



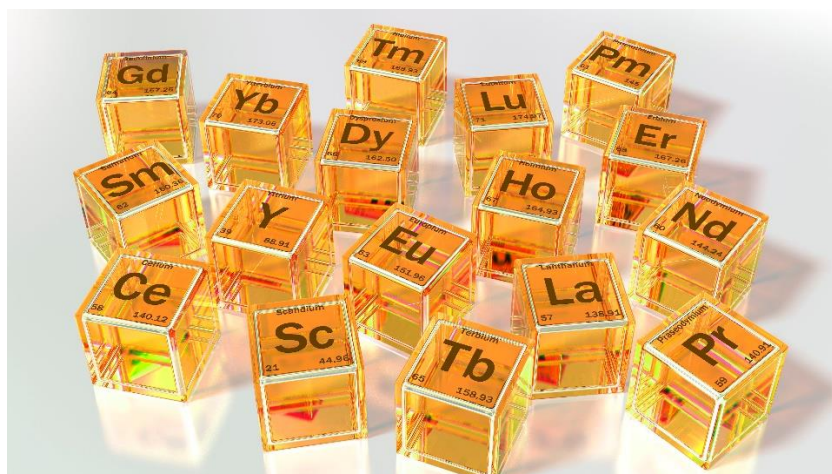
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΣΠΥΡΟΣ ΦΡΑΓΚΟΥ
ΑΕΜ 5682

Η ΓΕΩΠΟΛΙΤΙΚΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021





ΣΠΥΡΟΣ ΦΡΑΓΚΟΥ

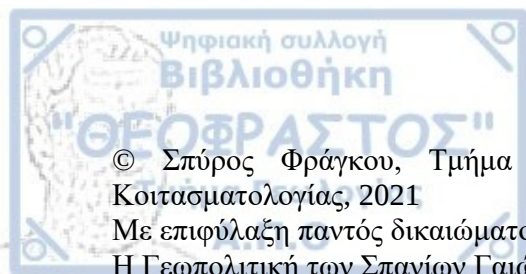
Η ΓΕΩΠΟΛΙΤΙΚΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Σπύρος Φράγκου, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Σπύρος Φράγκου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Η Γεωπολιτική των Σπανίων Γαιών – Διπλωματική Εργασία

© Spyros Fragkou, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2021

All rights reserved.

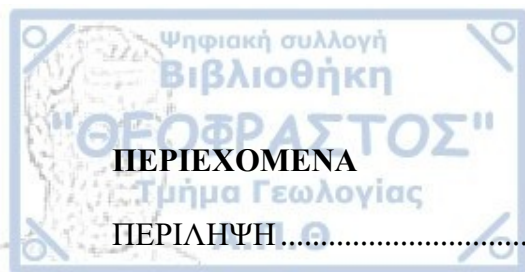
The Geopolitics of Rare-Earth Elements – Bachelor Thesis

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://www.thoughtco.com>





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	9
2.1. ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΒΑΥΑΝ ΟΒΟ.....	11
2.2. ΚΟΙΤΑΣΜΑ MOUNTAIN PASS	13
2.3. ΚΟΙΤΑΣΜΑ MOUNTWELD	15
2.4. ΑΡΓΙΛΟΙ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΙΟΝΤΩΝ ΝΟΤΙΑΣ ΚΙΝΑΣ	16
3. ΚΡΙΣΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	18
3.1. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΖΗΤΗΣΗΣ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	18
3.2. Η ΚΥΡΙΑΡΧΙΑ ΤΗΣ ΚΙΝΑΣ ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	18
4. ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	23
4.1. Η ΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΙΑΠΩΝΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	23
4.2. Η ΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΜΕΡΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	23
4.3. Η ΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ...	24
4.4. Η ΑΝΑΓΚΗ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ.....	26
4.5. ΤΟ ΠΑΡΑΝΟΜΟ ΕΜΠΟΡΙΟ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΤΗΣ ΚΙΝΑΣ	27
5. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΓΕΩΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ.....	28
5.1. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ.....	32
6. ΟΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.....	33
6.1. ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.....	33
6.2. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ	36
7. Η ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΣΤΟΝ ΓΕΩΠΟΛΙΤΙΚΟ ΧΑΡΤΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ..	37
8. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	41



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Γεωπολιτική των Σπανίων Γαιών

Σπύρος Φράγκου

Ο 21^{ος} αιώνας έχει χαρακτηριστεί ως ο πιο απαιτητικός στο ζήτημα των ορυκτών πόρων λόγω της τεράστιας τεχνολογικής έκρηξης που λαμβάνει χώρα στον πλανήτη. Το κλειδί για τις σύγχρονες τεχνολογίες αποτελεί μια ομάδα χημικών στοιχείων, με μοναδικές ιδιότητες, που ονομάζονται σπάνιες γαίες. Η σημαντικότητα των στοιχείων αυτών επιβεβαιώνεται με τη χρήση των σπανίων γαιών ως μέσο άσκησης πίεσης σε μια γεωπολιτική διαμάχη μεταξύ Ιαπωνίας και Κίνας το 2010. Το γεγονός αυτό θορύβησε αρκετά κράτη με αποτέλεσμα ολοένα και περισσότερες χώρες να στρέφουν τη προσοχή τους στην έρευνα των σπανίων γαιών. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα δοθεί έμφαση στη γεωπολιτική σημασία των σπανίων γαιών, στις επιπτώσεις της κρίσης των σπανίων γαιών, στον ρόλο της ανακύκλωσης ώστε να αποφευχθούν παρόμοιες κρίσεις στο μέλλον καθώς και στις προοπτικές των Ευρωπαϊκών και Ελληνικών κοιτασμάτων σπανίων γαιών.



ABSTRACT

The Geopolitics of Rare-Earth Elements

Spyros Fragkou

The 21st century has been characterized as the most demanding in terms of mineral resources due to the great technological development that is taking place on our planet. The key to these modern technologies is a group of chemical elements, with unique properties, known as Rare-Earth Elements. The significance of these elements is confirmed by use of Rare-Earths as a means of exerting pressure on a geopolitical dispute between Japan and China in 2010. This fact alarmed a lot of countries and as a result most of these countries turned their attention to the research about Rare-Earth Elements. This diploma thesis focuses on the geopolitical importance of Rare-Earth Elements, the effects of Rare-Earth Crisis, the role of recycling in order to avoid similar crises in the future as well as the prospects of European and Greek rare earth deposits.



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 Οκτώβριο του 2020.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των σπανίων γαιών στη παγκόσμια αγορά και πως αποτέλεσαν το κύριο μέσο γεωπολιτικής πίεσης της Κίνας έναντι του υπόλοιπου πλανήτη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή 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

Οι σπάνιες γαίες, γνωστές και ως Rare-Earth Elements (REE) στη διεθνή βιβλιογραφία, αποτελούν μία ομάδα 17 μετάλλων που περιλαμβάνουν την ομάδα των λανθανίδων που αποτελείται από τα λανθάνιο (La), δημήτριο (Ce), πρασεόδυμιο (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) που οφείλουν το όνομα τους στο πρώτο στοιχείο της ομάδας το λανθάνιο καθώς και τα στοιχεία ύτριο (Y) και σκάνδιο (Sc) καθώς έχουν παρόμοιες χημικές και φυσικές ιδιότητες με τις λανθανίδες (Goodenough et al. 2016, Μέλφος 2020). Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί πως το προμήθειο είναι το μόνο το οποίο δεν προκύπτει φυσικά αλλά μόνο τεχνητά σε εργαστήριο (De Lima and Leal Filho 1025 από Dushyantha et al. 2020).

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

Σχ. 1.1. Η θέση των σπανίων γαιών στον περιοδικό πίνακα (Anderson et al. 2017).

Οι σπάνιες γαίες διακρίνονται σε δύο βασικές υποομάδες τις ελαφριές σπάνιες γαίες (LREE) και τις βαριές σπάνιες γαίες (HREE). Σύμφωνα με την έκθεση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις κρίσιμες ορυκτές πρώτες ύλες, τα στοιχεία από το λανθάνιο μέχρι το σαμάριο χαρακτηρίζονται ως ελαφριές σπάνιες γαίες καθώς τα στοιχεία από το ευρώπιο μέχρι το λουτήσιο συμπεριλαμβανομένου του ύτριο χαρακτηρίζονται ως βαριές σπάνιες γαίες (ENTR 2014).

Οι σπάνιες γαίες δεν εμφανίζονται στη φύση ως αυτοφυή στοιχεία αλλά ως οξείδια με χαρακτηριστική γαιώδη μορφή στην οποία οφείλουν και το όνομα τους (Μέλφος 2020).

Πιο συγκεκριμένα συναντώνται σε περισσότερα από 250 ορυκτά παγκοσμίως, οι βασικές κατηγορίες των ορυκτών αυτών είναι τα φωσφορικά, τα πυριτικά και τα ανθρακικά ορυκτά καθώς επίσης τα οξείδια και τα αλογονίδια (Vijayan et al. 1989, Chi et al. 2001, Gupta and Krishnamurthy 2005, Dushyantha et al. 2020).

Χημικά Στοιχεία	Ατομικός Αριθμός	Περιεκτικότητα (ppm)
Λανθάνιο	57	30
Δημήτριο	58	60
Πρασεοδύμιο	59	6.7
Νεοδύμιο	60	27
Προμήθειο	61	10 ⁻¹⁸
Σαμάριο	62	5.3
Ευρώπιο	63	1.3
Γαγολίνιο	64	4
Τέρβιο	65	0.7
Δυσπρόσιο	66	3.8
Όλμιο	67	0.8
Έρβιο	68	2.1
Θούλιο	69	0.3
Υτέρβιο	70	2
Λουτήσιο	71	0.4

Σχ. 1.2. Οι συγκεντρώσεις των σπανίων γαιών στο φλοιό της Γης (Kumari, Archana, et al. 2015 τροποποιημένο από Σπύρο Φράγκου).

Γενικά, οι ελαφρές σπάνιες γαίες συγκεντρώνονται στα ανθρακικά και στα φωσφορικά ορυκτά ενώ οι βαριές σπάνιες γαίες συγκεντρώνονται στα οξείδια και σε ένα μέρος των φωσφορικών ορυκτών (Kanazawa and Kamitani 2006 από Dushyantha et al. 2020). Οι ελαφριές σπάνιες γαίες είναι πιο άφθονες από τις βαριές σπάνιες γαίες (Μέλφος 2020). Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση των σπανίων γαιών στο φλοιό της Γης ανέρχεται στα 169,1 ppm, από τα οποία τα 137,8 ppm αφορούν τις ελαφριές σπάνιες γαίες και τα 31,3 ppm αφορούν τις βαριές σπάνιες γαίες (Dushyantha et al. 2020). Ωστόσο, τα μέταλλα αυτά δεν είναι τόσο σπάνια όσο τα χαρακτηρίζει το όνομα τους. Μεγάλο ποσοστό των ελαφριών

σπανίων παρουσιάζουν παρόμοιες περιεκτικότητες στον φλοιό της Γης με μέταλλα που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία όπως είναι το χρώμιο, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος, ο κασσίτερος, το βολφράμιο και ο μόλυβδος (King 2017 από Dushyantha et al. 2020). Για παράδειγμα, η συγκέντρωση του δημήτριου (60 ppm, Σχ. 1.2.) είναι παρόμοια με τη συγκέντρωση του χαλκού στο φλοιό της Γης (Dushyantha et al. 2020). Επομένως, σε αυτό το πλαίσιο, η λέξη “σπάνιες” οφείλεται στο γεγονός ότι οι σπάνιες γαίες δεν συναντώνται σε ποσότητες τέτοιες που να αποτελούν κοιτάσμα, ωστόσο τα βιώσιμα κοιτάσματα που είναι καταναμεμημένα σε όλο το κόσμο παρουσιάζουν χαμηλές συγκεντρώσεις (Μέλφος 2020, Haxel et al. 2002 από Dushyantha et al. 2020).



Σχ. 1.3. Οι σπάνιες γαίες στα κινητά τηλέφωνα (ABC News τροποποιημένο από Σπύρο Φράγκου).

Οι σπάνιες γαίες είναι αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων κοινωνιών καθώς παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και κυρίως σε προϊόντα υψηλής τεχνολογίας, οπότε ορθώς αρκετοί τις έχουν χαρακτηρίσει ως “Οι βιταμίνες της σύγχρονης βιομηχανίας” (Balaram 2019). Ένα μέσο κινητό τηλέφωνο χρειάζεται περίπου 0,25 g σπάνιες γαίες για την κατασκευή του και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στο πλανήτη υπάρχουν περίπου 5,3

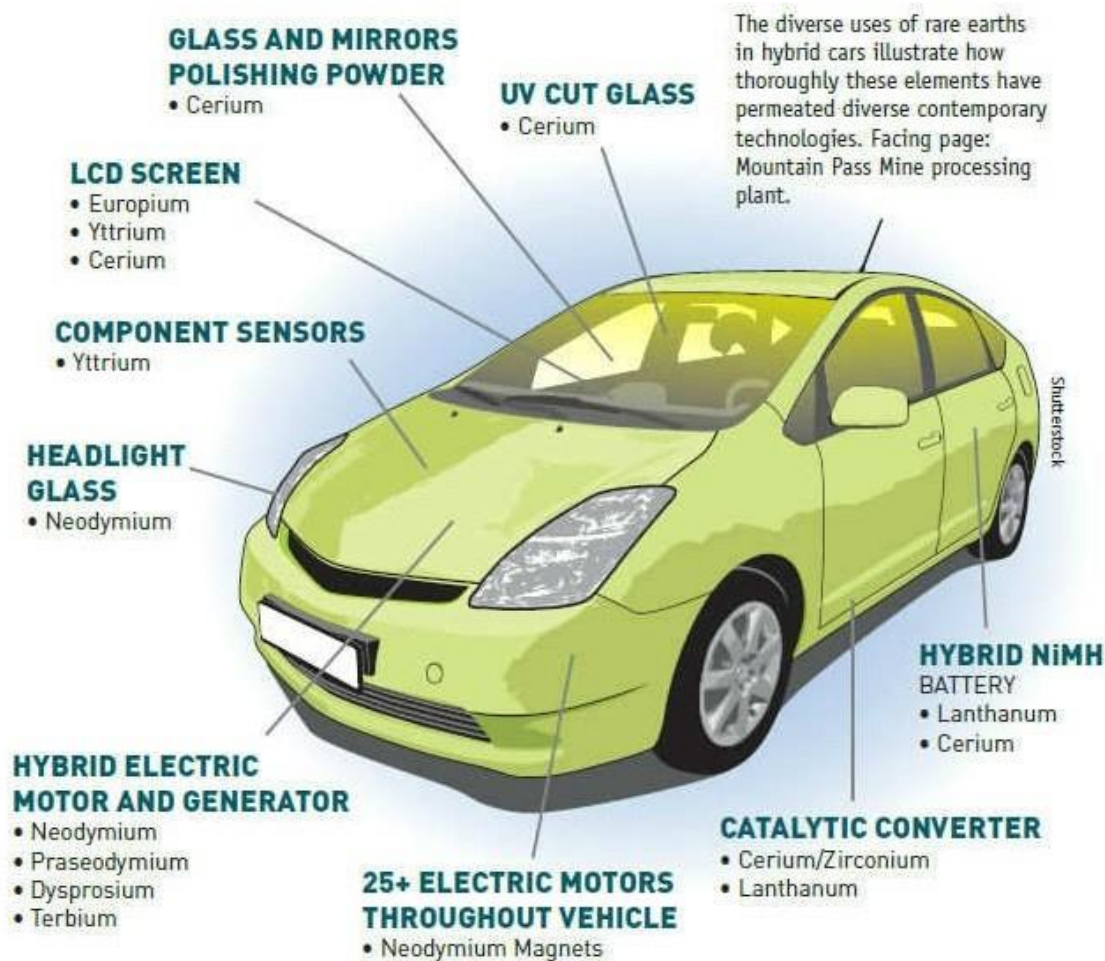
δισεκατομμύρια συσκευές ευκόλως προκύπτει το συμπέρασμα ότι απαιτούνται τεράστιες ποσότητες σπανίων γαιών για ένα αγαθό το οποίο ο μέσος άνθρωπος το θεωρεί δεδομένο (Μέλφος 2020). Ακόμη, ένα συμβατικό υβριδικό αυτοκίνητο περιέχει περίπου 1 κιλό σπάνιες γαίες (Balaram 2019 από Dushyantha et al. 2020).

Εφαρμογή σπανίων γαιών	La %	Ce %	Pr %	Nd %	Sm %	Eu %	Gd %	Tb %	Dy %	Y %	Υπόλοιπα %
Μαγνήτες	-	-	23,4	23,4	-	-	2	0,2	5	-	-
Κράματα Μπαταριών	50	33,4	3,3	3,3	3,3	-	-	-	-	-	-
Κράματα Μετάλλων	26	52	5,5	5,5	-	-	-	-	-	-	-
Καταλύτες Αυτοκινήτων	5	90	2	2	-	-	-	-	-	-	-
Διύλιση Πετρελαίου	90	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Υλικά Λείανσης	31,5	65	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Πρόσθετα Γυαλιών	24	66	1	3	-	-	-	-	-	2	4
Φώσφορος	8,5	11	-	-	-	4,9	1,8	4,6	-	69,2	-
Κεραμικά	17	12	6	12	-	-	-	-	-	53	-
Υπόλοιπα	19	39	4	15	2	-	1	-	-	19	-

Σχ. 1.4. Απαιτήσεις σπανίων γαιών σε κάθε εφαρμογή (Long et al. 2012, Jordens et al. 2013 από Dushyantha et al. 2020 τροποποιημένο από Σπύρο Φράγκου).

Οι μαγνήτες μαζί με τη βιομηχανία της υαλουργίας απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό σπανίων γαιών στην αγορά (Chapman 2018, Dushyantha et al. 2020). Η βιομηχανία της υαλουργίας αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές σπανίων γαιών στη αγορά διότι χρησιμοποιούνται για τη λείανση καθώς και ως πρόσθετες ουσίες επειδή προσδίδουν ιδιαίτερες οπτικές ιδιότητες, αντίστοιχα στη βιομηχανία των μαγνητών γίνεται ευρεία χρήση σπανίων γαιών καθώς παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (Chapman 2018, Dushyantha et al. 2020). Αυτό το ευρύ φάσμα διευρύνθηκε ακόμα περισσότερο με τη χρήση δυσπροσίου και σαμαρίου καθώς απέδωσε στους μαγνήτες ισχυρή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (Μέλφος 2020). Οι μαγνήτες σπανίων γαιών χρησιμοποιούνται κυρίως στους σκληρούς δίσκους των ηλεκτρονικών υπολογιστών, στα πολύ μικρού μεγέθους ηχεία και ακουστικά, σε ασύρματες συσκευές καθώς και στους κινητήρες υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων (Μέλφος 2020). Οι μαγνήτες νεοδυμίου, οι οποίοι αποτελούνται από ένα κράμα

νεοδυμίου-σιδήρου-νικελίου, είναι οι πιο ισχυροί εμπορικού τύπου μόνιμοι μαγνήτες που έχουν δημιουργηθεί μέχρι σήμερα (Chapman 2018). Αξίζει να σημειωθεί πως, λόγω του ισχυρού μαγνητισμού που παρουσιάζουν μερικές σπάνιες γαίες, ένας μόνιμος μαγνήτης 100 γραμμαρίων από σπάνιες γαίες παράγει το ίδιο μαγνητικό πεδίο με ένα μόνιμο μαγνήτη ενός κιλού του οποίου κατασκευή δεν οφείλεται σε σπάνιες γαίες (Athurupane 2014 από Dushyantha et al. 2020).



Σχ. 1.5. Οι σπάνιες γαίες σε ένα υβριδικό αυτοκίνητο (Mines Magazine).

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα διατροφής για την ενίσχυση της ανάπτυξης και της πάχυνσης των ζώων εκτροφής, όπως χοίροι, κοτόπουλα βοοειδή, ψάρια πάπιες και κουνέλια. Καθώς επίσης θεωρούνται ευεργετικές για την αύξηση της παραγωγής γάλατος από τις αγελάδες και αυξάνουν τα ποσοστά επιβίωσης των ψαριών (He et al. 2001, Redling, 2006 από Dushyantha et al. 2020). Επιπλέον, οι σπάνιες γαίες είναι ευεργετικά στοιχεία για τα φυτά και έχουν χρησιμοποιηθεί στα λιπάσματα σε διαλυτές μορφές και σε χαμηλή συγκέντρωση στην Κίνα από το 1972 (Baisheng 1985 από Dushyantha et al. 2020).

Ωστόσο, η χρήση των σπανίων γαιών δεν περιορίζεται μόνο στα παραπάνω καθώς η χρήση τους κρίνεται απαραίτητη και σε άλλους κλάδους όπως η στρατιωτική βιομηχανία, η διαστημική τεχνολογία, στην διύλιση πετρελαίου, στην επεξεργασία μετάλλων, στις επίπεδες οθόνες υγρών κρυστάλλων, σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Επιπροσθέτως, ευρεία χρήση σπανίων γαιών γίνεται στην ιατρική κυρίως στα ιατρικά λέιζερ και σε βιολογικούς, στις μαγνητικές τομογραφίες, στην οδοντιατρική, στα όργανα ακτινογραφιών με ακτίνες X και σε θεραπείες καρκινοπαθών (Μέλφος 2020).

Εν κατακλείδι, οι ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη αυξάνονται συνεχώς και σε συνδυασμό με τις συνέπειες χρήσης των ορυκτών καυσίμων στο πλανήτη οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κρίνεται αναγκαίο να στραφεί η προσοχή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το κλειδί για τη μετάβαση σε μια βιώσιμη κοινωνία με μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών βρίσκεται στις σπάνιες γαίες. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση σπανίων γαιών στα φωτοβολταϊκά επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας καθώς και μείωση των ενεργειακών απωλειών κατά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα (Dushyantha et al. 2020). Επίσης, η χρήση μαγνητών νεοδυμίου στις ανεμογεννήτριες αυξάνει την αποδοτικότητα τους καθώς επίσης επιτρέπει τη χρήση τους σε περιοχές με περιορισμένο δυναμικό αιολικής ενέργειας (Polinder et al. 2006, Ribrant and Bertling 2007, Morris 2011 από Dushyantha et al. 2020).

2. ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Οι σπάνιες γαίες δεν προκύπτουν στη φύση ως αυτοφυή μέταλλα όπως ο χρυσός, ο χαλκός και το ασήμι εξαιτίας της αντιδραστικότητας τους ωστόσο εμφανίζονται σε διάφορα ορυκτά είτε ως κύρια στοιχεία είτε ως ιχνοστοιχεία. Επιπρόσθετα, εμφανίζουν ένα περιορισμό στη φύση καθώς δεν εμφανίζονται στη δομή των περισσότερων ορυκτών και προκύπτουν σε λίγα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα (Balaram 2019).

Τα κοιτάσματα σπανίων γαιών σχηματίζονται μέσω μαγματικών, υδροθερμικών και μεταμορφικών διεργασιών καθώς και μέσω διάβρωσης και μεταφοράς ιζημάτων και διακρίνονται σε πρωτογενή και δευτερογενή (Mitchell 2015, Zhou 2017 από Dushyantha et al. 2020). Τα πρωτογενή κοιτάσματα σχετίζονται συνήθως με καρμπονατίτες αλκαλικά και υπεραλκαλικά πυριγενή πετρώματα ενώ τα δευτερογενή όπως είναι τα προσχωματικά και οι άργιλοι προσρόφησης ιόντων σχηματίζονται λόγω της διάβρωσης και της αποσάθρωσης πρωτογενών κοιτασμάτων (Goodenough et al. 2016, Zhou 2017 από Dushyantha et al. 2020).

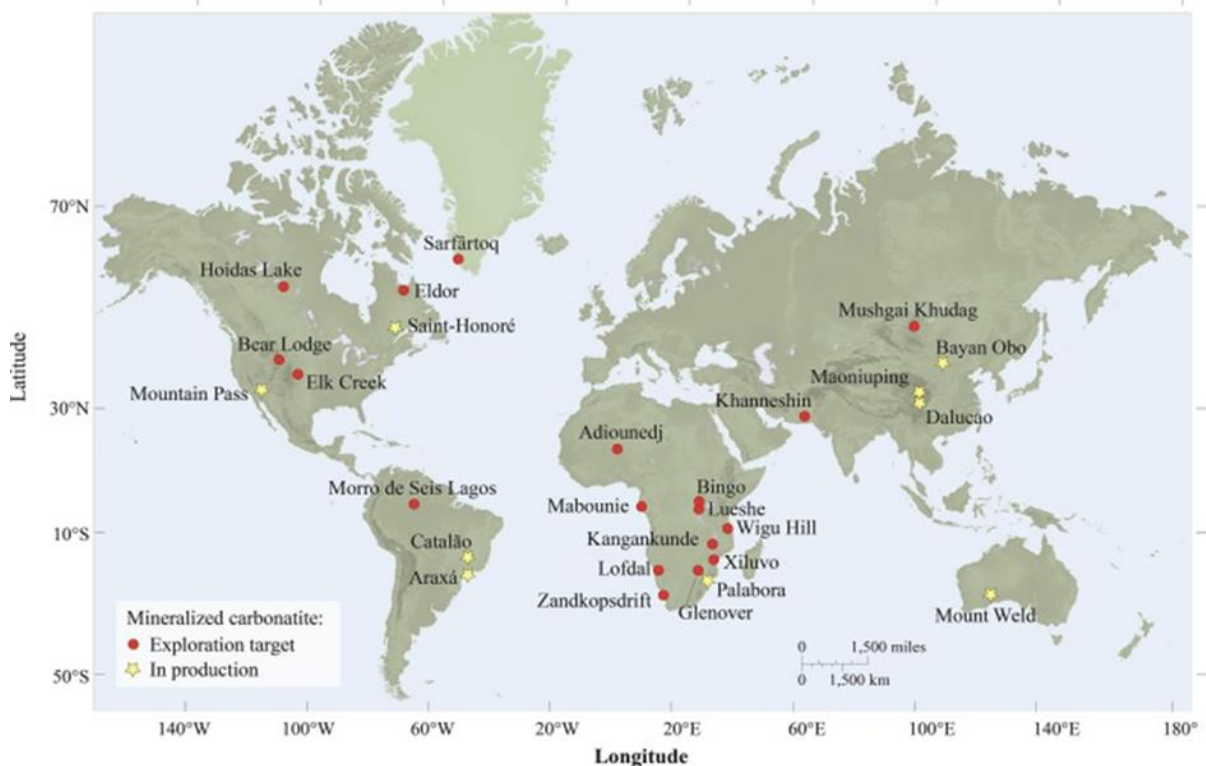
Συνολικά έχουν εντοπισθεί σε 34 χώρες στο κόσμο κοιτάσματα σπανίων γαιών (Chen 2011 από Dushyantha et al. 2020). Σύμφωνα με την έκθεση του 2021 της Αμερικάνικης Γεωλογικής Υπηρεσίας για τα εμπορεύσιμα ορυκτά τα εκτιμώμενα παγκόσμια αποθέματα σπανίων γαιών είναι 120 εκατομμύρια τόνοι με την Κίνα την Βραζιλία και το Βιετνάμ να συγκεντρώνουν στα εδάφη τους τα μεγαλύτερα αποθέματα καθώς κατέχουν το 36,6%, το 17,5% και το 18,3% αντίστοιχα (United States Geological Survey - USGS 2021). Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 από τις παραπάνω χώρες μόνο η Κίνα έχει έντονη εξορυκτική δραστηριότητα καθώς το 2020 με 140.000 τόνους κατείχε το 58,3% της παγκόσμιας εξόρυξης σπανίων γαιών.

Χώρα	Εξόρυξη (τόνοι)		Αποθέματα (τόνοι)
	2019	2020	
ΗΠΑ	28.000	38.000	1500.000
Αυστραλία	20.000	17.000	4.100.000
Βραζιλία	710	1.000	21.000.000
Μιανμάρ	25.000	30.000	Μη διαθέσιμο
Μπουρούντι	200	500	Μη διαθέσιμο
Καναδάς	-	-	830.000
Κίνα	132.000	140.000	44.000.000
Γροιλανδία	-	-	1.500.000
Ινδία	2.900	3.000	6.900.000
Μαδαγασκάρη	4.000	8.000	Μη διαθέσιμο
Ρωσία	2.700	2.700	12.000.000
Νότια Αφρική	-	-	790.000
Τανζανία	-	-	890.000
Ταϊλάνδη	1.900	2.000	Μη διαθέσιμο
Βιετνάμ	1.300	1.000	22.000.000
Υπόλοιπες χώρες	66	100	310.000
Σύνολο Παγκόσμια	220.000	240.000	120.000.000

Σχ. 2.1. Παγκόσμια εξόρυξη και αποθέματα σπανίων γαιών (United States Geological Survey -USGS 2021 τροποποιημένο από Σπύρο Φράγκου).

Η πλειονότητα των κοιτασμάτων σπανίων γαιών σχετίζονται με καρμωνατίτες οι οποίοι είναι συνήθως εμπλουτισμένοι με ελαφριές σπάνιες γαίες ενώ αντίστοιχα τα κοιτάσματα που σχετίζονται με αλκαλικά και υπεραλκαλικά πυριγενή πετρώματα είναι εμπλουτισμένα σε βαριές σπάνιες γαίες (Dushyantha et al. 2020). Η κατανομή των καρμωνατιτικών κοιτασμάτων γίνεται κυρίως σε Προκάμβριες κρατονικές ασπίδες ή σχετίζονται με μεγάλες δομές εκτατικής τεκτονικής (Kanazawa and Kamitani 2006). Τα παραπάνω συναντώνται στις ζώνες διάρρηξης της ανατολική Αφρικής, στο βόρειο τμήμα της Σκανδιναβικής χερσονήσου, στον ανατολικό Καναδά και στη νότια Βραζιλία (Kanazawa and

Kamitani 2006). Παρακάτω θα αναλυθούν τα σπουδαιότερα κοιτάσματα σπανίων γαιών στο κόσμο.



Σχ. 2.2. Παγκόσμια κατανομή καρμιπονιτικών κοιτασμάτων (Eggert et al. 2016, Verplanck et al. 2016 από Dushyantha, Nimila, et al. 2020).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχουν αναγνωριστεί παραπάνω από 250 ορυκτά που φέρουν σπάνιες γαίες στη κρυσταλλική δομή τους. Ωστόσο ο μπαστναζίτης και ο μοναζίτης αποτελούν τα πιο συνήθη ορυκτά σπανίων γαιών που συναντώνται σε κοιτάσματα σπανίων γαιών (Dushyantha et al. 2020). Επομένως, το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής σπανίων γαιών παρέχεται μέσω μπαστναζίτη, μοναζίτη και ξενότιμου (Haque et al. 2014, Zhou 2017 από Dushyantha et al. 2020).

2.1. Κοίτασμα Bayan Obo

Το κοιτάσμα στο Bayan Obo θεωρείται το μεγαλύτερο κοιτάσμα σπανίων γαιών στο κόσμο και αρχικά είχε ανακαλυφθεί ως κοιτάσμα σιδήρου το 1927 (Fan et al. 2016 από Dushyantha et al. 2020). Το συγκεκριμένο κοιτάσμα βρίσκεται 135 χιλιόμετρα από το Baotou στην αυτόνομη επαρχία της εσωτερικής Μογγολίας και συνορεύει με ένα κάτω Παλαιοζωικό ενεργητικό ηπειρωτικό περιθώριο στα βόρεια (Kanazawa and Kamitani 2006, Xiao and Kusky 2009 από Dushyantha et al. 2020). Η γένεση του κοιτάσματος συνδέεται με

καρμπονατιτικά πετρώματα στο γεγονός αυτό οφείλεται και η έντονη παρουσία καρμπονατιτών στη περιοχή του Bayan Obo. Πιο συγκεκριμένα, η δημιουργία του κοιτάσματος Bayan Obo οφείλεται στο Μεσοπρωτεροζωικό καρμπονατικό μαγματισμό και στην μετέπειτα Παλαιοζωική υδροθερμική δολομιτώση (Liu et al. 2018 από Dushyantha et al. 2020). Ο εμπλουτισμός του κοιτάσματος σε σπάνιες γαίες πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της Παλαιοζωικής υδροθερμικής δολομιτώσης (Liu et al. 2018 από Dushyantha, Nimila, et al. 2020). Τα μεταλλοφόρα σώματα του κοιτάσματος Bayan Obo παρουσιάζουν πολύπλοκη γεωχρονολόγηση καθώς η ηλικία των καρμπονατιτών είναι περίπου 1230-1350 εκατομμύρια χρόνια και περίπου 400-450 εκατομμύρια χρόνια με βάση τις ισόχρονες Sm-Nd και ισόχρονες Th-Pb αντίστοιχα (Smith et al. 2016 από Dushyantha, Nimila, et al. 2020). Η συγκέντρωση των σπανίων γαιών στο Bayan Obo είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τους καρμπονατίτες καθώς διαφοροποιείται ανάλογα με το τύπο του καρμπονατίτη. Για παράδειγμα οι ασβεστιτικοί καρμπονατίτες παρουσιάζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις σπανίων γαιών (Yang et al. 2019 από Dushyantha et al. 2020).



Σχ. 2.3 Μεταλλείο κοιτάσματος Bayan Obo (Google Earth).

Τα συνολικά αποθέματα του κοιτάσματος Bayan Obo περιλαμβάνουν 1.500 εκατομμύρια τόνους σιδήρου, 2,16 εκατομμύρια τόνους νιόβιου καθώς και 57,4 εκατομμύρια τόνους σπανίων γαιών εκ των οποίων το 97% είναι ελαφριές (Su 2009 Yang et al 2013, Fan et al. 2014 από Dushyantha et al. 2020). Στο συγκεκριμένο κοίτασμα επικρατούν κατά

προσέγγιση 162 ορυκτά με παραπάνω από 20 ορυκτά σπανίων γαιών και 15 ορυκτά νιόβιου. Τα πρώτα ορυκτά σπανίων γαιών που σχηματίστηκαν στο κοίτασμα ήταν ο μοναζίτης και ο μπασναζίτης (Dushyantha et al. 2020). Στο κοίτασμα Bayan Obo λαμβάνει χώρα επιφανειακή εκμετάλλευση για την εξόρυξη των σπανίων γαιών όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο Σχήμα 2.3. Επικρατούν 3 βασικές μεταλλογενετικές ζώνες, η Κεντρική, η Ανατολική και η Δυτική εκ των οποίων οι δύο πρώτες βρίσκονται υπό εκμετάλλευση αυτή τη στιγμή (Kanazawa and Kamitani 2006 από Dushyantha et al. 2020). Το 2005 η παραγωγή του συγκεκριμένου κοιτάσματος ήταν 55.300 τόνοι οξειδίων σπανίων γαιών (REOs) η οποία αντιπροσώπευε το 45% της παγκόσμιας παραγωγής καθώς και το 47% της παραγωγής της Κίνας (Wu 2008 από Dushyantha et al. 2020).

2.2. *Κοίτασμα Mountain Pass*

Το κοίτασμα Mountain Pass βρίσκεται στην έρημο Μοχάβι της Καλιφόρνια των ΗΠΑ η οποία είναι 75 χιλιόμετρα από τη πόλη του Λας Βέγκας. Το συγκεκριμένο κοίτασμα είναι το δεύτερο μεγαλύτερο κοίτασμα σπανίων γαιών στο κόσμο και ανακαλύφθηκε το 1949 ενώ οι πρώτες εξορύξεις ξεκίνησαν το 1952. Η περιοχή του Mountain Pass αποτελείται κυρίως από αυτόχθονο Προτεροζωικό κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο (Yang et al. 2019 από Dushyantha et al. 2020). Το μητρικό πέτρωμα του συγκεκριμένου κοιτάσματος είναι ένας καρμπονατίτης γνωστός ως Sulphide Queen Carbonatite στη διεθνή βιβλιογραφία και σχετίζεται με αλκαλικά πυριγενή πετρώματα που περιέχουν περισσότερο κάλιο από ότι νάτριο τα οποία κυμαίνονται από shonkonite μέχρι συνητή και γρανίτη. Ως εκ τούτου, ο συγκεκριμένος καρμπονατίτης θεωρείται ασυνήθιστος σε σχέση με τους υπόλοιπους καρμπονατίτες που σχετίζονται με κοιτάσματα σπανίων γαιών (Castor 2008 από Dushyantha et al. 2020). Η ηλικία του καρμπονατίτη του κοιτάσματος Mountain Pass είναι 1.375 ± 5 εκατομμύρια χρόνια (De Witt 1987 από Dushyantha et al. 2020).

Ο μπασναζίτης είναι το βασικό ορυκτό σπανίων γαιών που εμφανίζεται στο κοίτασμα Mountain Pass ωστόσο επικρατούν parisite καθώς και μοναζίτης ως επουσιώδη ορυκτά των σπανίων γαιών (Smith et al. 2016 από Dushyantha et al. 2020). Τα βεβαιωμένα αποθέματα οξειδίων σπανίων γαιών είναι κατά προσέγγιση 28 εκατομμύρια τόνοι με τις ελαφριές σπάνιες γαίες να κατέχουν τη συντριπτική πλειοψηφία (Kanazawa and Kamitani 2006, Dushyantha et al. 2020). Επιπλέον, στο συγκεκριμένο κοίτασμα παρατηρείται υψηλή

συγκέντρωση βαρίου ωστόσο επικρατούν ελάχιστες ποσότητες νιόβιου και φωσφόρου (Castor 2008, Smith et al. 2016, Zhou et al. 2016 από Dushyantha et al. 2020).



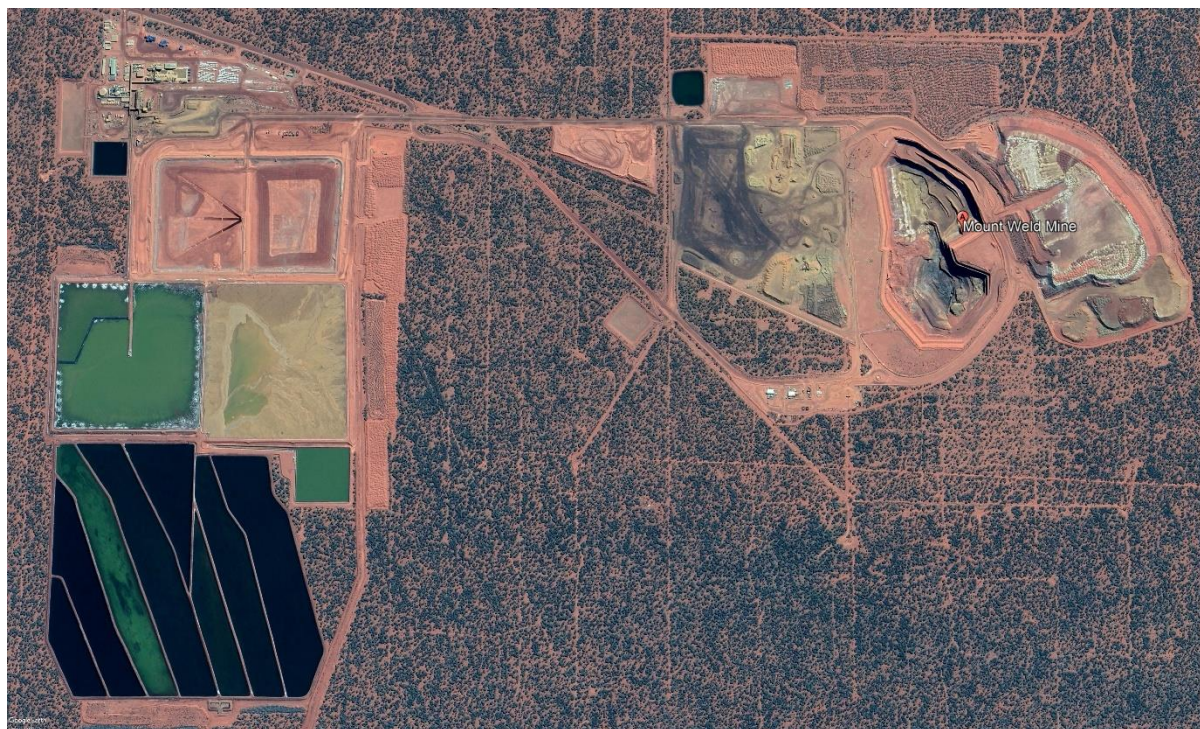
Σχ. 2.4. Μεταλλείο κοιτάσματος Mountain Pass (Google Earth).

Από τη δεκαετία του '60 έως τα μισά της δεκαετίας του '90, το κοιτάσμα του Mountain Pass αποτελούσε το μεγαλύτερο κοιτάσμα ελαφριών σπανίων γαιών στο κόσμο εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων ελαφριών σπανίων γαιών που εντοπίζονται παρά τις χαμηλές περιεκτικότητες νεοδυμίου που επικρατούν. Λόγω διαρροών στο περιβάλλον από τον αγωγό υγρών αποβλήτων οι εξορύξεις σπανίων γαιών τέθηκαν σε αναστολή το 1998, και κατά συνέπεια, οι εξορυκτικές δραστηριότητες καθώς και η παραγωγή σπανίων γαιών αυτού του μοναδικού εγχώριου παραγωγού σταμάτησαν το 2002 (Koltun and Tharumarajah 2014 από Dushyantha et al. 2020). Δεδομένου ότι το κοιτάσμα του Mountain Pass έχει τη δυνατότητα παραγωγής 19 χιλιάδων τόνων οξειδίων σπανίων γαιών κάθε χρόνο, η εταιρεία Molycorp απέκτησε το συγκεκριμένο κοιτάσμα το 2008 και στη συνέχεια το άνοιξε εκ νέου το 2012. Εντούτοις, λόγω της πτώχευσης της Molycorp και των πολύ χαμηλών τιμών που πρόσφερε η Κίνα για τις σπάνιες γαίες, οι δραστηριότητες τερματίστηκαν για ακόμη μία φορά το 2015. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Eric (2019a) (από Dushyantha et al. 2020) λόγω των συνεχιζόμενων εμπορικών διαφορών μεταξύ ΗΠΑ και Κίνα, οι δραστηριότητες εξόρυξης σπανίων γαιών έχουν επανεξεταστεί και ξεκίνησαν εκ νέου στα τέλη του 2020 για την εξαγωγή συμπτυκνωμάτων και οξειδίων σπανίων γαιών.

Το κοίτασμα Mount Weld στη δυτική Αυστραλία θεωρείται ένα από τα πλουσιότερα κοιτάσματα σπανίων γαιών στο κόσμο και συναντάται σε ένα λατεριτικό προφίλ 70-130 μέτρων πάνω από ένα αλκαλικό καρμπονατιτικό σύμπλεγμα (Hoatson et al. 2011 από Dushyantha et al. 2020). Επιπρόσθετα, υπάρχουν σημαντικές συγκεντρώσεις σπανίων γαιών μέσα στα λακτρηνικά ιζήματα, γνωστά και ως lacustrine sediments στη διεθνή βιβλιογραφία. Εκτός από συγκεντρώσεις σπανίων γαιών, τα παραπάνω ιζήματα συγκεντρώνουν σημαντικές ποσότητες νιοβίου, τανταλίου, ζirkονίου και φωσφόρου (Smith et al. 2016 από Dushyantha et al. 2020). Η ηλικία της πρωταρχικής καρμπονατιτικής διείσδυσης έχει υπολογισθεί και είναι 2080-2100 εκατομμύρια χρόνια ενώ η ηλικία του λατεριτικού προφίλ παραμένει άγνωστη. Ωστόσο, έχει καταγραφεί πως τα λακτρηνικά ιζήματα τα οποία υπέρκεινται στο λατερικό προφίλ ανήκουν στο άνω Κρητιδικό μέχρι το κάτω Καινοζωικό (Dushyantha et al. 2020). Το κοίτασμα Mount Weld αποτελείται από μια Παλαιοπροτεροζωική αλκαλική μαγματική επαρχία η οποία περιλαμβάνει κιμπερλίτες καθώς και άλλους καρμπονατίτες (Wilett et al. 1986, Hoatson et al. 2011, Jaireth et al. 2014 από Dushyantha et al. 2020). Ο λατεριτικός ρεγκόλιθος φιλοξενεί τις βασικές οικονομικά εκμεταλλεύσιμες ποσότητες σπανίων γαιών (Dushyantha et al. 2020). Η μακροπρόθεσμη έκπλυση και εναπόθεση των σπανίων γαιών από τα υπόγεια ύδατα κατά τη Μεσοζωική και Καινοζωική περίοδο συνέβαλαν στον εμπλουτισμό του κοιτάσματος με σπάνιες γαίες (Smith et al. 2016 από Dushyantha et al. 2020).

Στο κοίτασμα Mount Weld υπάρχουν δευτερογενή φωσφορικά ορυκτά, με πιο αντιπροσωπευτικό τον μοναζίτη (Haque et al. 2014 από Dushyantha et al. 2020). Ο μητρικός καρμπονατίτης αποτελείται από ορυκτά σπανίων γαιών όπως ο απατίτης, ο μοναζίτης και ο synchysite, ενώ το λατεριτικό προφίλ περιέχει μοναζίτη, crandallite, goyazite και florencite τα οποία δημιουργήθηκαν από την διάβρωση και εναπόθεση του καρμπονατίτη και ορυκτών σπανίων γαιών. Επιπρόσθετα, ορισμένα τμήματα του κοιτάσματος απαρτίζονται από ξενότιμο και churchite, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικών συγκεντρώσεων βαρειών σπανίων γαιών στο κοίτασμα με ένα μέσο ποσοστό του 3% για οξειδία βαρειών σπανίων γαιών (Hoatson et al. 2011, Haque et al. 2014 από Dushyantha et al. 2020). Το συγκεκριμένο κοίτασμα έχει την ικανότητα να παράγει περισσότερους από 26 χιλιάδες τόνους οξειδίων σπανίων γαιών ετησίως για περισσότερα από 25 χρόνια. Το κοίτασμα Mount Weld αποτελείται από 4 κοιτάσματα και συγκεκριμένα από τα Duncan, Crown, Swan και Central

Lanthanide Deposit το οποίο αποτελεί ένα από τα κοιτάσματα με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις σπανίων γαιών στο κόσμο (Lynas 2015 από Dushyantha et al. 2020).



Σχ. 2.5. Μεταλλείο κοιτάσματος Mount Weld (Google Earth).

2.4. Άργιλοι προσρόφησης ιόντων Νότιας Κίνας

Οι άργιλοι προσρόφησης ιόντων στη Νότια Κίνα, οι οποίες είναι γνωστές και ως ion absorption clays στη διεθνή βιβλιογραφία, προέκυψαν από διάβρωση πετρωμάτων και παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις βαρειών σπανίων γαιών (Li and Yang 2014, Voncken 2016 από Dushyantha et al. 2020). Δεδομένου ότι απαιτούνται μοναδικές γεωλογικές συνθήκες για να σχηματιστούν τα κοιτάσματα σπανίων γαιών τύπου προσρόφησης ιόντων, τα κοιτάσματα αυτά έχουν βρεθεί μόνο σε ορισμένα μέρη της Νοτιοανατολικής Ασίας μέχρι σήμερα, εκτός από τα κοιτάσματα που συναντώνται στη Νότια Κίνα (Takeda and Okabe 2014 από Dushyantha et al. 2020). Τα συγκεκριμένα κοιτάσματα ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά το 1970 στο Ganzhou της Κίνας. Οι συγκεκριμένοι άργιλοι προσρόφησης ιόντων περιέχουν 0,02-1% οξείδια σπανίων γαιών και αποτελούν το 2,9% των συνολικών αποθεμάτων σπανίων γαιών της Κίνας. Αξίζει να τονιστεί πως το 26% της συνολικής παραγωγής σπανίων γαιών της Κίνας προήλθε από τα συγκεκριμένα κοιτάσματα κατά τη

περίοδο 1988-2008 και από το 2009 το συγκεκριμένο ποσοστό έχει φτάσει στο 35% (Su 2009 από Dushyantha et al. 2020).



Σχ. 2.6. Η εικόνα ενός κοιτάσματος προσρόφησης ιόντων στη Νότια Κίνα (Wikipedia).

Τα συγκεκριμένα αργιλικά κοιτάσματα δημιουργήθηκαν από την έκπλυση σπανίων γαιών από γρανίτες, πορφυριτικούς γρανίτες ή ακόμη και από γνεύσιους μέσω των υπόγειων υδάτων σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας όπου τα ορυκτά των σπανίων γαιών καταφέρνουν και διαλύονται. Κατά τη διάρκεια των διαδικασιών της διείσδυσης και της μετανάστευσης, τα παραγόμενα ιόντα σπανίων γαιών απορροφώνται ασθενώς από την επιφάνεια του αργιλικού εδάφους που αναπτύχθηκε πάνω από το γρανιτικό υπόβαθρο (Van Gosen et al. 2014, Estrade et al. 2019 από Dushyantha et al. 2020). Μερικές από τις σπάνιες γαίες μπορούν να εξαχθούν σχετικά εύκολα μέσω ανταλλαγής ιόντων (Wall 2014, Deng et al. 2019 από Dushyantha et al. 2020). Συνεπώς, η εξαγωγή σπανίων γαιών από τα συγκεκριμένα κοιτάσματα χαρακτηρίζεται οικονομικά βιώσιμη λόγω της εύκολης αποληψιμότητας, παρά των χαμηλών συγκεντρώσεων που επικρατούν. Επιπρόσθετα, τα ραδιενεργά στοιχεία έχουν απομακρυνθεί κατά τη διάρκεια της διάβρωσης και ως εκ τούτου το δυσμενές αποτέλεσμα των ραδιενεργών ρύπων ελαχιστοποιείται (Dushyantha et al. 2020).

3. Η ΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

3.1. Παγκόσμια Χαρακτηριστικά Ζήτησης Σπανίων Γαιών

Με τον επικείμενο ρυθμό της συνολικής ανάπτυξης και τις νέες τεχνολογικές εξελίξεις, η ζήτηση για σπάνιες γαίες αυξάνεται δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες. Η ζήτηση σπανίων γαιών βίωσε την αρχική της ταχεία ανάπτυξη κατά τη δεκαετία του '60, λόγω της εισαγωγής των έγχρωμων τηλεοράσεων στην αγορά (Dushyantha et al. 2020). Στις αρχές της δεκαετίας του '50 η ζήτηση άγγιζε τους 1000 τόνους οξειδίων σπανίων γαιών, τα οποία αντιστοιχούσαν σε 25 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Η ζήτηση στη συνέχεια αυξήθηκε στους 66 χιλιάδες τόνους το 1997 και έφτασε τους 125 χιλιάδες τόνους το 2008 (Zhou et al. 2016 από Dushyantha et al. 2020). Ωστόσο, η ζήτηση το 2014 έπεσε στους 118 χιλιάδες τόνους οξειδίων σπανίων γαιών (Roskill 2015 από Dushyantha et al. 2020). Επί του παρόντος, πάνω από το 60% της ζήτησης για οξείδια σπανίων γαιών είναι για νέες εφαρμογές και θα συνεχίσει να αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο η ζήτηση των σπανίων γαιών λόγω της συχνής χρήσης τους σε <<πράσινες>> τεχνολογίες (Mancheri et al. 2019b από Dushyantha et al. 2020). Σύμφωνα με τον Kingsnorth (2016) (από Dushyantha et al. 2020), η ζήτηση των σπανίων γαιών θα μπορούσε να αυξάνεται 7 με 8% ετησίως. Οι Alonso et al. (2012) (από Dushyantha et al. 2020) αναφέρουν ότι οι απαιτήσεις νεοδυμίου και δυσπροσίου θα αυξηθούν κατά 700% και 2600%, αντίστοιχα, μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Ομοίως, η τιμή των οξειδίων σπανίων γαιών αυξάνεται μαζί με τη ζήτηση. Το κόστος του οξειδίου του νεοδυμίου, για παράδειγμα, ήταν 107 χιλιάδες δολάρια ΗΠΑ ανά τόνο το 2018 και αναμένεται να αυξηθεί έως και 150 χιλιάδες δολάρια ΗΠΑ έως το 2025 (Mertzman 2019 από Dushyantha et al. 2020).

3.2. Η Κυριαρχία της Κίνας στην αγορά των σπανίων γαιών

Η παραγωγή σπανίων γαιών τον 20^ο αιώνα λάμβανε χώρα κυρίως στην Βραζιλία, στις ΗΠΑ, στην νότια Αφρική και στην Ινδία (Μέλφος 2020). Ωστόσο, η παραγωγή σπανίων γαιών άρχισε να μεταναστεύει από τη Δύση στη Κίνα σε μια σταδιακή διαδικασία κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες του 20ού αιώνα (Klinger 2018). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι διεθνείς αγορές να στραφούν προς την Κίνα η οποία κατάφερε να παρέχει τις σπάνιες γαίες σε χαμηλές τιμές (Μέλφος 2020). Η Κίνα οφείλει αυτές τις χαμηλές τιμές διότι αποτελεί μια χώρα όπου είναι πολιτικά αποδεκτό να πραγματοποιηθεί εξόρυξη και επεξεργασία σπανίων γαιών με οικονομικά αποδοτικό τρόπο (Klinger 2018). Αυτό οφείλεται κυρίως στα

χαμηλά ημερομίσθια και στην απώλεια περιβαλλοντικής συνείδησης επομένως η διαχείριση των υγρών αποβλήτων γίνεται ευκολότερη για τις εταιρείες όπου δεν χρειάζεται να εφαρμόσουν ειδικά μέτρα για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Μέλφος 2020). Τα ορυκτά που περιέχουν τις σπάνιες γαίες συνδέονται με υψηλές περιεκτικότητες βαρέων μετάλλων, ουρανίου και θορίου (Klinger 2018, Μέλφος 2020). Επιπρόσθετα, τα οξέα που απαιτούνται για τον διαχωρισμό των σπανίων γαιών από το μητρικό πέτρωμα οδηγούν στη δημιουργία μεγάλων όγκων αποβλήτων των οποίων η αποτελεσματική διαχείριση είναι πολύ ακριβή. Αυτό είχε ως επακόλουθο να προτιμηθούν περιοχές όπου οι τοπικοί πληθυσμοί έχουν περιορισμένη ισχύ άρνησης και δεν χρειάζεται να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος (Klinger 2018, Μέλφος 2020). Οι παραπάνω συνθήκες οδήγησαν στην ραγδαία αύξηση της εξόρυξης και την επεξεργασίας σπανίων γαιών στην Κίνα.

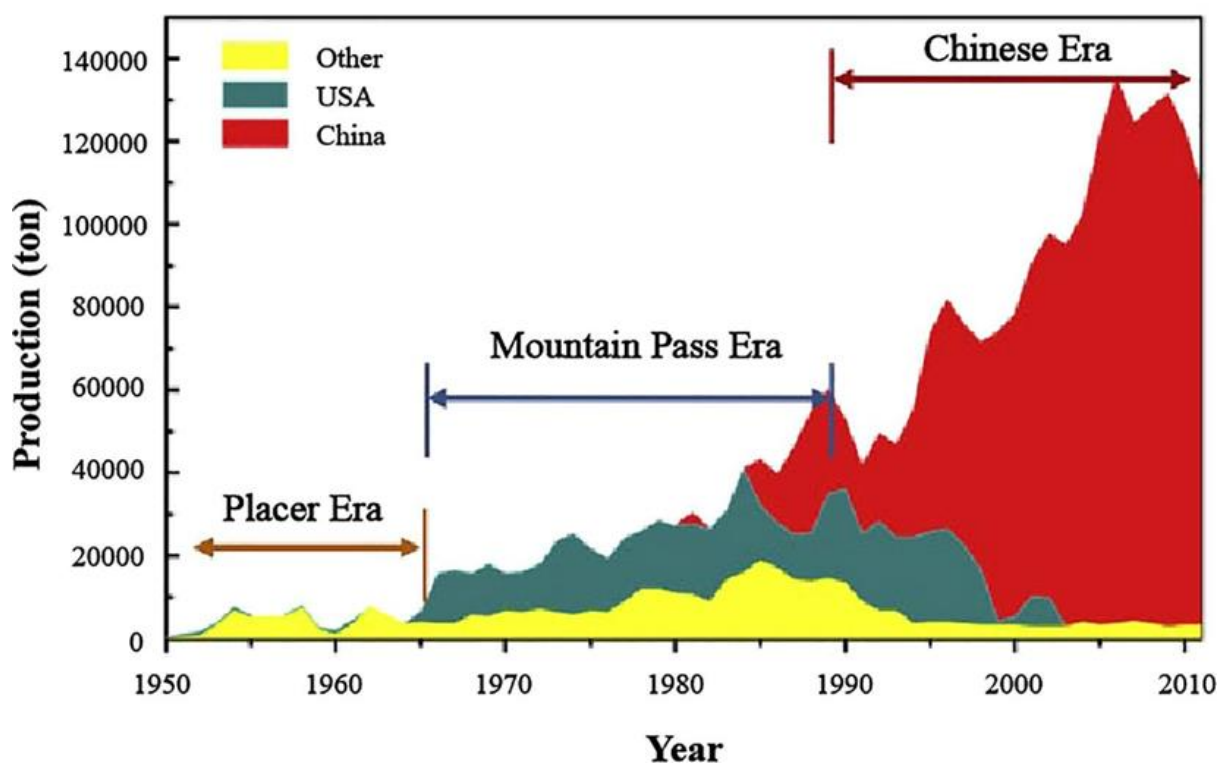


Σχ. 3.1. Σωλήνες που προέρχονται από ένα εργοστάσιο τήξης σπανίων γαιών εκτοξεύουν μολυσμένο νερό σε ένα τεράστιο φράγμα τελμάτων κοντά στο χωριό Xinguang, που βρίσκεται κοντά στα περίχωρα της πόλης Baotou στην αυτόνομη περιοχή της εσωτερικής Μογγολίας της Κίνας (Reuters 2010).

Η Κίνα ξεκίνησε να επενδύει σε καινοτόμα τεχνολογικά προϊόντα με βάση τις σπάνιες γαίες από το 1980, ως εκ τούτου η Κίνα κατάφερε να προηγηθεί κατά δύο δεκαετίες επενδύσεων στις σπάνιες γαίες καθώς οι ΗΠΑ και η Ευρώπη άργησαν να συνειδητοποιήσουν την σημαντικότητα των σπανίων γαιών (Μέλφος 2020). Με αυτό το τρόπο η Κίνα κατάφερε να δημιουργήσει ένα ισχυρό μέσο άσκησης γεωπολιτικής πίεσης

καθώς όπως αναφέρουν και οι Habib et al. (2016) το κράτος που καταφέρνει να ελέγχει τις σπάνιες γαίες μπορεί να ελέγξει την μελλοντική ανάπτυξη των υπόλοιπων κρατών.

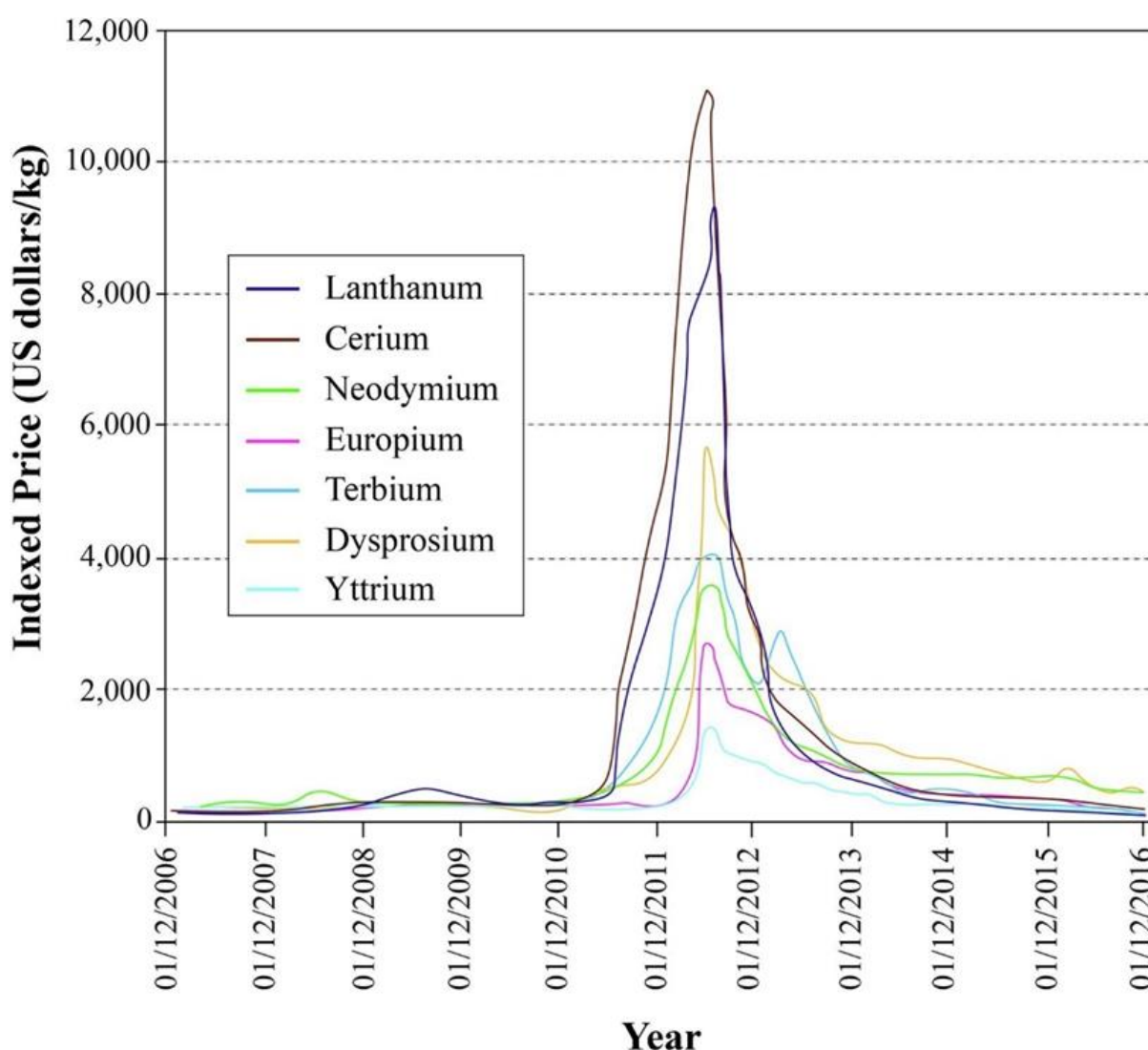
Από το 2005 έως το 2010, η Κίνα ήταν ο κυρίαρχος παραγωγός κατέχοντας το 97% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής σπανίων γαιών. Κατά την ίδια περίοδο, η κινεζική κυβέρνηση συνέχισε να συρρικνώνει τα ποσοστά των εξαγωγίμων σπανίων γαιών στον υπόλοιπο κόσμο. Η μείωση που πραγματοποιήθηκε από το 2005 έως το 2011 άγγιξε το 53% με τη σημαντικότερη μείωση να λαμβάνει χώρα από το 2009 μέχρι το 2010 (Habib and Wenzel 2014 από Habib et al. 2016). Η Κίνα μείωσε τις εξαγωγές σπανίων γαιών στον υπόλοιπο κόσμο ώστε να μειώσει την περιβαλλοντική υποβάθμιση και να δημιουργήσει ένα στρατηγικό απόθεμα σπανίων γαιών, το οποίο θα μπορέσει να εξυπηρετήσει την εγχώρια ζήτηση στο μέλλον (Humphries 2010, Hurst 2010 από Dushyantha et al. 2020). Ωστόσο, σχεδόν για μία δεκαετία κανένα κράτος δεν διαμαρτυρήθηκε για την συγκέντρωση αυτής της βρώμικης και επικίνδυνης βιομηχανίας στην ενδοχώρα της Κίνας, έως ότου οι σπάνιες χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο άσκησης πίεσης σε μια γεωπολιτική διαμάχη μεταξύ Ιαπωνίας και Κίνας στις 7 Σεπτεμβρίου του 2010.



Σχ. 3.1. Οι τάσεις της παγκόσμιας παραγωγής οξειδίων σπανίων γαιών (Long 2011 από Dushyantha et al. 2020).

Η γεωπολιτική διαμάχη έλαβε χώρα στο διαφιλονικούμενο αρχιπέλαγος Diaoyu για το Κινέζικο κράτος ή Senkaku για το Ιαπωνικό κράτος (Klinger 2018, Μέλος 2020). Στη

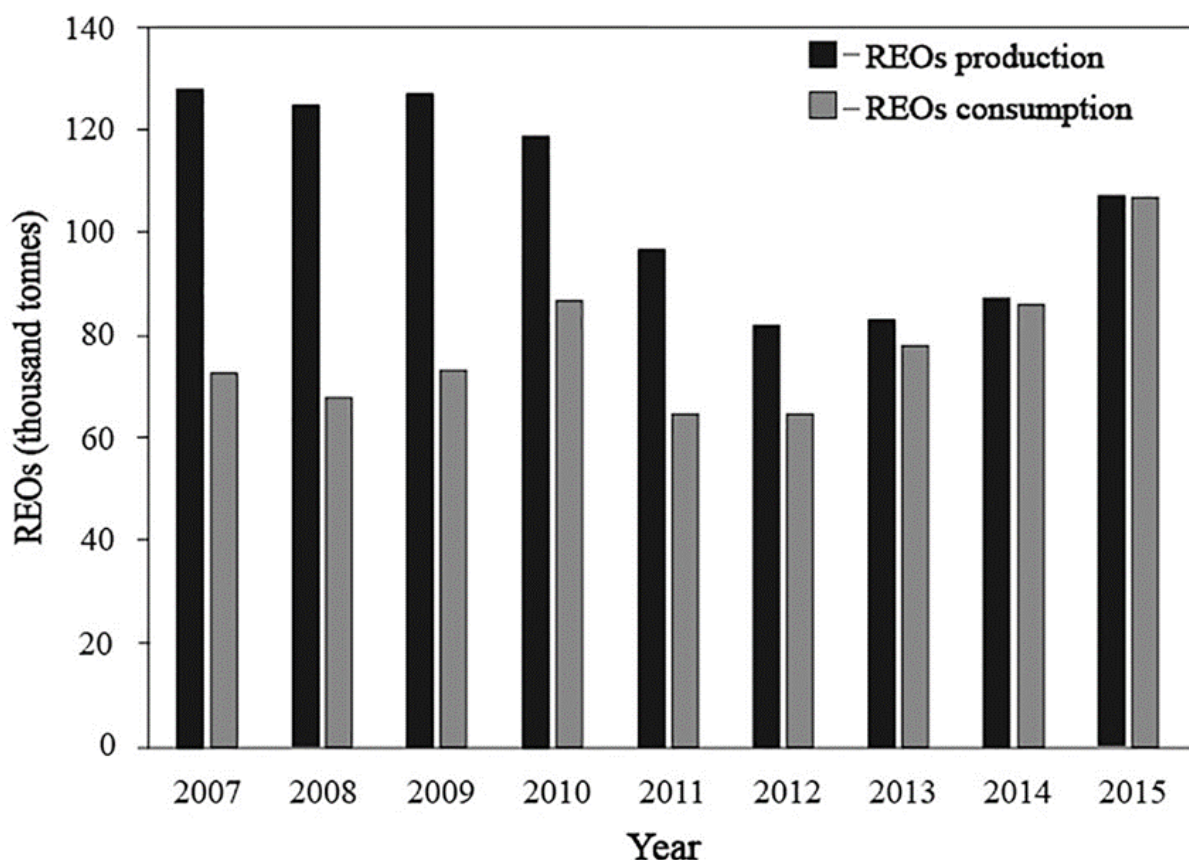
συγκεκριμένη περιοχή επικρατούν οκτώ έρημα νησιά τα οποία τα διεκδικούν η Ταιβάν, η Ιαπωνία και η Κίνα. Αφορμή για την γεωπολιτική διαμάχη αποτέλεσε ένα κινέζικο αλιευτικό σκάφος το οποίο περικυκλώθηκε από τα σκάφη της ιαπωνικής ακτοφυλακής και προσπαθώντας να διαφύγει εμβόλισε ένα από αυτά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η ιαπωνική ακτοφυλακή να συλλάβει ολόκληρο το πλήρωμα του αλιευτικού σκάφους (Μέλφος 2020). Η Κίνα θέλοντας να πιέσει την Ιαπωνία να απελευθερώσει του συλληφθέντες, σταμάτησε χωρίς καμία προειδοποίηση και αγνοώντας τους κανονισμούς του Παγκόσμιου Οργανισμού Εμπορίου τις αποστολές οξειδίων σπανίων γαιών με προορισμό την Ιαπωνία (Klinger 2018, Μέλφος 2020).



Σχ. 3.2. Οι τιμές μερικών οξειδίων σπανίων γαιών από το 2006 έως το 2016 (Eggert et al. 2016 από Dushyantha et al. 2020).

Η πολιτική της Κίνας να μειώσει τις εξαγωγές των σπανίων προκάλεσε μια παγκόσμια άνοδο των τιμών των σπανίων γαιών και δημιούργησε άγχος παγκόσμια μεταξύ

των ενδιαφερόμενων καθώς συνειδητοποίησαν ότι η σταθερότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας των σπανίων γαιών ήταν ευαίσθητη και μπορεί να παρουσιαστεί έλλειψη πρώτων υλών για την εξέλιξη της <<πράσινης>> τεχνολογίας στο μέλλον. Το Σχήμα 3.2 δείχνει τις τιμές που καταλαμβάνουν μερικά οξείδια σπανίων γαιών από το 2006 έως το 2016 και παρατηρείται έντονη αύξηση των τιμών από το 2010 έως το 2013 η οποία ευθύνεται στη γεωπολιτική διαμάχη μεταξύ Ιαπωνία και Κίνας που συνέβη το 2010 (Dushyantha et al. 2020). Ως εκ τούτου, η χρονική περίοδος από το 2010 έως το 2013 είναι γνωστή ως <<Η Κρίση των Σπανίων Γαιών>> καθώς η παγκόσμια αγορά ανταποκρίθηκε με πανικό, στη γεωπολιτική διαμάχη μεταξύ Κίνας και Ιαπωνίας, καθώς οι τιμές ορισμένων στοιχείων αυξήθηκαν κατά έως και δύο χιλιάδες τοις εκατό (Klinger 2018, Dushyantha et al. 2020). Το συγκεκριμένο γεγονός απεικονίζει την μονοπωλιακή θέση που κατέχει η Κίνα στον τομέα των σπανίων γαιών (Tse 2011, Li and Yang 2014, Voncken 2016 από Dushyantha et al. 2020).



Σχ. 3.3 Η παραγωγή και η κατανάλωση σπανίων γαιών της Κίνας από το 2007 έως το 2015 (China Industry Information Network 2007-2015, The Chinese Society of Rare Earths 2007-2015, Li and Yang 2016, Plankoon et al. 2018a από Dushyantha et al. 2020).

Επιπρόσθετα, η Κίνα σημείωσε σημαντική αύξηση κατανάλωσης σπανίων γαιών από το 2000. Μέχρι το 2000, η κινέζικη κατανάλωση σπανίων γαιών ήταν περίπου 19 χιλιάδες

τόνοι, ενώ έφτασε τον εντυπωσιακό αριθμό των 73 χιλιάδων τόνων έως το 2009 (η παγκόσμια κατανάλωση σπανίων γαιών το 2000 και το 2009 ήταν περίπου 91 και 130 χιλιάδες τόνοι, αντίστοιχα) και αυτό ισοδυναμεί με αύξηση 380% σε σύγκριση με το 2000 (Tse 2011, Fernandez 2017 από Dushyantha et al. 2020). Ως εκ τούτου, οι Κινέζοι κυριάρχησαν στην αγορά των σπανίων γαιών ως παγκόσμιοι καταναλωτές καθώς και ως παγκόσμιοι προμηθευτές. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζονται τα δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης οξειδίων σπανίων γαιών στην Κίνα από το 2007 έως το 2015 (Dushyantha et al. 2020). Επιπλέον, η Κίνα σχεδιάζει να επιταχύνει την ηλεκτρική αυτοκινητοβιομηχανία ώστε να καταφέρει να αντιμετωπίσει την έλλειψη πετρελαίου και τα περιβαλλοντικά προβλήματα μέχρι το 2030. Η προσέγγιση αυτή της Κίνας θα βασιστεί σε μεγάλο βαθμό στις σπάνιες γαίες και στις ιδιαίτερες εφαρμογές τους, το οποίο σημαίνει ότι θα αυξηθεί ακόμα περισσότερο η εσωτερική κατανάλωση σπανίων γαιών της Κίνας (Dushyantha et al. 2020).

4. ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

4.1. Η στάση της Ιαπωνίας στην κρίση των σπανίων γαιών

Μέσα σε μερικές βδομάδες από τη διακοπή των εξαγωγών σπανίων γαιών από την Κίνα προς την Ιαπωνία, η ιαπωνική κυβέρνηση δεσμεύτηκε να υποστηρίξει τη βιομηχανία των σπανίων γαιών στην Ιαπωνία με ειδική χρηματοδότηση 100 δισεκατομμυρίων γιεν τα οποία ισοδυναμούν με 1,2 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ, εκ των οποίων ένα ποσοστό προορίζονταν για την υποστήριξη της εξόρυξης σπανίων γαιών εκτός Κίνας (Hayashi και Areddy 2010 από Cox και Kynicky 2018). Το μέγεθος αυτής της χρηματοδότησης και το γεγονός ότι η ιαπωνική κυβέρνηση δεσμεύτηκε να υποστηρίξει άμεσα τη βιομηχανία των σπάνιων γαιών υποδεικνύει την ανάγκη σταθερού εφοδιασμού σπανίων γαιών στην Ιαπωνία (Cox και Kynicky 2018). Η εντατικοποίηση αναζήτησης κοιτασμάτων οδήγησε την Ιαπωνία να ανακοινώσει το 2018 ότι έχει ανακαλύψει ένα τεράστιο υποθαλάσσιο κοιτάσματα σπανίων γαιών εντός των χωρικών υδάτων της στον Ειρηνικό, του οποίου τα αποθέματα θα μπορούσαν να κλονίσουν το μονοπώλιο της Κίνας στην αγορά των σπανίων γαιών (Μέλφος 2020). Επιπρόσθετα, μετά την παύση των εξαγωγών σπανίων γαιών από την Κίνα προς την Ιαπωνία το Τόκυο και το Ανόι υπέγραψαν συμφωνία συνεργασίας η οποία είχε ως στόχο να αναπτυχθεί ο εφοδιασμός σπανίων γαιών της Ιαπωνίας και ως αντάλλαγμα η Ιαπωνία θα βοηθούσε το Βιετνάμ να κατασκευάσει τον πρώτο του πυρηνικό σταθμό παραγωγής ενέργειας (BBC News 2010 από Massari και Ruberti 2013).

4.2. Η στάση της Αμερικής στην κρίση των σπανίων γαιών

Το Δεκέμβριο του 2010, δηλαδή μερικούς μήνες μετά την απαγόρευση της Κίνας των εξαγωγών σπανίων γαιών προς την Ιαπωνία, το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ δημοσίευσε την έκθεση με τίτλο Στρατηγική Κρίσιμων Υλικών (Critical Materials Strategy) (DOE 2010 από Cox και Kynicky 2018). Ο σκοπός της συγκεκριμένης έκθεσης ήταν η μελέτη των μετάλλων των σπανίων γαιών και άλλων υλικών και ο ρόλος τους στην οικονομία της πράσινης ενέργειας. Το συγκεκριμένο έγγραφο αποτέλεσε τη βάση των διαγραμμάτων και γραφημάτων των μικρών εταιρειών εξόρυξης για να πείσουν ενδεχόμενους επενδυτές για το πόσο κρίσιμες ήταν οι σπάνιες γαίες για τη σύγχρονη τεχνολογία καθώς και για τη παγκόσμια εφοδιαστική αλυσίδα. Η συγκεκριμένη έκθεση επιβεβαίωσε την κρίσιμη σημασία των επενδύσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν στην βιομηχανία των σπανίων γαιών (Cox και Kynicky 2018).

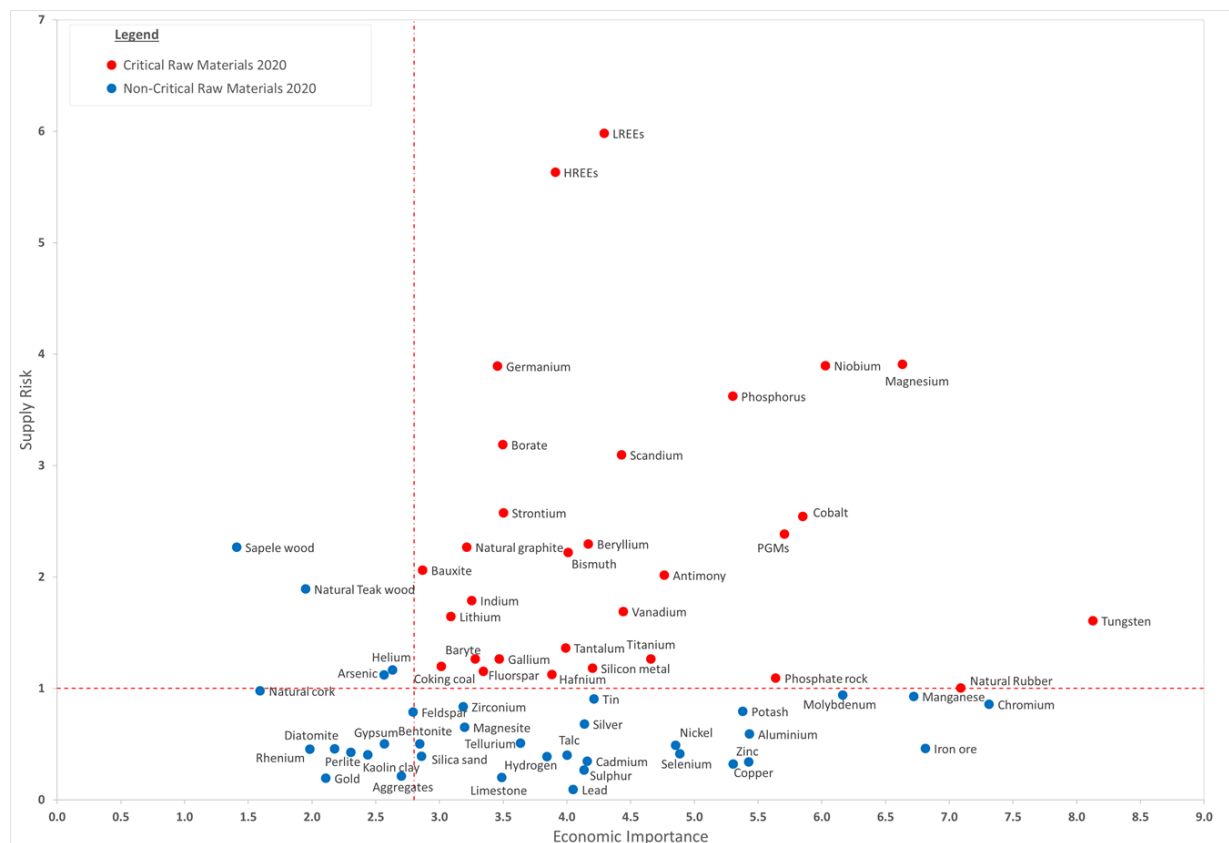
Το κογκρέσο μέσω του Νόμου περί Εθνικής Άμυνας (NDAA) για το οικονομικό έτος 2011 εξουσιοδότησε στο Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ (DOD) να εκτιμήσει εάν κάποιες από τις σπάνιες γαίες αποτελούν κρίσιμο συστατικό για την παραγωγή, την υποστήριξη, ή την λειτουργία σημαντικών στρατιωτικών εξοπλισμών των ΗΠΑ (NDAA 2011 από Cox και Kynicky 2018). Εν τέλει, το συμπέρασμα της έκθεσης του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ είναι ότι η χρήση σπανίων γαιών για την αμυντική βιομηχανία αντιπροσωπεύουν ένα μικρό κλάσμα της συνολικής κατανάλωσης σπανίων γαιών των ΗΠΑ (DOD 2010 από Cox και Kynicky 2018). Ωστόσο, η συγκεκριμένη έκθεση δεν αποτέλεσε την ώθηση που έψαχναν οι μικρές εταιρείες εξόρυξης (Cox και Kynicky 2018).

4.3. Η στάση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην κρίση των σπανίων γαιών

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2010 χαρακτήρισε, από κοινού με τα κράτη μέλη και τους ενδιαφερόμενους, 14 πρώτες ύλες ως κρίσιμης σημασίας, περιλαμβάνοντας και τις σπάνιες γαίες, και παράλληλα επεξεργάστηκε μια καινοτόμο, διαφανή και ρεαλιστική μεθοδολογική προσέγγιση για τον καθορισμό του κρίσιμου χαρακτήρα ορισμένων πρώτων υλών (Critical raw materials for the EU 2010 από EU Commission 2011). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει δεσμευτεί να ενημερώνει τον κατάλογο των κρίσιμων πρώτων υλών τουλάχιστον κάθε 3 χρόνια για να αντικατοπτρίζει την παραγωγή, την αγορά και τις τεχνολογικές εξελίξεις. Στον τέταρτο κατάλογό των κρίσιμων ορυκτών πρώτων υλών που δημοσιεύθηκε το 2020

εμφανίζονται πλέον 30 ορυκτά τα οποία χαρακτηρίζονται ως κρίσιμα (European Commission 2020).

Επιπρόσθετα, η Ευρωπαϊκή Ένωση προώθησε μέσα αναπτυξιακού χαρακτήρα που αφορούν τις εξορύξεις. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε χρηματοδότηση έργων από το Ταμείο Υποδομών ΕΕ-Αφρικής, μέσω δανείων από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων για δραστηριότητες εξόρυξης καθώς και μέσω του 7^{ου} Προγράμματος Πλαισίου για την Έρευνα και την Ανάπτυξη για γεωλογικές μελέτες. Ακόμη, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω της «Πρωτοβουλίας για τη Διαφάνεια των Εξορυκτικών Βιομηχανιών» δημιούργησε υγιές επενδυτικό περιβάλλον για τις εταιρείες εξόρυξης επίσης κατέβαλλε προσπάθεια για την προώθηση της σωστής διακυβέρνησης σε θέματα φορολογίας (COM 2010 163 από EU Commission 2011).



Σχ. 4.1. Σχήμα που καταγράφονται οι κρίσιμες ορυκτές πρώτες ύλες (κόκκινο χρώμα) καθώς και οι μη κρίσιμες ορυκτές ύλες (μπλε χρώμα) ανάλογα με την οικονομική τους αξία και τον κίνδυνο προσφοράς (Raw Material Information System 2020).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έλαβε σημαντικά μέτρα και στον τομέα της έρευνας και της καινοτομίας. Πιο συγκεκριμένα δημιούργησε το ερευνητικό πρόγραμμα ASTER το οποίο στοχεύει στην έρευνα των ευρωπαϊκών αποθεμάτων σπανίων γαιών καθώς και το ερευνητικό πρόγραμμα EURARE το οποίο στοχεύει στην αξιολόγηση των πιθανών πόρων σπανίων

γαιών στην Ευρώπη και στην ανάπτυξη νέων βιώσιμων μεθόδων επεξεργασίας των κοιτασμάτων σπανίων γαιών. Ακόμη, έλαβε μέτρα για να βελτιώσει το γνωσιακό υπόβαθρο των διαθέσιμων και νέων κοιτασμάτων πολλών σημαντικών πρώτων υλών. Επιπρόσθετα, χρηματοδότησε έρευνες που σχετίζονται με προηγμένες υπόγειες τεχνολογίες «έξυπνης» εξόρυξης, υποκατάστατα πρώτων υλών στρατηγικής σημασίας όπως για παράδειγμα των σπανίων γαιών μέσω του δικτύου ERA-NET. Εν κατακλείδι, η Ευρωπαϊκή Ένωση συνεχίζει να υποστηρίζει την ανάπτυξη του σχεδίου ProMine από το οποίο θα προκύψει η πρώτη πανευρωπαϊκή βάση δεδομένων για τους ορυκτούς πόρους μέσω της οποίας θα διευκολυνθεί η αποτίμηση της αξίας των ορυκτών πόρων της Ευρώπης..

4.4. Η ανάγκη υποκατάστατων σπανίων γαιών

Δεδομένου ότι τα πρωτογενή αποθέματα σπανίων γαιών είναι πεπερασμένα και ο εφοδιασμός τους διατρέχει το κίνδυνο της αβεβαιότητας, η παραγωγή και η χρήση των σπανίων γαιών πρέπει να διασφαλιστούν με βιώσιμο τρόπο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας την ποσότητα των σπανίων γαιών σε προϊόντα μίας χρήσης και με την επαναχρησιμοποίηση προϊόντων σπανίων γαιών ως δευτερεύουσα πηγή σπανίων γαιών καθώς και με την αναζήτηση βιώσιμων εναλλακτικών ή υποκατάστατων σπανίων γαιών (Atwood 2013 από Dushyantha et al. 2020). Ορισμένα ερευνητικά κέντρα ασχολούνται ακόμη και με την εύρεση τεχνητών υποκατάστατων σπανίων γαιών. Για παράδειγμα, το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ χρηματοδοτεί μέσω του ερευνητικού προγράμματος Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) πολλά καινοτόμα ερευνητικά σχέδια που αφορούν υποκατάστατα των σπανίων γαιών. Ένα από αυτά σχετίζεται με το πανεπιστήμιο του Delaware, την Hitachi και τη GE οι οποίοι συνεργάστηκαν για τη δημιουργία νάνο-συνθετικών υλικών τα οποία θα αποτελέσουν την βάση για την δημιουργία ισχυρών μαγνητών χωρίς να γίνει χρήση σπανίων γαιών (Bourzac 2011 από Massari και Ruberti 2013). Ακόμη, μια ομάδα Ιαπώνων ερευνητών, με επικεφαλής τον Hiroshi Kitagawa του Πανεπιστημίου του Κιότο, έχει αναπτύξει μια διαδικασία που επιτρέπει την παραγωγή, αναμιγνύοντας ρόδιο και άργυρο, ενός μετάλλου παρόμοιο με το παλλάδιο, το οποίο μπορεί να αντικαταστήσει τις σπάνιες γαίες στην κατασκευή καταλυτών (Physorg Inc. 2011 από Massari και Ruberti 2013). Κατά τη διάρκεια της κρίσης των σπανίων γαιών, λόγω της έλλειψης διαθεσιμότητας ή των υπερβολικών τιμών, πολλές εταιρίες αποστασιοποιήθηκαν από τη χρήση σπανίων γαιών με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, η General Electric

ήταν γνωστό πως πραγματοποίησε κρίσιμες αξιολογήσεις για την μείωση της εξάρτησης της σε σπάνιες γαίες καθώς επίσης και η Nissan κατάφερε να μειώσει τη χρήση δυσπροσίου κατά 40% σε ένα ηλεκτρικό κινητήρα που ανέπτυξε το 2012 (Dushyantha et al. 2020). Ωστόσο, υπάρχουν πολύ λίγες αποτελεσματικές εναλλακτικές λύσεις έναντι των σπανίων γαιών (Massari και Ruberti 2013).

4.5. Το παράνομο εμπόριο σπανίων γαιών της Κίνας

Το παράνομο εμπόριο σπανίων γαιών αυξάνεται με σημαντικό ρυθμό από το 2007. Αυτό οφείλεται κυρίως στους επιβληθέντες περιορισμούς της Κινέζικης κυβέρνησης σχετικά με το εμπόριο των σπανίων γαιών. Από την άλλη πλευρά η ακριβής ανίχνευση της παράνομης εξορυκτικής δραστηριότητας και των παράνομων εξαγωγίμων ποσοτήτων σπανίων γαιών είναι ένα δύσκολο εγχείρημα και ως εκ τούτου διάφορα πρακτορεία εκτιμούν διαφορετικές ποσότητες (Ilankoon et al. 2018a από Dushyantha et al. 2020). Ωστόσο, το παράνομο εμπόριο σπανίων γαιών εκτιμάται με βάση τις ποσοτικές διαφορές των εξαγωγίμων και εισαγωγίμων προϊόντων (Mancheri 2016 από Dushyantha et al. 2020). Οι παράνομες δραστηριότητες της Κίνας που σχετίζονται με το εμπόριο των σπανίων γαιών εντοπίζονται κυρίως σε νότιο τμήμα της χώρας και συγκεκριμένα σε δύο επαρχίες γνωστές ως Jiangxi και Guangdong. Στις συγκεκριμένες επαρχίες οι παράνομες δραστηριότητες αυξήθηκαν με ραγδαίους ρυθμούς από το 2007 έως το 2015, με τις ποσότητες που προήλθαν από παράνομη δραστηριότητα να αποτελούν το 25% των εξαγωγίμων ποσοτήτων σπανίων γαιών της Κίνας. Κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης περιόδου, το 59 έως 65% των βαριών σπανίων γαιών καθώς και το 14 έως 16% των ελαφριών σπανίων γαιών προήλθαν από παράνομες δραστηριότητες στην Κίνα (Nguyen and Imholte 2016 από Dushyantha et al. 2020). Η άνθηση της παράνομης παραγωγής σπανίων γαιών προκάλεσε πτώση των τιμών των σπανίων γαιών, γεγονός το οποίο ανάγκασε τους νόμιμους προμηθευτές να προσφέρουν χαμηλές τιμές ώστε να είναι ανταγωνιστικοί. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες εταιρείες εξόρυξης σπανίων γαιών αντιμετώπισαν σημαντικά οικονομικά προβλήματα λόγω της πτώσης των τιμών των σπανίων γαιών (Chang and Hui 2015 από Dushyantha et al. 2020).

Η κινεζική κυβέρνηση πλέον περιορίζει και ελέγχει την παράνομη παραγωγή και το λαθρεμπόριο των σπανίων γαιών μέσω ρυθμίσεων που επέβαλε στην αγορά. Επιπρόσθετα, το κινεζικό υπουργείο Βιομηχανίας και Τεχνολογίας Πληροφοριών ανέλαβε πρωτοβουλίες τον Οκτώβριο του 2016 για τον περιορισμό της παράνομης παραγωγής, επεξεργασίας και

συναλλαγής σπανίων γαιών που λαμβάνει χώρα στην Κίνα (Hankoon et al. 2018a, Mancheri et al., 2019a από Dushyantha et al. 2020). Στο ίδιο μήκος κύματος αποφάσισε να κυμανθεί η αυστραλιανή εταιρεία εξόρυξης σπανίων γαιών Lynas Corp καθώς σκοπεύει να εγκαταστήσει ένα σύστημα ανίχνευσης της προέλευσης των προϊόντων (Jamasmie, 2016a, Paul and Stanway, 2016 από Dushyantha et al. 2020).

5. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΓΕΩΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Η ανακύκλωση μετάλλων, ιδίως των λεγόμενων κρίσιμων μετάλλων όπως οι σπάνιες γαίες έχει αποκτήσει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια, όπου ορισμένες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στον ρόλο της ανακύκλωσης για τη μείωση του γεωπολιτικού κινδύνου εφοδιασμού (Habib 2015, Habib και Wenzel 2014, 2016 από Habib et al. 2016). Θεωρητικά, η ανακύκλωση μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στη μείωση του μελλοντικού γεωπολιτικού κινδύνου προσφοράς μετάλλων επειδή σε αντίθεση με την παροχή σπανίων γαιών μέσω της εξόρυξης, η παροχή σπανίων γαιών που προέρχεται από την δραστηριότητα της ανακύκλωσης δεν καθορίζεται γεωγραφικά στη μορφή ορυκτών που περιέχουν σπάνιες γαίες και συναντώνται σε συγκεκριμένους γεωλογικούς σχηματισμούς κατά μήκος του φλοιού της γης. Με άλλα λόγια, χώρες όπου δεν έχουν αποθέματα σπανίων γαιών θα έχουν τη δυνατότητα να παράγουν σπάνιες γαίες (Habib et al. 2016). Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στον κλονισμό του μονοπώλιού που έχει επιτύχει η Κίνα στην αγορά των σπανίων γαιών.

Ωστόσο, εκτός από το μονοπώλιο της Κίνας επικρατεί ένα ακόμη πολύ σημαντικό ζήτημα στην αγορά των σπανίων γαιών, το οποίο αφορά την απώλεια ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης σπανίων γαιών καθώς η πλειονότητα της παραγωγής των σπανίων γαιών κυριαρχείται από το λανθάνιο και το δημήτριο ενώ επικρατεί μεγάλη ανάγκη για νεοδύμιο και δυσπρόσιο στην αγορά (Binnemans and Jones 2015, Elshkaki and Graedel 2014 από Jowwit et al. 2018). Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια κατάσταση όπου θα επικρατεί μαζική παραγωγή λανθανίου και δημητρίου ενώ η ζήτηση για νεοδύμιο και δυσπρόσιο για χρήση σε τελικά προϊόντα όπως μαγνήτες ή μπαταρίες ενδέχεται να μην μπορεί να υποστηριχτεί από την εξορυκτική βιομηχανία. Ωστόσο, αυτό το ζήτημα μπορεί τουλάχιστον να ξεπεραστεί εν μέρη με την ανακύκλωση καθώς τα προϊόντα που θα ανακυκλώνονταν περιέχουν κυρίως νεοδύμιο και δυσπρόσιο και λιγότερο λανθάνιο και

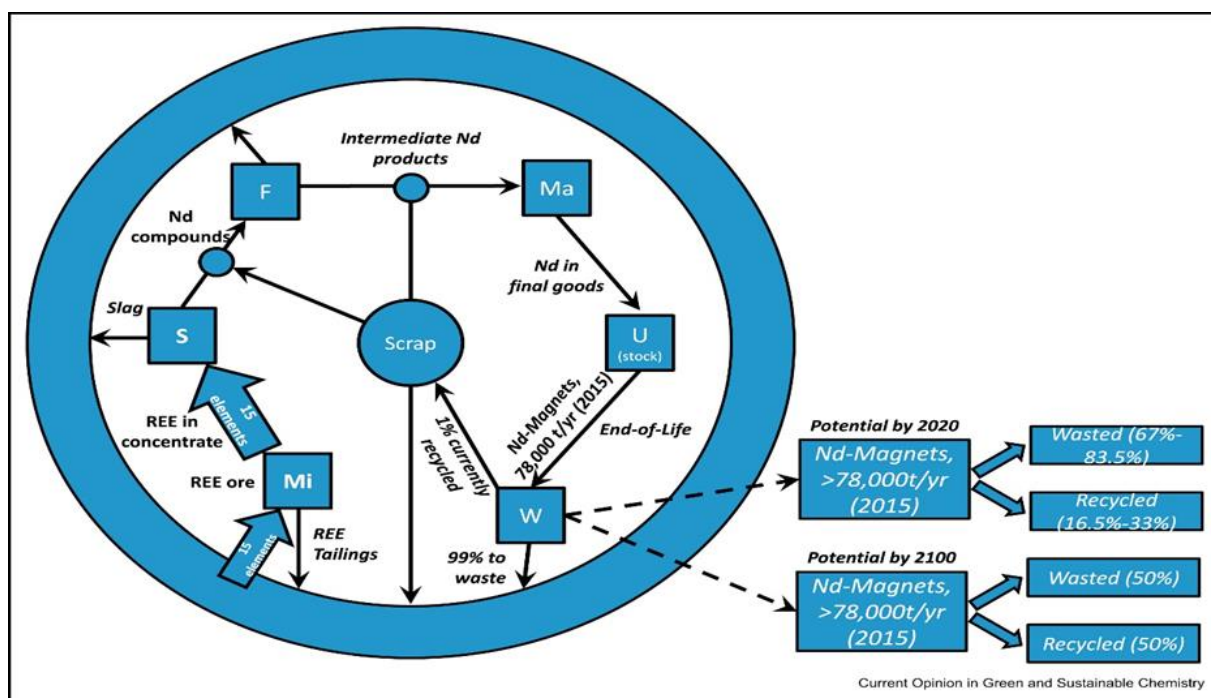
δημήτριο (Yang et al. 2017 Jowwit et al. 2018). Ένα από τα κύρια εμπόδια στην ανακύκλωση αυτών των στοιχείων είναι το γεγονός ότι η ποσότητα των σπανίων γαιών που επικρατούν στα τελικά προϊόντα σπανίων γαιών κυμαίνεται από mg μέχρι και μερικά κιλά (Binnemans et al. 2013 από Jowwit et al. 2018). Το παραπάνω γεγονός, σε συνδυασμό με την δυσκολία που επικρατεί στον διαχωρισμό των σπανίων γαιών μεταξύ τους με στόχο την παραγωγή καθαρών μεμονωμένων στοιχείων, την μεγάλη διάρκεια ζωής ορισμένων τελικών προϊόντων, όπως για παράδειγμα οι μόνιμοι μαγνήτες στις ηλεκτρικές τεχνολογίες καθώς επίσης και μια ποικιλία άλλων γενικότερων λόγων ευθύνονται για το γεγονός ότι συνήθως μόνο περίπου το 1% των σπανίων γαιών ανακυκλώνεται από τελικά προϊόντα, ενώ τα υπόλοιπα αποβάλλονται και καταλήγουν σε απόβλητα (Eggert et al. 2016 από Jowwit et al. 2018). Η ανακύκλωση που λαμβάνει χώρα γενικά αφορά τις σπάνιες γαίες που συναντώνται μέσα στους μόνιμους μαγνήτες, λαμπτήρες φωσφόρου, μπαταρίες και σε καταλύτες (Rombach και Friedrich 2014 από Jowwit et al. 2018). Ωστόσο, σημειώνονται σημαντικοί πρόοδοι στον τομέα της ανακύκλωσης (Jowwit et al. 2018).

Εφαρμογή σπανίων γαιών	Εκτιμώμενη προμήθεια σπανίων γαιών το 2020 (τόνοι)	Εκτιμώμενος μέσος όρος διάρκειας ζωής (έτη)	Εκτιμώμενα παλιά απορρίμματα σπανίων γαιών το 2020 (τόνοι)	Απαισιόδοξο σενάριο: ανακυκλωμένες σπάνιες γαίες το 2020 (τόνοι)	Αισιόδοξο σενάριο: ανακυκλωμένες σπάνιες γαίες το 2020 (τόνοι)
Μαγνήτες	300.000	15	20.000	3.300	6.600
Λαμπτήρες Φωσφόρου	25.000	6	4.167	1.333	2.333
Μπαταρίες Νικελίου(NiMH)	50.000	10	5000	1.000	1.750
Συνολικά	375.000		29.167	5.633	10.683

Σχ. 5.1. Δυνατότητα ανακύκλωσης σπανίων γαιών (Binnemans et al. 2013 από Jowwit et al. 2018 τροποποιημένο από Σπύρο Φράγκου).

Η ανακύκλωση που λαμβάνει χώρα κυρίως μπορεί να χωριστεί σε τρεις τύπους, πιο συγκεκριμένα διακρίνεται στην άμεση ανακύκλωση βιομηχανικών αποκριμάτων ή υπολειμμάτων, στην αστική εξόρυξη προϊόντων που βρίσκονται στο τέλος του κύκλου ζωής τους και στην ανακύκλωση στερεών και υγρών βιομηχανικών αποβλήτων (Li et al. 2017 από Jowwit et al. 2018). Μια σκιαγράφηση του δυναμικού ανακύκλωσης των σπανίων γαιών πραγματοποιείται στο Σχήμα 5.1 (Blanchette και Lund 2016 από Jowwit et al. 2018),

αποδεικνύοντας τη σημαντική ποσότητα των σπάνιων γαιών που θα μπορούσε να ανακυκλωθεί από μαγνήτες, μπαταρίες νικελίου (NiMH) και λαμπτήρες φωσφόρου (Jowwit et al. 2018). Η ροή των υλικών των σπάνιων γαιών περιγράφεται επίσης στο Σχήμα 5.2, το οποίο χρησιμοποιεί το νεοδύμιο σε μαγνήτες ως παράδειγμα που απεικονίζει την τρέχουσα ανακύκλωση καθώς και μελλοντικές δυνατότητες.



Σχ. 5.2. Διάγραμμα κυκλικής ροής του νεοδυμίου, που δείχνει τον κύκλο του νεοδυμίου από την εξόρυξη (Mi) στην διεξοδική βελτίωση και στο διαχωρισμό του νεοδυμίου από τις υπόλοιπες σπάνιες γαίες (S), μετά ακολουθεί η κατασκευή προϊόντων που φέρουν νεοδύμιο (F) και η ενσωμάτωση των προϊόντων αυτών που φέρουν νεοδύμιο σε τελικά προϊόντα κατά την κατασκευή (Ma), στη συνέχεια ακολουθεί η χρήση αυτών των τελικών προϊόντων (U) και τέλος υπάρχει η τελική διάθεση αυτών των τελικών προϊόντων σε απόβλητα (W) στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους, με το νεοδύμιο που προκύπτει είτε να αποβάλλεται στα απόβλητα είτε να ανακυκλώνεται. Εμφανίζονται δύο σενάρια ανακύκλωσης, στην πρώτη περίπτωση ανακυκλώνεται πολύ λίγη ποσότητα νεοδυμίου και στη δεύτερη περίπτωση παρουσιάζεται η μελλοντική ανακύκλωση νεοδυμίου έως το 2100 όπου ένα σημαντικό ποσοστό νεοδυμίου μπορεί να ανακυκλωθεί (Du και Graedel 2011, Binnemans et al. 2015, Dai et al. 2016, Sekine et al. 2017, Yang et al. 2017 από Jowwit et al. 2018).

Η πλειονότητα της τρέχουσας ανακύκλωσης των σπάνιων γαιών προέρχεται από μόνιμους μαγνήτες, αλλά ακόμα και σε αυτή τη περίπτωση γίνεται λόγος για αρκετά χαμηλές ποσότητες. Η ανάκτηση των σπάνιων γαιών από τους μόνιμους μαγνήτες γίνεται κυρίως με παραδοσιακές τεχνικές υδρομεταλλουργικής και πυρομεταλλουργικής ανάκτησης (Binnemans et al. 2013 από Jowwit et al. 2018). Η κατασκευή μαγνητών νεοδυμίου χρησιμοποιεί έναν αριθμό εργασιών αλέσματος, κοπής και λείανσης που μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια σχεδόν του ενός τρίτου των σπάνιων γαιών που χρησιμοποιήθηκαν και να

καταλήξουν ως απορρίμματα κατασκευής (Binnemans et al. 2013 από Jowwit et al. 2018). Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση μαγνητών στην τρέχουσα μορφή τους. Ωστόσο, αυτό είναι συνήθως δυνατό μόνο για μεγαλύτερους μαγνήτες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα ή ανεμογεννήτριες που εμφανίζονται λιγότερο συχνά στις ροές αποβλήτων λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής τους (Blanchette και Lund 2016 από Jowwit et al. 2018). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού αποτελούν την πολυτιμότερη πηγή σπανίων γαιών. Η προεπεξεργασία των αποβλήτων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξοπλισμών περιλαμβάνει την αυτόματη ταξινόμηση των μαγνητών νεοδυμίου, που θα οδηγήσει σε θρυμματισμένα μαγνητικά συστατικά. Αν και η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί αποτελεσματικά να διαχωρίσει τις σπάνιες γαίες σε μία ροή αποβλήτων, οι προκύπτουσες συγκεντρώσεις σπανίων γαιών είναι συνήθως χαμηλές και στις περισσότερες περιπτώσεις η συγκεκριμένη προσέγγιση οδηγεί στη μόλυνση της συγκεκριμένης ροής αποβλήτων που περιέχονται οι σπάνιες γαίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ανάκτηση των σπανίων γαιών από τη συγκεκριμένη ροή αποβλήτων (Ueberschaar et al. 2017 από Jowwit et al. 2018).

Η χρήση των λαμπτήρων φθορισμού έχει αυξηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών καθώς είναι ενεργειακά αποδοτικοί και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής οδηγώντας σε αύξηση ζήτησης των φωσφορικών σπανίων γαιών (Van Loy et al. 2017 από Jowwit et al. 2018). Τα τυπικά απόβλητα λαμπτήρων φθορισμού περιέχουν παραπάνω από 20% σπάνιες γαίες κατά βάρος σε μορφή λευκών, ερυθρών, πράσινων και μπλε φωσφόρων, οι οποίοι περιέχουν διαφορετικές ποσότητες σπανίων γαιών (Binnemans et al. 2013, Binnemans και Jones 2014, Van Loy et al. 2017 από Jowwit et al. 2018). Οι προσεγγίσεις ανακύκλωσης περιλαμβάνουν την άμεση επαναχρησιμοποίηση, τον μεμονωμένο διαχωρισμό των φωσφορικών συστατικών και τέλος την χημική εξαγωγή των σπανίων γαιών (Kumari et al. 2018 από Jowwit et al. 2018). Η πλειοψηφία της έρευνας μέχρι σήμερα έχει επικεντρωθεί στην εξαγωγή υτρίου και ευρωπίου από ερυθρούς φωσφόρους καθώς αυτά τα στοιχεία είναι σχετικά εύκολο να ανακτηθούν και έχουν υψηλή αξία (Van Loy et al. 2017 από Jowwit et al. 2018). Ωστόσο, οι πράσινοι φώσφοροι που φέρουν λανθάνιο, δημήτριο και τέρβιο είναι επίσης ένας ελκυστικός στόχος για μελλοντική ανακύκλωση, αν και αυτοί οι φώσφοροι είναι δυσκολότερο να διαλυθούν (Rorob et al. 2012, Wu et al. 2014, Van Loy et al. 2017 από Jowwit et al. 2018). Οι Van Loy et al. (2017) (από Jowwit et al. 2018) τονίζουν πως η μελλοντική έρευνα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη αποτελεσματικών και αποδοτικών μεθόδων για την ανάκτηση σπανίων γαιών από τους πράσινους φωσφόρους.

Οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται εκτενώς σε καταλύτες για την πυρόλυση των υδρογονανθράκων και περιέχουν 3,5% λανθάνιο κατά βάρος καθώς και μικρότερες ποσότητες δημητρίου, νεοδυμίου και πρασεοδυμίου. Υπήρξε πολύ μικρό ενδιαφέρον μέχρι σήμερα για την ανάκτηση σπανίων γαιών μέσω της ανακύκλωσης από τους συγκεκριμένους καταλύτες, με τις περισσότερες έρευνες να επικεντρώνονται στην έκπλυση με οξύ (Binnemans et al. 2013 από Jowwit et al. 2018). Αυτό μπορεί να σχετίζεται με το γεγονός ότι οι σπάνιες γαίες στους καταλύτες πυρόλυσης υδρογονανθράκων είναι χαμηλής αξίας καθιστώντας ασαφές εάν η ανακύκλωση των σπανίων γαιών στους συγκεκριμένους καταλύτες είναι οικονομικά βιώσιμη (Weng et al. 2015 από Jowwit et al. 2018).

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου (NiMH) αποτελούνται περίπου σε ποσοστό 10% από σπάνιες γαίες (Binnemans et al. 2013, Ueberschaar et al. 2017 από Jowwit et al. 2018). Μέχρι πρόσφατα, η ανακύκλωση των συγκεκριμένων μπαταριών αποσκοπούσε στην ανάκτηση του νικελίου με τις σπάνιες γαίες να χάνονται (Muller και Friedrich 2006, Binnemans et al. 2013 από Jowwit et al. 2018). Ωστόσο, οι σπάνιες γαίες στις συγκεκριμένες μπαταρίες θα μπορούσαν ενδεχομένως να ανακυκλωθούν χρησιμοποιώντας τεχνικές υδρομεταλλουργικές ή πυρομεταλλουργικές ανάκτησης αν και οι δύο προσεγγίσεις βρίσκονται σε πρώιμα στάδια (Binnemans et al. 2013 από Jowwit et al. 2018). Εν τέλει, οι Sommer et al. (2014) (από Jowwit et al. 2018) αναφέρουν ότι τα χαμηλά ποσοστά συλλογής μπαταριών είναι ένας σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας για την μελλοντική ανάκτηση σπανίων γαιών.

5.1. Μελλοντικές εξελίξεις στην ανακύκλωση των σπανίων γαιών

Οι μελλοντικές προοπτικές της ανακύκλωσης των σπανίων γαιών σχετίζονται άμεσα με τον τύπο του υλικού που ανακυκλώνεται και έχει πραγματοποιηθεί σημαντική εργαστηριακή έρευνα η οποία αποσκοπεί στην ανάπτυξη πιθανών επεκτάσιμων προσεγγίσεων που θα επιτρέψουν τη διεύρυνση του φάσματος της ανακύκλωσης των σπανίων γαιών. Ωστόσο, η ανακύκλωση των σπανίων γαιών απαιτεί επί του παρόντος ανάπτυξη αποτελεσματικών υποδομών συλλογής (Jowwit et al. 2018). Ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα που εμποδίζει τις μελλοντικές εξελίξεις στην ανακύκλωση των σπανίων γαιών είναι η έλλειψη οικονομικά αποδοτικών μεθόδων για τον καθαρισμό των μειγμάτων που προκύπτουν από απόβλητα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξοπλισμών. Μερικές πρόσφατες εξελίξεις στην έρευνα κατάφεραν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την

καταπολέμηση του συγκεκριμένου ζητήματος (Jowwit et al. 2018). Για παράδειγμα, οι Bogart et al. (2015) και οι Bogart et al. (2016) (από Jowwit et al. 2018) ανέπτυξαν μια οργανική ένωση που θα μπορούσε να συνδεθεί με κατιόντα σπανίων γαιών, επιτρέποντας το σχηματισμό διαφορετικών ενώσεων για τις ελαφριές σπάνιες γαίες και για τις βαριές σπάνιες γαίες, με τις ελαφριές σπάνιες γαίες να σχηματίζουν διμερείς συσσωματώσεις ενώ οι ενώσεις των βαριών σπανίων γαιών δεν συσσωματώνονται. Με τον παραπάνω τρόπο μπορεί να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικός διαχωρισμός μεταξύ των ελαφριών και των βαριών σπανίων γαιών (Bogart et al. 2015, Bogart et al. 2016 από Jowwit et al. 2018). Η βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου διαχωρισμού επέτρεψε τον σχηματισμό συγκεκριμένων ζευγών σπανίων γαιών που είναι χρήσιμα στη βιομηχανία, όπως για παράδειγμα τα ζευγάρια νεοδυμίου-δυσπροσίου και ευρωπίου-υττρίου που χρησιμοποιούνται ευρέως στους μόνιμους μαγνήτες και σε λαμπτήρες φθορισμού (Jowwit et al. 2018).

Επιπρόσθετα, αρκετές εταιρείες έχουν ξεκινήσει να δραστηριοποιούνται έντονα στο χώρο της ανακύκλωσης των σπανίων γαιών. Για παράδειγμα η εταιρεία Dowa Holdings έχει κατασκευάσει στην Kosaka της Ιαπωνίας ένα εργοστάσιο ανακύκλωσης το οποίο είναι υπεύθυνο για την τήξη παλαιών ηλεκτρονικών συσκευών που προέρχονται από ολόκληρη την Ιαπωνία καθώς και από τον υπόλοιπο κόσμο και μέσω της τήξης πραγματοποιείται η ανάκτηση των σπανίων γαιών (Tabuchi 2010 από Massari και Ruberti 2013).

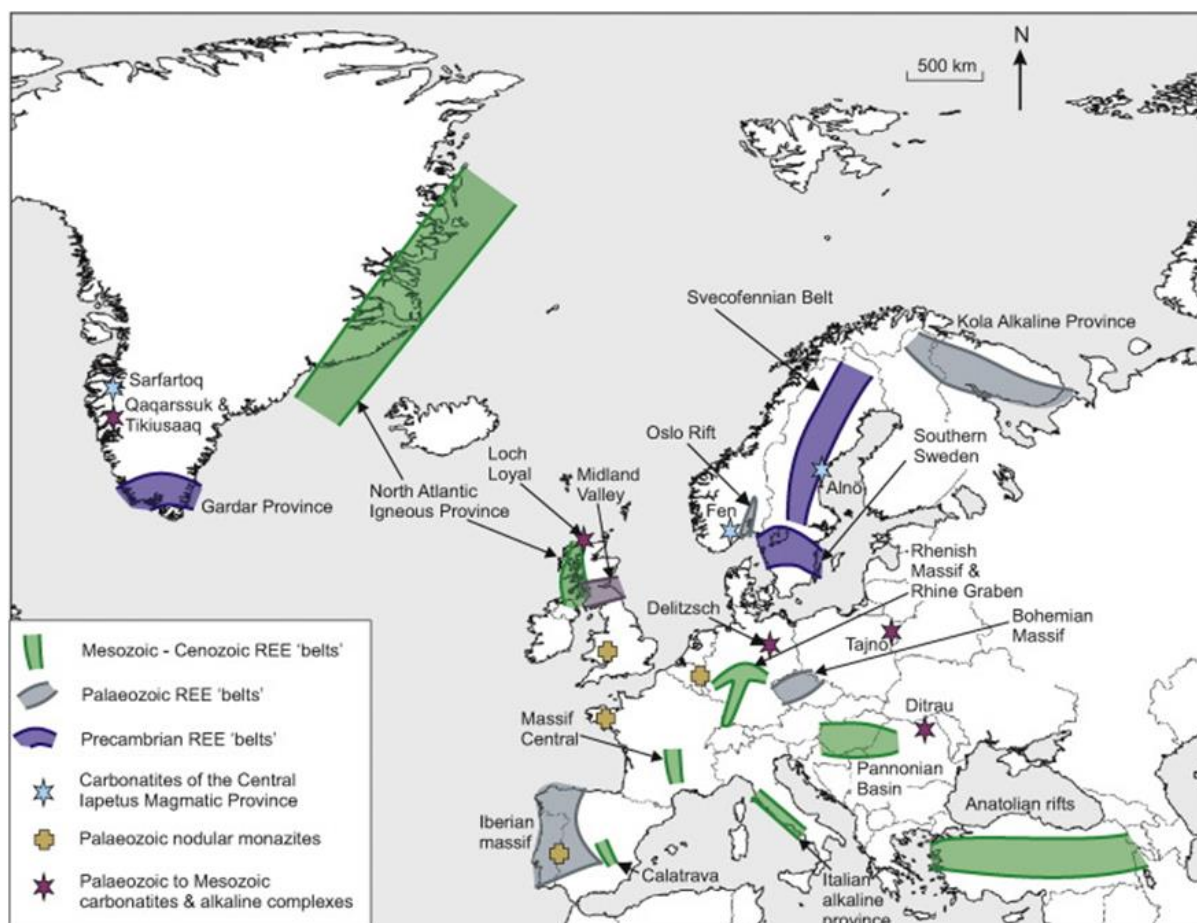
Εν κατακλείδι, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η ανακύκλωση είναι μεταξύ άλλων μία από τις σημαντικότερες λύσεις ώστε να μειωθούν οι γεωπολιτικοί κίνδυνοι εφοδιασμού σπανίων γαιών στο μέλλον (Jowwit et al. 2018). Ωστόσο, επικρατεί ο φόβος πως είναι πολύ πιθανό ότι χώρες όπως η Κίνα που καταναλώνουν το μεγαλύτερο μερίδιο της σημερινής παραγωγής σπανίων γαιών θα ελέγχουν και τη δευτερογενή προσφορά των σπανίων γαιών στο μέλλον. Αυτό φυσικά θα αποτελέσει τροχοπέδη στο ζήτημα του γεωπολιτικού κινδύνου εφοδιασμού σπανίων γαιών (Habib et al. 2016).

6. ΟΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

6.1. Πρωτογενή κοιτάσματα σπανίων γαιών στην Ευρώπη

Αν και η πλειονότητα των σπανίων γαιών αρχικά είχαν ανακαλυφθεί στην Ευρώπη και συγκεκριμένα στα ορυχεία του Bastnäs και του Ytterby στη Σουηδία δεν υπάρχει έντονη εξορυκτική δραστηριότητα στον τομέα των σπανίων γαιών σε Ευρωπαϊκό έδαφος (Gadolin 1794, Hisinger 1804, Williams-Jones et al. 2012 από Goodenough et al. 2016). Πιθανοί πόροι

σπανίων γαιών είναι γνωστό πως επικρατούν στην Ευρώπη εμφανίζοντας ιδιαίτερη γεωγραφική εξάπλωση. Εντός της Ευρώπης διακρίνεται ένας σημαντικός αριθμός μεταλλογενετικών ζωνών σπανίων γαιών. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται Προκάμβριες, Παλαιοζωικές και Μεσοζωικές-Καινοζωικές μεταλλογενετικές ζώνες σπανίων γαιών. Οι πιο γνωστές μεταλλογενετικές ζώνες είναι ηλικίας Προκάμβριου έως Παλαιοζωικού και εμφανίζονται στη Γροιλανδία και στην Fennoscandian ασπίδα. Τα σημαντικότερα ευρωπαϊκά κοιτάσματα σπανίων γαιών σχετίζονται με αλκαλικά και υπεραλκαλικά πυριγενή πετρώματα και καρμπονατίτες που αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον ενδοηπειρωτικής διάρρηξης. Τα κοιτάσματα σπανίων γαιών που συναντώνται στη Svecofennian ζώνη εμφανίζουν την ιδιαιτερότητα ότι σχηματίστηκαν μέσω υδροθερμικών διαδικασιών που σχετίζονται με ενεργή υποβύθιση (Goodenough et al. 2016).



Σχ. 6.1. Χάρτης της Ευρώπης που δείχνει την κατά προσέγγιση έκταση των βασικών μεταλλογενετικών ζωνών σπανίων γαιών (Goodenough et al. 2016).

Πολλά από τα τρέχοντα Ευρωπαϊκά προγράμματα αναζήτησης κοιτασμάτων σπανίων γαιών σχετίζονται με καρμπονατίτες, συμπεριλαμβανομένων των Sarfartoq και Qaqarssuk στην Γροιλανδία, του Fen στη Νορβηγία και του Storkwitz στη Γερμανία. Πολλοί από

αυτούς τους καρμπονατίτες έχουν το πλεονέκτημα ότι περιέχουν το ορυκτό μαστιχίτη, το οποίο αποτελεί το πιο διαδεδομένο ορυκτό από το οποίο πραγματοποιείται απόληψη σπανίων γαιών (Jordens et al. 2013 από Goodenough et al. 2016). Ωστόσο, οι περισσότεροι καρμπονατίτες είναι εμπλουτισμένοι σε ελαφριές σπάνιες γαίες και χαρακτηρίζονται από χαμηλές περιεκτικότητες στις κρίσιμες βαριές σπάνιες γαίες (Chakhmouradian και Zaitsev 2012 από Goodenough et al. 2016).

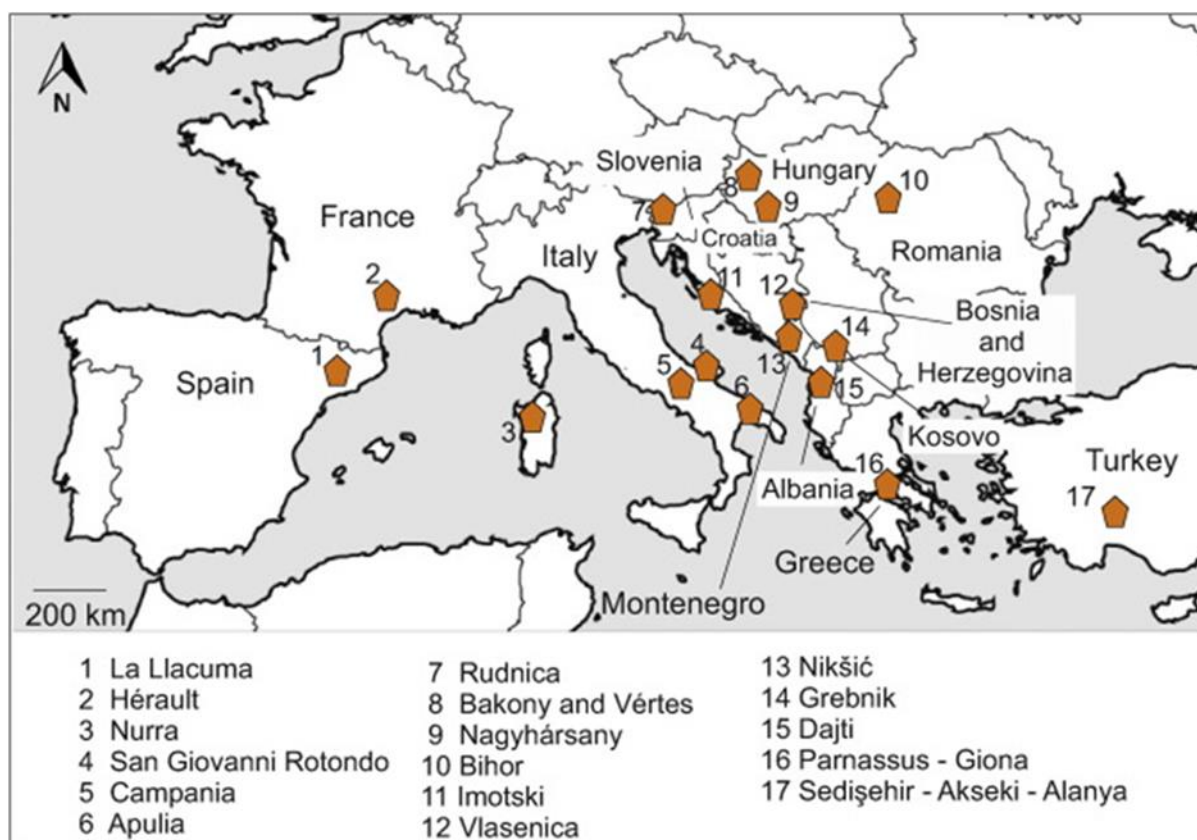
Επί του παρόντος, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον από την Ευρώπη για τα ορυκτά της ομάδας του ευδιαλύτη και τα προϊόντα αλλοίωσης τους. Αυτό συμβαίνει διότι τα συγκεκριμένα ορυκτά μπορούν να αποτελέσουν πηγή σπανίων γαιών και κυρίως των σπανίων γαιών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία των μαγνητών. Τα συγκεκριμένα ορυκτά συναντώνται συνήθως σε υπεραλκαλικά πυριγενή πετρώματα. Τα κοιτάσματα που περιέχουν τα ορυκτά της ομάδας του ευδιαλύτη χαρακτηρίζονται από χαμηλές σχετικά περιεκτικότητες σε σπάνιες γαίες, ωστόσο παρουσιάζουν χαμηλές συγκεντρώσεις σε ουράνιο και θόριο το οποίο σημαίνει ότι είναι ευκολότερη η διαχείριση των αποβλήτων της επεξεργασίας των σπανίων γαιών. Τα συγκεκριμένα κοιτάσματα στην Ευρώπη συναντώνται στο Norra Kärr στη Σουηδία καθώς και στην επαρχία του Gardar στη Γροιλανδία.

6.2. Δευτερογενή κοιτάσματα σπανίων γαιών στην Ευρώπη

Τα δευτερογενή κοιτάσματα σπανίων γαιών που παρατηρούνται στην Ευρώπη εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αν και συνήθως συνδέονται με χαμηλές περιεκτικότητες. Πιο συγκεκριμένα, στην Ευρώπη εντοπίζονται προσχωματικά κοιτάσματα σπανίων γαιών τα οποία δημιουργήθηκαν από τη διάβρωση αλκαλικών πυριγενών πετρωμάτων (Goodenough et al. 2016). Ωστόσο, ορισμένα από αυτά τα προσχωματικά κοιτάσματα περιέχουν τα ορυκτά ξενότιμο και μοναζίτη τα οποία συνήθως χαρακτηρίζονται από υψηλές περιεκτικότητες σε ουράνιο και θόριο. Το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ραδιενεργών αποβλήτων (Chakhmouradian και Wall, 2012 από Goodenough et al. 2016). Ωστόσο, σύμφωνα με τους Goodenough et al. (2016) πρέπει να πραγματοποιηθεί περεταίρω έρευνα στα προσχωματικά κοιτάσματα της Ευρώπης καθώς τα συγκεκριμένα κοιτάσματα αποτέλεσαν αντικείμενο περιορισμένης έρευνας μέχρι σήμερα.

Η κρίση των σπανίων γαιών ανέδειξε την ανάγκη που επικρατεί για έρευνα και εξερεύνηση νέων κοιτασμάτων σπανίων γαιών καθώς και για προσαρμογή των υπαρχόντων μεταλλείων. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην εκτενή έρευνα μεθόδων ανάκτησης σπανίων

γαιών από δευτερεύουσες πηγές. Η προοπτική εξαγωγής σπανίων γαιών από δευτερεύουσες πηγές είναι αρκετά υποσχόμενη. Οι δευτερεύουσες αυτές πηγές μπορεί να είναι, υπολείμματα βωξιτών (κόκκινη λάσπη), απόβλητα μεταλλείων, μεταλλουργικές σκωρίες καθώς και τέφρα άνθρακα (Binnemans et al. 2013 από Jowwit et al. 2018). Τα απόβλητα μεταλλείου ουρανίου στη Σουηδία χαρακτηρίζονται από υψηλές περιεκτικότητες σε σπάνιες γαίες (Jha et al. 2008, Peelman et al. 2016a από Dushyantha et al. 2020). Επίσης, τα απόβλητα του μεταλλείου σιδήρου στη περιοχή της Κιρούνα στη Σουηδία χαρακτηρίζονται ως πιθανά αποθέματα σπανίων γαιών καθώς μετά τον εμπλουτισμό περιέχουν περίπου 5000ppm σπάνιες γαίες. Οι Peelman et al. (2016) (από Dushyantha et al. 2020) αναφέρουν ότι με την έκπλυση με οξύ των αποβλήτων των μεταλλείων σιδήρου στη Κιρούνα πραγματοποιήθηκε εξαγωγή βαριών σπανίων γαιών όπως ευρώπιο, δυσπρόσιο και ύτριο με μια μέση αποδοτικότητα που ξεπέρασε το 75%. Το συγκεκριμένο γεγονός επιβεβαιώνει την οικονομική βιωσιμότητα της ανάκτησης σπανίων γαιών από τα απόβλητα των μεταλλείων (Dushyantha et al. 2020).



Σχ. 6.2. Χάρτης των βωξιτικών κοιτασμάτων στην Νότια Ευρώπη (Deady et al. 2014 από Goodenough et al. 2016).

Τα κοιτάσματα βωξίτη στην Ευρώπη συγκεντρώνονται κυρίως στο Νότο όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.2. Ο βωξίτης αποτελεί την κύρια πηγή αλουμινίου και περιέχει περίπου 30 έως 50% αλουμίνιο καθώς και διάφορα ιχνοστοιχεία όπως ασβέστιο, νάτριο,

ψευδάργυρο, γάλλιο και σπάνιες γαίες (Ochsenköhn-Petropulu et al. 1995, Smirnov and Molchanova 1997 από Dushyantha et al. 2020). Η διαδικασία Bayer εφαρμόζεται για την εξαγωγή του αλουμινίου από τον βωξίτη, μέσω αυτής της διαδικασίας παράγεται ένα στερεό υπόλειμμα, το οποίο είναι γνωστό ως κόκκινη λάσπη. Η συγκεκριμένη κόκκινη λάσπη παρουσιάζει υψηλές περιεκτικότητες σπανίων γαιών και κυρίως σκανδίου, οι οποίες σπάνιες γαίες μπορούν να εξαχθούν από την κόκκινη λάσπη είτε απευθείας με έκπλυση είτε με τήξη ακολουθούμενη από έκπλυση (Borra et al. 2015 από Dushyantha et al. 2020).

7. Η ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΣΤΟΝ ΓΕΩΠΟΛΙΤΙΚΟ ΧΑΡΤΗ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Οι σπάνιες γαίες στην Ελλάδα προκύπτουν σε διάφορα περιβάλλοντα και συναντώνται σε πυριγενή, ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα διαφορετικών ηλικιών. Στην Ελλάδα οικονομικό ενδιαφέρον εντοπίζεται σε δευτερογενή κοιτάσματα σπανίων γαιών. Πιο συγκεκριμένα τις σημαντικότερες προοπτικές, όσον αφορά τις σπάνιες γαίες, εμφανίζουν τα βωξιτικά και λατεριτικά κοιτάσματα καθώς και οι άμμοι με βαριά ορυκτά που έχουν εντοπισθεί στην παράκτια περιοχή της Βόρειας Ελλάδας (Eliopoulos et al. 2014).

Χαρακτηριστική περίπτωση λατεριτικού κοιτάσματος εμπλουτισμένο σε σπάνιες γαίες είναι το κοιτάσμα Άγιος Ιωάννης (Νησί), στο οποίο επικρατεί μαστιναζίτης. Το συγκεκριμένο κοιτάσμα χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλές συγκεντρώσεις σπανίων γαιών, έως 6440 ppm (Maksimovic and Panto 1991 από Eliopoulos et al. 2014). Ένα ακόμη σημαντικό λατεριτικό κοιτάσμα στην Ελλάδα βρίσκεται στη Λοκρίδα (Μαρμέικο). Στο συγκεκριμένο κοιτάσμα το πέτρωμα ξενιστής αποτελεί ένας Άνω Ιουρασικός-Κάτω Κρητικός Ασβεστόλιθος. Τα κύρια ορυκτά σπανίων γαιών που συναντώνται είναι ο μοναζίτης και ο μαστιναζίτης. Σύμφωνα με τους Economou-Eliopoulos et al. (1997) οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την περιεκτικότητα των σπανίων γαιών σε ένα λατεριτικό κοιτάσμα είναι σύσταση του πετρώματος ξενιστή, η διάρκεια της λατεριτικής αποσάθρωσης, η απόσταση μεταφοράς, το μέγεθος των μεταλλοφόρων σωμάτων καθώς και οι συνθήκες pH και Eh που επικρατούν.

Τα σημαντικότερα βωξιτικά κοιτάσματα στην Ελλάδα συναντώνται στην γεωτεκτονική ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας και συγκεκριμένα στα βουνά Παρνασσός, Ελίκονας, Καλλίδρομο και Οίτη. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στα βωξιτικά κοιτάσματα που

συναντώνται στο βουνό Παρνασσός. Η μέση περιεκτικότητα σε σπάνιες γαίες είναι 2.270 ppm, στα συγκεκριμένα κοιτάσματα (Laskou 1991, Laskou and Andreou 2003 από Eliopoulos et al. 2014). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις σπανίων γαιών συνδέονται με γκρίζα ή κόκκινα δείγματα τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλές συγκεντρώσεις Fe_2O_3 , υψηλές τιμές LOI και υψηλές συγκεντρώσεις MnO. Τα κύρια ορυκτά που φέρουν σπάνιες γαίες είναι το ξενότιμο και το churchite. Επιπρόσθετα, έντονο ενδιαφέρον επικρατεί για τα μεταλλουργικά απόβλητα των βωξιτικών κοιτασμάτων του Παρνασσού-Γκιόνας. Κατά την επεξεργασία του βωξίτη για τη παραγωγή αλουμινίου προκύπτει μία κόκκινη λάσπη η οποία παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις σπανίων γαιών. Η συνολική συγκέντρωση των σπανίων γαιών κυμαίνεται από 192 έως 1109 ppm. Από όλες τις σπάνιες γαίες το δημήτριο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αφθονία στα συγκεκριμένα κοιτάσματα, με μέση συγκέντρωση τα 193 ppm. Ωστόσο, το χρήσιμο για τη βιομηχανία νεοδύμιο δεν εμφανίζει παρόμοια αφθονία καθώς η μέση συγκέντρωσή του είναι 41 ppm (Gamaletsos et al. 2019).



Σχ.7.1: Χάρτης όπου διακρίνονται η περιοχή των ερευνών για σπάνιες γαίες στο Βόρειο Αιγαίο (Μέλφος 2020).

Στην Ελλάδα εντοπίζονται πολλά γρανιτικά και ηφαιστειακά πετρώματα τα οποία χαρακτηρίζονται από σημαντικές ποσότητες σπανίων γαιών, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι αποφύσεις του γρανίτη της Πλάκας του Λαυρίου με περιεκτικότητες 1,5 γραμμάρια ανά τόνο σπάνιες γαίες. Μεγάλη κατανομή γρανιτικών και ηφαιστειακών πετρωμάτων πλούσια σε σπάνιες γαίες παρατηρείται συγκεκριμένα στη Βόρεια Ελλάδα. Τα

συγκεκριμένα πετρώματα περιέχουν ορυκτά όπως ο απατίτης, το ζirkόνιο, ο αλλανίτης και ο μοναζίτης που είναι εμπλουτισμένα σε σπάνιες γαίες. Λόγω της διάβρωσης τα συγκεκριμένα ορυκτά αποδεδμεύονται από τα πετρώματα και καταλήγουν στις προσχώσεις κατά μήκος των ακτών με τη βοήθεια των ποταμών. Για αυτό το λόγο το ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στα ιζήματα της υφαλοκρηπίδας του Βορείου Αιγαίου, όπου μέσω γεωχημικών ερευνών εντοπίστηκαν έως και 1 γραμμάριο στο τόνο σπάνιες γαίες (Μέλφος 2020). Οι περιοχές που συναντώνται οι υψηλότερες περιεκτικότητες σε σπάνιες γαίες στο Βόρειο Αιγαίο φαίνονται στο Σχ. 7.1. Σύμφωνα με τον Μέλφος (2020) η προέλευση των σπανίων γαιών μπορεί να σχετίζεται με τους γρανίτες του Παγγαίου και της Καβάλας καθώς στην ευρύτερη περιοχή σε μεταλλουργική σκωρία από οθωμανικής περιόδου φούρνους τήξης βρέθηκε μεγάλη ποσότητα σπανίων γαιών.

8. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αδιαμφισβήτητα οι σπάνιες γαίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης κοινωνίας εξαιτίας του μεγάλου εύρους εφαρμογών που παρουσιάζουν κυρίως σε προϊόντα υψηλής τεχνολογίας. Τα συγκεκριμένα μέταλλα δεν είναι τόσο σπάνια όσο χαρακτηρίζονται καθώς παρουσιάζουν παρόμοιες περιεκτικότητες στο φλοιό της γης με κάποια κοινά βιομηχανικά μέταλλα. Τα αίτια στα οποία οφείλεται η σπανιότητα των συγκεκριμένων μετάλλων είναι κυρίως οικονομικά και περιβαλλοντικά.

Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα σπανίων γαιών στον κόσμο παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη γεωγραφική εξάπλωση, με την Κίνα, την Αυστραλία και την Αμερική να κατέχουν τα σημαντικότερα. Ωστόσο, η Κίνα παραμένει μέχρι σήμερα ο μεγαλύτερος παραγωγός σπανίων γαιών στον κόσμο μέχρι σήμερα. Αυτό οφείλεται στην απώλεια περιβαλλοντικής συνείδησης καθώς και στην εκμετάλλευση των τοπικών κοινωνιών όπου λαμβάνει χώρα η εξόρυξη και η επεξεργασία των σπανίων γαιών.

Η κυριαρχία της Κίνας στη συγκεκριμένη αγορά δεν θορύβησε τον υπόλοιπο κόσμο έως ότου οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο άσκησης πίεσης το Σεπτέμβριο του 2010. Αφορμή για το συγκεκριμένο γεγονός αποτέλεσε μια γεωπολιτική διαμάχη μεταξύ Ιαπωνίας και Κίνας η οποία οδήγησε στην κρίση των σπανίων γαιών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση των τιμών των σπανίων γαιών.

Το συγκεκριμένο γεγονός θορύβησε τα υπόλοιπα κράτη τα οποία συνειδητοποίησαν την σημαντικότητα των σπανίων γαιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Ιαπωνία, η

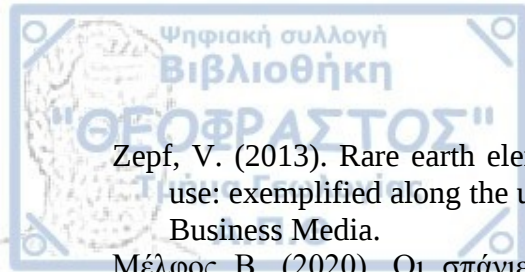
Αμερική και η Ευρωπαϊκή Ένωση οι οποίοι έλαβαν άμεσα μέτρα για την στήριξη της αγοράς των σπανίων γαιών. Επιπρόσθετα, η κρίση των σπανίων γαιών ανέδειξε την ανάγκη που επικρατεί στην αγορά για υποκατάστατα σπανίων γαιών.

Η ανακύκλωση σπανίων γαιών έχει αποτελέσει αντικείμενο ερευνών τα τελευταία χρόνια. Αυτό συμβαίνει διότι η ανακύκλωση σπανίων γαιών μπορεί να παίξει καταλυτικό ρόλο στη μείωση των μελλοντικών γεωπολιτικών κινδύνων προσφοράς σπανίων γαιών. Οι ανακυκλώσιμες σπάνιες γαίες έχουν τη δυνατότητα να κατέχουν υψηλό ποσοστό στην αγορά δεδομένου του μεγάλου φάσματος εφαρμογών που παρουσιάζουν. Ωστόσο, μόνο περίπου το 1% των σπανίων γαιών ανακυκλώνονται διότι επικρατούν συγκεκριμένα προβλήματα. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η συστηματική έρευνα στον τομέα της ανακύκλωσης των σπανίων γαιών ώστε να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα που επικρατούν.

Στην Ευρώπη επικρατούν κοιτάσματα σπανίων γαιών και εμφανίζουν ιδιαίτερη γεωγραφική εξάπλωση. Τα σημαντικότερα πρωτογενή κοιτάσματα σπανίων γαιών συναντώνται στη Βόρεια Ευρώπη και συγκεκριμένα στη Σκανδιναβική χερσόνησο και στη Γροιλανδία. Επιπρόσθετα, στην Ευρώπη επικρατούν και δευτερογενή κοιτάσματα σπανίων γαιών και συγκεκριμένα προσχωματικά κοιτάσματα. Εξίσου σημαντικά θεωρούνται και τα βωξιτικά κοιτάσματα που εμφανίζονται στη Νότια Ευρώπη καθώς επικρατεί η προοπτική ανάκτησης σπανίων γαιών από τα μεταλλουργικά τους απόβλητα. Η δυναμική των Ευρωπαϊκών κοιτασμάτων σπανίων γαιών θα μπορούσε να κλονίσει το μονοπώλιο της Κίνας ωστόσο για να συμβεί αυτό πρέπει να συνεχιστεί η εκτενής έρευνα των γνωστών μέχρι σήμερα κοιτασμάτων καθώς και η αναζήτηση καινούριων.

Στην Ελλάδα παρατηρούνται αρκετές εμφανίσεις σπανίων γαιών ωστόσο το οικονομικό ενδιαφέρον συνδέεται κυρίως με δευτερογενή κοιτάσματα. Πιο συγκεκριμένα, ορισμένα βωξιτικά και λατεριτικά κοιτάσματα στην Ελλάδα χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις σπανίων γαιών. Επιπρόσθετα, τα μεταλλουργικά απόβλητα (κόκκινη λάσπη) των βωξιτικών κοιτασμάτων Παρνασσού-Γκιόνας έχουν αποτελέσει αντικείμενο ερευνών διότι παρουσιάζουν υψηλές περιεκτικότητες σε σπάνιες γαίες. Εξίσου σημαντικές έχουν χαρακτηριστεί και οι άμμοι με βαριά ορυκτά που συναντώνται στην Βόρεια Ελλάδα καθώς δημιουργήθηκαν από τη διάβρωση πυριγενών πετρωμάτων πλούσια σε σπάνιες γαίες. Εν κατακλείδι, οι εμφανίσεις σπανίων γαιών που επικρατούν στην Ελλάδα παρουσιάζουν σημαντικές προοπτικές ωστόσο κρίνεται απαραίτητη η περεταίρω διεξοδική έρευνα των συγκεκριμένων εμφανίσεων ώστε να διαπιστωθεί αν είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμες.

- Anderson C.D., Taylor P.R. and Anderson C.G. 2017. Rare Earth Flotation Fundamentals: A Review. *American Journal of Engineering Research*, 6(11), 13p.
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285-1303.
- Chapman, B. (2018). The geopolitics of rare earth elements: emerging challenge for US National Security and Economics. *Journal of Self-Governance and Management Economics*, 6(2), 50-91.
- Cox, C., & Kynicky, J. (2018). The rapid evolution of speculative investment in the REE market before, during, and after the rare earth crisis of 2010–2012. *The Extractive Industries and Society*, 5(1), 8-17.
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeyasinghe, B.,... & Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*, 103521.
- Eliopoulos, D., Economou, G., Tzifas, I., & Papatrechas, C. (2014, September). The potential of rare earth elements in Greece. In *Proceedings of the ERES2014: First European Rare Earth Resources Conference*, Milos, Greece (pp. 4-7).
- 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.
- European Commission. (2020). Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability.
- 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(1), 20-47.
- Goodenough, K. M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J.,... & Keulen, N. (2016). Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 72, 838-856.
- Gov. Print. Off. Washington, DC. (2021) Rare Earths Statistics and Information. (<https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information>).
- Habib, K., Hamelin, L., & Wenzel, H. (2016). A dynamic perspective of the geopolitical supply risk of metals. *Journal of Cleaner Production*, 133, 850-858.
- Jowitt, S. M., Werner, T. T., Weng, Z., & Mudd, G. M. (2018). Recycling of the rare earth elements. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 1-7.
- Kanazawa, Y., & Kamitani, M. (2006). Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of alloys and compounds*, 408, 1339-1343.
- Klinger, J. M. (2018). Rare earth elements: Development, sustainability and policy issues. *The Extractive Industries and Society*, 5(1), 1-7.
- Kumari, A., Panda, R., Jha, M. K., Kumar, J. R., & Lee, J. Y. (2015). Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: A review. *Minerals Engineering*, 79, 102-115.
- Liu, Y. L., Ling, M. X., Williams, I. S., Yang, X. Y., Wang, C. Y., & Sun, W. (2018). The formation of the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, North China, Mesoproterozoic carbonatite and overprinted Paleozoic dolomitization. *Ore Geology Reviews*, 92, 73-83.
- Massari, S., & Ruberti, M. (2013). Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, 38(1), 36-43.
- United States Geological Survey (USGS), 2021. Mineral Commodity Summaries 2021.



Zepf, V. (2013). Rare earth elements: a new approach to the nexus of supply, demand and use: exemplified along the use of neodymium in permanent magnets. Springer Science & Business Media.

Μέλφος Β. (2020). Οι σπάνιες γαίες και η γεωπολιτική θέση της Ελλάδας. Ελληνικό Πανόραμα.