασμα Παρατηρητήρια που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής (Νησί III) (Καλαθά 2017).

Η Ελλάδα είναι η μόνη χώρα με εκτεταμένους χαμηλού βαθμού, νικελιούχους λατερίτες. Οι Ελληνικοί λατερίτες έχουν τη μοναδικότητα ότι είναι ιζηματογενείς και έχουν προκύψει από μεταφορά και ιζηματογένεση ενός φτωχού σε λατερίτη υλικού, προερχόμενου από αποσάθρωση υπερβασικών πετρωμάτων σε καρστικούς Τριαδικούς-Ιουρασικούς ασβεστόλιθους ή σε οφιολίθους (Eliopoulos et al. 2014).



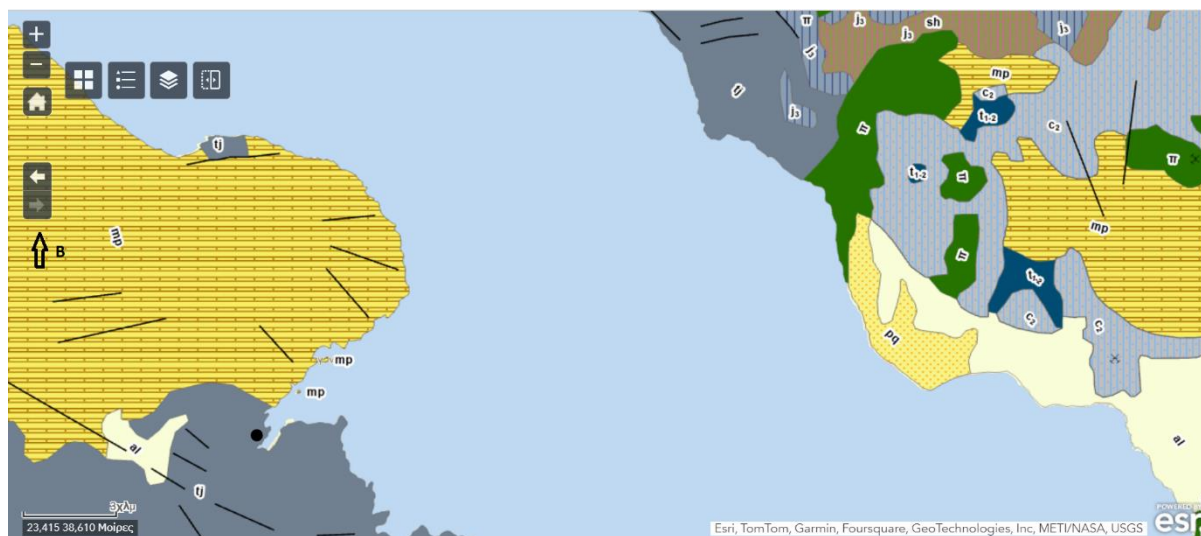
Σχ.3.4.1. Γεωλογικός χάρτης της Βοιωτίας, η μαύρη τελεία δείχνει την μεταλλευτική περιοχή του Αγίου Ιωάννη. Όπου **tj**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρίτες) και δολομίτες, τοπικά της φάσεως "Hallstatt" (Επίδauρος), όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **c2**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρίτες), όπου **fg**-φλύσχης Πελαγονικής ζώνης. Οι έντονες γραμμές συμβολίζουν κανονικά ρήγματα (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.4.2 Λάρυμνα και Εύβοια

Η Λάρυμνα είναι ένας παραθαλάσσιος οικισμός που ανήκει στην περιφερειακή ενότητα Φθιώτιδας (Σχ. 3.4.2). Τους νικελιούχους λατερίτες της Λάρυμνας και της Εύβοιας εξέτασαν γεωχημικά και μικρό-ορυκτολογικά οι Samouhos et al. (2019). Στην έρευνά τους αυτή συμπέραναν πως οι νικελιούχοι λατερίτες της Λάρυμνας έχουν πολύ μεγαλύτερη περιεκτικότητα σπάνιων γαιών και πιθανώς οικονομικά εκμεταλλεύσιμη σε σχέση με το λατερίτη της Εύβοιας (ΣREE 774ppm και 76ppm αντίστοιχα) με τις αργίλους να εμφανίζουν σημαντικό εμπλουτισμό σε σχέση με τα πρωταρχικά κοιτάσματα (ΣREE 1014ppm και 40ppm

αντίστοιχα). Η συγκέντρωση του σκάνδιου συγκεκριμένα έχει παρόμοιες τιμές 64ppm και 42ppm αντίστοιχα (Tzifas et al. 2019, Samouhos et al. 2019).

Στα συμπεράσματα τους αναφέρουν ότι ο Ni-λατερίτης της Λάρυμνας και ο Ni-λατερίτης της Εύβοιας δεν προέρχονται αποκλειστικά από υπερβασικά οφιολιθικά πετρώματα και πως ο εμπλουτισμός σε REE του λατερίτη της Λάρυμνας δείχνουν πως έχει λάβει χώρα ένα φαινόμενο μετα-διαγένεσης/απόθεσης. Είναι πιθανό ο εμπλουτισμός αυτός να προέρχεται από γειτονικά μεταμορφωμένα πετρώματα (Samouhos et al. 2019).



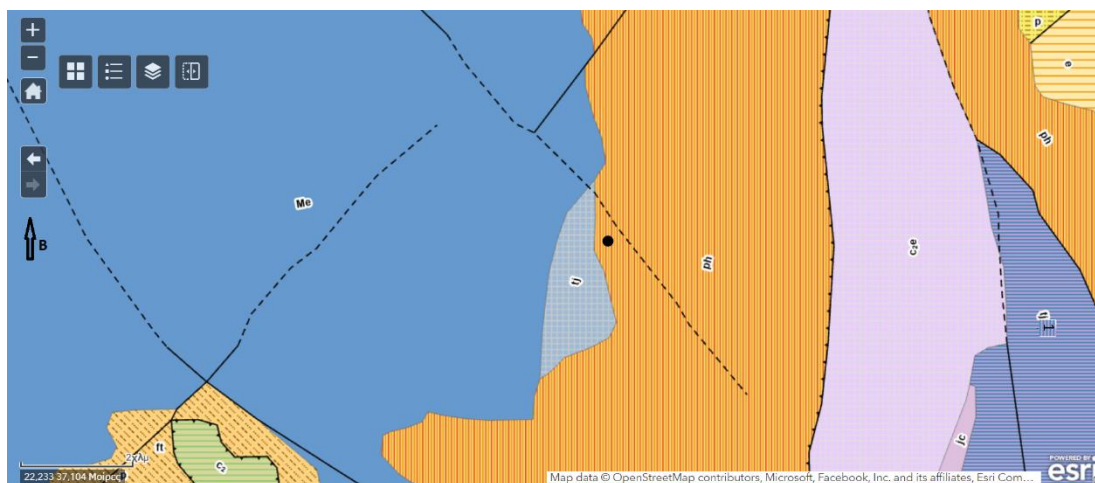
Σχ.3.4.2. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Λάρυμνας(μαύρη τελεία) και Εύβοιας. Όπου **tj**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρίτες) και δολομίτες, τοπικά της φάσεως "Hallstatt" (Επίδαυρος), όπου **mp**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, άμμοι, μάργες, κοκκινοχώματα, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, άργιλοι και ενίοτε λιγνίτες, **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις όπου **pq**-λιμναίες αποθέσεις: άμμοι, κροκαλοπαγή, άργιλοι, στρώματα τύρφης ή λιγνίτη, ενίοτε κοκκινοχώματα. Περιλαμβάνονται και ποταμολιμναίες αποθέσεις, όπου **t1,2**-ασβεστόλιθοι (βιοσπαρίτες) και δολομίτες, όπου **π**-περιδοτίτες, δουνίτες, πυροξενίτες, όπου **j3**-ασβεστόλιθοι (κυρίως σπαρίτες), όπου **sh**-σχιστοκερατολιθική διάπλαση: κερατόλιθοι, ψαμμίτες, πηλίτες με φακούς λευκών ασβεστολίθων και εγκλωβισμένα οφιολιθικά σώματα μεταμορφωμένοι. Οι έντονες γραμμές συμβολίζουν κανονικά ρήγματα (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.5 Πελοπόννησος

Οι Economou et al. (2019) πήραν δείγματα από φυλλίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους νοτιοανατολικά του χωριού Αλαγονία που βρίσκεται στους βορειοδυτικούς πρόποδες του βουνού Ταϋγέτου (Σχ. 3.5). Στα δείγματα από τους φυλλίτες βρέθηκαν από ορυκτά σπάνιων γαιών κυρίως μοναζίτης και σε λιγότερες συγκεντρώσεις αλλανίτης και

απατίτης. Ακόμη βρέθηκαν χαλαζίας, μαγνητίτης, μοσχοβίτης, ασβεστίτης λεπιδολίθος ως Fe-χλωρίτης και αλβίτης ως επιμήκεις υπιδιόμορφοι κρύσταλλοι. Τα δείγματα έχουν μαύρο χρώμα λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε χλωρίτη. Στα δείγματα από τους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους τα ορυκτά σπάνιων γαιών που αναγνωρίστηκαν είναι κύριος αλλανίτης, μοναζίτης και απατίτης. Όπως και με τα δείγματα από φυλλίτες τα άλλα ορυκτά που εντοπίστηκαν είναι χαλαζίας σε επιμήκεις ανακρυσταλλωμένους κρυστάλλους σχετιζόμενους με φύλλα μοσχοβίτη, διάσπαρτο μαγνητίτη, χλωρίτη και αλβίτη σε επίμηκες υπιδιόμορφους κρυστάλλους (Economou et al. 2019).

Η περιοχή έρευνας ανήκει στην ενότητα φυλλιτών-χαλαζιτών και αποτελείται από φυλλίτες και σχιστόλιθους, με μεγάλο εύρος γκρι αποχρώσεων, που κόβουν χαλαζιακές φλέβες. Η λιθολογική αυτή σειρά επηρεάζεται από εφελκυσμό που δείχνει μια διάτμηση με προσανατολισμό Δ/ΝΔ και εμπεριέχει ψευδο-παρεμβολές boudins και ταινίες διάτμησης μπλε σχιστολίθων σε πρασινοσχιστόλιθους (χλωριτοειδη, αλβίτες), μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, μετα-χαλαζίτες, μετασυσσωματώματα με κροκάλες χαλαζία μάρμαρα σερπεντινίτες και MORB μεταφαιστειακά πετρώματα (Economou et al. 2019).



Σχ. 3.5. Γεωλογικός χάρτης περιοχής Αλαγονίας(μαύρη τελεία). Όπου **Me**-ασβεστόλιθοι και δολομίτες μη διαχωριζόμενοι, όπου **ft**-φλύσχης ζώνης Γαβρόβου-Τριπόλεως, όπου **c2e**-πελαγικοί ασβεστόλιθοι (κυρίως βιομικρίτες), όπου **tj**-ασβεστόλιθοι κυρίως δολομιτικοί (βιοσπαρίτες, βιομικρουδίτες) συχνά με "Megalodon", όπου **tj1**-ασβεστόλιθοι φάσεως "Παντοκράτορα", όπου **rh**-φυλλιτική σειρά Πελοποννήσου-Κρήτης όπου **c2e**-σειρά "πλακώδων ασβεστολίθων", όπου **je**-πυριτικοί σχιστόλιθοι με "Ποσειδώνιες", όπου **p**-λιμναίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, άμμοι, άργιλοι, μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και συχνά στρώματα λιγνίτη, όπου **e**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιομικρίτες). Οι έντονες γραμμές συμβολίζουν κανονικά ρήγματα, οι διακεκομμένες πιθανά κανονικά ενώ οι οδοντωτές ανάστροφα επωθητικά ρήγματα (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.6 Κυκλάδες

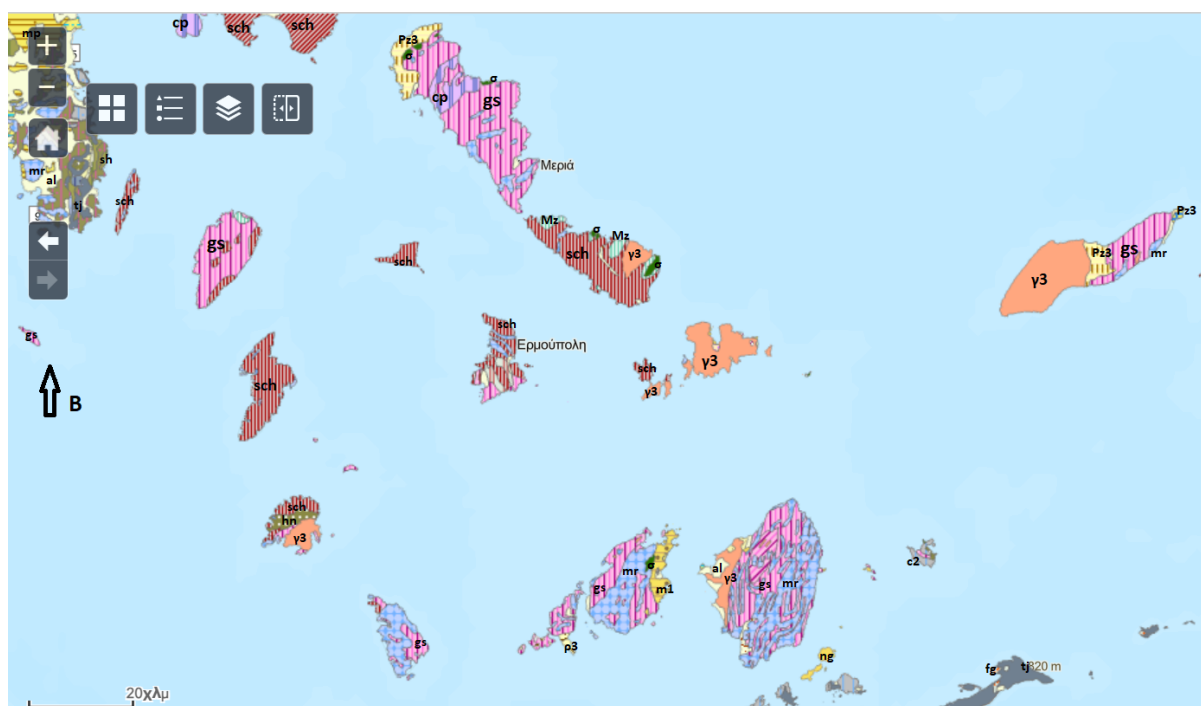
Οι Papadopoulos et al. (2019) συλλέξαν εικοσιοχτώ δείγματα από τα κυκλαδίτικα νησιά Νάξο (τέσσερα δείγματα), Σέριφο (επτά δείγματα), Πάρο (ένα δείγμα), Τήνο (ένα δείγμα), Μύκονο (εννέα δείγματα), και από το νησί του βορειοανατολικού Αιγαίου Ικαρία (έξι δείγματα). Όλα τα δείγματα συλλέχθηκαν σε παραλίες κοντά σε πλουτωνικά πετρώματα της Αττικοκυκλαδικής ζώνης (Σχ. 3.6). Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων έδειξαν πως οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις REE βρίσκονται στην παραλία Πάνορμος της Μυκόνου και στη Νάξο. Η Τήνος και η Σέριφος παρόλο που παρουσιάζουν εμπλουτισμό σε βαρέα ορυκτά οι περιεκτικότητές τους σε REE δεν είναι αυξημένες καθώς αποτελούνται κυρίως από γρανάτη, αμφίβολο και άλλα βαριά ορυκτά με χαμηλές περιεκτικότητες σε REE. Η περιεκτικότητα σε ΣREE που μετρήθηκε σε δείγματα της Μυκόνου βρέθηκε πάνω από 9500 ppm τιμή που είναι η υψηλότερη που έχει μετρηθεί μέχρι στιγμής στα προσχωματικά κοιτάσματα της Ελλάδας. Το συγκεκριμένο δείγμα από ορυκτά σπάνιων γαιών έχει πολύ υψηλή ποσοστά αλλανίτη αλλά και αρκετά μικρότερα ποσοστά μοναζίτη. Ακόμη φέρνει μικρές ποσότητες θορίτη (Papadopoulos et al. 2018).

Περαιτέρω αναλύσεις έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις REE των ακτών ελέγχονται κυρίως από βαρέα μη μαγνητικά ορυκτά όπως το ζirkόνιο, ο τιτανίτης και το ξενότιμο όλα εμπλουτισμένα σε REE. Συμπερασματικά από τα ορυκτά τα οποία αποτελούνται οι ακτές και ειδικότερα τα εμπλουτισμένα βαρέα ορυκτά ο αλλανίτης είναι το πιο σημαντικό ορυκτό REE καθώς περιέχει σημαντικά ποσοστά ΣREE. Ο αλλανίτης είναι υπεύθυνος για το 42% και το 21% των ΣREE δειγμάτων με τις περισσότερες σπάνιες γαίες συνολικά. Το ξενότιμο όπου είναι παρών θα μπορούσε επίσης να ελέγχει τα ποσοστά REE αλλά βρέθηκε σε πολύ μικρές ποσότητες μόνο σε ένα δείγμα (Papadopoulos et al. 2018).

Τα βαρέα ορυκτά των μελετηθέντων ακτών είναι αποτέλεσμα φυσικής διάβρωσης των γειτονικών πετρωμάτων τα οποία είναι κυρίως πλουτωνικά με εξαίρεση τη Νάξο που φαίνεται να έχει μια μεικτή προέλευση (πλουτωνικά και μεταμορφωμένα πετρώματα). Στα νησιά της Αττικοκυκλαδικής ζώνης πολυάριθμοι πλουτωνίτες διαφόρων συνθέσεων διεισδύουν τα μεταμορφωμένα πετρώματα βάσης της ζώνης. Ο πλουτωνίτης της Πάρου βρίσκεται ΒΔ του νησιού και αποτελείται από μεσόκοκκο διμαρμαρυγικό γρανίτη S-τύπου. Η Νάξος έχει δυο πλουτωνίτες έναν στο δυτικό και έναν στο βόρειο κεντρικό μέρος του νησιού. Ο δυτικός είναι ένας βιοτιτικός γρανοδιορίτης I-τύπου διείσδυσης Μειοκαινικής ηλικίας. Ο βόρειο κεντρικός είναι ένας S-τύπου διείσδυσης διμαρμαρυγικός γρανίτης επίσης Μειοκαινικής ηλικίας.

Ο πλουτωνίτης της Μυκόνου καλύπτει το περισσότερο μέρος του νησιού και είναι ένας βιοτιτικός γρανοδιορίτης Ι-τύπου που διείσδυσε το Μειόκαινο. Ακόμη στο νησί εμφανίζονται φλέβες υδροθερμικής δραστηριότητας με τη μορφή βαρύτη και υδροξείδιο-Fe. Ο γρανιτικός πλουτωνίτης της Τήνου βρίσκεται στο νοτιοανατολικό μέρος του νησιού διεισδύοντας οφειόλιθους, γενέσιους, σχιστόλιθους και μάρμαρα υποβάθρου. Το κύριο πέτρωμα είναι ένας βιοτιτικός γρανοδιορίτης ενώ υπάρχει και ένα λευκογρανίτης στο κεντρικό μέρος του νησιού. Το πρώτο θεωρείται Ι-τύπου διείσδυση ενώ το δεύτερο S. Η ηλικία του πλουτωνίτη προσδιορίζεται στο Μειόκαινο. Αναφέρεται ακόμα ύπαρξη μεταμόρφωσης επαφής και skarn στα βορειοδυτικά και τα νοτιοδυτικά μέρη του πλουτωνίτη (Papadopoulos et al. 2018).

Ο πλουτωνίτης της Σερύφου απαντάται στο νοτιοανατολικό μέρος του νησιού. Το κύριο πέτρωμα αναγνωρίστηκε ως κεροστιλβικός-βιοτιτικός γρανοδιορίτης Μειοκαινικής ηλικίας Ι-τύπου. Ακόμα αναγνωρίζεται λευκογρανίτης S-τύπου και μεταμόρφωση επαφής υψηλής θερμοκρασίας με υδροθερμική κρυστάλλωση σχετιζόμενα με την πλουτωνική διείσδυση. Στην Ικαρία βρίσκονται δυο πλουτωνίτες Μειοκαινικής ηλικίας. Ο ένας θεωρείται Ι-τύπου και καλύπτει το δυτικό μέρος του νησιού ενώ ο άλλος θεωρείται μικρότερος S-τύπου και απαντάται στο νοτιοανατολικό μέρος του νησιού. Ο κύριος τύπος του πετρώματος της Ι-τύπου διείσδυσης είναι βιοτιτικός γρανίτης ενώ της S-τύπου διείσδυσης ένας μεσόκοκκος διμαρμαρυγιακός γρανίτης (Papadopoulos et al. 2018).



Σχ.3.6. Γεωλογικός χάρτης Κυκλάδων. Όπου **mp**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: κροκαλοπαγή, άμμοι, μάργες, κοκκινοχώματα, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, άργιλοι. Ενίοτε λιγνίτες, όπου **mr**-μάρμαρα

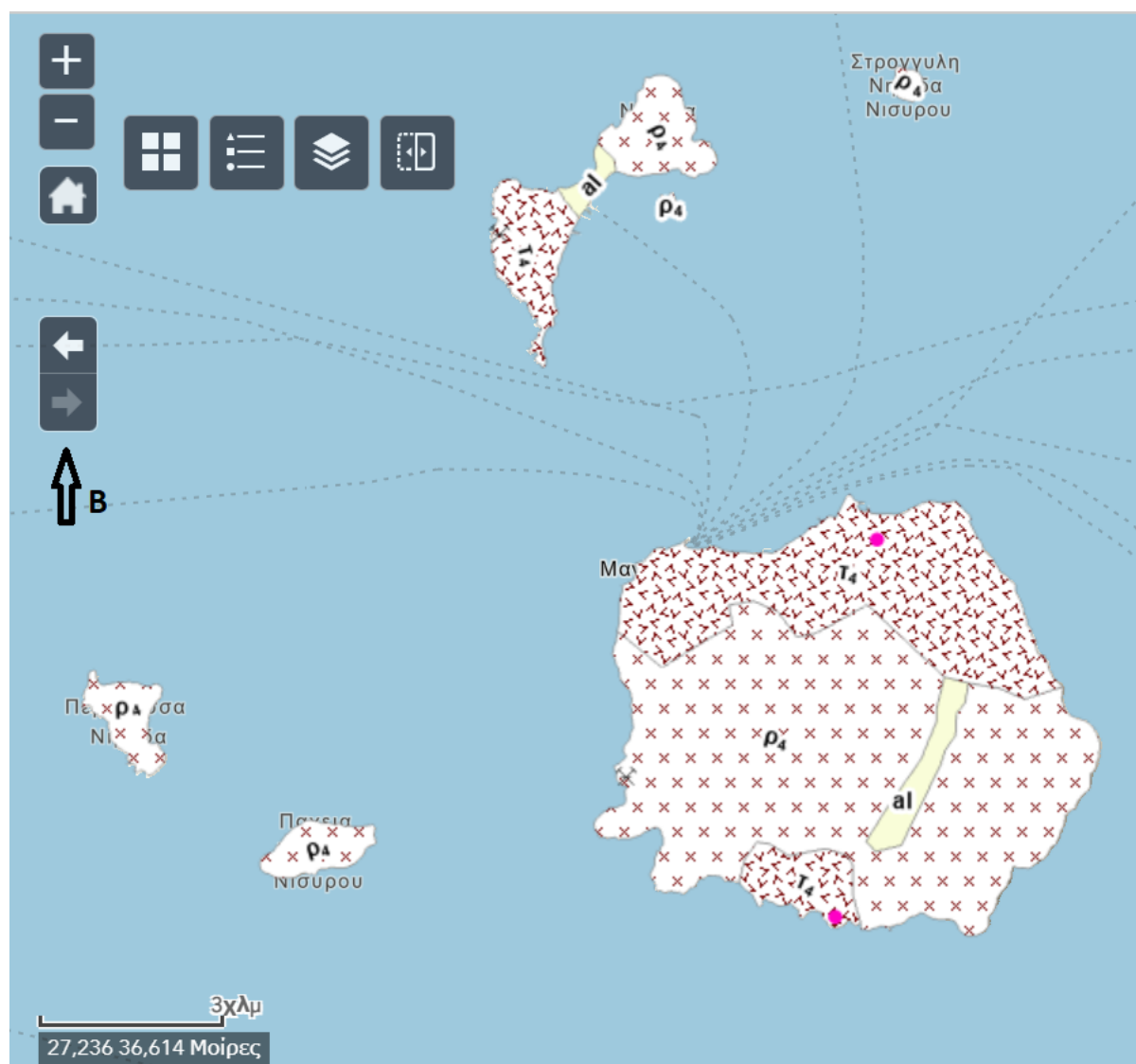
ή κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **tj**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρίτες) και δολομίτες, τοπικά της φάσεως "Hallstatt" (Επίδauρος) μεταμορφωμένοι σε μάρμαρα, όπου **sh**-σχιστοκερατολιθική διάπλαση: κερατόλιθοι, ψαμμίτες, πηλίτες με φακούς λευκών ασβεστολίθων και εγκλωβισμένα οφιολιθικά σώματα μεταμορφωμένοι, όπου **sch**-γλαυκοφανιτικοί σχιστόλιθοι, συχνά με ενστρώσεις μαρμάρων, όπου **cp**-σιπολίτες, ενίοτε με σχιστόλιθους (Εύβοια), όπου **Pz3**-πρασινοςχιστόλιθοι, σχιστόλιθοι, φυλλίτες, γραουβάκες με κροκαλοπαγή και ενστρώσεις ασβεστολίθων ή δολομιτών, όπου **σ**-σερπεντινίτες, όπου **gs**-οφθαλμογενέσιοι, γενέσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες. Στη Πελαγονική, Παλαιοζωικοί–Τριαδικοί, όπου **Mz**-πρασινοςχιστόλιθοι, όπου **γ3**-γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες τριτογενείς, όπου **hn**-κερατίτης Σερίφου και Πλάκας, όπου **ng**-λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις: ιζήματα κλαστικά όπως τα παραπάνω (κυρίως μολάσσα), όπου **p3**-ρυόλιθοι, ρυοδακίτες, δακίτες, ανδεσίτες, τεχειανδεσίτες, τραχείτες Πλειο-Πλειστόκαινου, όπου **m1**-στη Μεσοελληνική Αύλακα (σειρά Πενταλόφου), μολάσσα: κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ερυθρά αργιλοαμμώδη υλικά (Ακουϊτάνιο), όπου **c2**-ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρίτες), όπου **fg**-φλύσχης Πελαγονικής ζώνης (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.7 Δωδεκάνησα

Οι Tzifas et al. (2017) συγκέντρωσαν δείγματα από το νησί Νίσυρο των Δωδεκανήσων προς μελέτη (Σχ. 3.7). Από τις βόρειες ακτές του νησιού συγκέντρωσαν δυο ειδών δείγματα ένα από τις αποσαθρωμένες ηφαιστειακές άμμους και ένα πιο αργιλικό από τα πρόσφατα αποθέματα του κύριου υδροθερμικού κρατήρα από την καλδέρα του νησιού. Τα δείγματα έδειξαν έναν υποτυπώδη εμπλουτισμό σε LREE (ΣLREE=190mg/kg) από ότι HREE (ΣHREE=20mg/kg) αλλά η συνολική συγκέντρωση σε σπάνιες γαίες είναι πολύ χαμηλή(ΣREE=240mg/kg) Τα υπόλοιπα ορυκτά που αναγνωρίστηκαν στα δείγματα αποσάθρωσης είναι πυρόξενοι (όρθο- και κλίνο-), ιλμενίτες, Fe-Mn-οξείδια, Fe-σπινέλιοι (μαγνήτες), κεροστίλβη, πλαγιόκλαστα, τουρμαλίνης και ζirkόνια. Οι κρύσταλλοι τουρμαλίνη εμφανίζονται ως επιμήκεις τριγωνικά πρίσματα. Επίσης βρέθηκαν πυρίτης και βαρίτης. Από την άλλη τα αργιλικά δείγματα αποτελούνται κυρίως από αλουνίτη, άνυδρο οπάλιο και χαλαζία. Το υλικό εμπεριέχει θείο. Ακόμη βρέθηκαν ευδιάκριτοι μικροκρύσταλλοι βαρύτη με χαρακτηριστική πλατύ μορφολογία. Τέλος περεταίρω έρευνα έδειξε σημαντικά πόσα καολινίτη. Επιπρόσθετα βρέθηκαν εγκλείσματα ζirkονίου και απατίτες σε πολλούς κρυστάλλους (Tzifas et al. 2017).

Οι άμμοι βαρέων ορυκτών του ηφαιστείου της Νισύρου είναι από υλικό αποσάθρωσης προερχόμενο από τα Τεταρτογενή όξινα ηφαιστειακά πετρώματα, λάβες, πυροκλαστικά

στρώματα και δόμους. Τα πετρώματα της Νισύρου ανήκουν στην ασβεσταλκαλική σειρά και η σύστασή τους έχει εύρος από βασαλτικούς ανδεσίτες σε ρυόλιθους και φέρνουν σημαντικές ορυκτολογικές ομοιότητες με αλλά ηφαιστειακά κέντρα του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου. Η Νίσυρος είναι μέρος του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου που είναι σχετικά νέο (5Ma) και δημιουργήθηκε από την προ αλπική τεταρτογενή βύθιση της ελληνικής πλάκας (Tzifas et al. 2017).

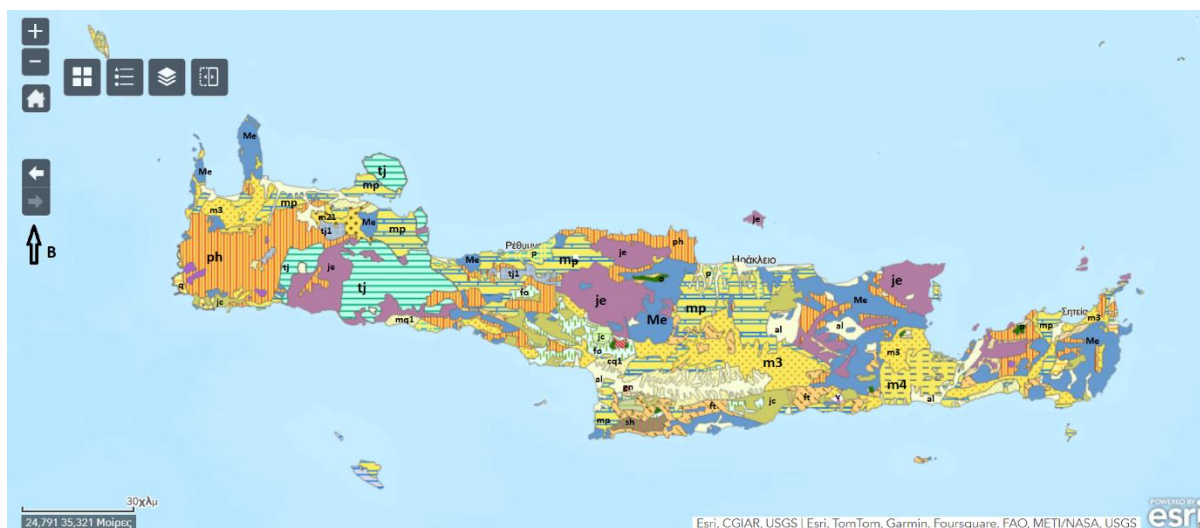


Σχ.3.7. Γεωλογικός χάρτης Νισύρου. Η ροζ κουκίδα συμβολίζει ζεστή μεταλλική πηγή. Όπου **ρ4**-ρυόλιθοι, ρυοδακίτες, δακίτες, ανδεσίτες, τραχειανδεσίτες, τραχείτες Τεταρτογενούς, όπου **τ4**-πυροκλαστικά: τόφοι, ιγκνιμβρίτες Τεταρτογενούς όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

3.8 Κρήτη

Οι Stathogianni et al. (2016) ερευνήσαν τα μεταμορφωμένα πετρώματα της ομάδας των πλακωδών ασβεστολίθων των Ταλαίων όρων της κεντρικής Κρήτης για σπάνιες γαίες (Σχ. 3.8). Για την έρευνα αυτή πέντε δείγματα συλλέχθηκαν, δυο από μεταψαμμίτες και τρία από σχιστόλιθους (ασβεστο-σχιστόλιθους, κίτρινους και λευκούς σχιστόλιθους). Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων έδειξαν μικρές συγκεντρώσεις La (από 6,87 ppm έως 61,04 ppm) και Ce (από 13,48 ppm έως 106,68 ppm) με τις μεγαλύτερες τιμές να βρίσκονται σε δείγμα από κίτρινο σχιστόλιθο. Στην έρευνα τους κρύσταλλοι αλλανίτη και μικροκρύσταλλοι αλλανίτη μέσα σε αλβίτη ήταν το ορυκτό που μελετήθηκε (Stathogianni et al. 2016).

Όπως προαναφέρθηκε η περιοχή μελέτης ανήκει στην ομάδα πλακωδών ασβεστολίθων του Περμίου-Ολιγόκαινου που αντιπροσωπεύει μετάβαση από πολύ ρηχή σε βαθιά Πελαγονική ιζηματογένεση (Stathogianni et al. 2016).



Σχ.3.8. Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης. Όπου **Me**-ασβεστόλιθοι και δολομίτες μη διαχωριζόμενοι, όπου **m3**-λιμναίες αποθέσεις: τα προηγούμενα κλαστικά ιζήματα (μάργες, ψαμμίτες κ.α.), τοπικά με στρώματα λιγνιτών, όπου **m4**-θαλάσσιες αποθέσεις: κυρίως μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, άργιλοι και γύψοι, όπου **mp**-θαλάσσιες αποθέσεις: τα παραπάνω κλαστικά ιζήματα και ενίοτε στρώματα γύψου. Συνήθως απουσιάζουν τα κοκκινοχώματα. Περιλαμβάνονται και αποθέσεις υφάλμυρης φάσης, όπου **ph**-φυλλιτική σειρά Πελοποννήσου-Κρήτης, όπου **tj**-ασβεστόλιθοι φάσεως "Παντοκράτορας". Τοπικά στην κορυφή ασβεστόλιθοι φάσεως "Σινιών". Ασβεστόλιθοι ενότητας "Τρυπαλίου" Κρήτης, όπου **je**-όλη η σειρά των "πλακωδών ασβεστολίθων" μη διαχωριζόμενων, όπου **q**-θαλάσσιοι ή χερσαίοι σχηματισμοί μη διαχωριζόμενοι, όπου **jc**-ο "πρώτος φλύσχης"(ζώνη Πίνδου) καθώς και η σειρά πηλινών και ραδιολαριτών με ψαμμίτες και ενίοτε λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους. Στη Κρήτη και ασβεστόλιθοι Ανώτ. Κρητιδικού καθώς και το κάλυμμα Άρβης, όπου **m21**-στη Μεσοελληνική Αύλακα (σειρά Τσοτυλίου), μολάσσα: κυρίως κροκαλοπαγή και ψαμμίτες. Στην Κρήτη: αδρομερή λατυποπαγή

και κοκκινοχώματα, όπου **tj1**-ασβεστόλιθοι κυρίως δολομιτικοί (βιοσπαρίτες, βιομικρουδίτες) συχνά με "Megalodon", όπου **mql**-θαλάσσιες αποθέσεις: μάργες, άργιλοι, άμμοι κροκαλοπαγή, παράκτιες αναβαθμίδες και "πώρος" Κυκλάδων, όπου **fo**-φλύσχης ζώνης Πίνδου, όπου **p**-θαλάσσιες αποθέσεις: τα προηγούμενα κλαστικά ιζήματα (κροκαλοπαγή, άμμοι, άργιλοι κ.α.), ενίοτε και στρώματα γύψου. Περιλαμβάνονται και αποθέσεις υφάλμυρης φάσεως, όπου **cql**-λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα κ.λ.π, όπου **al**-σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις, όπου **o**-οφιόλιθοι γενικά, όπου **gn**-γενεύσιοι γενικώς, όπου **sh**-σχιστοκερατολιθική διάπλαση: κερατόλιθοι, ψαμμίτες, πηλίτες με φακούς λευκών ασβεστολίθων και εγκλωβισμένα οφιολιθικά σώματα μεταμορφωμένοι όπου **ft**-φλύσχης ζώνης Γαβρόβου-Τριπόλεως (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, τροποποιημένο από Γάϊτα).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Το να οριστεί μια τιμή, είτε σε ppm είτε σε mg/kg συγκέντρωσης REE κατά την οποία θα θεωρείται ως οικονομικά εκμεταλλεύσιμο ένα κοίτασμα είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία. Από την μια πλευρά, οι παράγοντες είναι πολλοί και περιπλέκουν καθώς το υλικό περνάει πολλές φάσεις επεξεργασίας στην μετάβαση του από πέτρωμα σε εμπορικό προϊόν, από την άλλη τα δεδομένα και οι τεχνολογίες δεν είναι σταθερά, αλλά συνεχώς αλλάζουν. Με τα σημερινά δεδομένα η Ελλάδα παρόλο που έχει πολλές περιοχές εμφάνισής καμία από αυτές δεν αποτελεί οικονομικά εκμεταλλεύσιμο κοίτασμα. Μελλοντικά όμως, υπό νέα δεδομένα ή νέες μεθόδους επεξεργασίας η Ελλάδα έχει προοπτικές για εκμετάλλευση σπάνιων γαιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- American geoscience institute, (2024). Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral. commodity group rare earths-scandium, yttrium, and the lanthanides.
- Dushyantha, N., Batapola I. M. S. K Ilankoon, Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B.,... & Dissanayake, K (2020). The story of rare earth elements (REEs): occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global. production. Ore Geology Reviews, 103521.
- Economou G., Tsagas D., Photiades A (2019). Rare-Earth Minerals within Phyllite-Quartzite Series of SE Alagonia Area (Peloponnese)
- Eliopoulos D., Economou G., Tzifas I., Papatrechis C (2014). The potential of rare earth elements in Greece. 15th International. Congress of the Geological Society of Greece, Athens, 22-24 May, 2019
- ENTR, D (2014). Report on critical raw materials for the EU. European Commission. EU Commission (2011). Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials. Brussels: European Commission.
- Fitros M., Tombros F.S., Kiliass P.S., Perraki M., Skliros V., Simos X.S., Papaspyropoulos K., Avgouropoulos G., Williams-Jones A.E., Zhai D., Htzipanagiotou K (2020). Elsevier, Lithos 370-371.
- Frances W (2021). Encyclopedia of Geology (Second Edition).
- Gamaletsos, P. N., Godelitsas, A., Filippidis, A., Pontikes, Y., 2019. The Rare Earth Elements Potential of Greek Bauxite Active Mines in the Light of a Sustainable REE Demand. Journal of Sustainable Metallurgy, 5, 20-47
- Henderson, P (1984). Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam.
- Hoatson, D.M., Jaireth, S. and Mieizitis, Y., 2011. The major rare-earth-element deposits of Australia: geological setting, exploration, and resources. Geoscience Australia, 204pp.
- International Union of Pure and Applied Chemistry, 2005. Nomenclature of inorganic chemistry: IUPAC recommendations 2005 (Prepared for publication by: Connelly, N.G., Damhus, T., Hartshorn R.M. and Hutton A.T.). The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 366 p.
- Kanazawa, Y., Kamitani, M (2006). Rare earth minerals and resources in the world. Journal. of alloys and compounds, 408, 1339-1343
- Lumpkin G.R and Geisler-Wierwille (2012). Comprehensive Nuclear materials.

- Melfos, V., Voudouris, P., Melfou M., Sánchez M.G., Papadopoulou L., Filippidis A., Spry P.G., Schaarschmidt A., Klemm R., Haase K.M., Tarantola A., Mavrogenatos C. (2020). Mineralogical Constraints on the Potassic and Sodic-Calcic Hydrothermal Alteration and Vein-Type Mineralization of the Maronia Porphyry Cu-Mo ± Re ± Au Deposit in NE Greece. *Minerals*, 10, 182, 26 p.
- Papadopoulos A (2018). Geochemistry and REE content of beach sands along the Atticocycladic coastal zone, Greece. *Geosciences Journal*, 22, 6, 955-973
- Papadopoulos A., Tzifas T.I., Tsikos H (2019). The potential for REE and associated critical metals in coastal sand (placers) deposits of Greece: A review. *Minerals*, 9, 469
- Papadopoulos A., Lazaridis S, Kipourou-Panagiotou A, Kantiranis N, Koroneos A., Almpnakis K (2021). Mineralogy, Geochemistry and Provenance of Coastal. Sands from Greece: New Insights on the REE Content of Black Coastal. Sands from Aggelochori Area, N.-Greece, *Minerals*, 693.
- Peristeridou E., Melfos V., Papadopoulou L., Kantiranis N., Voudouris P. (2022). Mineralogy and mineral chemistry of the REE-rich black sands in beaches of the Kavala district, Northern Greece. *Geosciences*, 12, 277, 21 p.
- Rare Earth Elements (2011) Ανακτήθηκε από www.mineralsUK.com
- Samouhos, M., Godelitsas, A., Nomikou, Chr., Taxiarchou, M., Tsakiridis, P., Zavašnik, J., Gamaletsos, P.N., Apostolikas, Th., 2018. New insights into nanomineralogy and geochemistry of Ni-laterite ores from Central. Greece (Larymna and Evia deposits). *Chemie der Erde – Geochemistry*, 2019 – In press.
- Soldatos, T., Koroneos, A., Kamenov, B. K., Peytcheva, I., von Quadt, A., Christofides, G., Sang, H (2008). New U-Pb and Ar-Ar mineral ages for the BarutinBuynovo-Elatia-Skaloti-Paranesti batholith (Bulgaria and Greece): refinement of its debatable age. *Geochem Mineral Petrol*, 46, 85-102
- Stergiou C.L., (2022). Critical and rare metals in tertiary magmatic-hydrothermal. deposits at the Serbo-Macedonian metallogenic provenance in Greece (Vathi, Gerakario, Laodikino, Kolchiko, Aspra Xomata). Dissertation thesis.
- Tzifas I.T, Misaelides P., Godelitsas A., Gamaletsos P.N., Nomikou P., Karydas A.G., Kantareloud V., Papadopoulos A (2017). Geochemistry of coastal sands of Eastern Mediterranean: The case of Nisyros volcanic materials, Elsevier, *Chemie der Erde*, 77, 487-501

- Tzifas I.T., Gamaletsos P.N., Godelitsas A., Kantiranis N., Misaelides P., Filippidis A (2019) Actinides and Rare Earth Elements (REE) in Sedimentary Formations of Greece: A Review. 15th International Congress of the Geological Society of Greece Athens, 22-24 May 2019.
- Tzifas I.T., Papadopoulos A., Misaelidis P., Godelitsas A., Gottlicher J., Tsikos H., Gamaletsos P.N., Luvizotto G., Karydas A.G., Petrelli M., Noli F., Kantarelou V., Kontofakas A., Hatzidimitriou A (2019) New insights into mineralogy and geochemistry of allanite-bearing Mediterranean coastal sands from Northern Greece. Elsevier, Geochemistry, 247-267.
- Tzifas I.Tr., Godelitsas A., Magganas A., Androulakaki E., Eleftheriou G., Mertzimekis T.J, Perraki M (2014). Uranium-bearing phosphatized limestones of NW Greece, Elsevier, Journal. of Geochemical Exploration, 143, 62-73
- Vasilatos C. and Papoutsas A (2023). The REE-Zr-U-Th Minerals of the Maronia Monzodiorite, N. Greece: Implications on the Saturation and Segregation Mechanisms of Critical Metals in Intermediate–Mafic Compositions. Minerals, 13, 1256
- Αναστασίου Ι.Κ., (2021). Γεωχημική ανάλυση του λιγνίτη της Αχλάδας, Φλώρινα. Κατανομή κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων, εμπλουτισμός και κινητικότητα αυτών. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.
- Θεοδόσογλου Ε., Κορωναίος Α., Σολδάτος Τ., Σκλαβούνος Σ., (2001). Γεωχημεία και πετρογένεση του γρανίτη του Παρανεστίου (Κεντρική Ροδόπη). 2^ο συνέδριο της επιτροπής Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας και Γεωχημείας, 84-94.
- Θεοδώρου Χ (2020). Προφίλ των σπάνιων γαιών ως δείκτης προέλευσης των ελληνικών τυριών Γραβιέρας. Μεταπτυχιακή εργασία.
- Καλαθά Σ.Π.(2017). Μεταλλογενετικές διεργασίες που συνδέονται με τον σχηματισμό βωξιτικών λατεριτών και Ni-λατεριτών εμπλουτισμός σπάνιων γαιών. Διδακτορική διατριβή.
- Λυμπεροπούλου Θ (1996). Προσδιορισμός και ανάπτυξη σπάνιων γαιών από βωξίτες και ερυθρά ιλύ. Διδακτορική διατριβή.
- Μέλφος Β (2020). Οι σπάνιες γαίες και η γεωπολιτική θέση της Ελλάδας. Ελληνικό Πανόραμα.
- Μιχαήλοβιτς Γ (2017). Γεωχημική έρευνα για την αναζήτηση σπάνιων γαιών στο γρανίτη Παρανεστίου (Μάζα Ροδόπης). Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης.
- Πασβάνκα Κ (2016). Έλεγχος αυθεντικότητας οίνων προερχόμενων από ελληνικές ποικιλίες σταφυλιών και διαφορετικές τεχνικές οινοποίησης. Διδακτορική διατριβή.