



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



ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ  
ΑΕΜ 5588

ΖΙΑΝΟΣ ΙΣΑΑΚ  
ΑΕΜ 5636

## ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ: ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2024





ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ – ΖΙΑΝΟΣ ΙΣΑΑΚ

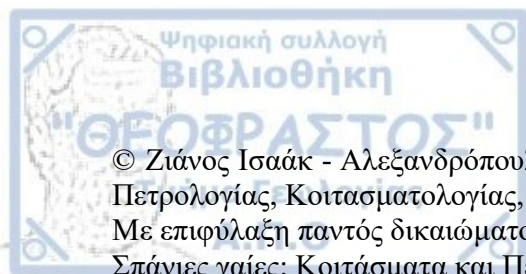
ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ: ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας  
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Ζιάνος Ισαάκ - Αλεξανδρόπουλος Γιώργος, 2024  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Ζιάνος Ισαάκ - Αλεξανδρόπουλος Γιώργος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Σπάνιες γαίες: Κοιτάσματα και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις – Διπλωματική Εργασία

© Zianos Isaak - Alexandropoulos Giorgos, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2024

All rights reserved.

Rare-Earth Elements: Ore Deposits and Environmental Impact – 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.

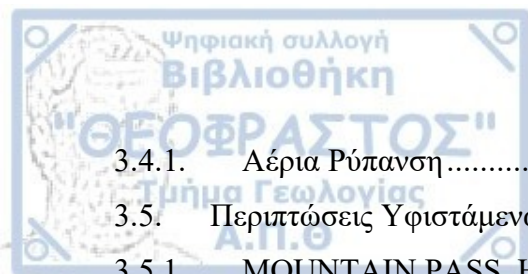
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Σπάνιες γαίες, (Πηγή: <https://www.newmoney.gr/>)



## Πίνακας Περιεχομένων

|                                                                                                                       |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Περίληψη.....                                                                                                         | viii |
| Abstract .....                                                                                                        | ix   |
| Πρόλογος - Ευχαριστίες .....                                                                                          | x    |
| 1. Εισαγωγή.....                                                                                                      | 1    |
| 1.1. Ορισμός και Χαρακτηριστικά των Σπάνιων Γαιών .....                                                               | 1    |
| 1.2. Ορυκτά των Σπάνιων Γαιών .....                                                                                   | 5    |
| 1.3. Ιστορική Αναδρομή.....                                                                                           | 9    |
| 1.4. Σημασία και Χρήσεις των Σπάνιων Γαιών .....                                                                      | 10   |
| 2. Κοιτάσματα Σπάνιων Γαιών .....                                                                                     | 18   |
| 2.1. Εντοπισμός και Χαρακτηριστικά των Κοιτασμάτων Σπάνιων Γαιών σε Παγκόσμιο<br>Επίπεδο.....                         | 18   |
| 2.2. Οι Σπάνιες Γαίες στην Ευρώπη.....                                                                                | 19   |
| 2.3. Εξόρυξη και Εκμετάλλευση των Κοιτασμάτων Σπάνιων γαιών .....                                                     | 20   |
| 2.4. Κοίτασμα Bayan Obo .....                                                                                         | 21   |
| 3. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της Εξόρυξης Σπάνιων Γαιών .....                                                        | 24   |
| 3.1. Ανάλυση των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων που σχετίζονται με την Εξόρυξη και την<br>Εκμετάλλευση Σπάνιων Γαιών..... | 24   |
| 3.1.1. Εξόρυξη.....                                                                                                   | 24   |
| 3.1.2. Διαδικασίες Επεξεργασίας (Εξευγενισμού).....                                                                   | 25   |
| 3.1.3. Απόβλητα .....                                                                                                 | 25   |
| 3.2. Περιβαλλοντικά Προβλήματα Επεξεργασίας (Refining) .....                                                          | 26   |
| 3.3. Περιβαλλοντικά Προβλήματα Αποβλήτων .....                                                                        | 27   |
| 3.3.1. Στερεά Απόβλητα .....                                                                                          | 28   |
| 3.3.2. Υγρά Απόβλητα.....                                                                                             | 28   |
| 3.3.3. Καθίζηση.....                                                                                                  | 29   |
| 3.3.4. Όξινη Απορροή Μεταλλείων .....                                                                                 | 29   |
| 3.3.5. Εκπομπές Ρύπων.....                                                                                            | 30   |
| 3.3.6. Ραδιονουκλεΐδια .....                                                                                          | 30   |
| 3.3.7. Σκωρία και Μέταλλα .....                                                                                       | 31   |
| 3.3.8. Οξείδια του Άνθρακα (C) .....                                                                                  | 31   |
| 3.3.9. Λύματα.....                                                                                                    | 32   |
| 3.4. Συνεισφορά REEs στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου.....                                                               | 32   |



|        |                                                                            |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.1. | Αέρια Ρύπανση .....                                                        | 32 |
| 3.5.   | Περιπτώσεις Υφιστάμενων Επιβλαβών Ορυχείων .....                           | 33 |
| 3.5.1. | MOUNTAIN PASS, ΗΠΑ.....                                                    | 33 |
| 3.5.2. | KVANEFJELD, Γροιλανδία .....                                               | 35 |
| 3.5.3. | BAOTOU, Κίνα.....                                                          | 36 |
| 4.     | Αξιολόγηση της Τρέχουσας Κατάστασης .....                                  | 38 |
| 5.     | Αντιμετώπιση Περιβαλλοντικών Προκλήσεων και Προτάσεις για Βελτιώσεις ..... | 40 |
| 5.1.   | Ανακύκλωση Σπάνιων Γαιών .....                                             | 40 |
| 5.2.   | Ανακυκλωμένες Συσκευές και Υφιστάμενη Κατάσταση .....                      | 42 |
| 5.3.   | Ανακυκλωμένα Υλικά .....                                                   | 43 |
| 5.4.   | Αποκατάσταση Χώρου των Ορυχείων .....                                      | 44 |
| 5.4.1. | Σταθερότητα του Εδάφους.....                                               | 45 |
| 5.4.2. | Παραγωγικότητα του Εδάφους .....                                           | 45 |
| 5.4.3. | Οπτική Αποκατάσταση .....                                                  | 46 |
| 5.5.   | Τεχνολογίες Πράσινης Ενέργειας .....                                       | 47 |
| 5.6.   | Θέσπιση Νέων Μέτρων .....                                                  | 48 |
| 5.6.1. | Αφύπνιση της Κίνας .....                                                   | 48 |
| 6.     | Συμπεράσματα.....                                                          | 50 |
| 7.     | Βιβλιογραφία.....                                                          | 52 |
| 7.1.   | Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....                                               | 52 |
| 7.2.   | Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία.....                                             | 55 |
| 7.3.   | Διαδίκτυο .....                                                            | 55 |



## Περίληψη

### Σπάνιες γαίες: Κοιτάσματα και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

**Αλεξανδρόπουλος Γιώργος – Ζιάνος Ισαάκ**

Λόγω της τεχνολογικής έκρηξης που σημειώνεται παγκοσμίως, ο 21<sup>ος</sup> αιώνας έχει γίνει γνωστός για την άνευ προηγουμένου ζήτηση ορυκτών πόρων. Μεταξύ αυτών των πόρων, οι σπάνιες γαίες, μια ομάδα χημικών στοιχείων με εξαιρετικές ιδιότητες, παίζουν καθοριστικό ρόλο στις σύγχρονες τεχνολογίες. Η σημασία αυτών των στοιχείων φάνηκε κατά τη διάρκεια μιας γεωπολιτικής διαμάχης, μεταξύ Ιαπωνίας και Κίνας το 2010, όπου οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιήθηκαν ως εργαλείο πολιτικής πίεσης. Αυτό το γεγονός προκάλεσε ανησυχίες σε διάφορα έθνη, οδηγώντας σε ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την έρευνα για τις σπάνιες γαίες. Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη σημασία, από την άποψη της παγκόσμιας πολιτικής, των σπάνιων γαιών, τις συνέπειες της κρίσης τους, τη σημασία της ανακύκλωσης για την πρόληψη παρόμοιων κρίσεων στο μέλλον και τις δυνατότητες των παγκόσμιων κοιτασμάτων σπάνιων γαιών. Μια υπόδειξη από την ανασκόπηση των βιβλιογραφικών αναφορών, είναι ότι οι σπάνιες γαίες πρόκειται να αποκτήσουν σημαντική θέση στο μέλλον, καθώς η χρήση τους σε διαφορετικές τεχνολογικές εφαρμογές διευρύνεται συνεχώς. Ωστόσο, περιβαλλοντικά ζητήματα υπάρχουν και πρέπει να αντιμετωπιστούν άμεσα μέσω της κατάλληλης τεχνολογίας.



## Abstract

### **Rare-Earth Elements: Ore Deposits and Environmental Impact**

**Giorgos Alexandropoulos – Zianos Isaak**

The 21<sup>st</sup> century has earned a reputation as the age of mineral resource demand escalation due to global technological advancements and not without merit. Within these sought-after minerals lie rare earths, a group of chemical elements possessing peculiar properties but paramount in modern technologies. The significance of these elements came under the spotlight during a geopolitical standoff between Japan and China in 2010, where rare earths found utility as a leverage tool. This tale sent shivers down the spines of many nations and sparked interest across several countries toward rare earth research, as this paper delineates. In vivid detail, we will paint the geopolitical importance that splashes over rare earth: what ripples are felt from the rare earth crisis waves? We shall see ways recycling can act as a fence to barricade future crises similarly stoked, topped off by an exploration into the global REEs deposits.



## Πρόλογος - Ευχαριστίες

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας ανατέθηκε από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο τον Οκτώβριο του 2021.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των Σπάνιων γαιών στη παγκόσμια αγορά, τα κοιτάσματά τους και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εξόρυξή τους. Μέσα από την ανάλυση αυτών των θεματικών, επιδιώκεται η κατανόηση του πώς η εξόρυξη και η εκμετάλλευση των Σπάνιων γαιών έχουν διαμορφώσει το γεωπολιτικό τοπίο, τις οικονομικές σχέσεις και τις διαπραγματεύσεις μεταξύ διεθνών παραγόντων.

Θερμές ευχαριστίες αξίζουν στον Καθηγητή, κ. Βασίλειο 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.

Μετά τιμής,

Αλεξανδρόπουλος Γιώργος - Ζιάνος Ισαάκ

| Περιοδικός Πίνακας των Στοιχείων |         |           |         |             |         |              |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |  |  |  |
|----------------------------------|---------|-----------|---------|-------------|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|--|--|--|
| Μέταλλα                          |         | Μεταλλικά |         | Μεταλλοειδή |         | Ευγενή αέρια |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |  |  |  |
| 1                                | 2       |           |         |             |         |              |         |         |         |         |         | 13      | 14      | 15      | 16      | 17      | 18      |  |  |  |  |
| IA                               | IIA     |           |         |             |         |              |         |         |         |         |         | IIIA    | IVA     | VA      | VIA     | VIIA    | VIIIA   |  |  |  |  |
| 3                                | 4       |           |         |             |         |              |         |         |         |         |         | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |  |  |  |  |
| Li                               | Be      |           |         |             |         |              |         |         |         |         |         | B       | C       | N       | O       | F       | Ne      |  |  |  |  |
| 6.941                            | 9.01218 |           |         |             |         |              |         |         |         |         |         | 10.811  | 12.011  | 14.0067 | 15.9994 | 18.9984 | 20.1797 |  |  |  |  |
| 11                               | 12      | 3         | 4       | 5           | 6       | 7            | 8       | 9       | 10      | 11      | 12      | 13      | 14      | 15      | 16      | 17      | 18      |  |  |  |  |
| Na                               | Mg      | IIIB      | IVB     | VB          | VIB     | VIB          | VIIIB   |         | IB      | IIB     |         | Al      | Si      | P       | S       | Cl      | Ar      |  |  |  |  |
| 22.9898                          | 24.3050 |           |         |             |         |              |         |         |         |         |         | 26.9815 | 28.0855 | 30.9738 | 32.066  | 35.4527 | 39.948  |  |  |  |  |
| 19                               | 20      | 21        | 22      | 23          | 24      | 25           | 26      | 27      | 28      | 29      | 30      | 31      | 32      | 33      | 34      | 35      | 36      |  |  |  |  |
| K                                | Ca      | Sc        | Ti      | V           | Cr      | Mn           | Fe      | Co      | Ni      | Cu      | Zn      | Ga      | Ge      | As      | Se      | Br      | Kr      |  |  |  |  |
| 39.0983                          | 40.078  | 44.9559   | 47.88   | 50.9415     | 51.9961 | 54.9381      | 55.847  | 58.9332 | 58.69   | 63.546  | 65.39   | 69.723  | 72.61   | 74.9216 | 78.96   | 79.904  | 83.80   |  |  |  |  |
| 37                               | 38      | 39        | 40      | 41          | 42      | 43           | 44      | 45      | 46      | 47      | 48      | 49      | 50      | 51      | 52      | 53      | 54      |  |  |  |  |
| Rb                               | Sr      | Y         | Zr      | Nb          | Mo      | Tc           | Ru      | Rh      | Pd      | Ag      | Cd      | In      | Sn      | Sb      | Te      | I       | Xe      |  |  |  |  |
| 85.4678                          | 87.62   | 88.9059   | 91.224  | 92.9064     | 95.94   | (98)         | 101.07  | 102.906 | 106.42  | 107.868 | 112.411 | 114.818 | 118.710 | 121.75  | 127.60  | 126.904 | 131.29  |  |  |  |  |
| 55                               | 56      | 57        | 72      | 73          | 74      | 75           | 76      | 77      | 78      | 79      | 80      | 81      | 82      | 83      | 84      | 85      | 86      |  |  |  |  |
| Cs                               | Ba      | *La       | Hf      | Ta          | W       | Re           | Os      | Ir      | Pt      | Au      | Hg      | Tl      | Pb      | Bi      | Po      | At      | Rn      |  |  |  |  |
| 132.905                          | 137.327 | 138.906   | 178.49  | 180.948     | 183.85  | 186.207      | 190.23  | 192.22  | 195.08  | 196.967 | 200.59  | 204.381 | 207.2   | 208.980 | (209)   | (210)   | (222)   |  |  |  |  |
| 87                               | 88      | 89        | 90      | 105         | 106     | 107          | 108     | 109     | 110     | 111     | 112     |         |         |         |         |         |         |  |  |  |  |
| Fr                               | Ra      | Ac        | Th      | Db          | Sg      | Bh           | Hs      | Mt      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |  |  |  |
| (223)                            | 226.025 | 227.028   | (232)   | (262)       | (263)   | (264)        | (265)   | (266)   | (269)   | (272)   | (277)   |         |         |         |         |         |         |  |  |  |  |
|                                  |         |           |         |             |         |              |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |  |  |  |
|                                  |         | 58        | 59      | 60          | 61      | 62           | 63      | 64      | 65      | 66      | 67      | 68      | 69      | 70      | 71      |         |         |  |  |  |  |
|                                  |         | Ce        | Pr      | Nd          | Pm      | Sm           | Eu      | Gd      | Tb      | Dy      | Ho      | Er      | Tm      | Yb      | Lu      |         |         |  |  |  |  |
|                                  |         | 140.115   | 140.908 | 144.24      | (145)   | 150.36       | 151.965 | 157.25  | 158.925 | 162.50  | 164.930 | 167.26  | 168.934 | 173.04  | 174.967 |         |         |  |  |  |  |
|                                  |         | 90        | 91      | 92          | 93      | 94           | 95      | 96      | 97      |         |         |         |         |         |         |         |         |  |  |  |  |

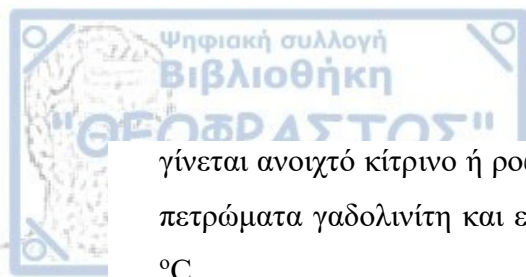
Στον τομέα της παγκόσμιας βιβλιογραφίας, οι σπάνιες γαίες συνήθως χωρίζονται σε δύο ομάδες: τις ελαφριές σπάνιες γαίες και τις βαριές σπάνιες γαίες. Διαφοροποιήθηκαν με βάση τα ατομικά τους βάρη, δεδομένου ότι τα στοιχεία κάθε ομάδας σχεδόν πάντα βρίσκονται σε συστεγασία. Τα LREE (Light Rare Earth Elements) περιλαμβάνουν: λανθάνιο (La), δημήτριο (Ce), πρασεοδύμιο (πρασινοδύμιο) (Pr), νεοδύμιο (Nd), προμήθειο (Pm), σαμάριο (Sm), ευρώπιο (Eu) και γαδολίνιο (Gd) (ατομικοί αριθμοί από 57 έως 63). Τα HREE (Heavy Rare Earth Elements) περιλαμβάνουν τα χημικά στοιχεία: τέρβιο (Tb), δυσπρόσιο (Dy), όλμιο (Ho), έρβιο (Er), θούλιο (Tm), υτέρβιο (Yb), λουτήτιο (Lu), καθώς και το ύτριο (Y), παρά το χαμηλό ατομικό του βάρος μοιράζεται περισσότερες ομοιότητες με τα HREE στους ατομικούς αριθμούς 64 έως 71 (Dushyantha et al. 2020). Ακόμη, το προμήθειο είναι το μοναδικό το οποίο δεν προκύπτει με φυσικό τρόπο, παρά μόνο εργαστηριακά (Dushyantha et al. 2020).

- **λανθάνιο (La):** είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 57. Είναι ένα ασημί-λευκό μέταλλο, που είναι εξαιρετικά εύπλαστο και με μεγάλη ολκιμότητα. Είναι το πρώτο από τη σειρά λανθανίδων και τα ελαφριά στοιχεία σπάνιων γαιών. Έχει σχετικά υψηλή αφθονία στον φλοιό της γης (18 ppm), σε σύγκριση με άλλα μέταλλα, και βρίσκεται κυρίως σε πετρώματα μπαστναζίτη και μοναζίτη. Το σημείο τήξης είναι 918°C και το σημείο βρασμού είναι 3464°C.
- **δημήτριο (Ce):** είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 58. Είναι στοιχείο λανθανίδων και ελαφριών σπάνιων γαιών. Είναι ένα ασημί-λευκό, όλκιμο, μαλακό μέταλλο, που περιέχει περισσότερα στοιχεία σπάνιων γαιών (46 ppm) από όλα τα στοιχεία σπάνιων γαιών. Βρίσκεται κυρίως σε ορυκτά, όπως ο μοναζίτης και ο μπαστναζίτης. Το σημείο τήξης είναι 798°C και το σημείο βρασμού είναι 3433°C.
- **πρασεοδύμιο (Pr):** είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 59. Είναι στοιχείο λανθανίδων και ελαφριών σπάνιων γαιών. Είναι ένα μαλακό, ασημί, εύπλαστο και όλκιμο μέταλλο με πολλές μαγνητικές, ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες. Είναι ένα μέταλλο υψηλής αντίδρασης, επειδή σχηματίζει μια πράσινη επίστρωση οξειδίου, όταν εκτίθεται στον αέρα. Το σημείο τήξης είναι 931°C και το σημείο βρασμού είναι 3520°C.
- **νεοδύμιο (Nd):** είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 60. Είναι στοιχείο λανθανίδων και ελαφριών σπάνιων γαιών. Είναι ένα σκληρό, ασημί, μερικώς όλκιμο μέταλλο, που οξειδώνεται πολύ γρήγορα στον αέρα, παράγοντας μια μωβ επίστρωση οξειδίου. Έχει πολλές εφαρμογές στη σύγχρονη τεχνολογία και το απόθεμά του είναι ικανοποιητικό (24ppm). Το σημείο τήξης είναι 1021°C και το σημείο βρασμού είναι 3074°C.

- **προμήθειο (Pm)**: είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 61. Αν και ανήκει στη σειρά των λανθανίδων, δεδομένου ότι είναι κατασκευασμένο από προϊόντα σχάσης του ουρανίου, θεωρείται ανθρωπογενές στοιχείο και επομένως δεν θεωρείται γενικά σπάνια γη. Το στοιχείο αυτό είναι ραδιενεργό και πολύ σπάνιο στη φύση του, καθώς υπολογίζεται ότι περιέχει 500-600 γραμμάρια σε ολόκληρο τον φλοιό της Γης.
- **σαμάριο (Sm)**: είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 62. Είναι στοιχείο λανθανίδων και ελαφριών σπάνιων γαιών. Είναι ένα σχετικά σκληρό, ασημί-λευκό μέταλλο που οξειδώνεται αργά στον αέρα. Τα αποθέματά του υπολογίζονται σε 6,5 μέρη ανά εκατομμύριο και εξορύσσονται από τα πετρώματα, όπως ο σμαρσκήτης (από όπου πήρε το όνομά του), ο γαδολινίτης, ο μαστναζίτης και ο μοναζίτης. Το σημείο τήξης είναι 1074°C και το σημείο βρασμού είναι 1794°C.
- **ευρώπιο (Eu)**: είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 63. Είναι στοιχείο λανθανίδων και ελαφριών σπάνιων γαιών. Είναι το πιο δραστικό και μαλακότερο λανθανίδιο και επομένως αποθηκεύεται σε ένα αδρανές υγρό, για να το προστατεύει από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Είναι ένα από τα πιο σπάνια στοιχεία σπάνιων γαιών που υπάρχει, σε περίπου 1 ppm, και βρίσκεται σε εξαιρετικά μικρές ποσότητες, σε πετρώματα μαστναζίτη, μοναζίτη και ξενότιμου. Το σημείο τήξης είναι 822°C και το σημείο βρασμού είναι 1529°C.
- **γαδολίνιο (Gd)**: είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 64. Είναι στοιχείο λανθανίδων και ελαφριών σπάνιων γαιών. Είναι ένα ασημί-λευκό, ελαφρώς όλκιμο και εύπλαστο μέταλλο. Ανάλογα με τη θερμοκρασία, συμπεριφέρεται είτε ως σιδηρομαγνητικό, είτε ως παραμαγνητικό, επομένως χρησιμοποιείται σε πολλούς μαγνήτες. Η περιεκτικότητά του κυμαίνεται από 6,4 ppm και βρίσκεται στα ορυκτά του μοναζίτη και του γαδολινίτη. Το σημείο τήξης είναι 1313°C και το σημείο βρασμού είναι 3273°C.
- **τέρβιο (Tb)**: είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 65. Είναι στοιχείο λανθανίδων και βαρέων σπάνιων γαιών. Είναι ένα ασημί-λευκό, ελατό, μαλακό μέταλλο που δεν απαντάται ως ελεύθερο στοιχείο στη φύση, αλλά βρίσκεται σε διάφορα ορυκτά, όπως ο μοναζίτης και το ξενότιμο. Το απόθεμά του είναι πολύ μικρό, περίπου 0,9 ppm. Το σημείο τήξης είναι 1356°C και το σημείο βρασμού είναι 3230°C.
- **δυσπρόσιο (Dy)**: είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 66. Είναι στοιχείο λανθανίδων και βαρέων σπάνιων γαιών. Είναι ένα ασημί-λευκό μέταλλο που, όπως υποδηλώνει το όνομα του, είναι δύσκολο να ανακτηθεί. Το δυσπρόσιο δεν εμφανίζεται σχεδόν ποτέ ως ελεύθερο στοιχείο στη φύση, αλλά βρίσκεται κυρίως στα πετρώματα του

ξενότιμου. Το απόθεμά του υπολογίζεται σε 4,5 ppm. Το σημείο τήξης είναι 1412°C και το σημείο βρασμού είναι 2567°C.

- **όλμιο** (Ho): είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 67. Είναι στοιχείο λανθανίδων και βαρέων σπάνιων γαιών. Είναι ένα ασημί-λευκό, σχετικά μαλακό και όλκιμο μέταλλο που δεν είναι ελεύθερο στη φύση, αλλά βρίσκεται σε μικρές ποσότητες σε πετρώματα μοναζίτη και γαδολινίτη. Το απόθεμά του είναι μικρό (1,2 ppm), με σημείο τήξης 1474°C και σημείο βρασμού 2700°C.
- **έρβιο** (Er): είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 68. Είναι στοιχείο λανθανίδων και βαρέων σπάνιων γαιών. Όπως και με άλλα στοιχεία βαρέων σπάνιων γαιών, δεν υπάρχει ως ελεύθερο στοιχείο στη φύση, εκτός από μια μικρή ποσότητα στα πετρώματα του γαδολινίτη. Είναι ένα ασημί-λευκό, εύπλαστο, μαλακό μέταλλο που δεν οξειδώνεται τόσο γρήγορα όσο άλλες σπάνιες γαίες. Το απόθεμά του είναι σχετικά χαμηλό (2,5 ppm), με σημείο τήξης 1529°C και σημείο βρασμού 2868°C.
- **θούλιο** (Tm): είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 69. Είναι στοιχείο λανθανίδων και βαρέων σπάνιων γαιών και είναι το σπανιότερο στοιχείο σπάνιων γαιών, μετά το ραδιενεργό και τεχνητό προμήθειο, καθώς τα παγκόσμια αποθέματά του υπολογίζονται σε 0,2 ppm. Είναι ένα γκρι, μαλακό και εύκολο στην επεξεργασία μέταλλο, με σημείο τήξης 1545°C και σημείο βρασμού 1950°C.
- **υττέρβιο** (Yb): είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 70. Είναι το προτελευταίο στοιχείο της σειράς λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών. Αν και το απόθεμά του είναι το δεύτερο μεγαλύτερο βαρύ στοιχείο σπάνιων γαιών, εξακολουθεί να είναι μικρό, σε περίπου 2,7 ppm. Είναι ένα μαλακό, εύπλαστο και όλκιμο μέταλλο, που αντιδρά αργά με το κρύο νερό και οξειδώνεται αργά στον αέρα. Επιπλέον, δεν απαντάται ως ελεύθερο στοιχείο στη φύση, παρά μόνο σε μικρές ποσότητες σε πετρώματα μοναζίτη και ξενότιμου. Το σημείο τήξης είναι 819°C και το σημείο βρασμού είναι 1196°C.
- **λουτήτιο** (Lu): είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 71. Είναι το τελευταίο στοιχείο της σειράς λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών. Είναι το ασημί-λευκό μέταλλο με την υψηλότερη πυκνότητα, σκληρότητα και σημείο τήξης μεταξύ όλων των σπάνιων γαιών. Το χαρακτηριστικό του είναι ότι είναι ανθεκτικό στην ξηρότητα, αλλά όχι στη διάβρωση από τον υγρό αέρα (υγρασία). Τα αποθέματά του είναι μικρότερα από 1 ppm και έχει σημείο τήξης 1663°C και σημείο βρασμού 3402°C.
- **σκάνδιο** (Sc): είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 21. Αποτελεί στοιχείο των βαρέων σπάνιων γαιών, καθώς παρουσιάζει παρόμοιες χημικές και φυσικές ιδιότητες με αυτές, αν και δεν ανήκει στη σειρά των λανθανίδων. Είναι ένα ασημί μαλακό μέταλλο που



γίνεται ανοιχτό κίτρινο ή ροζ, όταν οξειδώνεται από την ατμόσφαιρα. Υπάρχει κυρίως σε πετρώματα γαδολινίτη και ευξενίτη, με σημείο τήξης 1541°C και σημείο βρασμού 2836 °C.

- **ύττριο (Y):** είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 39. Μαζί με το σκάνδιο, είναι το μόνο στοιχείο εκτός της οικογένειας των λανθανίδων που ανήκει στην οικογένεια των σπάνιων γαιών. Συγκεκριμένα, ανήκει στην ομάδα των βαρέων σπάνιων γαιών, λόγω των κοινών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του. Είναι ένα ασημί-λευκό, γυαλιστερό και μαλακό μέταλλο που δεν υπάρχει ως ξεχωριστό στοιχείο στη φύση, αλλά βρίσκεται σε διάφορα ορυκτά όπως ο μοναζίτης και το ξενότιμο. Τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης είναι ικανοποιητικά, με περιεκτικότητα περίπου 28 ppm, σημείο τήξης 1522°C και σημείο βρασμού 3338°C (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

## 1.2. Ορυκτά των Σπάνιων Γαιών

Οι σπάνιες γαίες, που βρίσκονται ελεύθερες στο φλοιό της γης, διακρίνονται από την μεταλλική τους λάμψη, είναι αργυρόχρωα και αρκετά δραστικά μέταλλα. Σχηματίζουν οξείδια και αντιδρούν με το οξυγόνο στην ατμόσφαιρα. Τα μέταλλα είναι αναγωγικοί παράγοντες και αντιδρούν με το νερό (H<sub>2</sub>O). Τα οξέα τους εκλύουν, επίσης, αέριο υδρογόνο (H<sub>2</sub>). Μπορούν να αντιδράσουν σε υψηλές θερμοκρασίες με αμέταλλα, όπως το υδρογόνο (H<sub>2</sub>), το άζωτο (N) και το χλώριο (Cl<sub>2</sub>).

Οι μεγαλύτερες αναλογίες σπάνιων γαιών βρίσκονται σε ορυκτά, όπως ο μπαστναζίτης (bastnaesite), το ξενότιμο (xenotime) και ο μοναζίτης (monazite). Ωστόσο, ο συνολικός αριθμός ορυκτών που είναι γνωστό ότι περιέχουν σημαντικές ποσότητες σπάνιων γαιών φθάνει τα 160-200 (π.χ. βριθολίτης, ανκυλίτης, σαμαρσκίτης, αλλανίτης, κ.λπ.), αν και η περιεκτικότητά τους είναι πολύ μικρή.

Μια αρκετά μεγάλη πηγή σπάνιων γαιών αποτελεί το ορυκτό του μπαστναζίτη, καθώς χαρακτηρίζεται από μεγάλη περιεκτικότητα LREE (ελαφριών σπάνιων γαιών) και λιγότερο σε HREE (βαρέων σπάνιων γαιών). Στην ίδια κατηγορία ανήκει και ο μοναζίτης που είναι πιο κοινό ορυκτό σε σύγκριση με το μπαστναζίτη. Τέλος, το σημαντικότερο από τα τρία ορυκτά είναι το ξενότιμο. Το ξενότιμο παρόλο που περιέχει περισσότερες LREE απ' ότι HREE, ξεχωρίζει επειδή συναντάμε μεγαλύτερες περιεκτικότητες HREE από τα προηγούμενα 2 ορυκτά (Wall, 2014, Λισάντερ, 2021).

Η τυπική μέση συγκέντρωση των στοιχείων των σπάνιων γαιών, στον φλοιό της γης, εκτιμάται ότι είναι μεταξύ 150 και 220 ppm (περίπου). Αυτό ξεπερνά την παρουσία πολλών άλλων μετάλλων που εξορύσσονται, συνήθως σε βιομηχανική κλίμακα. Για παράδειγμα, ο χαλκός (Cu) είναι στα 55 ppm και ο ψευδάργυρος (Zn) στα 70 ppm. Σε αντίθεση με τα περισσότερα βασικά και πολύτιμα μέταλλα, όπου η εξόρυξη είναι βιώσιμη λόγω επαρκών επιπέδων συγκέντρωσης στα αποθέματα, τα στοιχεία σπάνιων γαιών σπάνια παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις που θα επέτρεπαν την αυτόνομη οικονομική τους εκμετάλλευση. Αυτό καθιστά την εξόρυξή τους δύσκολη, συνήθως αντιοικονομική, ως πρωτεύον προϊόν (Wall, 2014, Λισάντερ, 2021).

- **Μπαστναζίτης:** είναι ένα ορυκτό κόκκινου φθοράνθρακα, που είναι η κύρια πηγή σπάνιων γαιών, ιδιαίτερα ελαφρών στοιχείων σπάνιων γαιών (όπως το λανθάνιο, το δημήτριο και το ευρώπιο). Επίσης μεγάλη ποσότητα ύττριου.



**Εικόνα 1-1.** Πέτρωμα μπαστναζίτη, (Πηγή: Βικιπαίδεια, Ανυφαντάκης 2021)

- **Μοναζίτης:** είναι ένα φωσφορικό ορυκτό, καφέ χρώματος, με κίτρινη απόχρωση και αποτελεί σημαντική πηγή σπάνιων γαιών μαζί με τον μπαστναζίτη. Κυκλοφορεί σε τουλάχιστον 4 διαφορετικά είδη, ανάλογα με τη σύνθεσή του και είναι πλούσιο σε REEs, όπως δημήτριο, λανθάνιο, νεοδύμιο, πρασεοδύμιο και σαμάριο. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι το θόριο, ένα ραδιενεργό στοιχείο, εμφανίζεται μερικές φορές στην ορυκτολογία του, περιπλέκοντας την απομόνωση και την επεξεργασία των υπολοίπων στοιχείων.



Εικόνα 1-2. Πέτρωμα μοναζίτη, (Πηγή: <https://geology.com/minerals/photos/monazite-crystal.jpg>, Ανυφαντάκης 2021)

- **Γαδολινίτης:** Είναι ένα μαύρο-κόκκινο πυριτικό ορυκτό, που περιέχει μεγάλη ποσότητα σπάνιων γαιών στη σύνθεσή του. Δεν είναι άφθονο στη φύση, αλλά παρέχει επαρκείς ποσότητες ελαφρών στοιχείων σπάνιων γαιών, όπως λανθάνιο, δημήτριο, νεοδύμιο, γαδολίνιο και σημαντικές ποσότητες ύττριου.



Εικόνα 1-3. Πέτρωμα γαδολινίτη, (Πηγή: Βικιπαίδεια, Ανυφαντάκης 2021)

- **Ξενότιμο:** είναι ένα φωσφορικό ορυκτό, καφέ χρώματος με κίτρινες αποχρώσεις, που περιέχει μεγάλες ποσότητες βαρέων στοιχείων σπάνιων γαιών, όπως δυσπρόσιο, τέρβιο, υτέρβιο και ύτριο. Ωστόσο, όπως και άλλα φωσφορικά ορυκτά, περιέχει σημαντικές ποσότητες θορίου και ουρανίου, επομένως η επεξεργασία του εγκυμονεί περιβαλλοντικούς κινδύνους και απαιτεί μεγάλη προσοχή.



**Εικόνα 1-4.** Πέτρωμα ξενότιμου, (Πηγή: Βικιπαίδεια, Ανυφαντάκης 2021)

- **Σαμαρσκίτης:** είναι ένα ραδιενεργό ορυκτό, μαύρου χρώματος, το οποίο περιέχει επαρκείς ποσότητες σαμαρίου, έρβιου, ύττριου και ευρώπιου. Ωστόσο, λόγω της παρουσίας θορίου στη σύνθεσή του, η εξόρυξη και η περαιτέρω επεξεργασία του απαιτεί μια συνεχή και επίπονη διαδικασία.



**Εικόνα 1-5.** Πέτρωμα σαμαρσκίτη, (Πηγή: Βικιπαίδεια, Ανυφαντάκης 2021)

- **Ευξενίτης:** είναι ένα καφέ ορυκτό, που περιέχει μεγάλες ποσότητες βαρέων σπάνιων γαιών όπως έρβιο, σκάνδιο και ύττριο. Θεωρείται επίσης ραδιενεργό, λόγω της παρουσίας θορίου στη σύνθεσή του.



**Εικόνα 1-6.** Πέτρωμα ευξενίτη, (Πηγή: <https://www.mineralauctions.com/items/euxenite-y-rare-locale-trimmingham-coll-44789>)

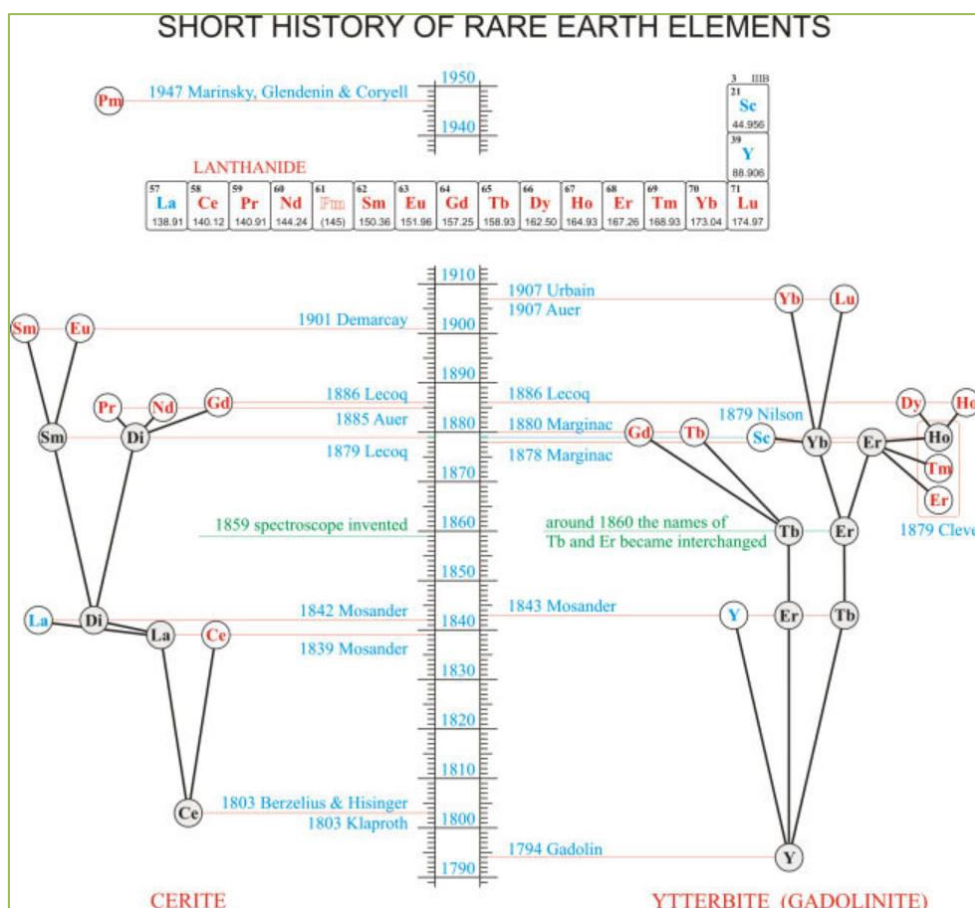
### 1.3. Ιστορική Αναδρομή

Η αναζήτηση για σπάνιες γαίες καθήλωσε τους επιστήμονες για πάνω από δύο αιώνες, από τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα έως τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Μια ιστορία ανακάλυψης εκτυλίχθηκε στα ευρωπαϊκά τοπία, καθώς οι γεμάτοι περιέργεια επιστήμονες, αποκάλυψαν τους κρυμμένους θησαυρούς της Γης. Ήταν το 1787, όταν ένα ορυκτό ανακαλύφθηκε στο Ytterby της Σουηδίας, από τον γεωλόγο C.A Arrhenius, λαμβάνοντας το όνομα του (υττερβίτης), ως φόρο τιμής στην τοποθεσία του χωριού. Επτά χρόνια αργότερα, το 1794, ο καθηγητής J. Gadolin απομόνωσε με επιτυχία, ένα άγνωστο οξείδιο, που ονομάζεται terra yttria, ενώ το ορυκτό πήρε επίσης το όνομά του, γαδολινίτης. Μόλις το 1803 ένα άλλο ορυκτό, που βρέθηκε στη Σουηδία, ο κερίτης, οδήγησε στην εύρεση ενός άλλου οξειδίου, που ονομάζεται terra ceria. Στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, δύο σπάνιες γαίες είχαν ήδη αποκαλυφθεί: το ύτριο (Y) και το δημήτριο (Ce).

Ήταν το 1839 όταν ο καθηγητής G. Mosander εξήγαγε επιτυχώς το γνωστό σε όλους, λανθάνιο (La) από terra ceria και μέχρι το 1842 απέδειξε ότι μια άλλη σπάνια γαία περιείχε το λανθάνιο, το οποίο ονόμασε διδύμιο. Μέχρι το 1843, διέσπασε το terra yttria σε τρία διακριτά οξείδια, το τέρβιο (Tb) ένα ροζ οξείδιο, το έρβιο (Er) ένα κίτρινο οξείδιο και το ύτριο (Y), ένα άχρωμο οξείδιο.

Έπειτα από την συγκλονιστική αποκάλυψη του G. Mosander, δεν υπήρξαν άλλες αποκαλύψεις για τουλάχιστον τρεις δεκαετίες. Εντούτοις, η αποκάλυψη του φασματοσκοπίου, το 1859, έδωσε τη δυνατότητα στους επιστήμονες να αποκτήσουν πρόσθετη γνώση των πετρωμάτων, κάτι που τους άνοιξε τον δρόμο για την αποκάλυψη περισσότερων σπάνιων

γαιών. Ήταν μέσω αυτής της διαδικασίας που το υττέρβιο ανακαλύφθηκε από τον Marginac το 1878. Ο P.T Cleve μπήκε στο παιχνίδι ένα χρόνο αργότερα (1879) και κατάφερε να διαχωρίσει δύο άλλα στοιχεία, το θούλιο με την ένδειξη (Tm) και το όλμιο που αναφέρεται ως (Ho) (Ανυφαντάκης 2021).



**Σχήμα 1-2.** Χρονοδιάγραμμα ανακάλυψης σπάνιων γαιών,  
(Πηγή: <http://metallpedia.asianmetal.com/img/ree/his2.jpg>, Ανυφαντάκης 2021)

#### 1.4. Σημασία και Χρήσεις των Σπάνιων Γαιών

Παρά το όνομά τους, οι σπάνιες γαίες δεν είναι στην πραγματικότητα σπάνιες στη φύση. Το πιο άφθονο από αυτά τα στοιχεία είναι το δημήτριο (Ce), που έχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στον φλοιό της γης από τον χαλκό (Cu) ή τον γραφίτη (C). Οι ελαφριές σπάνιες γαίες συνήθως είναι πολύ πιο εύκολο να βρεθούν (διαθέτουν μεγαλύτερη συγκέντρωση), σε σχέση με τις βαριές σπάνιες γαίες (Castor and Hendrick 2006). Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα

τα στοιχεία αυτής της ομάδας είναι πιο άφθονα, από τον χρυσό (Au) ή το ασήμι (Ag), εκτός από το προμήθειο (Pm), μια εξαιρετικά σπάνια περίπτωση.

Οι σπάνιες γαίες ονομάζονται σπάνιες, καθώς τον 19<sup>ο</sup> αιώνα μόνο ένα κοίτασμα ήταν γνωστό στον κόσμο και οι επιστήμονες πίστευαν τότε πως τα στοιχεία αυτά δεν ήταν συνήθη. Γαίες ονομάστηκαν, διότι, εμφανίζονται στη φύση ως οξείδια και όχι ως αυτοφυή στοιχεία, ενώ επίσης, στα γαλλικά, η λέξη οξείδιο μεταφραζόταν ως η γαία του στοιχείου. Αυτό έμελλε να επικρατήσει ως ονομασία (Voncken 2016).

Οι σπάνιες γαίες εμφανίζονται πάντα μαζί με άλλα μέταλλα των λανθανίδων και ποτέ μόνες τους, ως αυτοφυή στοιχεία, αλλά ως οξείδια. Υπάρχουν μερικές εκατοντάδες ορυκτά που είναι γνωστά πως περιέχουν σπάνιες γαίες, ωστόσο λίγα από αυτά έχουν αποδειχθεί πως έχουν ιδιαίτερη οικονομική σημασία, ορυκτά όπως ο μπαστναζίτης, ο μοναζίτης και το ξενότιμο (Zepf 2013). Δημιουργούνται σε ένα εύρος κοιτασμάτων, ανάλογα με τη γεωλογία της περιοχής. Οι κύριοι τύποι κοιτασμάτων, στα οποία συνηθίζεται να βρίσκονται οι σπάνιες γαίες, είναι τα κοιτάσματα Καρμπονιτών, τα κοιτάσματα Αλκαλικών Πυριγενών, τα κοιτάσματα Αποσάθρωσης αλλά και οι Άργιλοι Ιοντικής Προσρόφησης.

Όσον αφορά τη σημαντικότητα των σπάνιων γαιών στη σύγχρονη κοινωνία, αυτή αποδεικνύεται από τις ποικίλες εφαρμογές που βρίσκει, καθώς καλύπτουν ένα από τα ευρύτερα φάσματα σε προϊόντα, σχετικά με άλλες ομάδες στοιχείων (Castor and Hendrick 2006). Ειδικότερα, τις τελευταίες δεκαετίες, η ζήτηση των σπάνιων γαιών στα προϊόντα υψηλής τεχνολογίας και στην πράσινη ενέργεια έχει αυξηθεί σημαντικά, καθώς με τη βοήθειά τους τα τελικά προϊόντα γίνονται πιο ελαφριά, μικρότερα αλλά και πιο γρήγορα (Asian Metal). Μπορούν να βρεθούν σε απλά καθημερινά προϊόντα, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα, οι έξυπνες τηλεοράσεις, αλλά και σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές. Επιπλέον, βρίσκουν χρήση σε αμυντικές εφαρμογές, όπως είναι οι κινητήρες μαχητικών τζετ, τα συστήματα καθοδήγησης πυραύλων, οι δορυφόροι και τα συστήματα επικοινωνίας (Humphries 2010). Ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρήση των σπάνιων γαιών σε νέες τεχνολογίες, καθώς χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες και σε ηλεκτροκινητήρες, για την χρήση των υβριδικών αυτοκινήτων. Άλλες χρήσεις σε προϊόντα είναι παραδείγματος χάριν, σε οπτικά γυαλιά, λέιζερ, μηχανήματα ακτινών X, οπτικές ίνες, φωτισμός LED κ.ά. (Balaram 2019).

Η χρήση κάποιων άλλων στοιχείων, όπως είναι το νεοδύμιο (Nd), το πρασεοδύμιο (Pr), το δυσπρόσιο (Dy), αλλά και το γαδολίνιο (Gd), στους μόνιμους μαγνήτες, αποτελεί τη κυρίαρχη εφαρμογή των σπάνιων γαιών αυτή τη στιγμή. Οι συγκεκριμένοι μαγνήτες είναι, μέχρι στιγμής, οι ισχυρότεροι που έχουν κατασκευαστεί και χρησιμοποιούνται ευρέως στα υβριδικά αυτοκίνητα, στις ανεμογεννήτριες, στους σκληρούς δίσκους των υπολογιστών και σε

πολλές άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Παράλληλα, μεγάλο ποσοστό των τελικών προϊόντων των σπάνιων γαιών καταλαμβάνουν οι καταλύτες, με βάση το λανθάνιο (La), που χρησιμοποιούνται στη διύλιση του πετρελαίου, καθώς και οι καταλύτες με βάση το δημήτριο (Ce), που βρίσκουν χρήση κυρίως στους μετατροπείς αυτοκινήτων (USGS 2017).

**Πίνακας 1-1.** Περιεκτικότητα των σπάνιων γαιών στο φλοιό της γης (1), (Πηγή: Kumari et al. 2015, με τροποποίηση)

| ΣΤΟΙΧΕΙΑ    | ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ | ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ (ppm) |
|-------------|------------------|----------------------|
| σκάνδιο     | 21               | 22                   |
| λανθάνιο    | 57               | 30                   |
| δημήτριο    | 58               | 60                   |
| πρασεοδύμιο | 59               | 6.7                  |
| νεοδύμιο    | 60               | 27                   |
| προμήθειο   | 61               | 10 <sup>-18</sup>    |
| σαμάριο     | 62               | 5,3                  |
| ευρώπιο     | 63               | 1.3                  |
| γαδολίνιο   | 64               | 4                    |
| τέρβιο      | 65               | 0,7                  |
| δυσπρόσιο   | 66               | 3,8                  |
| όλμιο       | 67               | 0,8                  |
| έρβιο       | 68               | 2,1                  |
| θούλιο      | 69               | 0,3                  |
| ύτριο       | 70               | 2                    |
| λουτήτιο    | 71               | 0,4                  |

## Ποιες είναι

Οι λεγόμενες σπάνιες γαίες είναι μια ομάδα 17 μεταλλικών στοιχείων με μάλλον παράξενες ονομασίες, όπως νεοδύμιο, πραιοδύμιο, σαμάριο, δυσπρόσιο, τέρβιο, λανθάνιο, λουτήτιο, κέριο, ύτριο, ευρώπιο, γαδολίνιο, χόλμιο, σκάνδιο, θούλιο, υτέρβιο, προμέθιο και έρβιο

### Καταλύτες

- Διύλιση πετρελαίου
- Χημική επεξεργασία
- Καταλυτικός μετατροπέας
- Πρόσθετα ντίζελ
- Βιομηχανικό πλυντήριο ρύπανσης



### Ηλεκτρονικά είδη

- Εμφάνιση φωσφόρων (CRT, PDP, LCD)
- Φωσφόροι ιατρικής απεικόνισης
- Λέιζερ
- Οπτικές ίνες
- Οπτικοί αισθητήρες θερμοκρασίας



### Γυαλί

- Γυαλιστικές ενώσεις
- Γυαλιά οπτικών εφαρμογών
- Γυαλί ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία
- Καθρέπτες θερμικού ελέγχου
- Χρωματιστές/ αποχρωματιστές



### Άλλα

- Επεξεργασία νερού
- Φωτισμός φθορισμού
- Χρωστικές
- Λίπασμα
- Ιατρικοί ικνυλάτες
- Επικαλύψεις



### Μαγνήτες

- Μοτέρ
- Μονόδες δίσκου
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Ενεργητικοί
- Μαγνητική τομογραφία
- Σύστημα αντιπληροκαρίσματος φρένων
- Εξαρτήματα αυτοκινήτων



- Συστήματα επικοινωνίας
- Ηλεκτρική κίνηση & πρόωση
- Ρουλεμάν χωρίς τριβή
- Μαγνητικός δίσκος αποθήκευσης
- Σωλήνες τροφοδοσίας μικροκυμάτων
- Μικρόφωνα & ηχεία
- Μαγνητική ψύξη
- Μαγνητοσυσταλτικά κράματα



### Κεραμικά

- Πυκνωτές
- Αισθητήρες
- Χρωστικές ουσίες
- Σπινθηριστές



### Κράματα μετάλλων

- Αποθήκευση υδρογόνου (μπαταρίες NiMH, κυψέλες καυσίμου)
- Χάλυβας
- Ελαφρύτεροι πυριτόλιθοι
- Αλουμίνιο/μαγνήσιο
- Χυτοσίδηρος
- Υπερκράματα

ΟΙ ΧΡΗΣΕΙΣ  
ΤΩΝ  
ΣΠΑΝΙΩΝ  
ΓΑΙΩΝ

**Σχήμα 1-3.** Χρήσεις των σπάνιων γαιών, (Πηγή: <https://www.newmoney.gr/>, Γ. Καραγιάννης 19/04/2024)

Οι καταλύτες σπάνιων γαιών συμβάλλουν στη διάσπαση βαρέων μορίων υδρογονανθράκων σε μικρότερα μόρια και αυξάνουν σημαντικά την παραγωγή πετρελαίου. Πριν από λίγα χρόνια ο κύριος καταναλωτής των σπάνιων γαιών ήταν η βιομηχανία του γυαλιού, πλέον όμως δεν κατέχει την πρώτη θέση, αντιθέτως, καταλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό. Στη συγκεκριμένη βιομηχανία, οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται για το γυάλισμα του γυαλιού και ως πρόσθετα, του προσδίδουν χρώμα, αλλά και σε άλλες οπτικές ιδιότητες στο γυαλί, όπως είναι η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας αλλά και η αλλοίωση του δείκτη διάθλασης. Πιο συγκεκριμένα, το οξειδίο του δημήτριου (Cerium Oxide) βρίσκει χρήση σε γυαλιστικά ακριβείας, ενώ το λανθάνιο (La), βρίσκεται σε φακούς κάμερας. Από την άλλη, το πιο βαρύ και ακριβό, το λουτήτιο (Lu), χρησιμοποιείται ευρέως στη λιθογραφία εμβάπτισης (USGS 2017).

**Πίνακας 1-2.** Περιεκτικότητα των σπάνιων γαιών στο φλοιό της γης (2), (Πηγή: Kumari et al. 2015, με τροποποίηση)

| ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ | ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ (ppm) |
|-----------------|------------------|----------------------|
| λανθάνιο        | 57               | 30                   |
| δημήτριο        | 58               | 60                   |
| πρασσεόδυμιο    | 59               | 6,7                  |
| νεοδύμιο        | 60               | 27                   |
| προμήθειο       | 61               | 10 <sup>-18</sup>    |
| σαμάριο         | 62               | 5,3                  |
| ευρώπιο         | 63               | 1,3                  |
| γαδολίνιο       | 64               | 4                    |
| τέρβιο          | 65               | 0,7                  |
| δυσπρόσιο       | 66               | 3,8                  |
| όλμιο           | 67               | 0,8                  |
| έρβιο           | 68               | 2,1                  |
| θούλιο          | 69               | 0,3                  |
| υττέρβιο        | 70               | 2                    |
| λουτήτιο        | 71               | 0,4                  |

Πολλές από τις ελαφριές σπάνιες γαίες αποτελούν σημαντικό μέρος, με παρόμοια περιεκτικότητα, με μέταλλα που βρίσκονται στον φλοιό της Γης και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες. Αυτά περιλαμβάνουν το χρώμιο (Cr), το νικέλιο (Ni), τον ψευδάργυρο (Zn), τον κασσίτερο (Sn), το βολφράμιο (W) και τον μόλυβδο (Pb), όπως σημειώθηκε από τον King (2017) και τους Dushyantha et al. (2020).

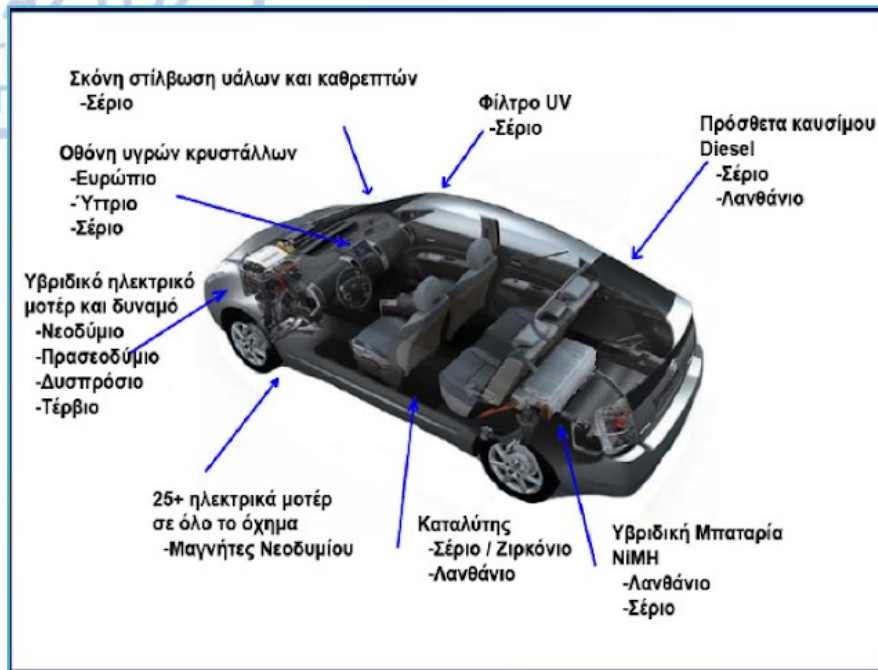
Για παράδειγμα, η συγκέντρωση δημητρίου (Ce) είναι 60 ppm (Πίνακας 1.1 και Πίνακας 1.2). Αυτό είναι συγκρίσιμο με την ποσότητα του χαλκού (Cu) που βρίσκεται στο φλοιό της Γης, όπως αναφέρεται από τους Dushyantha et al. (2020). Ως εκ τούτου, σε αυτό το συγκεκριμένο σενάριο, η χρήση του όρου "σπάνια" προέρχεται από την εξήγηση ότι οι σπάνιες γαίες δεν είναι διαθέσιμες σε μεγάλους όγκους, αλλά μόνο ως μεμονωμένα κοιτάσματα. Μάλλον είναι ευρέως καταναμεμημένα, με πιθανές χαμηλές συγκεντρώσεις, μια ιδέα που υποστηρίζεται από τα ευρήματα των Haxel et al. (2002), Μέλφος (2020) και Dushyantha et al. (2020).

Οι σπάνιες γαίες αποτελούν σημαντικό μέρος των προηγμένων πολιτισμών, καθώς έχουν πολυάριθμες χρήσεις σε προϊόντα υψηλής τεχνολογίας. Πολλοί τις αναφέρουν ως «Οι βιταμίνες της σύγχρονης βιομηχανίας» (Balaram, 2019).



**Σχήμα 1-4.** Οι Σπάνιες γαίες στα κινητά τηλέφωνα, (Πηγή: ABC News, τροποποιημένο)

Μια απλή κινητή συσκευή απαιτεί περίπου 0,25g σπάνιων γαιών (Σχήμα 1.4). Όταν αναγνωρίζουμε ότι υπάρχουν 5,3 δισεκατομμύρια τέτοια gadget σε όλο τον κόσμο, γίνεται σαφές, ότι οι μεγάλες ποσότητες αυτού του πολύτιμου υλικού, που χρειάζονται για την δημιουργία ενός αντικειμένου, περνούν απαρατήρητες από πολλά άτομα (Μέλφος 2020). Επιπλέον, ένα τυπικό υβριδικό αυτοκίνητο φιλοξενεί σχεδόν 1 κιλό σπάνιων γαιών (Σχήμα 1.5) (Balaram 2019, Dushyantha et al. 2020).



**Σχήμα 1-5.** Οι Σπάνιες γαίες σε ένα υβριδικό αυτοκίνητο, (Πηγή: Σ. Καμενόπουλος, SLpress, 19/07/2019)

Οι μεγαλύτεροι καταναλωτές σπάνιων γαιών, στην αγορά, είναι οι μαγνήτες, οι οποίοι συνεργάζονται στενά με τη βιομηχανία του γυαλιού (Chapman 2018). Στη βιομηχανία γυαλιού, οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται για λείανση (ή τον χρωματισμό), κάτι το οποίο τους καθιστά ως ειδικά οπτικά υλικά και πρόσθετα. Στη βιομηχανία των μαγνητών, οι σπάνιες γαίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή, λόγω της ευελιξίας τους. Διευρύνθηκαν περαιτέρω από τη χρήση του δυσπρόσιου και του σαμαρίου, καθώς τα έκανε εξαιρετικά ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες (Μέλφος 2020).

Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών βρίσκουν το δρόμο τους σε σκληρούς δίσκους υπολογιστών, μικρά ηχεία και ακουστικά (μεταξύ άλλων ασύρματων συσκευών) και κινητήρες υβριδικών ή ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με τον Μέλφο (2020). Οι πιο ισχυροί εμπορικοί μόνιμοι μαγνήτες, που έχουν παραχθεί ποτέ, είναι μαγνήτες νεοδυμίου (Nd) κατασκευασμένοι από κράμα νεοδυμίου-σιδήρου-νικελίου, όπως περιγράφεται από τον Chapman (2018). Ο ισχυρός μαγνητισμός τους, επιτρέπει σε έναν μόνιμο μαγνήτη σπάνιων γαιών 100 γραμμαρίων να ταιριάζει με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, ενός μόνιμου μαγνήτη μη σπάνιων γαιών ενός κιλού. Αυτό το γεγονός διατηρεί όλες τις φυσικές ιδιότητες του μαγνήτη χωρίς συμβιβασμούς, μια πτυχή που τονίζεται σε ορισμένες μελέτες, ως ο λόγος για την επιλογή αυτού του υλικού (των σπάνιων γαιών) έναντι άλλων του είδους του (Athurupane 2014, Dushyantha et al. 2020).

**Πίνακας 1-3.** Απαιτήσεις σπάνιων γαιών σε κάθε εφαρμογή, (Πηγή: Long et al. 2012, Jordens et al. 2013, Dushyantha et al. 2020, με τροποποίηση)

| ΕΦΑΡΜΟΓΗ<br>ΣΠΑΝΙΩΝ      | La<br>% | Ce<br>% | Pr<br>% | Nd<br>% | Sm<br>% | Eu<br>% | Gd<br>% | Tb<br>% | Dy<br>% | Y<br>% | ΥΠΟΛΟΙΠΑ<br>% |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------------|
| ΓΑΙΩΝ                    |         |         |         |         |         |         |         |         |         |        |               |
| Μαγνήτες                 | -       | -       | 23,4    | 23,4    | -       | -       | 2       | 0,2     | 5       | -      | -             |
| Κράματα<br>μπαταριών     | 50      | 33,4    | 3,3     | 3,3     | 3,3     | -       | -       | -       | -       | -      | -             |
| Κράματα<br>μετάλλων      | 26      | 52      | 5,5     | 5,5     | -       | -       | -       | -       | -       | -      | -             |
| Καταλύτες<br>αυτοκινήτων | 5       | 90      | 2       | 2       | -       | -       | -       | -       | -       | -      | -             |
| Διύλιση<br>πετρελαίου    | 90      | 10      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -      | -             |
| Υλικά<br>λείανσης        | 31,5    | 65      | 3,5     | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -      | -             |
| Πρόσθετα<br>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     | -             |

Παράλληλα, κάνουν την είσοδό τους σε συμπληρώματα ζωοτροφών, για την ανάπτυξη και την προώθηση της πάχυνσης, σε διάφορα ζώα φάρμας, συμπεριλαμβανομένων των χοίρων, των πουλερικών, των βοοειδών και των ψαριών, καθώς ακόμη σε πάπιες και κουνέλια. Παρόμοια χρήσιμα τόσο για την ενίσχυση της παραγωγής γάλακτος από τις αγελάδες, όσο και για την επιβίωση των ψαριών. Σε μια άλλη σημείωση, οι σπάνιες γαίες αποτελούν μέρος των ευεργετικών θρεπτικών συστατικών των φυτών που εισάγονται σε διαλυτή μορφή και με χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης στα κινεζικά λιπάσματα, από το 1972 (He et al. 2001, Redling 2006, Dushyantha et al. 2020).

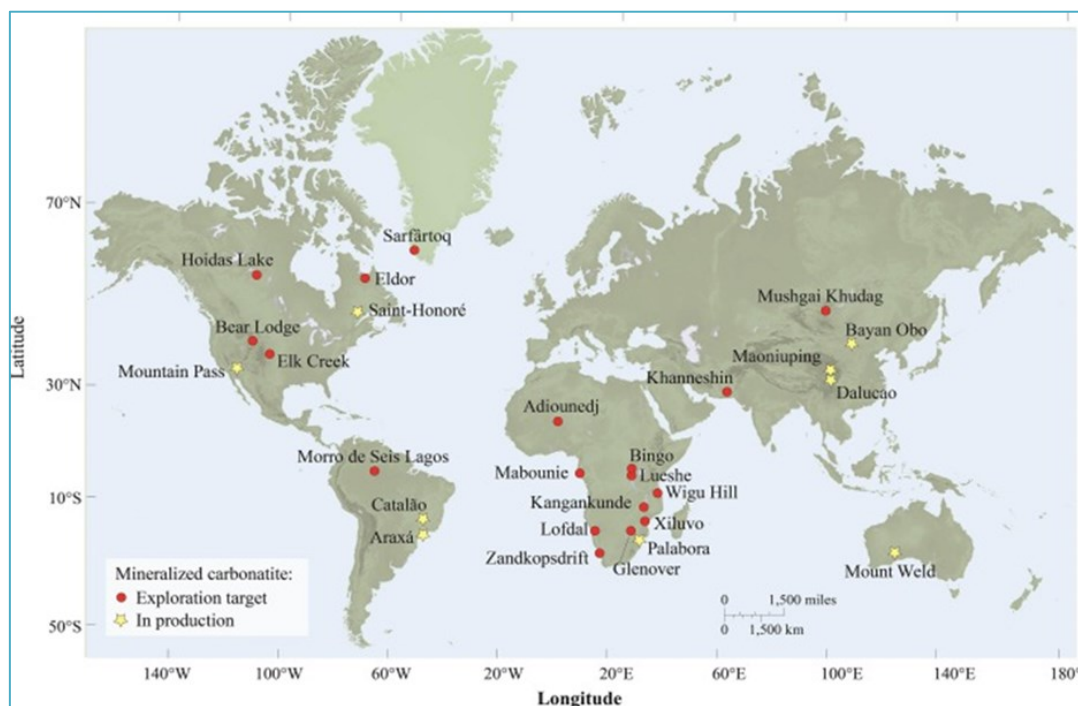
Όμως, η αξιοποίηση των σπάνιων γαιών δεν σταματά σε αυτούς τους τομείς. Διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο, σε άλλους τομείς, όπως ο στρατός, η διαστημική τεχνολογία, η διύλιση πετρελαίου ή η μεταλλουργία. Ακόμη και η παραγωγή οθονών LCD, με επίπεδη οθόνη, και πυρηνικών αντιδραστήρων απαιτεί αυτά τα στοιχεία. Επιπλέον, οι σπάνιες γαίες βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή στην ιατρική, ιδίως μέσω ιατρικών λέιζερ και βηματοδοτών, καθώς και μαγνητικής τομογραφίας, οδοντιατρικής περίθαλψης και διαγνωστικών ακτίνων X, που είναι κρίσιμα για τη θεραπεία του καρκίνου (Μέλφος 2020).

## 2. Κοιτάσματα Σπάνιων Γαιών

### 2.1. Εντοπισμός και Χαρακτηριστικά των Κοιτασμάτων Σπάνιων Γαιών σε Παγκόσμιο Επίπεδο

Οι σπάνιες γαίες δεν απαντώνται ελεύθερα στη φύση, ως καθαρά μέταλλα, όπως ο χρυσός (Au), ο χαλκός (Cu) ή ο άργυρος (Ag), λόγω της υψηλής δραστηριότητάς τους. Ωστόσο, υπάρχουν σε διαφορετικά ορυκτά, είτε ως κύρια συστατικά, είτε ως ίχνη. Παρουσιάζουν, επίσης, ένα φυσικό χαρακτηριστικό σπανιότητας, που δεν αποτελούν μέρος της δομής των περισσότερων ορυκτών σχηματισμών και βρίσκονται μόνο σε περιορισμένες γεωτεκτονικές ρυθμίσεις, σύμφωνα με τον Balaram (2019).

Τα κοιτάσματα σπάνιων γαιών σχηματίζονται μέσω μιας ποικιλίας διεργασιών: μαγματική, υδροθερμική, μεταμόρφωση, διάβρωση και μεταφορά ιζημάτων. Μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως, σε πρωτογενείς και δευτερογενείς κατηγορίες, όπως υποδεικνύεται από τους Mitchell (2015), Zhou (2017) και Dushyantha et al. (2020). Τα πρωτογενή κοιτάσματα εμφανίζονται συνήθως μαζί με τους ανθρακίτες (Εικόνα 2.1), λαμβάνοντας υπόψη ότι δευτερογενείς εναποθέσεις, όπως οι άργιλοι και οι ιοντο-προσροφητικές άργιλοι, δημιουργούνται μέσω της διάβρωσης και της τελικής αποσύνθεσης των πρωτογενών κοιτασμάτων, όπως αναλύθηκε από τους Goodenough et al. (2016), και Zhou (2017).



**Σχήμα 2-1.** Η παγκόσμια κατανομή καρμπονατιτικών κοιτασμάτων, τα οποία αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη και δολομίτη, εντοπίζονται κυρίως στη Βόρεια και Νότια Αμερική, την Ευρώπη, την Ασία, την Αφρική και την Ωκεανία, σε περιοχές με σημαντική γεωλογική δραστηριότητα, (Πηγή: Eggert et al. 2016, Verplanck et al. 2016, Dushyantha et al. 2020)

Κοιτάσματα σπάνιων γαιών έχουν βρεθεί σε συνολικά 34 χώρες σε όλο τον κόσμο (Chen 2011). Τα παγκόσμια αποθέματα σπάνιων γαιών υπολογίζονται σε 120 εκατομμύρια τόνους, σύμφωνα με μια έκθεση του Γεωλογικού Ινστιτούτου των ΗΠΑ (2021) (Πίνακας 2.1). Η Κίνα, η Βραζιλία και το Βιετνάμ βρίσκονται στην κορυφή της λίστας με 36,6%, 17,5% και 18,3% αντίστοιχα των αποθεμάτων, εντός των συνόρων τους (United States Geological Survey (USGS) 2021). Παρά τις πολυάριθμες χώρες με αναγνωρισμένα κοιτάσματα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, μόνο η Κίνα συμμετέχει σημαντικά σε εξορυκτικές δραστηριότητες. Το 2020, παρήγαγαν 140.000 τόνους που αντιστοιχούσαν σε περισσότερο από το ήμισυ (58,3%) του παγκόσμιου όγκου παραγωγής εκείνο το έτος.

## 2.2. Οι Σπάνιες Γαίες στην Ευρώπη

Κοιτάσματα σπάνιων γαιών έχουν βρεθεί στις σκανδιναβικές χώρες και την Ελλάδα, αλλά δεν έχουν αξιοποιηθεί, οδηγώντας σε μια κατάσταση όπου η ΕΕ εισάγει το 98% των REEs της. Η Ελλάδα είναι ένα από τα πέντε έθνη στα οποία η ΕΕ έχει εναποθέσει τις ελπίδες της για τις σπάνιες γαίες, μαζί με τη Γροιλανδία, τη Σουηδία, τη Φινλανδία και τη Νορβηγία. Στις 23 Φεβρουαρίου 2021, η Ursula von der Leyen (Πρόεδρος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής) πρότεινε κατά τη διάρκεια της ομιλίας της, για τις Ημέρες Βιομηχανίας της ΕΕ (2021), τη δημιουργία μιας ευρωπαϊκής συμμαχίας για τις πρώτες ύλες. Ακολουθεί ένα παράδειγμα απόσπασμα από την ομιλία της (Jowitt 2018):

«Τόσο οι πράσινες όσο και οι ψηφιακές τεχνολογίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από συγκεκριμένες σπάνιες πρώτες ύλες... Ένα εκπληκτικό 98% των στοιχείων Rare Earth που απαιτούμε προέρχονται από έναν μόνο πάροχο την Κίνα. Αυτό σαφώς δεν ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της βιωσιμότητας. Επομένως, είναι επιτακτική η ανάγκη να κοιτάξουμε προς τη διαφοροποίηση των αλυσίδων εφοδιασμού μας».

Ο βασικός πυλώνας είναι πως πρέπει να επενδύσουμε, ταυτόχρονα, σε κυκλικές τεχνολογίες, εκείνες που περιλαμβάνουν την ανακύκλωση των πόρων, αντί για την συνεχή τους εξόρυξη. Αυτό έχει σχεδιαστεί να αντιμετωπίσει το σχέδιο δράσης για τις κρίσιμες πρώτες ύλες. Αυτό οδηγεί στην ιδέα της δημιουργίας μιας Ευρωπαϊκής Συμμαχίας Πρώτων Υλών.

### 2.3. Εξόρυξη και Εκμετάλλευση των Κοιτασμάτων Σπάνιων γαιών

**Πίνακας 2-1.** Παγκόσμια εξόρυξη και αποθέματα σπάνιων γαιών, (Πηγή: United States Geological Survey 2021, με τροποποίηση)

| ΧΩΡΑ               | ΕΞΟΡΥΞΗ (τόνοι) |         | ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ (τόνοι) |
|--------------------|-----------------|---------|-------------------|
|                    | 2019            | 2020    |                   |
| ΗΠΑ                | 28.000          | 38.000  | 1500.000          |
| Αυστραλία          | 20.000          | 17.000  | 4.100.000         |
| <b>Βραζιλία</b>    | 710             | 1.000   | 21.000.000        |
| Μιανμάρ (Βιρμανία) | 25.000          | 30.000  | Μη διαθέσιμο      |
| Μπουρούντι         | 200             | 500     | Μη διαθέσιμο      |
| Καναδάς            | -               | -       | 830.000           |
| <b>Κίνα</b>        | 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      |
| <b>Βιετνάμ</b>     | 1.300           | 1.000   | 22.000.000        |
| Υπόλοιπες χώρες    | 66              | 100     | 310.000           |
| Σύνολο (Παγκόσμια) | 220.000         | 240.000 | 120.000.000       |

Τα κοιτάσματα σπάνιων γαιών, που σχετίζονται με τον ανθρακίτη, αποτελούν την πλειονότητα (Σχήμα 2.1), που τυπικά κυριαρχούνται από ελαφριές σπάνιες γαίες. Αντίθετα, κοιτάσματα σπάνιων γαιών που σχετίζονται με Αλκαλικά και Υπεραλκαλικά Πυριγενή πετρώματα, εμπλουτίζονται σε βαριές σπάνιες γαίες. Τα αποθέματα ανθρακίτη κατανέμονται κυρίως σε Προκάμβριες κρατονικές ασπίδες ή σχετίζονται με μεγάλες δομές εκτατικής τεκτονικής (Kanazawa and Kamitani 2006), όπως αυτές που βρίσκονται σε ρωγμές ζώνες της ανατολικής Αφρικής, της βόρειας Σκανδιναβίας, του ανατολικού Καναδά και της νότιας Βραζιλίας.

Πάνω από 200 ορυκτά έχουν εντοπιστεί που περιέχουν σπάνιες γαίες, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Παρ' όλα αυτά, ο μπαστναζίτης και ο μοναζίτης είναι τα πιο διαδεδομένα ορυκτά σπάνιων γαιών, σε κοιτάσματα τέτοιου είδους (Dushyantha et al. 2020). Ως αποτέλεσμα, η πλειονότητα της παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών παρέχεται μέσω του

μπαστναζίτη, του μοναζίτη και του ξενότιμου (Haque et al. 2014, Zhou 2017, Dushyantha et al. 2020).

## 2.4. Κοίτασμα Bayan Obo

Το κοίτασμα Bayan Obo είναι γνωστό ως το μεγαλύτερο κοίτασμα σπάνιων γαιών στον κόσμο και είναι αρκετά ενδιαφέρον ότι ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά ως κοίτασμα σιδήρου το 1927 από τον κ. Daoheng Ding, ενώ οι σπάνιες γαίες ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά από τον κ. Zuolin He, γεγονός που άνοιξε τον δρόμο για την ίδρυση του ορυχείου Bayan Obo το 1957 (Fan et al. 2016, Dushyantha et al. 2020). Βρίσκεται 135 χιλιόμετρα μακριά από το Baotou, στην Αυτόνομη Επαρχία της Εσωτερικής Μογγολίας, το βόρειο όριο αυτής της τοποθεσίας χαρακτηρίζεται από ένα Παλαιοζωικό Ενεργό Ηπειρωτικό Περιθώριο (Kanazawa and Kamitani 2006, Xiao and Kusky 2009, Dushyantha et al. 2020). Το ορυχείο κατέχει έναν διάσημο τίτλο, ως το μεγαλύτερο ορυχείο σπάνιων γαιών στον κόσμο (REEs) και το δεύτερο μεγαλύτερο ορυχείο πηγής Νιοβίου (Nb). Είναι, επίσης, η κύρια πηγή σιδήρου της Κίνας, όλα σύμφωνα με τα ευρήματα του USGS (2015).

Η γένεση του Bayan Obo πραγματοποιήθηκε, αρχικά από έναν Μεσοπροτεροζωικό ανθρακικό μαγματισμό και μετέπειτα από μια Παλαιοζωική υδροθερμική δολομιτίωση (Liu et al. 2018, Dushyantha et al. 2020). Κατά τη διάρκεια της δολομιτίωσης, οι σπάνιες γαίες εμπλουτίστηκαν οδηγώντας σε μια πολυπλοκότητα, για τα μεταλλεύματα Bayan Obo, τα οποία παρουσιάζουν διάφορα συστατικά (Cox et al. 2018). Η ηλικία των ανθρακικών είναι περίπου 1230-1350 εκατομμυρίων ετών, ενώ άλλα δείχνουν διαφορετικές ηλικίες, με βάση διάφορες μεθόδους χρονολόγησης. Η συγκέντρωση των σπάνιων γαιών στο Bayan Obo σχετίζεται, περίπλοκα, με τους τύπους ανθρακικών που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Διαφέρουν σημαντικά, με κάθε παραλλαγή που σημειώνεται μεταξύ των ανθρακικών ασβεστίου (Yang et al. 2019).

Μια εκπληκτική ποσότητα και ποικιλία ορυκτών, συνθέτουν τα συνολικά αποθέματα του κοιτάσματος Bayan Obo: 1.500 εκατομμύρια τόνοι σιδήρου, 2,16 εκατομμύρια τόνοι νιόβιο και 57,4 εκατομμύρια τόνοι σπάνιων γαιών (το 97% είναι ελαφριές). Οι λεπτομέρειες προέρχονται από διάφορες μελέτες (Su 2009, Yang et al. 2013, Fan et al. 2014, Dushyantha et al. 2020) οι οποίες επίσης προσδιόρισαν ότι αυτό το μεμονωμένο κοίτασμα διαθέτει περίπου 162 ορυκτά, με περισσότερα από 20 να είναι ορυκτά σπάνιων γαιών και 15 ορυκτά νιοβίου. Μεταξύ αυτών των ορυκτών συστατικών, ο μοναζίτης και ο μπαστναζίτης ήταν τα πρώτα ορυκτά σπάνιων γαιών που σχηματίστηκαν μέσα στο κοίτασμα, ένα σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και σημασίας για την υπό εξέταση μελέτη.

Η εξόρυξη που πραγματοποιείται στο κοίτασμα Bayan Obo για σπάνιες γαίες είναι επιφανειακή, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 2.2 με χαρακτηριστική λεπτομέρεια. Υπάρχουν τρεις πρωτογενείς μεταλλογενετικές ζώνες, Κεντρική, Ανατολική και Δυτική, με τις δύο πρώτες να βρίσκονται υπό εκμετάλλευση (Kanazawa and Kamitani 2006, Dushyantha et al. 2020). Η παραγωγή στο πεδίο το 2005 ήταν 55.300 τόνοι οξειδίων σπάνιων γαιών (REOs), τα οποία αποτελούσαν το 45% της παγκόσμιας παραγωγής, μαζί με το μερίδιο 47% από την παραγωγή της Κίνας (Wu 2008). Μια οπτική αναπαράσταση απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2 που δείχνει την επιφανειακή εκμετάλλευση στο κοίτασμα Bayan Obo, για εξόρυξη σπάνιων γαιών.



**Σχήμα 2-2.** Μεταλλείο Κοιτάσματος Bayan Obo, (Πηγή: Google Earth)



**Σχήμα 2-3.** Το ορυχείο σπάνιων γαιών στην περιοχή ορυχείων Bayunebo, της πόλης Baotou, στη βόρεια Κίνα, είναι ένα σημαντικό παράδειγμα της κινεζικής κυριαρχίας στα σπάνια στοιχεία (Πηγή: Rare Earth Elements and Chinese Monopoly, [mayankartoons.blogspot.com](http://mayankartoons.blogspot.com)).

### **3. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της Εξόρυξης Σπάνιων Γαιών**

#### **3.1. Ανάλυση των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων που σχετίζονται με την Εξόρυξη και την Εκμετάλλευση Σπάνιων Γαιών**

Προτού μπορέσουν να εμπορευματοποιηθούν οι σπάνιες γαίες, πρέπει πρώτα να εξαχθούν, μια διαδικασία που περιλαμβάνει εξόρυξη και διαχωρισμό, και στη συνέχεια υποβολή σε κατάλληλες διαδικασίες επεξεργασίας. Οποιαδήποτε απόκλιση από τα μέτρα και τις μεθόδους που περιγράφονται μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο σε οικονομικές απώλειες, αλλά σε διαφορετικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους.

Πολλοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι εμπλέκονται στην παραγωγή και εξόρυξη των στοιχείων σπάνιων γαιών. Είναι αδύνατο να εξορυχθούν και να ανακυκλωθούν οι σπάνιες γαίες, χωρίς να υπάρξει μια διατάραξη στο φυσικό τους περιβάλλον. Η εξόρυξη σπάνιων γαιών (REEs) έχει γίνει απαραίτητη για την παραγωγή μιας ευρείας ποικιλίας προϊόντων υψηλής τεχνολογίας, όπως κινητά τηλέφωνα, ηλεκτρικά οχήματα και ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, η διαδικασία εξόρυξης και επεξεργασίας REEs μπορεί να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εάν δεν γίνεται με βιώσιμο τρόπο (Kanazawa and Kamitani 2006, Dushyantha et al. 2020).

##### **3.1.1. Εξόρυξη**

Η εξορυκτική δραστηριότητα αποτελεί μία απειλητική για το περιβάλλον δραστηριότητα. Η υπαίθρια εξόρυξη, η οποία είναι η κύρια τεχνική που χρησιμοποιείται για την απόκτηση των σπάνιων γαιών, συνεπάγεται την ανάπτυξη κολοσσιαίου βιομηχανικού εξοπλισμού.

Οι κύριες πηγές ρύπανσης από τα ορυχεία, περιλαμβάνουν την απελευθέρωση ραδιονουκλεϊδίων, σκόνης και τοξικών μετάλλων, όταν δεν τηρείται η σχετική περιβαλλοντική νομοθεσία, καθώς οι ρύποι διαφεύγουν από τα ορυχεία, μέσω διαφορετικών οδών, φτάνοντας τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στους υδροφόρους ορίζοντες, γεγονός που οδηγεί σε δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Για αυτό, θα ήταν σκόπιμο η ενίσχυση των ελέγχων, μέσω της συχνής επιθεώρησης των εξορυκτικών δραστηριοτήτων, από τις αρμόδιες αρχές, με σκοπό την διασφάλιση της τήρησης των περιβαλλοντικών προτύπων. Ακόμα, η αυστηρή επιβολή κυρώσεων δύναται αναγκαία, σε περιπτώσεις παραβίασης περιβαλλοντικών νόμων. Τέλος, η δημοσιοποίηση των περιβαλλοντικών δεδομένων και η διασφάλιση της πρόσβασης του

κοινού, σε πληροφορίες σχετικά με τις εξορυκτικές δραστηριότητες, ενισχύει την λογοδοσία και την υπεύθυνη λήψη αποφάσεων (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

### 3.1.2. Διαδικασίες Επεξεργασίας (Εξευγενισμού)

Η εξόρυξη σπάνιων γαιών αγγίζει ένα ευρύτερο φάσμα από την απλή απόκτηση καθαρών και λειτουργικών προϊόντων. Αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία με πολλαπλές πτυχές που αγγίζουν επιστημονικά πεδία, περιβαλλοντικές ανησυχίες και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις. Η επεξεργασία του μεταλλεύματος (ή αλλιώς ο εξευγενισμός του) είναι μια σειρά από χημικές και φυσικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση και την καθαρότητα των μετάλλων από τα μεταλλεύματά τους (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021). Η διαδικασία εξευγενισμού ποικίλλει, ανάλογα με το είδος του, αλλά γενικά περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Θρυμματισμός και άλεση. Το μέταλλευμα αρχικά θρυμματίζεται σε μικρά κομμάτια και στη συνέχεια αλέθεται σε λεπτόκοκκο κλάσμα.
- Συμπύκνωση. Το λεπτόκοκκο κλάσμα του μεταλλεύματος αναμιγνύεται με νερό και κάποιο χημικό αντιδραστήριο για να διαχωριστούν τα ορυκτά που περιέχουν τα μέταλλα από τα σύνδρομα ορυκτά. Αυτό γίνεται συνήθως μέσω βαρυτικής διαλογής, μαγνητικής διαλογής ή επίπλευσης.
- Χημική επεξεργασία. Το συμπύκνωμα υποβάλλεται σε χημικές διεργασίες για την απόληψη του μετάλλου ή των ενώσεών του που αποτελούν το τελικό προϊόν. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει οξείδωση, αναγωγή, διάλυση, ή ιοντοανταλλαγή.
- Ηλεκτρόλυση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται ηλεκτρόλυση για την απομόνωση του μετάλλου από το συμπύκνωμα.
- Καθαρισμός. Το τελικό προϊόν καθαρίζεται για να απομακρυνθούν τυχόν ίχνη ακαθαρσιών.

### 3.1.3. Απόβλητα

Η εξόρυξη στοιχείων σπάνιων γαιών (REEs) είναι ζωτικής σημασίας και ουσιαστικά απαραίτητη για τη δημιουργία μιας ποικιλίας εξελιγμένων αγαθών, από κινητά τηλέφωνα έως ηλεκτρικά οχήματα. Ωστόσο, η διαδικασία εξόρυξης και επεξεργασίας των REEs μπορεί να παράγει σημαντικές ποσότητες αποβλήτων, οι οποίες, εάν και εφόσον δεν διαχειρίζονται

σωστά, μπορούν να έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ορισμένοι από τους τύπους αποβλήτων που μπορούν να παραχθούν από την εξόρυξη των σπάνιων γαιών είναι:

- ✓ Υγρά απόβλητα. Αυτά τα απόβλητα προέρχονται από διάφορες φάσεις της επεξεργασίας REEs, όπως η έκπλυση, η οξείδωση και η εξαγωγή. Μπορεί να περιέχουν βαρέα μέταλλα, ραδιενεργά στοιχεία και άλλα τοξικά υλικά.
- ✓ Στερεά απόβλητα. Αυτά τα απόβλητα αποτελούνται από βράχια και χώμα που απομένουν μετά την εξαγωγή των REEs. Μπορεί να περιέχουν βαρέα μέταλλα και άλλους ρύπους.
- ✓ Επικίνδυνα Αέρια. Η επεξεργασία REEs μπορεί να εκπέμψει επικίνδυνα αέρια, όπως φθοριούχο υδρογόνο (HF) και διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>).

Ορισμένες από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παραγόμενων αποβλήτων είναι:

- ✓ Ρύπανση του νερού. Τα υγρά απόβλητα από την εξόρυξη REEs μπορούν να διαρρεύσουν στο νερό, ρυπαίνοντας και βλάπτοντας την υδρόβια ζωή.
- ✓ Ρύπανση του εδάφους. Τα στερεά απόβλητα από την εξόρυξη REEs μπορούν να ρυπάνουν το έδαφος, με βαρέα μέταλλα και άλλους ρύπους, καθιστώντας το ακατάλληλο για καλλιέργεια ή άλλες χρήσεις.
- ✓ Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η εκπομπή επικίνδυνων αερίων από την επεξεργασία REEs συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή.
- ✓ Προβλήματα υγείας. Η έκθεση σε ρύπους από την εξόρυξη REEs μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας στους ανθρώπους που ζουν και εργάζονται κοντά σε ορυχεία REEs (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

### 3.2. Περιβαλλοντικά Προβλήματα Επεξεργασίας (Refining)

Όταν ολοκληρωθεί η εξόρυξη, τα πετρώματα σπάνιων γαιών μεταφέρονται σε μονάδες εμπλουτισμού. Η διαδικασία επεξεργασίας περιλαμβάνει την παραγωγή, είτε οξειδίων, είτε καθαρών στοιχείων σπάνιων γαιών (Gamaletsos et al. 2019). Παρόλα αυτά, η διαδικασία επεξεργασίας των σπάνιων γαιών μπορεί να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εάν δεν γίνεται με βιώσιμο τρόπο. Κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα της επεξεργασίας είναι:

- Ρύπανση με οξέα. Ατυχήματα ή ελλιπής συντήρηση στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, μπορούν να οδηγήσουν σε απελευθέρωση τοξικών οξέων στο περιβάλλον, με καταστροφικές συνέπειες για τα οικοσυστήματα.

- Επικίνδυνα απόβλητα. Η απόρριψη επικίνδυνων αποβλήτων από την επεξεργασία REEs, όπως ραδιενεργά υλικά, μπορεί να ρυπάνει το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, θέτοντας σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.
- Απώλεια βιοποικιλότητας: αποψίλωση των δασών. Η εξόρυξη REEs συχνά απαιτεί την αποψίλωση των δασών και την καταστροφή των φυσικών οικοτόπων, οδηγώντας στην απώλεια βιοποικιλότητας και στην αλλοίωση του τοπίου. Για αυτό είναι αναγκαία η τήρηση των περιβαλλοντικών προτύπων.
- Επιπτώσεις στην άγρια ζωή. Η ρύπανση του νερού και του εδάφους από την εξόρυξη και την επεξεργασία των REEs μπορεί να βλάψει ή να εξαφανίσει είδη άγριας ζωής, διαταράσσοντας την τροφική αλυσίδα και τις ισορροπίες του οικοσυστήματος (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

### 3.3. Περιβαλλοντικά Προβλήματα Αποβλήτων

Ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα που πηγάζει από την εξόρυξη και τη επεξεργασία REEs είναι η διαχείριση των αποβλήτων, ένα πρόβλημα που κλιμακώνεται, όταν τα ορυχεία παραβιάζουν τους κανονισμούς για τη σωστή διάθεση απορριμμάτων, κάτι που συμβαίνει συχνά στην Κίνα. Αυτή η παράβλεψη μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση του περιβάλλοντος και των υδάτων, καθώς και σε ρύπανση του εδάφους, με ραδιενεργά υλικά και υποπροϊόντα εξόρυξης. Τα άμεσα οικοσυστήματα που επηρεάζονται είναι η ατμόσφαιρα και το έδαφος, αλλά πιο ανησυχητικό είναι η πιθανότητα εισχώρησης αποβλήτων και λυμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα, κάτι που θα διεύρυνε περαιτέρω την ακτίνα ρύπανσης (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

Στα απόβλητα διακρίνονται δύο τύποι, τα απόβλητα μετάλλων και τα απόβλητα πετρωμάτων. Στα απόβλητα μετάλλων είναι υψηλότερος ο κίνδυνος της ρύπανσης, καθώς, όντας λεπτόκοκκα και συχνά αναμεμιγμένα με λύματα και χημικά, διαθέτουν αυξημένη ικανότητα διάχυσης στο περιβάλλον. Επιπλέον, η μικρή τους κοκκομετρία επιτρέπει την εύκολη μεταφορά και διασπορά τους στο νερό ή το έδαφος, θέτοντας σε άμεσο κίνδυνο την ποιότητα του περιβάλλοντος.

Σε αντίθεση, τα απόβλητα των πετρωμάτων έχουν μειωμένο κίνδυνο ρύπανσης, καθώς όντας μεγαλύτερα σωματίδια, δυσκολεύονται να διαχυθούν στο περιβάλλον. Έτσι, η περιορισμένη κινητικότητα μειώνει τον άμεσο κίνδυνο ρύπανσης του νερού και του εδάφους (Schüler et al. 2011).

### 3.3.1. Στερεά Απόβλητα

Η δημιουργία των στερεών αποβλήτων μιας εξορυκτικής δραστηριότητας, δεν περιορίζεται μόνο στο στάδιο των εργασιών της. Τα στερεά απόβλητα αφορούν το σύνολο των διεργασιών που απαιτούνται από την εξόρυξη των σπάνιων γαιών μέχρι τη δημιουργία του τελικού προϊόντος. Οι σπάνιες γαίες ακολουθούν κάποια συγκεκριμένα στάδια/πρότυπα επεξεργασίας (εξευγενισμός, εμπλουτισμός κλπ.) για την παραγωγή του τελικού του; προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα τα στερεά απόβλητα προέρχονται από:

- Υπερκείμενα εκμετάλλευσης.
- Τέλματα εμπλουτισμού (συνήθως επίπλευσης).
- Στέρεα άλλων μεθόδων εμπλουτισμού.
- Σκωρίες.
- Ιζήματα.
- Ιλύς, από εξουδετερώσεις υγρών αποβλήτων (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

### 3.3.2. Υγρά Απόβλητα

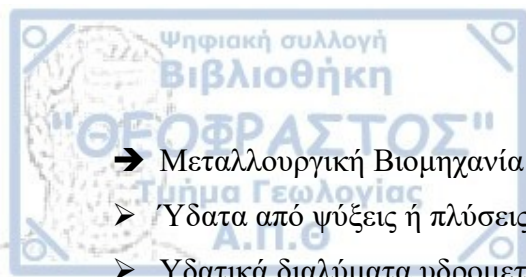
Η επεξεργασία των σπανίων γαιών αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες πηγές υγρών αποβλήτων που δημιουργούνται στην εξορυκτική βιομηχανία. Ο εμπλουτισμός των ορυκτών πραγματοποιείται για την απομόνωση των σημαντικών στοιχείων και γίνεται μέσω του νερού, αλλά και πολλών άλλων διαφορετικών χημικών ενώσεων, ανάλογα πάντα με το στοιχείο. Γενικά τα υγρά απόβλητα στην μεταλλευτική βιομηχανία απορρέουν από τρεις διαφορετικές φάσεις εξόρυξης και επεξεργασίας του υλικού. Σε κάθε φάση έχουμε και τα αντίστοιχα υγρά απόβλητα, όπου είναι τα έξης:

#### ➔ Μεταλλευτική Βιομηχανία

- Όξινα νερά μεταλλείων.
- Νερά έκλυσης μηχανημάτων.
- Νερά κατά την εξόρυξη (ψύξη μηχανημάτων).

#### ➔ Βιομηχανία Εμπλουτισμού

- Απορροές νερών από φυσικές ή τεχνητές λίμνες καθίζησης διαλυμάτων υδρομεταλλουργίας.
- Υγρά που χρησιμοποιούνται κατά τον διαχωρισμό.



- ➔ Μεταλλουργική Βιομηχανία
- Υδατα από ψύξεις ή πλύσεις.
- Υδατικά διαλύματα υδρομεταλλουργίας.

Στο σύνολό τους, τα υγρά απόβλητα, μπορεί να περιλαμβάνουν αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία προέρχονται από το εξορυγμένο μέταλλευμα. Επιπλέον, το στάδιο του εμπλουτισμού και η διαδικασία του διαχωρισμού, με την μέθοδο επίπλευσης, δημιουργεί υγρά απόβλητα, με ανόργανες διαλυμένες ουσίες. Στις ουσίες αυτές περιλαμβάνονται τα βαρέα μέταλλα, όπως ο σίδηρος (Fe), ο ψευδάργυρος (Zn), το μαγγάνιο (Mn), ο μόλυβδος (Pb), το αρσενικό (As), το χρώμιο (Cr) και αρκετά οξείδια μετάλλων. Μερικές φορές και το νερό με διαφορετικό δείκτη pH ή υψηλή θερμοκρασία, μπορεί να χαρακτηριστεί ως επικίνδυνο υγρό απόβλητο για το περιβάλλον (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

### **3.3.3. Καθίζηση**

Καθίζηση ονομάζεται η δράση της προσθήκης ιζήματος σε υδάτινα σώματα. Πραγματοποιείται όταν η απορροή, από χώρους κράτησης ή η διάβρωση των αποβλήτων, προσθέτει ένα ακόμα στρώμα αποβλήτων. Αυτή η διαδικασία αλλάζει το σχήμα και τις κατευθύνσεις ροής του νερού, που στη συνέχεια κάνει το νερό πιο ρηχό. Έτσι, δημιουργεί περιοχές με συνθήκες μεγαλύτερης πιθανότητας σε πλημμύρες (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

### **3.3.4. Όξινη Απορροή Μεταλλείων**

Η παραγωγή θειικού οξέος είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας της οξείδωσης, που λαμβάνει χώρα στα θειούχα ορυκτά. Αυτό δημιουργεί ένα όξινο υλικό, όπου τα απόβλητα εκτίθενται και επιταχύνει περαιτέρω τη διάλυση των θειούχων ορυκτών, εισάγοντας περισσότερα μέταλλα και οξέα στο περιβάλλον. Η έκπλυση με οξύ αποτελεί σοβαρό κίνδυνο για την υδρόβια ζωή, καθώς τα οικοσυστήματα δεν μπορούν να υποστηρίξουν την επιβίωση τους, λόγω των διακυμάνσεων του pH του νερού. Αυτό καθιστά την όξινη απορροή των μεταλλείων επιζήμια για τη βιοποικιλότητα (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

### 3.3.5. Εκπομπές Ρύπων

Η εξόρυξη και η επεξεργασία σπάνιων γαιών έχουν ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση/εκπομπή ρύπων, μέσω διαφορετικών οδών όπως η διαρροή στο έδαφος, η απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα και η διαφυγή στους υδροφορείς ορίζοντες. Η υιοθέτηση σύγχρονων μεθόδων στην εξόρυξη και την επεξεργασία πετρωμάτων διασφαλίζει ότι η απελευθέρωση τέτοιων ρύπων είναι μηδαμινή. Κύριοι ρύποι αναφέρονται:

- Αέρια του Θερμοκηπίου. Η καύση ορυκτών καυσίμων για την τροφοδοσία της εξόρυξης και επεξεργασίας REEs απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στην κλιματική αλλαγή.
- Ρυπαντές Αέρα. Η καύση και η επεξεργασία REEs παράγουν ρύπους αέρα, όπως αιθαλομίχλη, οξείδια του αζώτου, οξείδια του θείου και πτητικά οργανικά υλικά (VOCs). Αυτοί οι ρύποι μπορούν να βλάψουν την ανθρώπινη υγεία, να προκαλέσουν όξινη βροχή και να βλάψουν τα οικοσυστήματα (Λισάντερ 2021).

### 3.3.6. Ραδιονουκλεΐδια

Οι πηγές των ραδιονουκλεϊδίων είναι πολλά ορυκτά REEs, όπως ο μοναζίτης και το ξενότιμο, τα οποία περιέχουν ραδιενεργά στοιχεία, όπως το θόριο και το ουράνιο. Η επεξεργασία των ορυκτών των σπάνιων γαιών απελευθερώνει ραδιονουκλεΐδια, τα οποία μπορούν να ρυπαίνουν το περιβάλλον και να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία των εργαζομένων και των γύρω κοινοτήτων.

Η ακατάλληλη αποθήκευση των αποβλήτων έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει τη διείσδυση ραδιενεργών στοιχείων στο έδαφος και σε κοντινές πηγές νερού, όπως σημειώνουν οι Paul and Campbell (2011). Αυτές οι ραδιενεργές ουσίες μπορούν να συσσωρευτούν στα φυτά και, όταν καταποθούν, μπορούν να προχωρήσουν μέσω της τροφικής αλυσίδας, οδηγώντας σε αναπνευστικά και διάφορα προβλήματα υγείας στα ζώα.

Η μεγαλύτερη απειλή ρύπανσης, από ακτινοβολία, οφείλεται σε απόβλητα του μοναζίτη και είναι ουσιαστικά μη περιορισμένη, καθώς αποτελεί μεγάλο κίνδυνο για το περιβάλλον.

Η Κίνα απαγόρευσε την εξόρυξη ορυκτών μοναζίτη, το 2011. Ομοίως, οι Ηνωμένες Πολιτείες εφάρμοσαν αυστηρά μέτρα για την εξόρυξη αυτών των μεταλλευμάτων, ως πρωτοβουλία για τον περιορισμό της ραδιενεργής ρύπανσης (Schüler et al. 2011). Αλλά λίγο αργότερα, λόγω της μεγάλης ζήτησης για σπάνιες γαίες, η Κίνα επανεξέτασε την απόφασή της

και επέτρεψε ξανά την εξόρυξη πετρωμάτων μοναζίτη, αυτή τη φορά με ακόμη πιο αυστηρούς νόμους και κανονισμούς, χωρίς όμως να τηρούνται σε όλες τις περιπτώσεις.

Το πιο επικίνδυνο μέρος αυτής της ρύπανσης είναι τα απόβλητα που παράγονται από ραδιενεργά στοιχεία, επειδή η ακτινοβολία που απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση της ραδιενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε καρκίνο, μεταξύ άλλων καταστάσεων, σε ανθρώπους καθώς και σε ζώα.

### 3.3.7. Σκωρία και Μέταλλα

Καθώς οι εξορυκτικές δραστηριότητες προχωρούν, ορισμένα πετρώματα διαλύονται μαζί με άλλα υλικά, απελευθερώνοντας σωματίδια σκόνης στον αέρα. Αυτή η αερομεταφερόμενη σκόνη είναι ικανή να μεταφέρει σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων, ένα θέμα που συνδέεται με πολλά ζητήματα υγείας που υπογράμμισαν οι Paul and Campbell (2011). Μεταξύ αυτών των μετάλλων είναι και ο αμίαντος όταν υπάρχει στο μέταλλευμα, ο οποίος, εάν εισπνευστεί σε μορφή σκόνης, παγιδεύεται στους πνεύμονες και οδηγεί στον γνωστό ως «μαύρο πνεύμονα» ή πνευμονοκονίαση και πυριτίαση.

Ο αριθμός των εργαζομένων στα ορυχεία έχει μειωθεί σε μεγάλο βαθμό, λόγω των αναπνευστικών προβλημάτων που έχουν, αλλά δεν είναι μόνο αυτό. Όταν λαμβάνουμε υπόψη τις αναπνευστικές επιπλοκές που περιβάλλουν τους ανθρώπους που ζουν σε κοντινές περιοχές, ως αποτέλεσμα της απελευθέρωσης ρύπων στον αέρα, δημιουργείται μια ακόμη πιο σοβαρή εικόνα.

Ένα άλλο παράδειγμα δημιουργίας επιβλαβούς σκόνης, είναι η σκόνη που συνοδεύει τα καυσαέρια και αποτελεί υποπροϊόν της εξόρυξης φθορίου (Schüler et al. 2011). Σύμφωνα με την CSRE (Κινεζική Εταιρεία Σπάνιων Γαιών), σχεδόν κάθε τόνος στοιχείων σπάνιων γαιών που παράγονται επιβαρύνει το περιβάλλον, με περίπου 9 κιλά φθόριο και 12 κιλά βαρέων μετάλλων, που περιέχονται στη σκόνη των καυσαερίων και στα απόβλητα.

### 3.3.8. Οξείδια του Άνθρακα (C)

Η απόκτηση της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία των ορυχείων σπάνιων γαιών βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα. Αυτό οδηγεί σε σημαντικές εκπομπές CO<sub>2</sub> σε όλη τη διαδικασία εξόρυξης και επεξεργασίας REEs. Ορισμένα κράτη έχουν λάβει μέτρα για να καταπολεμήσουν αυτό το ζήτημα, θεσπίζοντας νόμους που περιορίζουν τα επίπεδα εκπομπών. Ωστόσο, πολλές αναπτυσσόμενες χώρες στερούνται τέτοιας νομοθεσίας για την

απελευθέρωση οξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, επιδεινώνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εκείνο με τη σειρά του, προάγει την ανάπτυξη όξινης βροχής, λόγω των αυξημένων επιπέδων μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται στον αέρα (Schüler et al. 2011).

### **3.3.9. Λύματα**

Η πλειονότητα των μεθόδων εξόρυξης έχουν υψηλές ανάγκες σε νερό, για την εξαγωγή ορυκτών, την επεξεργασία τους και τη διαχείριση των αποβλήτων τους. Τα λύματα που παράγονται μέσω αυτών των διεργασιών έχουν τη δυνατότητα να ρυπαίνουν πηγές νερού σε κοντινή απόσταση από την περιοχή εξόρυξης, γεγονός που θα άλλαζε την ποιότητα του τοπικού πόσιμου νερού (Molycorp 2012). Υπάρχουν μερικά ορυχεία, όπως το ορυχείο Mountain Pass, που βρίσκονται στη νότια Καλιφόρνια, το οποίο έχει υιοθετήσει τεχνολογίες ανακύκλωσης λυμάτων. Αυτό οδήγησε σε σημαντικές μειώσεις, τόσο στην ποιότητα του νερού, όσο και στον όγκο των λυμάτων.

## **3.4. Συνεισφορά REEs στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου**

Ένα οικολογικό πρόβλημα μεγάλου μεγέθους για τον πλανήτη είναι η επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η διαδικασία κατά την οποία η ατμόσφαιρα ενός πλανήτη παγιδεύει θερμότητα είναι εκείνη που περιλαμβάνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο οδηγεί σε άνοδο της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Ωστόσο, η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι αυτή που ανεβάζει τα επίπεδα των αερίων του θερμοκηπίου, οδηγώντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι πολλές και εξαιρετικά σημαντικές, όπως το λιώσιμο των πάγων και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, καθώς και τα ακραία καιρικά φαινόμενα που δεν βοηθούν στην εξέλιξη της ζωής στη Γη (Λισάντερ 2021).

### **3.4.1. Αέρια Ρύπανση**

Η αιρούμενη σκόνη που προέρχεται από το χώρο της εξόρυξης και της επεξεργασίας των REEs, μπορεί και μεταφέρεται με τον αέρα, σε ακτίνα εκατοντάδων μέτρων μακριά από το ορυχείο. Η σκόνη από τις σπάνιες γαίες προκαλεί περιβαλλοντική ρύπανση και ρυπαίνει τα οικοσυστήματα. Οι κύριες πηγές αυτής της σκόνης είναι οι ανοιχτές περιοχές των εργοταξίων, οι σωροί αποθήκευσης υλικών και οι τοποθεσίες εργασιών, ιδιαίτερα εκεί που

χρησιμοποιούνται μηχανήματα. Η κίνηση των οχημάτων συμβάλλει στη διάδοση της σκόνης, σε μεγάλες αποστάσεις.

Για τον περιορισμό της αέριας ρύπανσης θα πρέπει να γίνεται συνεχής και ενδεδειγμένος έλεγχος, καθώς και να υπάρχουν προγράμματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ο προσεγγιστικός δείκτης των εκπομπών για τις εξορυκτικές δραστηριότητες είναι:

$$E = 2,69 \text{ mg} / \text{εκτάριο} / \text{μήνα δραστηριότητας}$$

Αυτό σημαίνει, ότι σε συνδυασμό και με την ήδη υπάρχουσα σκόνη, το όριο ξεπερνιέται κατά πολύ. Για την μείωση των αερίων ρύπων συνιστάται το στρώσιμο των δρόμων της κυκλοφορίας των οχημάτων. Το συγκεκριμένο μέτρο είναι άκρως αποτελεσματικό, όμως έχει υψηλό κόστος. Αντιθέτως, η διαβροχή του δρόμου και των εγκαταστάσεων με νερό ή χημικά, έχει χαμηλό κόστος, είναι αποτελεσματική, όμως απαιτεί συνεχή συντήρηση. Η μείωση της σκόνης, επιτυγχάνεται επίσης, με την ελάττωση και των περιορισμό της κίνησης. Συνήθως επιτυγχάνεται με την επιβολή μείωσης της ταχύτητας και της άσκοπης κυκλοφορίας των οχημάτων, εντός και εκτός του εργοταξίου (Λισάντερ 2021).

| REOs                     | Primary Energy<br>MJ/kg | GHG<br>kg CO <sub>2</sub> -e/kg | Water kL<br>Water/kg | Toxicity<br>*DALY/kg |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|
| La                       | 177                     | 9.3                             | 0.33                 | $1.65 \times 10^6$   |
| Ce                       | 157                     | 8.3                             | 0.30                 | $1.46 \times 10^6$   |
| Pr                       | 798                     | 41.4                            | 1.32                 | $7.36 \times 10^6$   |
| Nd                       | 743                     | 38.5                            | 1.23                 | $6.86 \times 10^6$   |
| Sm, Eu, Gd (mixed oxide) | 1,074                   | 55.6                            | 1.75                 | $9.89 \times 10^6$   |

Note: \*DALY—Disability adjusted life years (metric to determine toxicity on human health developed by World Health Organisation [64].

**Σχήμα 3-1.** Περιβαλλοντικό αποτύπωμα REEs, (Πηγή: Haque et al. 2014)

### 3.5.Περιπτώσεις Υφιστάμενων Επιβλαβών Ορυχείων

#### 3.5.1. MOUNTAIN PASS, ΗΠΑ

Από το 1965 έως το 1990, το Pass Mountain, στην Καλιφόρνια κατείχε τον τίτλο του μεγαλύτερου ορυχείου παραγωγής σπάνιων γαιών. Ωστόσο, η άνοδος της Κίνας στην παραγωγή και το εμπόριο σπάνιων γαιών άλλαξε αυτό το τοπίο. Το Pass Mountain είναι μια ολοκληρωμένη εγκατάσταση, που όχι μόνο εξορύσσει ορυκτά, αλλά επίσης παράγει, επεξεργάζεται και εξευγενίζει μέταλλα και οξείδια σπάνιων γαιών. Αυτά τα πολύτιμα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών. Η εγκατάσταση Pass

Mountain στην Αυστραλία έχει σχεδιαστεί με στόχο την μηδενική εκφόρτωση αποβλήτων, καθώς αξιοποιεί και καινοτόμες τεχνολογίες για την επεξεργασία σπάνιων γαιών (ΣΓ).

- ✓ Ξήρανση Αποβλήτων. Η εγκατάσταση διαθέτει σύστημα ξήρανσης αποβλήτων, που ανακτά σχεδόν όλο το νερό που χρησιμοποιείται στις διαδικασίες άλεσης και επίπλευσης REEs. Αυτό μειώνει σημαντικά την παραγωγή υγρών αποβλήτων και την ανάγκη για επεξεργασία λυμάτων.
- ✓ Κλειστό Κύκλωμα. Η μονάδα υιοθετεί ένα κλειστό κύκλωμα λειτουργίας, όπου τα υγρά που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται, ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση νερού και την παραγωγή αποβλήτων.
- ✓ Χλωρίωση/Αλκαλίωση. Η εγκατάσταση Pass Mountain διαθέτει μονάδα χλωρίου/αλκαλίου που χρησιμοποιεί ενώσεις χλωρίου και αλκαλίου ως αντιδραστήρια για τον διαχωρισμό και την επεξεργασία REEs. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων REEs με υψηλή καθαρότητα.
- ✓ Βιώσιμες Τεχνολογίες. Η μονάδα αξιοποιεί βιώσιμες τεχνολογίες που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας, τα απόβλητα και τις εκπομπές ρύπων, συμβάλλοντας στην προστασία του περιβάλλοντος (Ανυφαντάκης 2021).



**Σχήμα 3-2.** Αεροφωτογραφία Ορυχείου Mountain Pass, (Πηγή: mpmaterials.com)

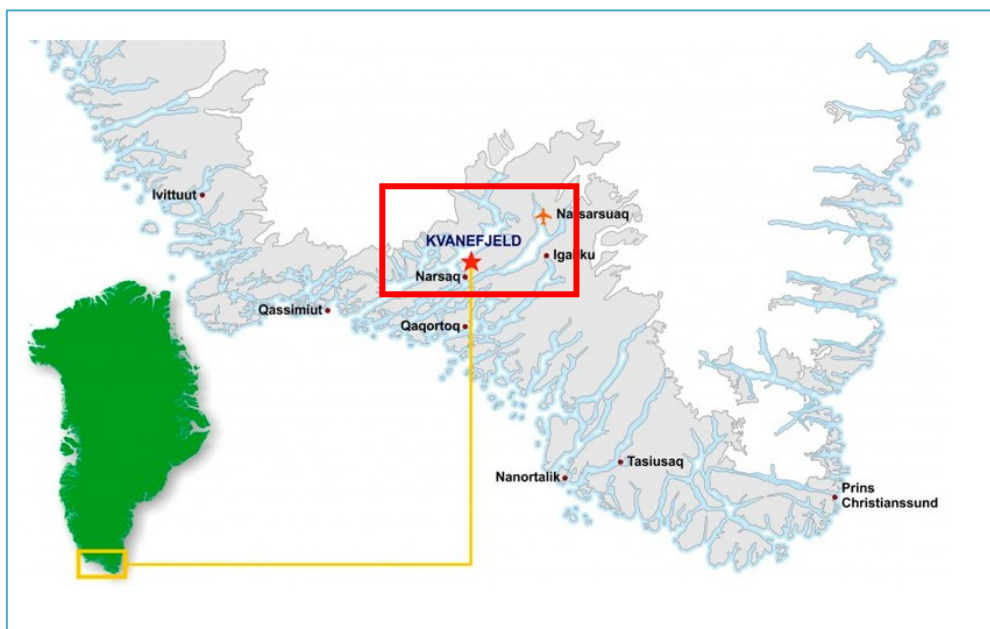
Ωστόσο, η Molycorp, η εταιρεία που εκμεταλλεύεται το ορυχείο Pass Mountain, αντιμετώπισε ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα το 2002, όταν ένας σωλήνας που μετέφερε απόβλητα σε μια δεξαμενή αποθήκευσης έσπασε, προκαλώντας υπερχειλίση και διαρροή ραδιενεργών και τοξικών αποβλήτων στην περιοχή. Η διαρροή, σε συνδυασμό με μια ποικιλία οικονομικών παραγόντων, οδήγησε στο κλείσιμο του ορυχείου και στην αναθεώρηση των περιβαλλοντικών πρακτικών του. Παράλληλα, έχει προκληθεί περιβαλλοντική ζημιά σε

οικοσυστήματα και πηγές νερού κοντά στα ορυχεία. Σήμερα, το Mountain Pass έχει ξαναρχίσει τη λειτουργία του μετά την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών κινδύνων, αλλά η παραγωγή παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (Ανυφαντάκης 2021).

### 3.5.2. KVANEFJELD, Γροιλανδία

Το Kvanefjeld της Γροιλανδίας, είναι μια περιοχή πλούσια σε σπάνιες γαίες, όπου οι ερευνητές εκτιμούν ότι διαθέτει τα τρίτα μεγαλύτερα κοιτάσματα σπάνιων γαιών στον κόσμο και τα έκτα μεγαλύτερα κοιτάσματα ουρανίου. Η Greenland Minerals and Energy Ltd, με έδρα την Αυστραλία, σκόπευε να ανοίξει ορυχείο στην περιοχή το 2013. Ωστόσο, το σχέδιο διάθεσης αποβλήτων περιλάμβανε την αποθήκευσή τους στη λίμνη Taseq. Τα ραδιονουκλεΐδια, τα βαρέα μέταλλα και τα φθορίδια θα εισέρχονταν στις λίμνες, μέσω των αποβλήτων, ρυπαίνοντας όχι μόνο τις λίμνες αλλά και τα υπόγεια ρέματα ποταμών που εκβάλλουν στον ωκεανό (Schüler et al. 2011).

Η έλλειψη περιβαλλοντικών κανονισμών στη χώρα όπου υπάγεται η Γροιλανδία, δηλαδή τη Δανία, επέτρεψε στις εταιρείες εξόρυξης της Γροιλανδίας να προχωρήσουν με σχέδια εξόρυξης, παρά τα υπάρχοντα σχέδια διάθεσης αποβλήτων, τα οποία θα είχαν επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και τις γύρω περιοχές. Το 2015 η εταιρία αιτήθηκε άδεια εξόρυξης για ορυχείο επιφανειακής εξόρυξης, στην κυβέρνηση της Γροιλανδίας, ωστόσο η αίτηση απορρίφθηκε εξαιτίας της μη τήρησης των μέτρων για τον περιορισμό των ρύπων.



**Σχήμα 3-3.** Έργο Kvanefjeld - Ορυκτά ενεργειακής μετάβασης, (Πηγή: <https://etransmin.com/kvanefjeld-project/>)

### 3.5.3. ΒΑΟΤΟΥ, Κίνα

Ένα σημαντικό ζήτημα που επηρεάζει την εξόρυξη σπάνιων γαιών στη Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας, είναι το ανησυχητικά υψηλό ποσοστό παράνομης εξόρυξης. Οι επιστήμονες εκτιμούν, ότι η Κίνα εξορύσσει παράνομα περίπου 20.000 τόνους στοιχείων σπάνιων γαιών από μη πιστοποιημένα ορυχεία κάθε χρόνο. Επιπλέον, τα παράνομα ορυχεία θεωρείται απίθανο να διαθέτουν μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος, οδηγώντας σε ανεξέλεγκτες εκπομπές ρύπων και αποβλήτων. Τα απόβλητα και η σκόνη ορυχείων προκαλούν ρύπανση, επηρεάζοντας αρνητικά την υγεία των εργαζομένων και των κατοίκων στις γύρω περιοχές και βλάπτουν το περιβάλλον και τα οικοσυστήματα.

Συγκεκριμένα, στη βόρεια Κίνα, ραδιενεργά απόβλητα διαπιστώθηκε ότι διέρρευσαν σε υπόγεια ρέματα και στον Κίτρινο Ποταμό, πηγή νερού για περισσότερους από 150 εκατομμύρια κατοίκους, ενώ στην επαρχία Γκουανγκντόνγκ, γεωργικές εκτάσεις και υγρότοποι υπέστησαν σοβαρές ζημιές, από τα ισχυρά οξέα και τις άλλες απορροές, από τα κοντινά ορυχεία σπάνιων γαιών. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί, επίσης, το γεγονός ότι ένα ολόκληρο χωριό, μεταξύ της πόλης Baotou στην Εσωτερική Μογγολία και του Κίτρινου Ποταμού, έχει εκκενωθεί και οι κάτοικοι μεταφέρθηκαν, μετά από αναφορές, με υψηλά ποσοστά καρκίνου και άλλα προβλήματα υγείας, που σχετίζονται με ορυχεία και διυλιστήρια σπάνιων γαιών (Ανυφαντάκης 2021).



**Σχήμα 3-4.** Μια παρατημένη δεξαμενή συγκέντρωσης τοξικών αποβλήτων στην Κίνα, (Πηγή: Yale E360)

«Ο καθαρισμός είναι δύσκολος, ειδικά επειδή υπάρχει μια μακρά ιστορία εξόρυξης εδώ», είπε ο Xu Cheng, διευθυντής του Γραφείου σπάνιων γαιών Longnan, σε μια συνέντευξη στο κυβερνητικό γραφείο της πόλης Longnan... «Μερικοί ειδικοί λένε ότι θα χρειαστούν 50 έως 100 χρόνια για να ανακάμψει πλήρως το περιβάλλον, επομένως το τίμημα που πληρώνουν οι ντόπιοι είναι πολύ υψηλό»

«Δεδομένου ότι αυτές οι τεχνολογικές εταιρείες επωφελούνται από τη χρήση των πόρων σπάνιων γαιών μας, θα πρέπει να αναλάβουν κάποια ευθύνη και να συμμετάσχουν στη διαδικασία καθαρισμού του περιβάλλοντος... Κάνουμε τεράστιες θυσίες για να αντλήσουμε τους πόρους που χρειάζονται» (Standaert / Yale E360 2019).

Τα εξαρτήματα σε μια ευρεία ποικιλία αντικειμένων, που κυμαίνονται από υπολογιστές έως μηχανές ακτινών X και κινητήρες αεροσκαφών, εξαρτώνται από την παρουσία ενός ή περισσότερων στοιχείων σπάνιων γαιών για τις μαγνητικές τους ιδιότητες, τις δυνατότητες φακών και άλλες βασικές λειτουργίες. Οι αναπτυξιακές τροχιές των τεχνολογικών κολοσσών, συμπεριλαμβανομένων των Apple, Huawei και Tesla, θα παρεμποδιστούν σημαντικά εάν οι προμήθειες συγκεκριμένων στοιχείων σπάνιων γαιών [δυσπρόσιο (Dy), ευρώπιο (Eu), τέρβιο (Tb), θούλιο (Tm)] περιοριστούν ή διογκωθούν σε τιμή.

Αν και δεν είναι σπάνιες σε παγκόσμια κλίμακα, οι σπάνιες γαίες είναι πολύ δαπανηρές για την εξαγωγή τους με περιβαλλοντικά ασφαλείς τρόπους αφού, πράγματι, δεν είναι και τόσο σπάνιες. Η κατάσταση για τη βιομηχανία εξόρυξης στη νότια επαρχία του Jiangxi ήταν αρκετά διαφορετική, ήταν σε μεγάλο βαθμό άναρχη μέχρι πρόσφατα και οι παράνομες εξορυκτικές δραστηριότητες πραγματοποιούνταν εκτενώς (Standaert / Yale E360 2019).

#### 4. Αξιολόγηση της Τρέχουσας Κατάστασης

Η επίδραση των σύγχρονων πρακτικών εξόρυξης στο περιβάλλον είναι γνωστή και έχει καταγραφεί. Αυτό σημαίνει ότι είναι ζωτικής σημασίας για τις κυβερνήσεις και τους διεθνείς οργανισμούς να αναπτύξουν κατάλληλα μέτρα, ως απάντηση σε αυτά τα περιβαλλοντικά ζητήματα. Η αδυναμία ανάληψης αντίστοιχης δράσης θα οδηγούσε σε σοβαρές συνέπειες, όχι μόνο για το περιβάλλον, αλλά και για τις πληγείσες κοινότητες.

Στην Κίνα, έρευνες ανακάλυψαν ότι μια σημαντική ποσότητα επιβλαβών αερίων (όπως οξείδια του άνθρακα/του θείου και το υδροφθορικό οξύ) διαχέεται στον αέρα και κυμαίνεται περίπου μεταξύ 9.600 και 12.000 κυβικών μέτρων, κατά την παραγωγή κάθε τόνου REEs. Επιπλέον, υπολογίζεται, κατά προσέγγιση, ότι περίπου 75 κυβικά μέτρα όξινων λυμάτων και σχεδόν ένας τόνος ραδιενεργών αποβλήτων ρίχνονται σε κοντινές δεξαμενές, όπως δήλωσαν οι Paul and Campbell στην εργασία τους (2011).

Μια έκθεση του Ινστιτούτου Ανάλυσης Παγκόσμιας Ασφάλειας αποκάλυψε ότι η Κίνα είχε παραγωγή που ξεπερνούσε τους 130.000 μετρικούς τόνους REE το 2008. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη αυτόν τον αριθμό σε συνδυασμό με την προηγουμένως συζητηθείσα έρευνα για την παραγωγή, η ετήσια παραγωγή πιστεύεται ότι δημιουργεί εκπληκτικούς όγκους αποβλήτων. Κυμαίνεται περίπου από 1,2 δισεκατομμύρια έως 1,6 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> αποβλήτων μαζί με 9,8 εκατομμύρια m<sup>3</sup> όξινων λυμάτων (αυτή η μεγάλη ποσότητα που περιέχει δημήτριο (Ce) και λανθάνιο (La) πιθανότατα χρησιμοποιείται σε κεραμικούς πυκνωτές, εξαιτίας της υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς του).

Ενώ η επεξεργασία των REEs συνεχίζεται την ίδια στιγμή, δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός επιβλαβών υποπροϊόντων που πρέπει να απορριφθούν χωρίς να τους επιτραπεί να βγουν στο περιβάλλον. Στην Κίνα, πολλές εγκαταστάσεις επεξεργασίας REEs παράγουν τεράστιες ποσότητες αποβλήτων, αλλά δεν διαθέτουν κατάλληλα και σύγχρονα συστήματα επεξεργασίας. Αυτά αποτελούνται κυρίως από μικρά παράνομα ορυχεία και διυλιστήρια, χωρίς μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος (Ανυφαντάκης 2021).

Το βάρος βαραίνει τις κυβερνήσεις και τους παγκόσμιους οργανισμούς για να θεσπίσουν αυστηρότερους νόμους και νέα προγράμματα, για να μειωθεί το πλήγμα στο περιβάλλον. Επιπλέον, πρέπει να βρεθούν δημιουργικές εναλλακτικές, όπως η σκέψη πως μπορεί να κοστίζουν περισσότερο ορισμένες πρακτικές, αλλά είναι λιγότερο επιβλαβείς για το περιβάλλον.

Ένα παράδειγμα εδώ θα ήταν η Molycorp (2012), η οποία επέλεξε έναν ακριβό, αλλά λιγότερο επίσημο τρόπο απόρριψης των αποβλήτων της. Αυτό αφορά τα πηκτικά πάστας που χρησιμοποιήθηκαν από τη Molycorp (2012). Τελικά αυξήθηκε ο ρυθμός με τον οποίο το νερό ανακυκλώνεται και μειώθηκε η ανεξέλεγκτη παραγωγή λυμάτων. Παρόλο που είναι πιο δαπανηρή η λειτουργία της, από μια σηπτική δεξαμενή, από άποψη κόστους, τα οφέλη από τους μειωμένους περιβαλλοντικούς κινδύνους και την ενισχυμένη εξοικονόμηση νερού είναι πιο σημαντικά μακροπρόθεσμα.

Επίσης, υπάρχει μια άλλη εναλλακτική είναι η διαδικασία που ονομάζεται «ξηρή στοίβαξη». Σε αυτή τη διαδικασία, τα απόβλητα αφυδατώνονται, πράγμα που σημαίνει ότι τα υγρά διαχωρίζονται από τα στερεά υλικά χρησιμοποιώντας φίλτρα κενού ή πίεσης. Τα προκύπτοντα ξηρά απόβλητα μπορούν εύκολα να στοιβάζονται και να μεταφέρονται στις επιθυμητές θέσεις. Επιπλέον, μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η αποθήκευση των αποβλήτων υπόγεια, όπου αναμιγνύονται με τσιμέντο, που χρησιμοποιείται ως μάζα που γεμίζουν υπόγεια κενά.

Με τα χρόνια και την εξέλιξη των καινοτόμων ιδεών στην εξόρυξη, την επεξεργασία και τη διάθεση αποβλήτων, στόχος ήταν πάντα να περιορίσουμε το κόστος από περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η τρέχουσα παγκόσμια κατάσταση σχετικά με τις σπάνιες γαίες εμφανίζει πολλές προκλήσεις και προοπτικές. Ας εξετάσουμε μερικές αξιολογήσεις σε διάφορους τομείς:

Εξόρυξη και εφαρμογές → Η αυξανόμενη ζήτηση για σπάνιες γαίες, ιδίως σε βιομηχανικούς και τεχνολογικούς τομείς, όπως η ηλεκτρονική, η κατασκευή αυτοκινήτων και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχει οδηγήσει σε αυξημένη εξόρυξη. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία συνήθως συνοδεύεται από περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κοινωνικές διαμάχες, στις περιοχές εξόρυξης.

Γεωπολιτική πίεση → Η εξάρτηση πολλών χωρών από την Κίνα για τις σπάνιες γαίες έχει δημιουργήσει γεωπολιτικές ευαισθησίες. Η Κίνα έχει αξιοποιήσει αυτήν την εξάρτηση για να ασκήσει πίεση σε άλλες χώρες σε διάφορα θέματα, όπως εμπορικές συμφωνίες και διεθνείς διαπραγματεύσεις.

Εκτίμηση των αποθεμάτων → Η ακριβής εκτίμηση των αποθεμάτων σπάνιων γαιών είναι σημαντική για την ασφάλεια του εφοδιασμού. Πολλές χώρες και εταιρείες προσπαθούν να αναπτύξουν τεχνολογίες για την ανάκτηση και ανακύκλωση σπάνιων γαιών από διάφορες πηγές (Ανυφαντάκης 2021, Λισάντερ 2021).

## **5. Αντιμετώπιση Περιβαλλοντικών Προκλήσεων και Προτάσεις για Βελτιώσεις**

Η ανάγκη για μείωση των εκπομπών ρύπων είναι επείγουσα. Ωστόσο, ο στόχος της μείωσης των επιβλαβών εκπομπών μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω κανονισμών/προτύπων, που θα εμποδίζουν τις βιομηχανίες να κατασκευάζουν μέταλλα και άλλα αγαθά, εάν δεν πληρούν τα περιβαλλοντικά κριτήρια. Μερικές από τις λύσεις που μπορούν να εξεταστούν, περιλαμβάνουν την ανακύκλωση σπάνιων γαιών ή τη δημιουργία νέων μεθόδων εξόρυξης και επεξεργασίας, φιλικές προς το περιβάλλον. Ή ακόμα και κοιτάζοντας τους τεχνολογικούς τομείς με κριτική ματιά, στη μείωση των REEs ή στην αντικατάστασή τους με εναλλακτικά μέταλλα (Λισάντερ 2021).

Μια βέλτιστη προσέγγιση για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εξόρυξης και της κατασκευής σπάνιων γαιών απαιτεί την εφαρμογή ορισμένων ή όλων αυτών των δράσεων. Ταυτόχρονα, οι προσπάθειες πρέπει να κατευθύνονται προς την καινοτομία προϊόντων που εξαρτώνται λιγότερο από μέταλλα σπάνιων γαιών. Μόνο όταν το κόστος που σχετίζεται με την αποκατάσταση και τη διατήρηση του περιβάλλοντος εξισωθεί με το κόστος λειτουργίας του ορυχείου, μπορεί να επιτευχθεί βιώσιμη ισορροπία (Λισάντερ 2021).

### **5.1. Ανακύκλωση Σπάνιων Γαιών**

Τα μέταλλα υψηλής τεχνολογίας, όπως το κοβάλτιο (Co), το λίθιο (Li), το άφνιο (Hf), το ταντάλιο (Ta), το γάλλιο (Ga) και ειδικά οι σπάνιες γαίες, είναι θεμελιώδη για τον κόσμο και για την ανάπτυξη αποτελεσματικών υψηλής τεχνολογίας και φιλικών προς το περιβάλλον προϊόντων. Η ανακύκλωση των σπάνιων γαιών αποτελεί μια κρίσιμη πρόκληση, με αυξανόμενη σημασία, καθώς η ζήτηση για αυτές τις πολύτιμες πρώτες ύλες εκτοξεύεται. Η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών ανακύκλωσης είναι απαραίτητη για την μείωση της εξάρτησης από την εξόρυξη νέων πόρων, την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος.

Πολλά είναι τα ερευνητικά έργα που συνεχίζουν να αντικαθιστούν άλλα υλικά με σπάνιες γαίες, σε κρίσιμες τεχνολογίες, όπως οι υπερμαγνήτες. Τα τεχνολογικά άλματα όμως οδηγούν γρήγορα σε τεράστιους σωρούς ηλεκτρονικών αποβλήτων, η απόρριψη των οποίων ενέχει κινδύνους για το περιβάλλον. Τα απόβλητα είναι πλούσια σε σπάνιες γαίες, καθώς και σε άλλα πολύτιμα μέταλλα όπως Au, Pt, Pd και Rh και ως εκ τούτου είναι ένας πολύτιμος πόρος. Η παραγωγή αυτών των υλικών μπορεί να ικανοποιήσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις με

δυνατότητα περιορισμού της πρωτογενούς παραγωγής σε ορυκτές πρώτες ύλες. Ειδικά στην περίπτωση των σπάνιων γαιών τα ηλεκτρονικά απόβλητα θα μπορούσαν θεωρητικά να καλύψουν ένα σημαντικό μέρος της ζήτησης. Πρόσφατες μελέτες για το κύκλο ζωής των προϊόντων έδειξαν ότι η ανακύκλωση καταναλωτικών υλικών είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής (Schüler et al. 2011).

Σήμερα, ο παγκόσμιος αριθμός ηλεκτρονικών αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής λέγεται ότι φτάνει τους περίπου 50 εκατομμύρια μετρικούς τόνους κάθε χρόνο. Ωστόσο, μόνο το 12,5% περίπου των ηλεκτρονικών αποβλήτων ανακυκλώνεται επί του παρόντος για όλα τα μέταλλα. Η ανακύκλωση στοιχείων σπάνιων γαιών (REEs) είναι ιδιαίτερα δύσκολη, επειδή αυτά τα στοιχεία υπάρχουν σε μικρές ποσότητες σε μικροσκοπικά ηλεκτρονικά μέρη, όπως οθόνες αφής κινητών τηλεφώνων, όπου είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα, εμποδίζοντας τις προσπάθειες για εύκολη ανάκτησή τους. Παρά τα προβλήματα χαμηλής απόδοσης και υψηλού κόστους (εξαιτίας των οποίων τα REEs δεν ανακυκλώνονται σε μεγάλες ποσότητες ανεξάρτητα από την τελική χρήση), η ανακύκλωση θα μπορούσε να καταστεί δυνατή εάν καταστεί εντολή, καθώς οι τιμές των REEs θα εκτοξευθούν σημαντικά στο μέλλον. Έτσι, διεξάγονται πολλές μελέτες σε παγκόσμιο επίπεδο σχετικά με την οικονομική ανάκτηση από τα ηλεκτρονικά απόβλητα, προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η επικείμενη κρίση (Eliopoulos et al. 2014, Nguyen et al. 2016). Αυτές οι μελέτες περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις για την αποσυναρμολόγηση ηλεκτρονικών αποβλήτων, καθώς και την χημεία για την εξαγωγή REEs από αυτά.

Σε μια πρόσφατη εξέλιξη, η Apple παρουσίασε ένα ρομπότ ικανό να αποσυναρμολογεί iPhone με εκπληκτικό ρυθμό 200 συσκευών την ώρα. Η εξόρυξη υλικών από έναν τόσο μεγάλο όγκο, με 100.000 iPhone που παράγουν 1900 κιλά αλουμίνιο, 770 κιλά κοβάλτιο, 710 κιλά χαλκό και άλλα, υπογραμμίζει την αποτελεσματικότητα που επιφέρει αυτή η καινοτόμος τεχνολογία. Παρά το γεγονός ότι ανακοίνωσαν τη δέσμευσή τους το 2017 να βασίζονται αποκλειστικά σε ανακυκλωμένους πόρους, εντός της αλυσίδας εφοδιασμού της, φαίνεται ότι η Apple δεν έχει ακόμη σημειώσει ευρεία πρόοδο προς αυτή την πρωτοβουλία (η Apple κυκλοφορεί το Robot για iPhone το 2018).

Οι διαδικασίες χημικού διαχωρισμού για στοιχεία σπάνιων γαιών (REEs) είναι μια μεγάλη πρόκληση. Λειτουργεί ως σημαντικός αποτρεπτικός παράγοντας για κάθε πιθανή εκτεταμένη δραστηριότητα ανακύκλωσης, που ήδη εκτελείται σε ποσοστό, περίπου 1%. Το έργο του διαχωρισμού και του καθαρισμού μεμονωμένων REEs είναι σχεδόν αδύνατο, λόγω των στενών χημικών ομοιοτήτων τους. Είναι σαφές ότι υπάρχει ζήτηση για καινοτόμες τεχνολογίες σε διαχωρισμούς που μπορούν να μειώσουν το κόστος των REEs βιομηχανικής

κλίμακας στοχεύοντας, επίσης, στη σημειακή συλλογή ανακυκλωμένων πηγών, κατά την απομόνωσή τους, η οποία στοχεύει όχι μόνο στη δημιουργία ανακτήσιμων πηγών αλλά και στην ελαχιστοποίηση των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Konianos et al. 2022).

## 5.2. Ανακυκλωμένες Συσκευές και Υφιστάμενη Κατάσταση

Η EPA (2009) ανέφερε ότι μόνο ένα κλάσμα ηλεκτρονικών συσκευών φτάνει σε εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, μόλις το ένα τέταρτο. Μεταξύ αυτών, τα ποσοστά συλλογής ήταν πενιχρά, με μόνο το 34% των υπολογιστών και των σταθερών υπολογιστών, το 20% των τηλεοράσεων, το 10% των κινητών τηλεφώνων και μόλις το 4% των λαμπτήρων φθορισμού να βρίσκουν το δρόμο τους στα κέντρα ανακύκλωσης. Κατά ειρωνικό τρόπο, αυτές οι συσκευές προσφέρουν μερικά από τα πλουσιότερα αποθέματα για ανακυκλωμένα υλικά, ωστόσο οι καταναλωτές δεν ανταποκρίνονται σε είδος (Haque et al. 2014).

Αν και η ανακύκλωση σπάνιων γαιών παραμένει μια νέα προσπάθεια, η σημασία της υπογραμμίζεται από την ακόρεστη όρεξη για αυτά τα στοιχεία και την επίπονη φύση της εξόρυξής τους. Επιπλέον, αυτή η πρακτική συμβάλλει στη μείωση των επιπέδων ρύπανσης, ένα αποτέλεσμα που πλήττει τις βιομηχανίες που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις κινεζικές προμήθειες REEs. Ωστόσο, ας μην ξεχνάμε μια άλλη θετική πτυχή, τυχόν ανακτημένα REEs θα γλιτώσουν από τον μελλοντικό έλεγχο που σχετίζεται με τη ραδιενέργεια (Λισάντερ 2021).

Οι σπάνιες γαίες μπορούν να ανακτηθούν μέσω της επαναχρησιμοποίησης των αποβλήτων. Τα απόβλητα προέρχονται κυρίως από τη διαδικασία παραγωγής, καθώς και τα υλικά, όπως μαγνήτες, μπαταρίες και λαμπτήρες ή χρησιμοποιημένοι καταλύτες. Πάρα ταύτα, η διαδικασία είναι αρκετά αποθαρρυντική, λόγω της απαίτησής της για ενεργοβόρες τεχνικές φυσικού και χημικού διαχωρισμού, που ανέφεραν οι Haque et al. (2014). Επιπλέον, υπάρχουν περιπτώσεις, όπου τα βιομηχανικά απόβλητα περιέχουν υπολείμματα παραγωγής μαγνητών, μια άλλη πιθανή πηγή σπάνιων γαιών (Λισάντερ 2021).

Ο φυσικός διαχωρισμός απαιτεί την αποσυναρμολόγηση των υλικών. Η Hitachi, μια ιαπωνική εταιρεία, συμμετέχει σε μια προσπάθεια, όπου εξετάζει φιλικές προς το περιβάλλον διαδικασίες που μπορούν να διαχωρίσουν μέταλλα από προϊόντα. Επίσης, βρίσκεται στην αναζήτηση νέων τρόπων εξαγωγής σπάνιων γαιών, από συγκεκριμένα κράματα που βρίσκονται σε μικρές ηλεκτρονικές συσκευές, με χαμηλό κόστος (Schüler et al. 2011). Στην εταιρία έχουν ήδη αναπτύξει νέα μηχανήματα που κατορθώνουν την αποσυναρμολόγηση 100

μονάδων ανά ώρα, για το διαχωρισμό και τη συλλογή REEs, κυρίως Nd και Dy από σκληρούς δίσκους.

Μεταξύ των χωρών που επενδύουν στην έρευνα σπάνιων γαιών, μέσω της ανακύκλωσης ηλεκτρονικών προϊόντων, είναι η Ιαπωνία. Στοχεύουν στην ανάκτηση μετάλλων και σπάνιων γαιών, μειώνοντας έτσι την εξάρτησή τους από τις εισαγωγές REEs. Ενώ η Ιαπωνία χρειάζεται συνήθως περίπου 600 τόνους σπάνιων γαιών κάθε χρόνο, σχεδιάζει να μειώσει τη ζήτηση Dy κατά 200 τόνους ετησίως και νεοδύμιο κατά 1.000 τόνους, μέσα σε δύο χρόνια, μέσω αυτών των προσπαθειών ανακύκλωσης. Οι πρωτοβουλίες που ανέλαβε η Ιαπωνία τις παρουσιάζουν ως πρότυπο για άλλες κυβερνήσεις και οργανισμούς, προτρέποντάς τους να ακολουθήσουν το παράδειγμά τους στην προώθηση της έρευνας για την ανακύκλωση αυτών των υλικών. Με αυτό το παράδειγμα, πολλές χώρες μπορούν να μιμηθούν στρατηγικές, όπως την ανάπτυξη προηγμένων μηχανημάτων ανακύκλωσης και την δημιουργία εγκαταστάσεων ανακύκλωσης, με βάση τους κατασκευαστές ορυκτών που έχουν αποδειχθεί επιτυχημένες στην περίπτωση της Ιαπωνίας.

Τα Ηνωμένα Έθνη θα πρέπει να διδαχθούν από εταιρείες, όπως η Hitachi, και να υιοθετήσουν μια προσέγγιση, με γνώμονα τη χώρα, για τη χρηματοδότηση της έρευνας και της ανάπτυξης τεχνολογιών για την αποτελεσματική ανάκτηση σπάνιων γαιών και άλλων μετάλλων. Αυτή η καινοτομία μπορεί να γίνει με την προμήθεια υλικών από μεταχειρισμένες συσκευές, παλιές τεχνολογίες και απόβλητα, συνήθως η πλειονότητα των οποίων αποτελούν απόβλητα καταναλωτών, εμποδίζοντας πολλές προσπάθειες ανακύκλωσης. Τα περισσότερα προϊόντα που περιέχουν στοιχεία σπάνιων γαιών (REEs) είναι σχετικά νέα στην αγορά. Έτσι, η τελική αντικατάστασή τους θα γίνει μετά από πιθανώς άλλες δύο δεκαετίες. Επιπλέον, ο Haque et al. (2014) προτείνει εναλλακτικές μεθόδους υποκατάστασης, όπου ορισμένα REEs μπορούν να αντικατασταθούν με άλλα πιο εύκολα υλικά ή προϊόντα, καθώς τα REEs χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορα μοντέλα πράσινης ενέργειας.

### **5.3. Ανακυκλωμένα Υλικά**

Οι περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές της αγοράς έχουν στοιχεία που περιέχουν σπάνιες γαίες. Συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα έχουν μόνο μικρές ποσότητες REEs που καθιστούν την ανακύκλωσή τους, με τεχνολογία αιχμής, μη οικονομική. Έτσι, απομακρύνονται ως απόβλητα. Αυτό οδηγεί σε απώλεια πολύτιμων πόρων.

Πολλά προϊόντα και συσκευές, σε χώρους υγειονομικής ταφής, διαθέτουν σημαντικές ποσότητες σπάνιων γαιών. Δεν είναι σωστό να θεωρούνται οι ΧΥΤΑ μόνο πηγές τοπικής ρύπανσης. Μάλλον, θα πρέπει να θεωρούνται ως αναξιοποίητες δεξαμενές για διάφορα μέταλλα (Schüler et al. 2011). Τα απόβλητα συνήθως περιέχουν σημαντικό ανακυκλώσιμο περιεχόμενο που, εάν διασωθεί από τους χώρους υγειονομικής ταφής και υποβληθεί σε κατάλληλη επεξεργασία, μπορεί να χρησιμεύσει ως νέα γραμμή ανεφοδιασμού σπάνιων γαιών.

Εντούτοις, ορισμένα καθημερινά είδη έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε αυτά τα εξαρτήματα και μπορούν να ανακυκλωθούν ευεργετικά. Μερικά παραδείγματα ανακυκλώσιμων προϊόντων που περιέχουν μεγάλες ποσότητες σπάνιων γαιών είναι: μπαταρίες αυτοκινήτων, λαμπτήρες φθορισμού, σκληροί δίσκοι υπολογιστών, καταλυτικοί μετατροπείς (Ανυφαντάκης 2021).

#### **5.4. Αποκατάσταση Χώρου των Ορυχείων**

Μετά το πέρας των εξορυκτικών εργασιών, το ορυχείο παραμένει ανενεργό. Η νομοθεσία στην πλειοψηφία των κρατών προβλέπει για την έναρξη των εργασιών μιας μεταλλευτικής δραστηριότητας να κατατίθεται από την εταιρία, που κατέχει τα μεταλλευτικά δικαιώματα, ένα περιβαλλοντικό σχέδιο αποκατάστασης. Το σχέδιο περιβαλλοντικής αποκατάστασης τρέχει και υλοποιείται κατά την διάρκεια λειτουργίας του μεταλλείου, ενώ συνεχίζει και μετά το τέλος των εξορύξεων.

Όπως κάθε είδος μεταλλευτικής δραστηριότητας έτσι και τα ορυχεία σπάνιων γαιών απαιτούν μια πολυετή διαδικασία για την αποκατάσταση του περιβάλλοντος μετά την εξόρυξη. Η περιβαλλοντική μελέτη που υποβάλλεται πριν την έναρξη των εργασιών μιας εξόρυξης, περιλαμβάνει και ένα σχέδιο αποκατάστασης του ορυχείου. Το σχέδιο αποκατάστασης προβλέπει την εξασφάλιση τριών βασικών στόχων μετά το κλείσιμο του μεταλλείου, που είναι οι εξής (Ανυφαντάκης 2021):

- Σταθερότητα του εδάφους, τόσο εντός όσο και εκτός περιβάλλοντα χώρου του ορυχείου (αποθέσεις εκτός μεταλλείου).
- Παραγωγικότητα του εδάφους.
- Οπτική αποκατάσταση (αισθητική του τοπίου).

#### **5.4.1. Σταθερότητα του Εδάφους**

Οι λειτουργίες ενός ορυχείου απαιτούν την ασφάλεια τόσο των δραστηριοτήτων όσο και του προσωπικού που εμπλέκονται. Επιπλέον, η σταθερότητα των πρανών θα πρέπει να διασφαλίζεται μετά το τέλος της οριοθετημένης περιοχής. Για να λειτουργεί με ασφάλεια ένα ορυχείο είναι απαραίτητο όλοι οι άνθρωποι να είναι ασφαλείς.

Για να διασφαλιστεί η μελλοντική σταθερότητα και να αποφευχθούν πρόσθετες κατολισθήσεις, οι αποθέσεις που γίνονται έξω από το ορυχείο θα πρέπει επίσης να υποστηρίζουν παρόμοια ανησυχία για την ασφάλεια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή σκαλοπατιών με ήπια κλίση 2% - 3%, ένα χαρακτηριστικό σχεδιασμού που διαθέτει εγγενώς υψηλό συντελεστή ασφάλειας. Παρόλα αυτά, στην αναζήτηση της απόλυτης ασφαλούς απόρριψης, διάφορα τεχνικά μέσα μπαίνουν στο παιχνίδι, εκτός από απλώς τη δημιουργία βημάτων. Αυτά περιλαμβάνουν φράγματα, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (τόσο ενισχυμένο όσο και μη) ακόμη και συρματοπλέγματα (Ανυφαντάκης 2021).

#### **5.4.2. Παραγωγικότητα του Εδάφους**

Πριν το άνοιγμα ενός ορυχείου θα πρέπει να έχει ληφθεί υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που θα αφήσει η μεταλλευτική δραστηριότητα στο φυσικό περιβάλλον. Η χλωρίδα και η πανίδα θα διαταραχθεί (είτε άμεσα, είτε έμμεσα) καθώς αλλάζουν οι ισορροπίες του οικοσυστήματος. Πολλές φορές αρκετά ζώα μπορεί να αναγκαστούν να μεταναστεύσουν για να βρουν τροφή. Η βιοποικιλότητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ισορροπημένη ζωή των ζώων. Η δημιουργία ενός ορυχείου συνεπάγεται με την αποψίλωση μικρών αλλά και μεγάλων εκτάσεων γης, με αποτέλεσμα την μερική καταστροφή του περιβάλλοντος. Η φυσική αποκατάσταση και η παραγωγικότητα του εδάφους μετά το πέρας ενός ορυχείου είναι πολύ σημαντικός και δύσκολος στόχος να επιτευχθεί.

Το πιο σύνηθες μέτρο που λαμβάνεται, είναι η δενδροφύτευση, με είδη τα οποία υπήρχαν στην περιοχή και πριν το ορυχείο. Η δενδροφύτευση αφορά, τόσο το ορυχείο, όσο και τις αποθέσεις του. Η διαδικασία της δεντροφύτευσης, για την αποκατάσταση του φυσικού περιβάλλοντος, μπορεί να διαρκέσει κα αρκετά χρόνια. Για την επίτευξη πιο γρήγορης αποκατάστασης, η έναρξη της δεντροφύτευσης, ξεκινάει κατά την διάρκεια λειτουργίας του ορυχείου και προχωρά βαθμιδωτά (Ανυφαντάκης 2021).

### 5.4.3. Οπτική Αποκατάσταση

Η αισθητική ενός τοπίου είναι ένας παράγοντας ο οποίος πολλές φορές αγνοείται αλλά αποτυπώνει το τελικό αποτέλεσμα της επέμβασης στο τοπίο. Η οπτική αποκατάσταση πολλές φορές είναι υποκειμενική. Η φυσική αποκατάσταση τις περισσότερες φορές συνδυάζεται και με την οπτική εναρμόνιση του τοπίου, καθώς αυτό επανέρχεται στην προηγούμενη εικόνα του. Ο Gegen το 1992 είπε: «Η σύγχρονη μεταλλευτική δραστηριότητα είναι ικανή να μεταβάλλει το φυσικό τοπίο περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητα σε καιρό ειρήνης». Αυτή η αλλαγή του τοπίου είναι σχεδόν αδύνατη να αποκατασταθεί πλήρως. Για αυτό εταιρείες προχωρούν και σε άλλες λύσεις αποκατάστασης πέρα από τη φυσική αποκατάσταση, προσφέροντας νέες χρήσεις του χώρου για τις τοπικές κοινωνίες. Οι σύγχρονες αυτές τάσεις για την αποκατάσταση των μεταλλείων είναι (Ανυφαντάκης 2021):

- Υγροβιότοποι ή λιμνοδεξαμενές στην θέση των ορυχείων επιφανειακής εξόρυξης → τεχνητές κατασκευές οι οποίες θα αποτελέσουν φυσικοί πόροι ιδιαίτερης περιβαλλοντικής αξίας. Οι δεξαμενές εναρμονίζονται με το δάσος, συν ότι το ενισχύουν, αλλά ταυτόχρονα προσέχουν να τροφοδοτούν και τις ανάγκες σε νερό των κοντινών φυτειών.
- Χώροι υγειονομικής ταφής αποβλήτων (X.Y.T.A.) → το έργο αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί αξιοποιώντας έναν ήδη επιβαρυνμένο χώρο, αυτών των ορυχείων, χωρίς να υπάρξει και άλλη άσκοπη χρήση γης. Προϋπόθεση του έργου είναι η στεγανοποίηση του πυθμένα με άργιλο ή μπετονίτη, σε συνδυασμό με ειδικό γι' αυτή τη χρήση, πλαστικό. Η στεγανοποίηση της επιφανείας γίνεται για την αποφυγή απορροής ή κατείσδυσης των υγρών, που προκύπτουν από την αποσύνθεση των αποβλήτων.
- Υπόγειοι αποθηκευτικοί χώροι ραδιενεργών (και μη) αποβλήτων → το περιβαλλοντικό πρόβλημα των ραδιενεργών απόβλητων του θορίου μπορεί να λυθεί, εν μέρει, με την αποθήκευση και ταφή του, για πολλά έτη, σε ειδικά διαμορφωμένες αποθήκες εντός ενός υπόγειου μεταλλείου. Βασική προϋπόθεση, η πλήρης στεγανοποίηση του έργου για την αποφυγή διαρροών.
- Ψυχαγωγικές δραστηριότητες → η κατασκευή ψυχαγωγικών πάρκων, η δημιουργία υπαίθριων θεάτρων, η διαμόρφωση υπόγειων μουσείων, η σύνθεση υπόγειων αποθηκευτικών datarooms (Logistics) και η ανέγερση εμπορικών καταστημάτων στην περιοχή που κάποτε είχε έδρα ένα ορυχείο θα αποφέρει ενίσχυση στις κοινωνικές τάσεις. Μια τέτοια κατασκευή συνδυάζεται πιο αρμονικά με το φυσικό τοπίο, ενώ παράλληλα ενισχύει την πολιτιστική και οικονομική κατάσταση της περιοχής.

### 5.5. Τεχνολογίες Πράσινης Ενέργειας

Μέταλλα όπως το λίθιο (Li), το κοβάλτιο (Co) και οι REEs διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη βιομηχανία υψηλής τεχνολογίας, ιδιαίτερα στην ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον και αποτελεσματικών τεχνολογιών. Για παράδειγμα, ηλεκτρικά ή υβριδικά αυτοκίνητα που εξαρτώνται από λίθιο και νεοδύμιο, καθώς και ανεμογεννήτριες που χρειάζονται σημαντικά επίπεδα νεοδυμίου και δυσπρόσιου.

Η εμφάνιση των τεχνολογιών πράσινης ενέργειας είναι πλέον συνυφασμένη με τα νήματα της σύγχρονης οικονομίας, προσφέροντας πληθώρα οφελών, τόσο για την ανθρωπότητα, όσο και για το περιβάλλον. Σε αυτές τις τεχνολογίες χρησιμοποιείται σημαντική ποσότητα σπάνιων γαιών. Ωστόσο, υπάρχει ελπίδα ότι αυτά μπορούν να διασωθούν με βιώσιμο τρόπο. Η τρέχουσα τεχνολογία για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών είναι τόσο δαπανηρή όσο και αναποτελεσματική στο έργο της. Ωστόσο, υπάρχουν εναλλακτικές μέθοδοι που δοκιμάζονται σε πρώιμο στάδιο, που περιλαμβάνουν απλές ενέργειες, όπως η θλίψη και ο διαχωρισμός μετάλλων (που μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση έως και 90% γυαλιού και 95% μετάλλων).

Παρόλα αυτά, με την έλευση των φωτοβολταϊκών στην αγορά, τα οποία έχουν διάρκεια ζωής περίπου 20 ετών, σύντομα πολλά ηλιακά πάνελ θα βγουν στην επιφάνεια για ανακύκλωση. Όταν έρθει εκείνη η ώρα, θα ήταν εποικοδομητικό να έχουν εξελιχθεί οι κατάλληλες τεχνικές ανάκτησης των σπάνιων γαιών. Ένα παράλληλο σενάριο παρατηρείται στην ανακύκλωση των ανεμογεννητριών. Οι έρευνες δείχνουν ότι είναι πράγματι δυνατή η διάσωση περίπου 350 kg ΑΠΕ, κυρίως Nd και Dy, από μια ανεμογεννήτρια ισχύος 1,5 MW.

Συνοπτικά, οι τεχνολογίες πράσινης ενέργειας καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες σε REEs, ωστόσο η ανακύκλωσή τους και η ανάκτηση μετάλλων δεν είναι εφικτή, λόγω της καινοτομίας αυτών των τεχνολογιών που εισέρχονται στην αγορά και δεν έχουν ακόμη καταργηθεί σταδιακά. Οι επιστήμονες οφείλουν να αναπτύξουν μεθόδους ανακύκλωσης, έτσι ώστε όταν παρουσιαστεί ανάγκη, να ανακτηθεί μια τεράστια ποσότητα REEs (Ανυφαντάκης 2021).

## 5.6. Θέσπιση Νέων Μέτρων

### 5.6.1. Αφύπνιση της Κίνας

Η ευθύνη ανήκει στις κυβερνήσεις παγκοσμίως να αντιμετωπίσουν τις επιπτώσεις των περιβαλλοντικών ρύπων στην κοινωνία. Ωστόσο, η επιτυχία τέτοιων μέτρων εξαρτάται από την Κίνα, τον σημαντικότερο παράγοντα στην παραγωγή σπάνιων γαιών, με έλεγχο πάνω από το μερίδιο αγοράς του 80%. Αν η Κίνα δεν λάβει κρίσιμα βήματα για την επίλυση αυτού του ζητήματος, οποιαδήποτε άλλη πρωτοβουλία δεν θα είναι το ίδιο αποτελεσματική.

Η Κινέζικη Κυβέρνηση αγνόησε το θέμα για πάνω από δύο δεκαετίες, αλλά τώρα υπάρχουν περισσότερες προσπάθειες από εκείνην, οι οποίες έχουν αυξηθεί σημαντικά. Έχουν σκοπό να δημιουργήσουν ένα σύστημα πιστοποίησης για αυτά τα πολύτιμα υλικά, για να διασφαλίσουν ότι η πηγή τους είναι επαληθεύσιμη και ότι οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικά υψηλής τεχνολογίας καθώς και σε αμυντική τεχνολογία / ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι αναφορές υποδεικνύουν ότι το επερχόμενο σύστημα παρακολούθησης της Κίνας θα χρησιμοποιεί πολλαπλές αναφορές ως εισαγωγή.

Η Κίνα βρίσκεται σε αγώνα κατά της παράνομης εξόρυξης και εξαγωγής σπάνιων γαιών, εδώ και πολύ καιρό. Εντούτοις, οι προσπάθειες απέτυχαν να αντιμετωπίσουν ζητήματα, όπως το λαθρεμπόριο, την περιβαλλοντική καταστροφή και τις επικίνδυνες μεθόδους εξόρυξης. Υπολογίζεται ότι 40.000 τόνοι σπάνιων γαιών εξορύσσονται, παράνομα, μέσω των δικτύων του Βιετνάμ και του Χονγκ Κονγκ. Ως απάντηση σε αυτές τις προκλήσεις, η Κινέζικη Κυβέρνηση έκανε ένα βήμα το 2014, συγχωνεύοντας ολόκληρη τη βιομηχανία σπάνιων γαιών σε έξι μεγάλους οργανισμούς, ως στρατηγική κίνηση προς την αντιμετώπιση όχι μόνο της παράνομης εξόρυξης αλλά και της ρύπανσης (Jamasmie 2016). Αυτή η ενοποίηση απαιτεί από τις εταιρείες να αναβαθμίσουν τον εξοπλισμό τους με προηγμένες και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες.

Σε μια προσπάθεια να αντισταθμίσει τις αρνητικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τις εταιρείες εξόρυξης, η Κίνα στοχεύει σε αυστηρότερους κανονισμούς. Επιπλέον, υπάρχει ένα σενάριο στο οποίο οι φόροι θα πρέπει να καθορίζονται με βάση την πραγματική αξία των ορυκτών και όχι τον όγκο (όπως συνηθίζεται επί του παρόντος). Αυτό στοχεύει να αποτρέψει τους παραγωγούς σπάνιων γαιών από περαιτέρω οικονομικές ζημιές, δεδομένου ότι σχεδόν το 80% λειτουργούν ήδη ελλειμματικά. Εάν υιοθετηθούν ευρέως, αυτές οι απώλειες ενδέχεται να μειωθούν (Jamasmie 2016). Με πολλά ορυχεία να αναμένεται να σταματήσουν τη λειτουργία τους σύντομα, λόγω των προαναφερθέντων οικονομικών περιορισμών, συν τη μείωση των αποθεμάτων ορισμένων στοιχείων σπάνιων γαιών, η παραγωγή τους, έχει αναφερθεί από

διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένης της China Rare Earth Industry Association (Ένωση Βιομηχανίας Σπάνιων Γαιών της Κίνας), ότι πιθανόν επηρεάζεται. Η εφαρμογή αυτών των βημάτων είναι μια προσπάθεια να αναχαιτιστούν μελλοντικά περιβαλλοντικά ζητήματα.

Τον τελευταίο καιρό, η Κίνα έχει κάνει ένα τολμηρό βήμα προς την αντιμετώπιση των συνεπειών δεκαετιών άναρχης εξόρυξης σπάνιων γαιών, μια προσπάθεια που δεν είναι απλή λόγω των πολλών συνιστωσών της. Αυτά περιλαμβάνουν την απομάκρυνση των ρύπων από τα υπόγεια ύδατα, καθώς και την αραίωση των συγκεντρώσεων τοξικών αποβλήτων, μέσω της εισαγωγής γλυκού νερού σε σημεία που επηρεάζονται από τη διαρροή, κατά μήκος περιοχών που έχουν μολυνθεί από τοξικά απόβλητα. Οι συμβατικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη στοιχείων σπάνιων γαιών από ορυκτά πετρώματα έχουν αφήσει σημαντική οικολογική καταστροφή στην αγροτική Κίνα. Οι αρμόδιες κυβερνητικές υπηρεσίες αναλαμβάνουν τώρα σταδιακά μέτρα για να σταματήσουν ή ακόμα και να αντιστρέψουν ορισμένες από αυτές τις δυσμενείς επιπτώσεις, αν και έρχονται με αργό ρυθμό και συνεπάγονται με υψηλό κόστος.

Η θέσπιση κανονισμών από τις κυβερνήσεις σε διάφορες χώρες που θα αναγκάσουν τις βιομηχανίες να διαχειρίζονται τα δικά τους απόβλητα, μέσω της ανακύκλωσης και παραγωγής προϊόντων ή της συμμετοχής σε ένα κέντρο ανακύκλωσης, μπορεί να θεωρηθεί ως ο δρόμος προς τα εμπρός (Schüler et al. 2011). Ακόμα, τέτοιες ενέργειες θα έβλεπαν ορισμένα οφέλη, όπως φορολογικές ελαφρύνσεις για τους κατασκευαστές, οι οποίες με τη σειρά τους θα οδηγούσαν σε θετικά αποτελέσματα για το περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες στις διαδικασίες παραγωγής και ανακύκλωσης στοιχείων σπάνιων γαιών (REEs), είναι δυνατό να μειωθούν οι εκπομπές και να μειωθεί η εξάρτηση από τα έθνη που παράγουν REEs, διαφοροποιώντας έτσι τις εθνικές βάσεις πόρων με ορυκτά προς αυτάρκεια. Αυτό θα βοηθήσει στην εξάλειψη της ανάγκης για εισαγωγές REEs και θα διασφαλίσει μια σταθερή προσφορά ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης που απαιτούνται από την πλευρά της ζήτησης της αγοράς, για να αυξηθούν περαιτέρω οι πωλήσεις.

## 6. Συμπεράσματα

Λόγω των επικρατουσών οικονομικών και τεχνολογικών συνθηκών της εποχής μας, καθώς και του σημαντικού ρόλου που διαδραματίζουν οι σπάνιες γαίες σε διάφορους τομείς, όπως η ψηφιακή τεχνολογία, η ιατρική και τα αμυντικά συστήματα, αυτά τα πολύτιμα στοιχεία έχουν εισαχθεί σε παγκόσμιες αγορές και χρηματιστήρια. Οι εκπληκτικές εξελίξεις που διευκολύνθηκαν από τα μέταλλα σπάνιων γαιών έχουν δημιουργήσει μια άνευ προηγουμένου ζήτηση για αυτά, με αποτέλεσμα σημαντικές ετήσιες αυξήσεις των τιμών.

Ο όρος «σπάνιες γαίες» είναι άκρως παραπλανητικός. Θεωρούμε αυτά τα στοιχεία σπάνια μόνο επειδή είναι πράγματι μια πρόκληση η εξαγωγή τους από τα ορυκτά, εξαιτίας της πολύπλοκης φύσης της διαδικασίας απομόνωσής τους και όχι επειδή είναι σπάνια στον φλοιό της γης. Εκτεταμένα γεωλογικά δεδομένα έχουν δείξει ότι αυτά τα στοιχεία είναι κάθε άλλο παρά σπάνια. Στην πραγματικότητα, πολλά έχουν υψηλότερα ποσοστά αποθεμάτων από ό,τι ακόμη και τα μέταλλα με μεγάλη αφθονία, όπως ο χαλκός (Cu). Είναι ενδιαφέρον ότι δεν υπάρχει παγκόσμιο ορυχείο που να εστιάζει αποκλειστικά στις σπάνιες γαίες, ως κύρια σειρά προϊόντων, υπογραμμίζοντας την οικονομική πρακτικότητα της εκμετάλλευσης των REEs. Τα περισσότερα REEs είναι στην πραγματικότητα υποπροϊόντα, που συλλέγονται από ορυχεία, που εξάγουν κυρίως άλλα υλικά, όπως σίδηρο (Fe), χαλκό (Cu) και θειούχα μεταλλεύματα, λόγω της δυσκολίας απόκτησής τους.

Η αυξημένη και συχνά ανεξέλεγκτη εξόρυξη στοιχείων σπάνιων γαιών δημιουργεί περιβαλλοντική επιβάρυνση και αυξάνει τους κινδύνους για τους ζωντανούς οργανισμούς. Δεδομένου ότι οι εταιρείες δεν έδειξαν ιδιαίτερο ενθουσιασμό στη διαχείριση, μεγάλες ποσότητες ρύπων (στερεών, υγρών και αέριων), καθώς και επικίνδυνων ραδιονουκλεϊδίων, άρχισαν να γίνονται ανεξέλεγκτες. Η εμφάνιση των ραδιονουκλεϊδίων από σπάνιες γαίες δεν οφείλεται αποκλειστικά από την ύπαρξη τους στα χημικά στοιχεία όλων των REEs. Η έντονη εμφάνιση της ραδιενεργής δραστηριότητας οφείλεται στην ύπαρξη τους, στα ορυκτά των σπανίων γαιών και άλλων στοιχείων, όπως το θόριο (Th) αλλά και το ουράνιο (U).

Η παρουσία ραδιενεργών στοιχείων κατά την επεξεργασία σπάνιων γαιών είναι ένα πολύ κρίσιμο γεγονός, για την επιβάρυνση του περιβάλλοντος και των ζωντανών οργανισμών. Κατά τη διάρκεια της εξόρυξης και των εργασιών, απελευθερώνεται σκόνη στην ατμόσφαιρα, η οποία είναι επιβλαβής για την ευρύτερη κοινότητα.

Αυτό το είδος εξορυκτικής δραστηριότητας έχει προκαλέσει σημαντική ζημιά σε πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο. Οι αρνητικές επιπτώσεις επεκτείνονται στα οικοσυστήματα, τη βλάστηση, ακόμη και την ευημερία των τοπικών κοινωνιών. Το επίκεντρο αυτού του ζητήματος βρίσκεται στην Κίνα, η οποία όχι μόνο διαθέτει το μεγαλύτερο ορυχείο σπάνιων γαιών, αλλά κατέχει επίσης το 80% των παγκόσμιων αποθεμάτων. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι τιμές των σπάνιων γαιών είναι εξαιρετικά ασταθείς, κυμαινόμενες με βάση τη ζήτηση της αγοράς. Ωστόσο, η σταθερότητα των τιμών των οξειδίων των σπάνιων γαιών έχει διαταραχθεί, λόγω συγκρουόμενων εθνικών συμφερόντων. Ως αποτέλεσμα, σημειώνονται σημαντικές αποκλίσεις τιμών σε μηνιαία βάση.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε αλλαγή στον τρόπο αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η εφαρμογή της ανακύκλωσης σπάνιων γαιών, ως εναλλακτική προσέγγιση για τη ρύπανση, οδήγησε στη σταθεροποίηση των αγορών και των αποθεμάτων αυτών των στοιχείων. Αυτή η ισορροπία έχει σκοπό να ρυθμίσει την τρέχουσα παραγωγή, καθώς οι περισσότερες εξορυκτικές δραστηριότητες δεν είναι βιώσιμες, λόγω της δυσκολίας λήψης αυστηρών περιβαλλοντικών μέτρων που θα επιβληθούν μέσω αυτών. Πολλές εταιρείες σήμερα επενδύουν στην ανακύκλωση σπάνιων γαιών, η οποία είναι μια διπλή ώθηση τόσο από περιβαλλοντικής σκοπιάς όσο και από οικονομικό κέρδος.

## 7. Βιβλιογραφία

### 7.1. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Athurupane, B.M.B. (2014). Rare earth mineral resources in Sri Lanka 1, 14–16.
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285-1303.
- Castor, S.B., Hedrick, J.B. (2006). Rare earth elements. *Ind. Miner. rocks* 769–792.
- Chapman, B. (2018). The geopolitics of rare earth elements: an emerging challenge for US National Security and Economics. *Journal of Self-Governance and Management Economics*, 6(2), 50-91.
- Chen, Z. (2011). Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *J. Rare Earths* 29, 1–6.
- 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., 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.
- Eggert, R., Wadia, C., Anderson, C., Bauer, D., Fields, F., Meinert, L., Taylor, P. (2016). Rare earths: market disruption, innovation, and global supply chains. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 41, 199–222.
- Eliopoulos, D., Economou, G., Tzifas, I., & Papatrechis, C. (2014). 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.
- Fan, H.-R., Hu, F.-F., Yang, K.-F., Pirajno, F., Liu, X., Wang, K.-Y. (2014). Integrated U-Pb and Sm–Nd geochronology for a REE-rich carbonatite dyke at the giant Bayan Obo REE deposit, Northern China. *Ore Geol. Rev.* 63, 510–519.

- Fan, H.-R., Yang, K.-F., Hu, F.-F., Liu, S., Wang, K.-Y. (2016). The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: controversy and ore genesis. *Geosci. Front.* 7, 335–344.
- 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>).
- Gielen, D. and Lyons M. (2022). Critical materials for the energy transition: Lithium, IRENA technical paper1/2022, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, critical Materials for the Energy Transition: Rare Earth Elements.
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S., Vernon, C. (2014). Rare earth elements: overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. *Resources* 3, 614–635.
- Haxel, G.B., Hedrick, J.B., Orris, G.J., Stauffer, P.H., Hendley II, J.W. (2002). Rare earth elements: critical resources for high technology.
- Haxel, G.B. (2005). Ultrapotassic mafic dikes and rare earth element-and barium-rich carbonatite at Mountain Pass, Mojave Desert, Southern California: Summary and field trip localities.
- He, M.L., Ranz, D., Rambeck, W.A. (2001). Study on the performance enhancing effect of rare earth elements in growing and fattening pigs. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl)* 85, 263–270.
- Humphries, M., (2010). *Rare Earth Elements: The Global Supply Chain*. Diane Publishing.
- 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.
- Jamasmie, C. (2016). China gets tougher on illegal mining, exporting of rare earths. *Mining.com*. <https://www.mining.com/china-gets-tougher-on-illegal-miningexporting-of-rare-earths/>.
- Kanazawa, Y., & Kamitani, M. (2006). Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of alloys and compounds*, 408, 1339-1343.

- King, H.M. (2017). REE: Rare Earth Elements and their Uses. Geol. News Inf. <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/>.
- Konianos, I., Koutsoupi, M., Michailidis, M., Pnagiotopoulos, P., & Giallousi, M. (2022). Τα Χημικά Στοιχεία των Κινητών Τηλεφώνων. Open Schools Journal for Open Science, 5(2). <https://doi.org/10.12681/osj.30306>.
- 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.
- Mitchell, R.H. (2015). Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. *Ore Geol. Rev.* 64, 626–641.
- Nguyen, R.T., Imholte, D.D. (2016). China's rare earth supply chain: illegal production, and response to new cerium demand. *JOM* 68, 1948–1956.
- Redling, K., (2006). Rare earth elements in agriculture with emphasis on animal husbandry.
- Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., Merz, C. (2011). Study on rare earths and their recycling. Öko-Institut eV Darmstadt.
- Smith, M.P., Moore, K., Kavecsánszki, D., Finch, A.A., Kynicky, J., Wall, F., (2016). From mantle to critical zone: a review of large and giant-sized deposits of the rare earth elements. *Geosci. Front.* 7, 315–334.
- Su, W. (2009). Economic and Policy Analysis of China's Rare Earth Industry. China Financ. Econ. Publ House, Beijing.
- United States Geological Survey (USGS), 2021. Mineral Commodity Summaries 2021.
- Verplanck, P.L., Mariano, A.N., Mariano Jr, A., (2016). Rare earth element ore geology of carbonatites.
- Voncken, J.H.L. (2016). The Rare Earth Elements: An Introduction. Springer.
- Wall, F. (2014). Rare earth elements. *Crit. Met. Handb.* 312–339.
- Wu, C. (2008). Bayan obo controversy: carbonatites versus Iron Oxide-Cu-Au-(REE-U).
- Xiao, W., Kusky, T. (2009). Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asian and related orogenic belts: introduction.

Yang, K., Fan, H., Pirajno, F., Li, X. (2019). The Bayan Obo (China) giant REE accumulation conundrum elucidated by intense magmatic differentiation of carbonatite. *Geology* 47, 1198–1202.

Yang, X.J., Lin, A., Li, X.-L., Wu, Y., Zhou, W., Chen, Z. (2013). China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environ. Dev.* 8, 131–136.

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.

Zhou, B. (2017). Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals* 7, 203–217.

## 7.2. Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

Ανυφαντάκης. Γ. (2021). «Σπάνιες γαίες και εφαρμογές στην σύγχρονη οικονομία». Διπλωματική εργασία. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Βόλος.

Λισάντερ, Λ. (2021). «Σπάνιες γαίες: προοπτικές και προβλήματα αξιοποίησης», Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών. Τομέας Μεταλλευτικής Τεχνολογίας. Μάθημα Σχεδιασμός Υπαίθριων Εκμεταλλεύσεων. Αθήνα.

Μέλφος Β. (2020). Οι σπάνιες γαίες και η γεωπολιτική θέση της Ελλάδας. *Ελληνικό Πανόραμα*, 124, 2-13.

## 7.3. Διαδίκτυο

<https://resource-recycling.com/e-scrap/2018/04/26/apple-rolls-out-robot-for-iphone-dismantling/>

<https://www.naftemporiki.gr/finance/world/1464805/spanies-gaies-apo-palia-kinita-tilefona/>

<https://www.energia.gr/article/185099/oi-ellhnikes-spanies-gaies-kai-h-geopolitikh-toys-shmasia>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100207212300087X>

<https://e360.yale.edu/features/china-wrestles-with-the-toxic-aftermath-of-rare-earth-mining>