



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνολογιών ανανεώσιμων
πηγών ενέργειας που απαιτούν εξόρυξη μετάλλων σπάνιων
γαιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΝΕΛΛΗΣ ΜΙΧΑΗΛ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ατσαλάκης, Γεώργιος, Αναπληρωτής, Καθηγητής

1^ο Μέλος: Μουστάκης, Βασίλειος, Καθηγητής

2^ο Μέλος: Ιψάκης, Δημήτριος, Επίκουρος, Καθηγητής

Χανιά, 2025



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνολογιών ανανεώσιμων
πηγών ενέργειας που απαιτούν εξόρυξη μετάλλων σπάνιων
γαιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΝΕΛΛΗΣ ΜΙΧΑΗΛ ΑΡΙΣΤΕΪΔΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ατσαλάκης, Γεώργιος, Αναπληρωτής, Καθηγητής

1^ο Μέλος: Μουστάκης, Βασίλειος, Καθηγητής

2^ο Μέλος: Ιψάκης, Δημήτριος, Επίκουρος, Καθηγητής

Χανιά, 2025



TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

DEPARTMENT OF PRODUCTION AND
MANAGEMENT ENGINEERING

**Environmental impacts of the renewable energy technologies
that require extraction of rare earth metals**

DIPLOMA THESIS

KANELIS MICHAEL ARISTEIDIS

COMMITTEE OF EXANIMERS

Supervisor: Atsalakis, Georgios, Associate Professor

Member 1: Moustakis, Vasilis, Professor

Member 2: Ipsakis, Dimitrios, Assistant, Professor

Chania, 2025

Πρόλογος

Οι σπάνιες γαίες (ΣΓ) είναι μια κατηγορία δεκαεπτά χημικών στοιχείων, τα οποία βρίσκονται σε μορφή μεταλλευμάτων στον φλοιό της Γης. Από τα παλαιότερα χρόνια μέχρι και τη σημερινή εποχή, η εξόρυξη και η εκμετάλλευση τους έχει παρουσιαστεί ως ζήτημα μείζονος σημασίας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η αξία των σπάνιων γαιών για πολλές επιστημονικές εφαρμογές είναι αναμφίβολα αναγνωρισμένη, παρεμβαίνοντας έτσι καταλυτικά στο κάδρο της παγκόσμιας οικονομίας και των επιστημονικών, πολιτικών και κοινωνικών εξελίξεων.

Οι ξεχωριστές ιδιότητες που εμφανίζουν, οι οποίες οφείλονται στην ηλεκτρονική δομή των ατόμων τους, τις έχει καταστήσει πλέον απαραίτητες στις σύγχρονες εφαρμογές.

Πέρα από όλα αυτά, σημαντική κρίνεται και η συμβολή τους στην εκμετάλλευση και την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μέσα από την ενδεδειγμένη χρήση και εξόρυξη των σπάνιων γαιών, παρέχεται η δυνατότητα να αξιοποιηθούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πλήρως, αποδοτικά και επιτυχημένα, πάντοτε βέβαια εντός των αρμόδιων πλαισίων, όπου δεν παρατηρούνται σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες είναι ζημιογόνες τόσο για τον πλανήτη όσο και, κατά επέκταση, για την ανθρώπινη ζωή.

Ωστόσο, αρκετά είναι και τα προβλήματα, τα οποία εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης της εξόρυξης των σπάνιων γαιών. Σε κάθε περίπτωση, ενδείκνυται να υπάρχουν και να εφαρμόζονται οι κατάλληλοι οικονομικοί αφενός και περιβαλλοντικοί αφετέρου παράγοντες για την ορθολογική αξιολόγηση της εξόρυξης, με γνώμονα τις επιπτώσεις που παρουσιάζονται.

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή Γεώργιο Ατσαλάκη, για την πολύτιμη βοήθειά του και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε, για να μου προσφέρει τις χρήσιμες συμβουλές και τη στήριξή του, ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία η συγγραφή της εργασίας αυτής. Τέλος, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|----|
| Πρόλογος..... | 5 |
| Ευχαριστίες..... | 6 |
| Πίνακας Περιεχομένων..... | 7 |
| Κατάλογος Εικόνων..... | 9 |
| Κατάλογος Πινάκων..... | 10 |
| Κατάλογος Σχημάτων..... | 11 |
| Συντομογραφίες..... | 12 |
| Περίληψη..... | 13 |
| Abstract..... | 15 |
| 1. Σπάνιες Γαίες..... | 17 |
| 1.1 Εννοιολογικό Πλαίσιο..... | 17 |
| 1.1.1 Ορισμός..... | 17 |
| 1.1.2 Ιστορική Εξέλιξη..... | 19 |
| 1.1.3 Ταξινόμηση Σπάνιων Γαιών..... | 20 |
| 1.2 Γεωλογία Σπάνιων Γαιών..... | 22 |
| 1.3 Εφαρμογές Σπάνιων Γαιών..... | 23 |
| 1.4 Χώρες Παραγωγής..... | 27 |
| 1.4.1 Κατανομή στον Πλανήτη..... | 29 |
| 1.4.2 Κατανομή στον Ελλαδικό Χώρο..... | 31 |
| 2. Οικονομική Συσχέτιση των Σπάνιων Γαιών..... | 34 |
| 2.1 Σπάνιες Γαίες ως Οικονομικό Υπερόπλο..... | 34 |
| 2.2 Η Βιομηχανική τους Αγορά από Οικονομικά Ανεπτυγμένες Χώρες..... | 36 |
| 2.3 Η συμπλοκή της Ευρωπαϊκής Ένωσης για Σπάνιες Γαίες..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 3. Σπάνιες Γαίες κι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας..... | 43 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 43 |
| 3.2 Αξιοποίηση Σπάνιων Γαιών στις ΑΠΕ..... | 44 |
| 3.3 Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι..... | 48 |
| 3.4 Τεχνολογίες Ανακύκλωσης..... | 50 |
| 3.5 Σύγκριση Τεχνολογιών των ΑΠΕ που απαιτούν Σπάνιες Γαίες..... | 54 |
| 4. Ανάλυση Αξιολόγησης κι Εκμετάλλευσης Σπάνιων Γαιών..... | 56 |
| 4.1 Γεωπολιτική και Κανονισμός γύρω από Εξόρυξη..... | 56 |
| 4.1.1 Η Κινέζικη Κυριαρχία..... | 59 |
| 4.1.2 Η Ενασχόληση του Υπόλοιπου Πλανήτη..... | 61 |
| 4.1.3 Εμπορικές Εντάσεις κι Απειλές..... | 63 |
| 4.1.4 Στρατιωτικές Εφαρμογές Σπάνιων Γαιών..... | 68 |
| 4.2 Αξιολόγηση Εξόρυξης Σπάνιων Γαιών..... | 76 |
| 4.3 Παράγοντες Αξιολόγησης..... | 78 |
| 4.3.1 Οικονομικοί Παράγοντες..... | 78 |
| 4.3.2 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες..... | 80 |
| 4.4 Επενδύσεις σε Σπάνιες Γαίες..... | 82 |
| 5. Συμπεράσματα..... | 86 |
| 5.1 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας..... | 86 |
| 5.2 Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα..... | 87 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ..... | 88 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση Σπάνιων Γαιών..... | 22 |
| Εικόνα 1.2: Σπάνιες Γαίες στον Ευρωπαϊκό Χάρτη..... | 31 |
| Εικόνα 2.1: Τα Ποσοστά των Σπάνιων Γαιών για Βιομηχανική Χρήση..... | 38 |
| Εικόνα 2.2: Η Δύσκολη Μάχη της Ε.Ε για Σπάνιες Γαίες..... | 41 |
| Εικόνα 3.1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Σπάνιες Γαίες..... | 47 |
| Εικόνα 3.2: Ρεαλιστικότητα Ανακύκλωσης Σπάνιων Γαιών..... | 53 |
| Εικόνα 4.1: ΗΠΑ εναντίον Κίνας..... | 56 |
| Εικόνα 4.2: Συμφωνία ΗΠΑ – Κίνα..... | 66 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 1.1: Περιοδικός Πίνακας Αποτύπωσης Σπάνιων Γαιών..... | 17 |
| Πίνακας 1.2: Χώρες και Τόνοι Παραγωγής Σπάνιων Γαιών..... | 27 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|--------------------------------------|----|
| Σχήμα 2.1: Η Κινέζικη Κυριαρχία..... | 35 |
|--------------------------------------|----|

Συντομογραφίες

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση

ΗΠΑ: Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

ΣΓ: Σπάνιες Γαίες

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται μια μελέτη αναφορικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την εξόρυξη μετάλλων σπάνιων γαιών, όσον αφορά τις τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και το κόστος που συνεπάγονται.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, μέσω μιας εκτενούς βιβλιογραφικής αναφοράς, γίνεται λόγος για την ευρύτερη κατανόηση της έννοιας των σπάνιων γαιών. Αναλυτικότερα, εξετάζονται οι ορισμοί της έννοιας αυτής καθώς και η ιστορική τους εξέλιξη, μέσα από τις προσπάθειες αποσαφήνισης της. Επιπρόσθετα, υλοποιείται μια ταξινόμηση των σπάνιων γαιών, αναλύοντας τις εκάστοτε κατηγοριοποιήσεις τους όπως, λόγω χάρη, οι ελαφριές σπάνιες γαίες και οι βαριές σπάνιες γαίες. Παράλληλα αποτυπώνεται η γεωλογία των σπάνιων γαιών, καθώς επίσης και εφαρμογές τους στην καθημερινή ζωή. Τέλος, στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενής λόγος για τις χώρες παραγωγής των σπάνιων γαιών, αφενός σε μια αποτύπωση σε παγκόσμιο επίπεδο κι αφετέρου στον ελληνικό χώρο.

Συνακολούθως στο 2^ο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις οικονομικές συσχετίσεις των σπάνιων γαιών. Πιο συγκεκριμένα η βιβλιογραφική επισκόπηση, οδήγησε στην ανάλυση των σπάνιων γαιών ως οικονομικό υπερόπλο των σύγχρονων επιχειρήσεων ανά τον κόσμο, και πως η χώρα της Κίνας, έχει αναδειχθεί σε παγκόσμια υπερδύναμη στην εκμετάλλευση συγκεκριμένων κοιτασμάτων, με μια διεθνή αναγνωσιμότητα, ενώ παράλληλα αναφέρεται κι η βιομηχανική αγορά των σπάνιων γαιών στις οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες της σημερινής εποχής.

Επιπροσθέτως, υλοποιείται η σύζευξη των εννοιών των σπάνιων γαιών και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αναλυτικότερα, αρχικά πραγματοποιείται μια πρώτη εισαγωγική προσέγγιση για το θέμα αυτό, ενώ στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην αξιοποίηση των σπάνιων γαιών στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπλέον, οροθετούνται οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι κι οι τεχνολογίες ανακύκλωσης. Εν κατακλείδι, πραγματοποιείται σύγκριση των τεχνολογιών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που απαιτούν σπάνιες γαίες, με αναφορές σε πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και στοιχεία κόστους.

Στη συνέχεια, στο 4^ο κεφάλαιο, υλοποιείται η ανάλυση της αξιολόγησης και εκμετάλλευσης των σπάνιων γαιών. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται λόγος για τις πολιτικές και τους κανονισμούς γύρω από την εξόρυξη τους. Ακόμη, μέσα από την παροχή πληροφοριών της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αναφέρονται οι παράγοντες αξιολόγησης, με αναλυτική προσέγγιση των οικονομικών και περιβαλλοντικών παραγόντων.

Τέλος, γίνεται μια σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με την καταγραφή των συμπερασμάτων, που προέκυψαν από τη μελέτη και έρευνα του συγκεκριμένου θέματος, ενώ παράλληλα παρέχεται και ο προσανατολισμός και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω ανάλυση σε συγκεκριμένες πτυχές του θέματος αυτού.

Λέξεις Κλειδιά: Σπάνιες γαίες, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εξόρυξη, παράγοντες αξιολόγησης.

Abstract

This thesis deals with a study regarding the environmental impacts related to the mining of rare earth metals, with reference to the technologies of renewable energy sources and the costs involved.

Initially, in the first chapter, through an extensive bibliographic reference, the broader understanding of the concept of rare earths is discussed. In more detail, the definitions of this concept are examined on the one hand, and their historical evolution, through the efforts to clarify the concept. In addition, a classification of rare earths is implemented, analyzing their respective categorizations, such as, for example, light rare earths and heavy rare earths. At the same time, the geology of rare earths is captured, as well as their applications in everyday life. Finally, in the 1st chapter, there is an extensive discussion about the countries producing rare earths, on the one hand, in a global perspective and on the other in the Greek area.

Subsequently, in the 2nd chapter, reference is made to the economic correlations of rare earths. More specifically, the bibliographic review led to the analysis of rare earths as an economic superweapon of modern businesses around the world, and how the country of China has emerged as a global superpower in the exploitation of specific deposits, with an international recognition, while at the same time the industrial rare earth market in today's economically developed countries.

In addition, the coexistence of the concepts of rare earths and renewable energy sources is realized. In more detail, initially a first introductory approach to this subject is carried out, while then reference is made to the utilization of rare earths in renewable sources. In addition, environmental risks and recycling technologies are defined. In conclusion, a comparison of renewable energy technologies requiring rare earths is made, with references to advantages, disadvantages and cost figures.

Then, in the 4th chapter, the analysis of the evaluation and exploitation of rare earths is carried out. More specifically, there is talk of the policies and regulations surrounding their mining. Furthermore, through the provision of information from the bibliographic review, the evaluation factors are mentioned, with an analytical approach to economic and environmental factors.

Finally, a summary of the present thesis, with the recording of the conclusions, which emerged from the study and research of the specific subject, while at the same time orientation is also provided in directions for future research and further analysis in specific aspects of this subject.

Keywords: Rare earths, renewable energy sources, mining, assessment factors.

1^ο Κεφάλαιο

Σπάνιες Γαίες

1.1 Εννοιολογικό Πλαίσιο

1.1.1 Ορισμός

Οι σπάνιες γαίες αποτελούν μια ομάδα 17 χημικών στοιχείων με παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο σε ποικίλες τεχνολογικές εφαρμογές. Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει τις 15 λανθανίδες, καθώς και το σκάνδιο (Sc) και το ύτριο (Y), στοιχεία που συχνά συνυπάρχουν με τις λανθανίδες σε γεωλογικά κοιτάσματα λόγω των παρόμοιων χημικών τους χαρακτηριστικών. Οι λανθανίδες καταλαμβάνουν τους ατομικούς αριθμούς 57 έως 71 στον περιοδικό πίνακα, ενώ το ύτριο έχει ατομικό αριθμό 39. Παρότι το σκάνδιο δεν είναι λανθανίδα, συχνά συμπεριλαμβάνεται στις σπάνιες γαίες λόγω της χημικής του συγγένειας.

Τα στοιχεία αυτά ανήκουν στην 3η ομάδα του περιοδικού πίνακα, με τις λανθανίδες να κατατάσσονται στην 6η περίοδο και το ύτριο στην 5η. Οι λανθανίδες περιλαμβάνουν, κατά αύξοντα ατομικό αριθμό, τα εξής στοιχεία: λανθάνιο (La), δημήτριο (Ce), πρασεοδύμιο (Pr), νεοδύμιο (Nd), προμήθειο (Pm), σάμαριο (Sm), ευρώπιο (Eu), γαδολίνιο (Gd), τέρβιο (Tb), δυσπρόσιο (Dy), όλμιο (Ho), έρβιο (Er), θούλιο (Tm), ύπερβιο (Yb) και λουτέτιο (Lu).

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των σπάνιων γαιών είναι η τάση τους να σχηματίζουν σταθερά τρισθενή κατιόντα σε οξειδωτικές συνθήκες. Ωστόσο, υπάρχουν εξαιρέσεις, καθώς το ευρώπιο (Eu) μπορεί να εμφανίζεται και ως δισθενές, ενώ το δημήτριο (Ce) μπορεί να αποκτά και τετρασθενή μορφή, γεγονός που επηρεάζει τη χημική συμπεριφορά και τις εφαρμογές τους (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

Περιοδικός Πίνακας των Στοιχείων

Μέταλλα
Αμέταλλα
Μεταλλοειδή
Ευγενή αέρια

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
| | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 |
| | IA | IIA | | | | | | | | | | | | | | | | | VIIIA |
| | 1 | 2 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | | | | | | | | | |
| | H | He | B | C | N | O | F | Ne | | | | | | | | | | | |
| | 1.00794 | 4.00260 | 10.811 | 12.011 | 14.0067 | 15.9994 | 18.9984 | 20.1797 | | | | | | | | | | | |
| 2 | Li | Be | B | C | N | O | F | Ne | | | | | | | | | | | |
| | 6.941 | 9.01218 | 10.811 | 12.011 | 14.0067 | 15.9994 | 18.9984 | 20.1797 | | | | | | | | | | | |
| 3 | Na | Mg | Al | Si | P | S | Cl | Ar | | | | | | | | | | | |
| | 22.9898 | 24.3050 | 26.9815 | 28.0855 | 30.9738 | 32.066 | 35.4527 | 39.948 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 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 | |
| 5 | 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 | 121.757 | 127.60 | 126.904 | 131.29 | |
| 6 | 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 | 204.383 | 207.2 | 208.980 | (209) | (210) | (222) | |
| 7 | Fr | Ra | * Ac | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | | | | | | | | | | |
| | (223) | (226) | (227) | (261) | (262) | (263) | (264) | (265) | (266) | (269) | (272) | (277) | | | | | | | |
| | | | * Λανθανίδες | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 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 | | | |
| | | | † Ακτινίδες | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | | | |
| | | | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr | | | |
| | | | 232.038 | 231.036 | 238.029 | 237.048 | (244) | (243) | (247) | (247) | (251) | (252) | (257) | (258) | (259) | (260) | | | |

Πίνακας 1.1: Περιοδικός Πίνακας Αποτύπωσης Σπάνιων Γαιών

Πηγή: [Αθηνόδρομο, 2023]

Το ύτριο (Y) και το σκάνδιο (Sc) παρουσιάζουν παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες με τις λανθανίδες, γεγονός που τα καθιστά στενά συνδεδεμένα με την ομάδα των σπάνιων γαιών. Παρόλα αυτά, μόνο το ύτριο συνήθως ταξινομείται μαζί με τις υπόλοιπες σπάνιες γαίες, καθώς απαντάται σε σημαντικές συγκεντρώσεις στα ίδια μεταλλεύματα και συνεισφέρει στην οικονομική αξία των κοιτασμάτων τους (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018). Αντίθετα, το σκάνδιο θεωρείται ξεχωριστό στην ανάλυση των κρίσιμων πρώτων υλών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς εξορύσσεται κυρίως από βωξιτικά κοιτάσματα και χρησιμοποιείται σε εξειδικευμένες βιομηχανικές εφαρμογές (Massari & Ruberti, 2013).

Επιπλέον, αν και όλες οι λανθανίδες απαντώνται στη φύση, το προμήθειο (Pm) αποτελεί εξαίρεση. Το στοιχείο αυτό δεν έχει σταθερά φυσικά ισότοπα, ενώ το πιο σταθερό του ισότοπο διαθέτει ημιπερίοδο ζωής περίπου 17,7 έτη. Ως εκ τούτου, το προμήθειο δεν περιλαμβάνεται στις σπάνιες γαίες που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη, η οποία επικεντρώνεται στις 15 λανθανίδες, το ύτριο και τη συνάφειά τους με την εξόρυξη και τις εφαρμογές τους (Weng et al., 2015).

Παρά τη χρήση του όρου «σπάνιες γαίες», τα συγκεκριμένα στοιχεία δεν είναι απαραίτητα σπάνια στη Γη. Αντιθέτως, είναι διαδεδομένα στον φλοιό της Γης, ωστόσο η ονομασία τους προέρχεται από το γεγονός ότι αρχικά απομονώθηκαν από σπάνια ορυκτά, όπου ήταν εντοπισμένα σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Για παράδειγμα, το νεοδύμιο (Nd), ένα από τα πιο κοινά στοιχεία αυτής της ομάδας, είναι στην πραγματικότητα πιο άφθονο από τον χαλκό ή τον μόλυβδο. Παρόλα αυτά, η

πραγματική σπανιότητα των στοιχείων αυτών δεν σχετίζεται τόσο με την παρουσία τους στον φλοιό της Γης, όσο με τη συγκέντρωσή τους σε οικονομικά βιώσιμα κοιτάσματα προς εκμετάλλευση (Zhou, Li, & Chen, 2017).

Ο όρος «γαίες» που αποδίδεται σε αυτήν την κατηγορία στοιχείων προέρχεται από τον τρόπο που αρχικά ανακαλύφθηκαν και εξήχθησαν. Οι πρώτες ενώσεις που απομονώθηκαν από τα ορυκτά ήταν οξείδια, τα οποία στην εποχή εκείνη ονομάζονταν «terre» στα γαλλικά και «erde» στα γερμανικά, όροι που μεταφράζονται ως «γαία» ή «γήινη ύλη». Επιπλέον, τα οξείδια αυτά παρουσίαζαν μια χαρακτηριστική ακατέργαστη και θαμπή εμφάνιση, που ενίσχυσε την υιοθέτηση του όρου (Hoatson, Jaireth, & Mieзитis, 2011).

1.1.2 Ιστορική Εξέλιξη

Η ιστορική ανακάλυψη και χρήση των σπάνιων γαιών ξεκινά στα τέλη του 18ου αιώνα στη Σουηδία και διακρίνεται σε τέσσερις διακριτές περιόδους.

Η πρώτη περίοδος, από το 1788 έως το 1891, θεωρείται η προοιμιακή φάση της μελέτης των σπάνιων γαιών. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, τα στοιχεία αυτά ανακαλύφθηκαν και μελετήθηκαν επιστημονικά, χωρίς όμως να έχουν ακόμη βιομηχανικές εφαρμογές. Το 1788, ο Σουηδός ερασιτέχνης χημικός Carl Axel Arrhenius εντόπισε στην περιοχή Υτέρμπι ένα μαύρο ορυκτό, το οποίο αρχικά ονόμασε υτερμπίτη, αλλά αργότερα αναγνωρίστηκε ως γαδολινίτης προς τιμήν του Johan Gadolin, που πρώτος μελέτησε το ορυκτό το 1794. Ο Gadolin διαπίστωσε ότι ένα σημαντικό ποσοστό της σύστασής του αποτελούνταν από μια άγνωστη έως τότε «γαία», η οποία σήμερα αναγνωρίζεται ως οξείδιο του υτρίου (Y_2O_3) (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

Η κατανόηση των σπάνιων γαιών προχώρησε σημαντικά κατά τον 19ο αιώνα, όταν ο Mosander ανέλαβε τη συστηματική ανάλυση των μικτών σπάνιων γαιών το 1839. Το έργο του συνέβαλε στην αναγνώριση νέων στοιχείων, ενώ ο Bunsen και ο Kirchhoff εισήγαγαν τη φασματοσκοπία ως βασική μέθοδο διαχωρισμού των σπάνιων γαιών. Επιπλέον, το 1885, ο Auer von Welsbach ανέπτυξε έναν νέο τύπο λαμπτήρα αερίου (Auerlicht), ο οποίος ωστόσο δεν γνώρισε αμέσως επιτυχία, γεγονός που καθιστούσε αβέβαιο το βιομηχανικό μέλλον των σπάνιων γαιών (Massari & Ruberti, 2013).

Η δεύτερη περίοδος (1891-1930) σηματοδοτεί την πρώτη σημαντική βιομηχανική χρήση των σπάνιων γαιών. Το 1891, ιδρύθηκε νέα εταιρεία με σκοπό τη βελτίωση των λαμπτήρων αερίου, οι οποίοι, λόγω της υψηλής φωτεινότητας και χαμηλότερου κόστους τους, κυριάρχησαν έναντι των ηλεκτρικών λαμπτήρων για αρκετές δεκαετίες. Μέχρι το 1935, είχαν κατασκευαστεί περίπου 5 δισεκατομμύρια τέτοιοι λαμπτήρες παγκοσμίως, επιβεβαιώνοντας τη χρησιμότητα των σπάνιων γαιών και την οικονομική τους σημασία (Zhou, Li, & Chen, 2017).

Η τρίτη περίοδος (1930-1960) χαρακτηρίζεται από τη σταδιακή επέκταση των εφαρμογών των σπάνιων γαιών. Η περίοδος 1930-1940 σημαδεύτηκε από τις πρώτες προσπάθειες αξιοποίησης των σπάνιων γαιών σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές, ενώ κατά την περίοδο 1940-1960, η έρευνα και οι τεχνικές διαχωρισμού εξελίχθηκαν σημαντικά. Η πρόοδος αυτή οφείλεται εν μέρει στην ανάγκη παραγωγής καθαρών στοιχείων για τα προγράμματα πυρηνικής έρευνας και βιομηχανικής ανάπτυξης σε χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Μεγάλη Βρετανία (Weng et al., 2015).

Η τέταρτη και τρέχουσα περίοδος, που ξεκινά από το 1960, σηματοδοτεί την εκρηκτική αύξηση των εφαρμογών των σπάνιων γαιών σε τομείς όπως τα ηλεκτρονικά, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η αεροδιαστημική τεχνολογία. Η διαθεσιμότητα των σπάνιων γαιών σε υψηλές καθαρότητες κατέστησε δυνατή την αξιοποίησή τους σε εξειδικευμένες εφαρμογές, ωστόσο το κόστος και η πρόσβαση στις πρώτες ύλες παραμένουν σημαντικές προκλήσεις για τη βιώσιμη διαχείρισή τους (Kim & Yoon, 2015).

1.1.3 Ταξινόμηση Σπάνιων Γαιών

Οι σπάνιες γαίες κατατάσσονται συχνά σε δύο κύριες κατηγορίες: τις ελαφριές σπάνιες γαίες (LREE - Light Rare Earth Elements) και τις βαριές σπάνιες γαίες (HREE - Heavy Rare Earth Elements). Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται κυρίως στο ατομικό βάρος των στοιχείων καθώς και στο γεγονός ότι τα στοιχεία κάθε ομάδας απαντώνται συνήθως μαζί στα φυσικά κοιτάσματα (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

Η ομάδα των **ελαφριών σπάνιων γαιών (LREE)** περιλαμβάνει τα εξής χημικά στοιχεία: λανθάνιο (La), δημήτριο (Ce), πρασινοδύμιο (Pr), νεοδύμιο (Nd), προμήθειο (Pm), σαμάριο (Sm), ευρώπιο (Eu) και γαδολίνιο (Gd). Από την άλλη πλευρά, η ομάδα των **βαριών σπάνιων γαιών (HREE)** περιλαμβάνει τα στοιχεία τέρβιο (Tb), δυσπρόσιο (Dy), όλμιο (Ho), έρβιο (Er), θούλιο (Tm), υτέρβιο (Yb) και λουτήτιο (Lu), καθώς και το ύτριο (Y). Παρόλο που το ύτριο έχει μικρότερο ατομικό βάρος, κατατάσσεται συνήθως στις βαριές σπάνιες γαίες λόγω των χημικών του ομοιοτήτων, κυρίως με το όλμιο και σε μικρότερο βαθμό με το δυσπρόσιο (Massari & Ruberti, 2013).

Επειδή η διαίρεση των σπάνιων γαιών σε ελαφριές και βαριές δεν είναι απόλυτα διακριτή, συχνά προτείνεται και μια ενδιάμεση κατηγορία, οι **μεσαίες σπάνιες γαίες (MREE - Medium Rare Earth Elements)**, στην οποία κατατάσσονται τα στοιχεία μεταξύ του ευρωπαϊού και του δυσπρόσιου. Ο διαχωρισμός αυτός έχει περισσότερο πρακτική χρησιμότητα, καθώς επιτρέπει την καλύτερη ανάλυση της χημείας και των ιδιοτήτων των επιμέρους στοιχείων (Zhou, Li, & Chen, 2017).

Εκτός από την κατάταξή τους με βάση το ατομικό βάρος, οι σπάνιες γαίες αναφέρονται συχνά και ως "**οξειδία σπάνιων γαιών**" (**ΟΣΓ - Rare Earth Oxides, REO**). Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως στη βιομηχανία, καθώς τα στοιχεία των σπάνιων γαιών συνήθως διαχωρίζονται και πωλούνται στη μορφή των οξειδίων τους. Επομένως, η αποτύπωση των αποθεμάτων σπάνιων γαιών σε όρους ΟΣΓ είναι κοινή πρακτική στις μελέτες εκμετάλλευσης και εμπορικής αξιολόγησης (Binnemans & Jones, 2015).

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

Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση Σπάνιων Γαιών

Πηγή: [Απεροπία, 2017]

1.2 Γεωλογία Σπάνιων Γαιών

Παρά την ονομασία τους, οι σπάνιες γαίες δεν είναι τόσο σπάνιες όσο αρχικά θεωρήθηκε. Στην πραγματικότητα, απαντώνται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στον φλοιό της Γης από αρκετά κοινά πολύτιμα και βιομηχανικά μέταλλα, όπως ο χρυσός (Au), ο λευκόχρυσος (Pt), ο άργυρος (Ag), ο χαλκός (Cu), ο μόλυβδος (Pb), ο ψευδάργυρος (Zn), ο κασσίτερος (Sn) και το νικέλιο (Ni) (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018). Ωστόσο, η εκμετάλλευσή τους είναι περιορισμένη λόγω του γεγονότος ότι σπάνια απαντώνται σε υψηλές συγκεντρώσεις σε οικονομικά βιώσιμα κοιτάσματα.

Οι σπάνιες γαίες απαντώνται ως συστατικά περίπου 250 γνωστών ορυκτών, εκ των οποίων λίγα είναι εκμεταλλεύσιμα για την εξόρυξή τους. Τα πιο σημαντικά ορυκτά που περιέχουν σπάνιες γαίες είναι ο μπαστναϊσίτης $[(La, Ce, Y)CO_3F]$, που αποτελεί κύρια πηγή ελαφριών σπάνιων γαιών (LREE), ο μοναζίτης $[(Ce, La, Th)PO_4]$, που επίσης περιέχει LREE αλλά και θόριο (Th), και ο ξενοτίμης (YPO_4) , ο οποίος είναι πηγή βαριών σπάνιων γαιών (HREE) και υτρίου (Y). Επιπλέον, ο απατίτης

[Ca₅(PO₄)₃(F, Cl, OH)] μπορεί να περιέχει συγκεντρώσεις σπάνιων γαιών, αν και δεν αποτελεί πρωταρχικό ορυκτό εξόρυξης για αυτά τα στοιχεία (Weng et al., 2015).

Από γεωλογική άποψη, οι σπάνιες γαίες απαντώνται σε δύο βασικούς τύπους κοιτασμάτων: **πρωτογενή και δευτερογενή**. Τα πρωτογενή κοιτάσματα σχηματίζονται από γεωλογικά επεισόδια βαθιά στον φλοιό της Γης, όπου η εισροή μάγματος ή η κυκλοφορία υδροθερμικών διαλυμάτων εμπλουτισμένων σε σπάνιες γαίες οδηγεί στη συγκέντρωσή τους. Τα δευτερογενή κοιτάσματα, από την άλλη, δημιουργούνται όταν ένα πρωτογενές κοίτασμα υπόκειται σε μεταγενέστερες γεωλογικές διεργασίες, όπως διάβρωση, μεταφορά και εναπόθεση των σπάνιων γαιών σε νέα περιβάλλοντα.

Η δημιουργία αυτών των κοιτασμάτων λαμβάνει χώρα σε περιοχές όπου μανδυακό υλικό (μάγμα) ή υδροθερμικά διαλύματα πλούσια σε σπάνιες γαίες διεισδύουν σε πετρώματα μέσω ρωγμών και ασυνεχειών. Στη συνέχεια, αυτά τα διαλύματα αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και καθιζάνουν, σχηματίζοντας πλούσιες συγκεντρώσεις των επιθυμητών στοιχείων. Παρόλα αυτά, όχι όλα τα μάγματα ή υδροθερμικά διαλύματα περιέχουν σπάνιες γαίες, καθώς ο σχηματισμός τους απαιτεί ειδικές γεωχημικές συνθήκες που προωθούν τη συγκέντρωση και την καθίζηση αυτών των στοιχείων (Zhou, Li, & Chen, 2017).

1.3 Εφαρμογές Σπάνιων Γαιών

Οι σπάνιες γαίες διακρίνονται για τις ιδιαίτερες φυσικές και χημικές τους ιδιότητες, οι οποίες τις καθιστούν απαραίτητες σε ένα ευρύ φάσμα σύγχρονων εφαρμογών. Χάρη στις μοναδικές τους μαγνητικές, οπτικές, ηλεκτρικές και καταλυτικές ιδιότητες, χρησιμοποιούνται ευρέως σε προηγμένες τεχνολογίες, ενισχύοντας την αποδοτικότητα πολλών βιομηχανικών και καταναλωτικών προϊόντων (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

Μεταξύ των βασικών εφαρμογών των σπάνιων γαιών συγκαταλέγονται τα κράματα μετάλλων, τα οποία συμβάλλουν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της θερμικής σταθερότητας διαφόρων υλικών. Επιπλέον, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην κατασκευή μπαταριών υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς και στην

παραγωγή ισχυρών μόνιμων μαγνητών, οι οποίοι αξιοποιούνται σε κινητά τηλέφωνα, σκληρούς δίσκους και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές (Yang et al., 2017).

Η χρήση των σπάνιων γαιών επεκτείνεται και στον τομέα των οπτικών εφαρμογών, καθώς χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένα γυαλιά για κράνη συγκόλλησης, λέιζερ και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Παράλληλα, ο ρόλος τους στην αμυντική βιομηχανία γίνεται ολοένα και πιο σημαντικός, καθώς αξιοποιούνται σε προηγμένα συστήματα καθοδήγησης πυραύλων, δορυφορικές επικοινωνίες και εξειδικευμένα υλικά στρατιωτικών τεχνολογιών (Humphries, 2013).

Οι σπάνιες γαίες, πέρα από την εκτεταμένη χρήση τους στον τεχνολογικό τομέα, έχουν βρει εφαρμογή και στον αγροτικό τομέα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται σε λιπάσματα με στόχο τη βελτίωση της ανάπτυξης των φυτών και την αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Η ενσωμάτωσή τους στο έδαφος ενδέχεται να ενισχύει τη συγκέντρωση βασικών θρεπτικών στοιχείων και να συμβάλλει στην ποιότητα των καλλιεργειών (Weng et al., 2015).

Τα ανόργανα φωσφορικά λιπάσματα περιέχουν τόσο μακροθρεπτικά στοιχεία, όπως το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg), το άζωτο (N) και ο φώσφορος (P), όσο και μικροθρεπτικά στοιχεία, όπως ο σίδηρος (Fe) και το πυρίτιο (Si), καθώς και σπάνιες γαίες. Στην Κίνα, τα λιπάσματα που περιέχουν σπάνιες γαίες εφαρμόζονται εκτενώς, καθώς έχει διαπιστωθεί ότι μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της απόδοσης και της ποιότητας των καλλιεργειών. Σύμφωνα με μελέτες, οι συγκεντρώσεις των σπάνιων γαιών στα λιπάσματα ποικίλλουν και εξαρτώνται από τον τύπο της καλλιέργειας, τις συνθήκες του εδάφους και τις γεωργικές πρακτικές που εφαρμόζονται. Για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί ότι το ρύζι έχει μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης σπάνιων γαιών σε σύγκριση με το καλαμπόκι, γεγονός που υποδηλώνει ότι ορισμένα φυτά μπορούν να συσσωρεύσουν υψηλότερες συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων (Zhou, Li, & Chen, 2017).

Η πρώτη καταγεγραμμένη τεχνολογική εφαρμογή των σπάνιων γαιών χρονολογείται από τη δεκαετία του 1890 στη Βιέννη, όταν χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή καλυμμάτων λαμπτήρων. Σήμερα, η χρήση τους εκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα προηγμένων εφαρμογών, από ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τηλεοράσεις, υπολογιστές και έξυπνα κινητά τηλέφωνα, έως τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι ανεμογεννήτριες και τα βιοκαύσιμα (Massari & Ruberti, 2013). Επιπλέον, οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, σε τομείς όπως η μεταλλουργία, η παραγωγή ισχυρών μαγνητών, η κατασκευή καταλυτών, καθώς και η παραγωγή υλικών υψηλής τεχνολογίας, όπως πλαστικά, κεραμικά και υαλικά. Παράλληλα, η ιατρική αξιοποιεί τις ιδιότητες των σπάνιων γαιών σε διαγνωστικές και θεραπευτικές εφαρμογές, όπως η μαγνητική τομογραφία, οι ακτινοθεραπείες και η τεχνολογία λέιζερ (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι σπάνιες γαίες αποτελούν αναπόσπαστο μέρος πολλών αντικειμένων που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητά μας, συχνά χωρίς να το γνωρίζουμε. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρήση τους στη βιομηχανία γυαλιού, καθώς αποτελούν βασικό συστατικό για την παραγωγή φακών φωτογραφικών μηχανών, φακών κινητών τηλεφώνων και διαφόρων τύπων οθονών, όπως Plasma, LCD, LED και HDD. Επιπλέον, οι σπάνιες γαίες αξιοποιούνται σε εξαρτήματα ηλεκτρονικών συσκευών, όπως οι σκληροί δίσκοι, οι επεξεργαστές και τα ψυκτικά ανεμιστηράκια των υπολογιστών, καθώς και σε περιφερειακές συσκευές, όπως οι σαρωτές (Chakhmouradian & Wall, 2012).

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές των σπάνιων γαιών αφορά την παραγωγή μόνιμων μαγνητών υψηλής ισχύος. Οι μαγνήτες αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε σύγχρονες ηλεκτρονικές και τεχνολογικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των κινητών τηλεφώνων, των τηλεοράσεων, των υπολογιστών, των ηλεκτρικών οχημάτων, των ανεμογεννητριών και της αεροναυπηγικής βιομηχανίας. Ο μαγνητισμός, η φωταύγεια και οι χημικές-καταλυτικές τους ιδιότητες καθιστούν τις σπάνιες γαίες αναντικατάστατες σε πολλές από αυτές τις τεχνολογίες (Yang et al., 2017).

Αξιοσημείωτη είναι η συμβολή τους στην κατασκευή «έξυπνων» κινητών τηλεφώνων, τα οποία περιέχουν πλήθος ορυκτών πρώτων υλών. Συγκεκριμένα, έχουν εντοπιστεί συνολικά 75 διαφορετικά ορυκτά σε τέτοιες συσκευές, εκ των οποίων τα 62 είναι μέταλλα. Οι σπάνιες γαίες αντιπροσωπεύονται σε 16 από τα 17 στοιχεία της ομάδας τους, με μόνη εξαίρεση το ραδιενεργό προμήθιο (Pm), το οποίο δεν χρησιμοποιείται για προφανείς λόγους (Massari & Ruberti, 2013).

Οι σπάνιες γαίες διαθέτουν ένα σύνολο μοναδικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων, που επιτρέπουν την ευρεία χρήση τους σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της βιομηχανίας. Η αξιοποίησή τους επεκτείνεται σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν την κατάλυση, τη γυάλινη βιομηχανία, τη μεταλλουργία, την παραγωγή μπαταριών και μαγνητών, την κεραμική και την ιατρική τεχνολογία.

- **Κατάλυση:** Τα οξείδια σπανίων γαιών αξιοποιούνται στην καταλυτική πυρόλυση βαρέων κλασμάτων πετρελαίου, καθώς και στους καταλυτικούς μετατροπείς αυτοκινήτων. Συγκεκριμένα, τα οξείδια του λανθανίου, του δημητρίου, του νεοδυμίου και του πρασεοδυμίου παίζουν κρίσιμο ρόλο στην αποδοτικότητα αυτών των διεργασιών (Zhou, Li, & Chen, 2017).
- **Υαλουργία:** Τα στοιχεία των σπανίων γαιών χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του γυαλιού, όπως η απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας, η τροποποίηση του διαθλαστικού δείκτη και η μεταβολή του χρώματος. Το ύτριο, σε συνδυασμό με γρανάτη και αλουμίνιο, αποτελεί βασικό υλικό στην παραγωγή λέιζερ YAG, ενώ το νεοδύμιο και άλλες σπάνιες γαίες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).
- **Στίλβωση:** Τα οξείδια σπανίων γαιών χρησιμοποιούνται σε κόνεων στίλβωσης που εφαρμόζονται σε οθόνες καθοδικού σωλήνα, πλάσμα και υγρών κρυστάλλων. Το οξείδιο του δημητρίου είναι ένα από τα κύρια υλικά για τέτοιες εφαρμογές, εξαιτίας της ικανότητάς του να βελτιώνει την καθαρότητα και τη στιλπνότητα του γυαλιού (Weng et al., 2015).
- **Μεταλλουργία:** Οι σπάνιες γαίες ενσωματώνονται σε κράματα αλουμινίου, σιδήρου και χάλυβα, ενισχύοντας την αντοχή, τη θερμική σταθερότητα και τη μηχανική τους συμπεριφορά. Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη μεταλλουργία περιλαμβάνουν το λανθάνιο, το νεοδύμιο, το δημήτριο και το πρασεοδύμιο (Hoatson, Jaireth, & Miezitis, 2011).

- **Κεραμικά:** Η κεραμική βιομηχανία αξιοποιεί τις σπάνιες γαίες για την παραγωγή εξειδικευμένων κεραμικών υλικών, καθώς και για την τροποποίηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του τιτανίου. Το ύτριο, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για την παραγωγή φερριτών υψηλών συχνοτήτων και για τη σταθεροποίηση του ζirkονίου στους αισθητήρες οξυγόνου (Chakhmouradian & Wall, 2012).
- **Μαγνήτες:** Οι σπάνιες γαίες συμβάλλουν καθοριστικά στην κατασκευή μαγνητών νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB), οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλή μαγνητική πυκνότητα και χρησιμοποιούνται σε ηλεκτροκινητήρες, ανεμογεννήτριες και ηλεκτρονικές συσκευές. Τα κύρια στοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτούς τους μαγνήτες είναι το νεοδύμιο, το πρασεοδύμιο, το δυσπρόσιο, το γαδολίνιο και το τέρβιο (Yang et al., 2017).
- **Μπαταρίες:** Οι σπάνιες γαίες βρίσκουν εφαρμογή στις μπαταρίες υδριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH), οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα. Τα υλικά αυτά επιτρέπουν τη σταθερή αποθήκευση και απελευθέρωση υδρογόνου, αυξάνοντας την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των μπαταριών (Kim & Yoon, 2015).
- **Ιατρική:** Οι σπάνιες γαίες έχουν βρει σημαντικές εφαρμογές στην ιατρική, ιδιαίτερα σε τεχνικές απεικόνισης και θεραπείας. Το γαδολίνιο χρησιμοποιείται ως παράγοντας αντίθεσης στη μαγνητική τομογραφία (MRI), ενώ νανοϋλικά βασισμένα στο οξείδιο του δημητρίου μελετώνται για τη δυνατότητα αντιμετώπισης παθολογικών καταστάσεων. Επιπλέον, η αντιοξειδωτική δράση των σπανίων γαιών παρουσιάζει ερευνητικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη νέων θεραπευτικών στρατηγικών (Das et al., 2007).

1.4 Χώρες Παραγωγής

Η αυξανόμενη στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις έξυπνες τεχνολογίες οδηγεί σε ραγδαία αύξηση της ζήτησης για κρίσιμα μέταλλα. Οι σπάνιες γαίες αποτελούν βασικά στοιχεία σε πολλές από αυτές τις εφαρμογές, καθώς συμβάλλουν στη βελτίωση της απόδοσης και της αποδοτικότητας υλικών που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά συστήματα και μπαταρίες. Αν και οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες, η σημασία τους είναι δυσανάλογα μεγάλη, γι' αυτό και χαρακτηρίζονται συχνά ως οι «βιταμίνες της βιομηχανίας» (Massari & Ruberti, 2013).

Η αύξηση της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να εντείνει τη ζήτηση για αυτά τα στρατηγικά υλικά. Έρευνες έχουν δείξει ότι μέχρι το 2050, η ζήτηση για ορυκτές ύλες που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες θα μπορούσε να αυξηθεί έως και 300%, ενώ για τα φωτοβολταϊκά συστήματα η αύξηση εκτιμάται στο 200%. Εντυπωσιακή προβλέπεται και η άνοδος στη ζήτηση πρώτων υλών για την παραγωγή μπαταριών, η οποία αναμένεται να αυξηθεί κατά 1.000% (Zhou, Li, & Chen, 2017).

Παράλληλα, η εξόρυξη και η παραγωγή σπανίων γαιών συγκεντρώνονται σε λίγες χώρες παγκοσμίως, γεγονός που καθιστά τη διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού ιδιαίτερα κρίσιμη. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία, οι πέντε χώρες με τη μεγαλύτερη εξόρυξη σπανίων γαιών το 2019 περιλαμβάνουν κορυφαίους παραγωγούς, οι οποίοι διαμορφώνουν τις παγκόσμιες αγορές (Weng et al., 2015).

Σύμφωνα με τα τελευταία στατιστικά στοιχεία του Γεωλογικού Ιδρύματος των ΗΠΑ οι 5 χώρες με τη μεγαλύτερη εξόρυξη ΣΓ το 2019 ήταν αυτές του Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Χώρες και Τόνοι Παραγωγής Σπάνιων Γαιών

| | | |
|---|---------|---------|
| 1 | Κίνα | 132.000 |
| 2 | ΗΠΑ | 26.000 |
| 3 | Μιανμάρ | 22.000 |

Πηγή: [De Facto, 2020]

Η Κίνα διατηρεί κυρίαρχη θέση τόσο στην εξόρυξη όσο και στην εξαγωγή των σπάνιων γαιών, ελέγχοντας το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής. Ο έλεγχος αυτός δημιουργεί σημαντικές εξαρτήσεις για μεγάλες οικονομίες, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ευρωπαϊκή Ένωση, οι οποίες βασίζονται στην Κίνα για τον εφοδιασμό τους σε κρίσιμες πρώτες ύλες (Humphries, 2013).

Η εκμετάλλευση των σπάνιων γαιών ξεκίνησε στα μέσα του 20ού αιώνα, με κύριους παραγωγούς τη Βραζιλία, την Ινδία και τη Νότια Αφρική, όπου εντοπίστηκαν πλούσια κοιτάσματα μοναζίτη. Μέχρι τη δεκαετία του 1960, η ζήτηση για αυτά τα στοιχεία παρέμενε περιορισμένη, καθώς οι περισσότερες εφαρμογές τους αφορούσαν μεταλλικά κράματα, κυρίως με τον σίδηρο. Ωστόσο, η ανακάλυψη νέων τεχνολογιών διαχωρισμού και επεξεργασίας στη δεκαετία του 1950 άνοιξε τον δρόμο για τη χρήση μεμονωμένων στοιχείων των σπάνιων γαιών σε εξειδικευμένες εφαρμογές (Weng et al., 2015).

Η πραγματική άνοδος της ζήτησης σημειώθηκε το 1965, όταν οι πρώτες έγχρωμες τηλεοράσεις έγιναν ευρέως διαθέσιμες στην αγορά. Το ευρώπιο αποτέλεσε βασικό υλικό για την παραγωγή των φωσφορίζοντων επικαλύψεων των έγχρωμων οθονών, ενισχύοντας τη σημασία των σπάνιων γαιών στη βιομηχανία. Την ίδια περίοδο, η ανακάλυψη κοιτασμάτων μπαστναζίτη στις Ηνωμένες Πολιτείες οδήγησε στην ανάπτυξη του ορυχείου **Mountain Pass** στην Καλιφόρνια, το οποίο σύντομα αναδείχθηκε στον μεγαλύτερο παραγωγό σπάνιων γαιών παγκοσμίως. Κατά την περίοδο 1965-1985, το ορυχείο αυτό κάλυπτε την πλειονότητα της παγκόσμιας ζήτησης. Ενδεικτικά, η ετήσια παραγωγή των ΗΠΑ αυξήθηκε από 2.900 τόνους το 1965 σε 12.200 τόνους το 1966, ενώ η παγκόσμια παραγωγή αυξήθηκε από 6.960 τόνους σε 16.200 τόνους. Μέχρι το 1984, οι ΗΠΑ αντιπροσώπευαν περίπου το 63% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών, με το ποσοστό να φτάνει στο 78% το 1974 (Massari & Ruberti, 2013).

Στη δεκαετία του 1980, η Κίνα κατέγραψε ραγδαία αύξηση της παραγωγής οξειδίων και μετάλλων σπάνιων γαιών, καταφέροντας μέσα σε μία δεκαετία να εδραιωθεί ως ο κυρίαρχος παραγωγός. Η άνοδος αυτή βασίστηκε όχι μόνο στη διαθεσιμότητα πλούσιων κοιτασμάτων αλλά και στις χαμηλές τιμές εξόρυξης και παραγωγής, καθιστώντας τον ανταγωνισμό αδύνατο για άλλες χώρες. Αυτό οδήγησε στο σταδιακό κλείσιμο ορυχείων, όπως το **Mountain Pass**, επιτρέποντας στην Κίνα να διατηρήσει

πάνω από το 90% της παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών (Zhou, Li, & Chen, 2017).

Η αυξημένη παραγωγή αποτυπώνεται και στα ποσοτικά δεδομένα. Το 1994, η συνολική παραγωγή σπάνιων γαιών υπολογιζόταν στους 60.000 τόνους, ενώ μέχρι το 2017 είχε υπερδιπλασιαστεί, φτάνοντας τους 130.000 τόνους. Η αυξανόμενη ζήτηση για πράσινη ενέργεια, ηλεκτρονικά προϊόντα και προηγμένες τεχνολογίες στην αυτοκινητοβιομηχανία έχει συμβάλει σε αυτή την άνοδο. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις ότι τα επίσημα στοιχεία της Κίνας ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζουν το πλήρες μέγεθος της παραγωγής, καθώς αναφέρεται η ύπαρξη μη καταγεγραμμένων ή παράνομων δραστηριοτήτων εξόρυξης (Weng et al., 2015). Παρόλα αυτά, συγκριτικά με άλλα μέταλλα, η συνολική παραγωγή σπάνιων γαιών παραμένει χαμηλή, παρά τη στρατηγική τους σημασία στη βιομηχανία και την τεχνολογία (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

1.4.1 Κατανομή στον Πλανήτη

Η εξόρυξη σπάνιων γαιών στην Ευρώπη αποτελεί ένα ζήτημα με ιδιαίτερη γεωπολιτική και περιβαλλοντική σημασία. Το κοίτασμα **Norra Kärr** στη Σουηδία, παρότι βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο αδειοδότησης, έχει βρεθεί αντιμέτωπο με αντιδράσεις από τοπικές κοινότητες, καθυστερώντας έτσι την έναρξη της εξόρυξης. Παράλληλα, η σουηδική εταιρεία **LKAB** επιδιώκει την παραγωγή σπάνιων γαιών ως παραπροϊόν της εκμετάλλευσης σιδήρου, αναπτύσσοντας πιλοτικές εγκαταστάσεις στο κοίτασμα **Kiruna** για την αξιοποίηση των μεταλλευτικών υπολειμμάτων (Hoatson, Jaireth, & Miezitis, 2011).

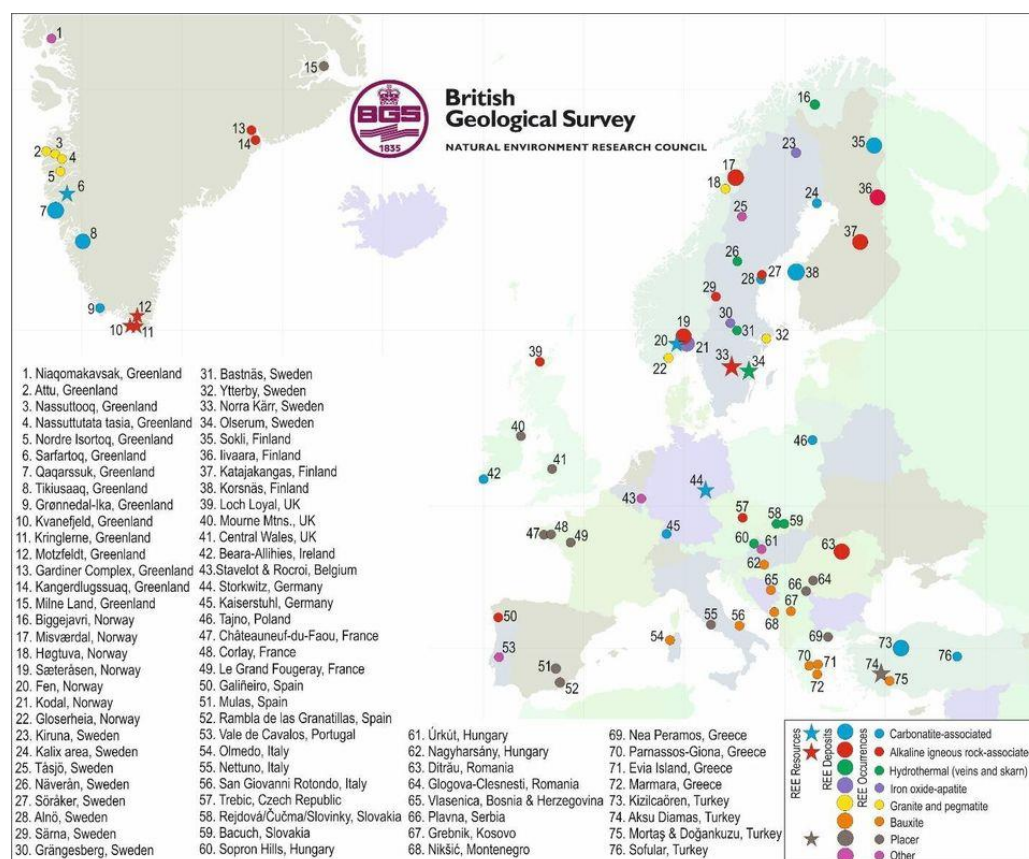
Αντίστοιχες προσπάθειες εντοπίζονται και στη Φινλανδία, όπου βρίσκονται σε εξέλιξη γεωλογικές έρευνες και οικονομικές μελέτες για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων σπάνιων γαιών. Στη Γροιλανδία, η δραστηριότητα είναι επίσης έντονη, με κινεζικές εταιρείες και την αυστραλιανή **TANBREEZ** να επιδιώκουν επενδύσεις στον τομέα αυτό, προκειμένου να ενισχύσουν την παγκόσμια προσφορά σπάνιων γαιών (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα κοιτάσματα που έχουν εντοπιστεί πρόσφατα βρίσκεται στον **Ειρηνικό Ωκεανό**, κοντά στο νησί **Minamitori**, το οποίο ανήκει στην **Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη (ΑΟΖ) της Ιαπωνίας**. Σύμφωνα με επιστημονικές εκθέσεις, το κοιτάσμα αυτό περιλαμβάνει τεράστιες ποσότητες σπανίων γαιών σε μορφή θαλάσσιας ιζηματογενούς λάσπης, σε βάθος περίπου 4.000 μέτρων. Οι εκτιμήσεις αναφέρουν ότι τα αποθέματα μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση σε ύτριο για 780 χρόνια, σε δυσπρόσιο για 730 χρόνια, σε ευρώπιο για 620 χρόνια και σε τέρβιο για 420 χρόνια. Ωστόσο, η εξόρυξη αυτών των ορυκτών είναι εξαιρετικά δαπανηρή, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη νέων, πιο οικονομικά βιώσιμων τεχνολογιών. Σε περίπτωση που η Ιαπωνία καταφέρει να εκμεταλλευτεί επιτυχώς το συγκεκριμένο κοιτάσμα, ενδέχεται να αποκτήσει σημαντική επιρροή στην παγκόσμια αγορά σπανίων γαιών, μεταβάλλοντας τις ισορροπίες μεταξύ των κυρίαρχων παραγωγών, δηλαδή της Κίνας και των Ηνωμένων Πολιτειών (Weng et al., 2015).

Παρότι οι περισσότερες χώρες που δραστηριοποιούνται στον τομέα των σπανίων γαιών είναι ήδη γνωστές, η περίπτωση της **Βόρειας Κορέας** έχει προκαλέσει σημαντικό ενδιαφέρον. Πρόσφατες γεωλογικές εκτιμήσεις υποδηλώνουν ότι η χώρα αυτή ενδέχεται να διαθέτει από τα μεγαλύτερα αποθέματα σπανίων γαιών παγκοσμίως. Συγκεκριμένα, στο κοιτάσμα **Jongju**, έχει εντοπιστεί απόθεμα περίπου **216,2 εκατομμυρίων τόνων οξειδίων σπανίων γαιών**, ποσότητα που φέρεται να ξεπερνά το σύνολο των γνωστών παγκόσμιων αποθεμάτων. Η οικονομική αξία αυτών των ορυκτών εκτιμάται στα **2,8 τρισεκατομμύρια δολάρια**, σύμφωνα με υπολογισμούς της **Νότιας Κορέας** (Massari & Ruberti, 2013).

Ωστόσο, η εκμετάλλευση αυτών των αποθεμάτων βρίσκεται σε αδιέξοδο λόγω των διεθνών κυρώσεων που έχουν επιβληθεί στη Βόρεια Κορέα, καθώς και της περιορισμένης τεχνογνωσίας στον τομέα της μεταλλευτικής βιομηχανίας. Οι προκλήσεις αυτές αυξάνουν το κόστος ανάπτυξης των σχετικών έργων, καθιστώντας την παραγωγή σπανίων γαιών από τη χώρα αυτή ιδιαίτερα δύσκολη. Σε περίπτωση που οι γεωπολιτικές συνθήκες αλλάξουν και η Βόρεια Κορέα καταφέρει να επενδύσει στην εκμετάλλευση αυτών των κοιτασμάτων, θα μπορούσε να διαμορφώσει νέα δεδομένα στον τομέα των σπανίων γαιών, επηρεάζοντας τις παγκόσμιες ισορροπίες στην προμήθεια αυτών των κρίσιμων πρώτων υλών (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

Εικόνα 1.2: Σπάνιες Γαίες στον Ευρωπαϊκό Χάρτη



Πηγή: [De Facto, 2020]

1.4.2 Κατανομή στον Ελλαδικό Χώρο

Όσον αναφορά το ελλαδικό υπέδαφος, Η Ελλάδα, μαζί με χώρες όπως η **Γροιλανδία**, η **Σουηδία**, η **Φινλανδία** και η **Νορβηγία**, συγκαταλέγεται στις ευρωπαϊκές περιοχές με δυναμικές προοπτικές για την εξόρυξη σπανίων γαιών. Η γεωλογική της σύσταση περιλαμβάνει όξινα μαγματικά πετρώματα, παρόμοια με εκείνα των γνωστών κοιτασμάτων **Norra Kärr** στη Σουηδία, **Kvanefjeld** και **Kringlerne** στη Γροιλανδία, καθώς και **Fen** στη Νορβηγία. Τα κοιτάσματα αυτά εκτιμάται ότι θα μπορούσαν να καλύψουν τις ευρωπαϊκές ανάγκες για σπάνιες γαίες τις επόμενες δεκαετίες (De Facto, 2020).

Έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην **Ελλάδα**, κυρίως στη **Βόρεια Ελλάδα**, έχουν αποκαλύψει σημαντικές ενδείξεις ύπαρξης σπανίων γαιών, ιδιαίτερα στις εκβολές των ποταμών **Στρυμόνα**, **Νέστου** και **Έβρου**. Ανιχνεύθηκαν σημαντικές συγκεντρώσεις σε θαλάσσια και παράκτια ιζήματα, με τις αναλύσεις δειγμάτων να

δείχνουν **μέση περιεκτικότητα 1,17% σε σπάνιες γαίες**. Ωστόσο, το γεγονός ότι στις ίδιες περιοχές εντοπίστηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις **θορίου**, ενός ραδιενεργού στοιχείου, αποτελεί εμπόδιο για την αξιοποίησή τους (De Facto, 2020).

Η παρουσία βαρέων μετάλλων και ραδιενεργών στοιχείων είναι ένας από τους βασικούς λόγους που, παρά την ύπαρξη κοιτασμάτων σπανίων γαιών σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, η εκμετάλλευσή τους παραμένει περιορισμένη. Στην Ελλάδα, εκτός από τις περιοχές της Βόρειας Ελλάδας, σπάνιες γαίες έχουν ανιχνευθεί στους **Λατερίτες της Λοκρίδας**, στο **Βροντερό Φλώρινας**, στους **Βωξίτες της Ζώνης Παρνασσού - Γκιώνας**, καθώς και στα **αλκαλικά μαγματικά πετρώματα της Σαμοθράκης** και στους **φωσφορίτες της Δυτικής Ελλάδας** (De Facto, 2020).

Παρότι έχουν μελετηθεί αρκετές μεταλλοφορίες σπανίων γαιών στην Ελλάδα, το μεγαλύτερο **οικονομικό ενδιαφέρον** παρουσιάζουν οι **μαύρες άμμοι στην περιοχή Λουτρών Ελευθερών - Νέας Περάμου**. Ωστόσο, η περιοχή αυτή είναι τουριστικά ανεπτυγμένη, γεγονός που δημιουργεί εμπόδια σε πιθανές εξορυκτικές δραστηριότητες. Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες και η τουριστική σημασία της περιοχής καθιστούν δύσκολη την εκμετάλλευση αυτών των κοιτασμάτων (De Facto, 2020).

Το ενδιαφέρον για τις σπάνιες γαίες στην Ελλάδα δεν έχει περάσει απαρατήρητο από τη **Κίνα**, η οποία κυριαρχεί στην παγκόσμια αγορά σπανίων γαιών, ελέγχοντας περίπου **το 62% της παγκόσμιας προσφοράς**. Το 2014, εξαμελής κινεζική αντιπροσωπεία αποτελούμενη από γεωλόγους και μεταλλουργούς επισκέφθηκε την **Αθήνα** για να ενημερωθεί σχετικά με τις υπάρχουσες έρευνες. Η κινεζική πλευρά εξέφρασε ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση σπανίων γαιών από τα υπολείμματα παραγωγής αλουμινίου, προτείνοντας τη μεταφορά των κοιτασμάτων σε κινεζικές εγκαταστάσεις για περαιτέρω επεξεργασία. Η στρατηγική αυτή θα μπορούσε να διευκολυνθεί από τη χαλαρότερη περιβαλλοντική νομοθεσία που εφαρμόζεται στην Κίνα, σε αντίθεση με τα αυστηρά ευρωπαϊκά πρότυπα (De Facto, 2020).

Κεφάλαιο 2

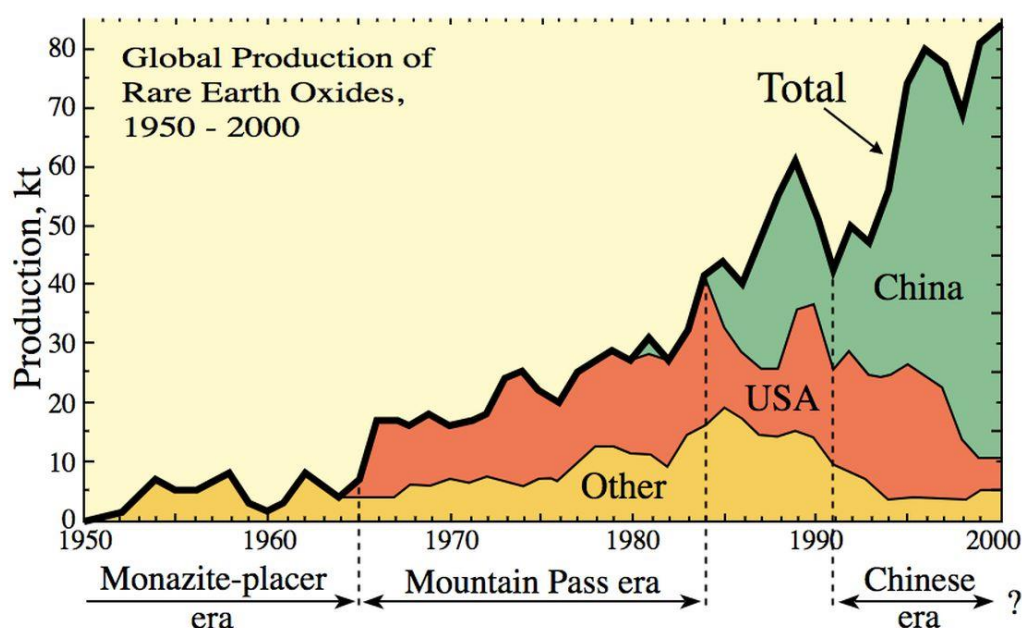
Η Οικονομική Συσχέτιση των Σπάνιων Γαιών

2.1 Σπάνιες Γαίες ως Οικονομικό Υπερόπλο

Για αρκετές δεκαετίες, οι σπάνιες γαίες ήταν γνωστές μόνο σε έναν περιορισμένο κύκλο επιστημόνων, κυρίως χημικών, γεωλόγων, μηχανικών και ειδικών στον τομέα των υλικών. Ωστόσο, στον 21ο αιώνα, η σημασία τους έχει γίνει ευρέως αναγνωρίσιμη για δύο βασικούς λόγους. Αφενός, το κοινό έχει αρχίσει να αντιλαμβάνεται τις εξειδικευμένες φυσικές και χημικές ιδιότητές τους, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές. Αφετέρου, η κυριαρχία της **Κίνας** στην παραγωγή και προμήθεια σπανίων γαιών έχει δημιουργήσει σημαντικές γεωπολιτικές εντάσεις και έχει φέρει το ζήτημα στο προσκήνιο της διεθνούς επικαιρότητας. Ο έλεγχος της Κίνας στην παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού σπανίων γαιών έχει οδηγήσει πολλές χώρες να αναζητήσουν εναλλακτικές πηγές, ώστε να μειώσουν την εξάρτησή τους (Massari & Ruberti, 2013).

Η **αγορά των σπανίων γαιών** θεωρείται ιδιαίτερα ευμετάβλητη, καθώς σχεδόν το **97% της παγκόσμιας παραγωγής** προέρχεται από την Κίνα, καθιστώντας τις υπόλοιπες χώρες εξαρτημένες από τις εισαγωγές. Αυτή η μονοπωλιακή κατάσταση επηρεάζει κυρίως **βιομηχανοποιημένα κράτη** με έντονη δραστηριότητα σε τεχνολογικούς τομείς, όπως οι **Ηνωμένες Πολιτείες, η Ιαπωνία και τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης**, τα οποία βασίζονται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε κινεζικές εισαγωγές σπανίων γαιών. Η αβεβαιότητα που περιβάλλει την προσφορά και τις γεωπολιτικές στρατηγικές της Κίνας έχει καταστήσει τη διαχείριση αυτών των κρίσιμων πρώτων υλών μία από τις προτεραιότητες για τις δυτικές κυβερνήσεις και τη βιομηχανία υψηλής τεχνολογίας (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

Σχήμα 2.1: Η Κινέζικη Κυριαρχία



Πηγή: [Ελληνικός Ορυκτός Πλούτος, 2018]

Η εξάρτηση των χωρών που χρειάζονται μια **σταθερή παροχή σπανίων γαιών** από την **Κίνα** παραμένει μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στην παγκόσμια αγορά πρώτων υλών. Η απόφαση της Κίνας να **περιορίσει τις εξαγωγές** σπανίων γαιών, επικαλούμενη την αυξανόμενη εσωτερική ζήτηση καθώς και τις **περιβαλλοντικές επιπτώσεις** της εξόρυξης, προκάλεσε ισχυρές ανησυχίες στις χώρες που εξαρτώνται από την προμήθεια αυτών των κρίσιμων υλικών. Η εξέλιξη αυτή ανέδειξε την ευαλωτότητα της ενεργειακής και βιομηχανικής ασφάλειας πολλών οικονομιών, καθώς η πρόσβαση στις σπάνιες γαίες συνδέεται άμεσα με την **παραγωγή τεχνολογικών προϊόντων, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στρατιωτικών εφαρμογών** (Massari & Ruberti, 2013).

Η απόφαση της Κίνας να μειώσει τις εξαγωγές της προκάλεσε διεθνείς αντιδράσεις, με τον **Παγκόσμιο Οργανισμό Εμπορίου (ΠΟΕ)**, τις **Ηνωμένες Πολιτείες, την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ιαπωνία** να καταθέτουν επίσημη καταγγελία κατά της κινεζικής κυβέρνησης. Η καταγγελία αυτή αφορούσε τις **μονοπωλιακές πρακτικές της Κίνας** στον τομέα των σπανίων γαιών και την επιβολή ποσοστώσεων εξαγωγής, γεγονός που θεωρήθηκε ως προσπάθεια χειραγώγησης των διεθνών αγορών και

περιορισμού της πρόσβασης άλλων χωρών σε αυτά τα κρίσιμα υλικά. Παρά τις αντιδράσεις, η Κίνα υπερασπίστηκε την πολιτική της, υποστηρίζοντας ότι οι νέοι περιορισμοί αποσκοπούν στην **προστασία του περιβάλλοντος** και στη **διατήρηση των στρατηγικών της αποθεμάτων** για την εγχώρια βιομηχανία (Zhou, Li, & Chen, 2017).

Συνοψίζοντας, η βιβλιογραφική ανασκόπηση καταδεικνύει ότι η **διαθεσιμότητα των σπανίων γαιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σταθερότητα της Κίνας**, τόσο σε πολιτικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Η δυναμική των σχέσεων της χώρας αυτής με τις υπόλοιπες παγκόσμιες δυνάμεις παίζει καθοριστικό ρόλο στον εφοδιασμό της αγοράς και δημιουργεί εύλογες ανησυχίες για την **ασφάλεια του εφοδιασμού** σε χώρες που δεν διαθέτουν εγχώριες πηγές σπανίων γαιών. Σε αυτό το πλαίσιο, η εξάρτηση από έναν και μόνο προμηθευτή εγείρει ζητήματα **γεωπολιτικής στρατηγικής και οικονομικής πολιτικής**, καθιστώντας τις σπάνιες γαίες έναν από τους πιο κρίσιμους πόρους του 21ου αιώνα (Goodenough, Wall, & Merriman, 2018).

2.2 Η Βιομηχανική τους Αγορά από Οικονομικά Ανεπτυγμένες Χώρες

Σύμφωνα με όσα έχουν αναλυθεί προηγουμένως και δεδομένης της κυρίαρχης θέσης της Κίνας στην αγορά, η αποδέσμευση από το μονοπώλιό της όσον αφορά τα σπάνια γαία (ΣΓ), που έχουν άμεση συσχέτιση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και την πράσινη τεχνολογία, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αξιοποίησής τους από άλλες βιομηχανικές χώρες (ΗΠΑ, Αυστραλία, ΕΕ, Ιαπωνία, κ.λπ.). Η διασφάλιση μιας υπεύθυνης και βιώσιμης εξόρυξης θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσα από ένα αυστηρό νομικό πλαίσιο.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη κινηθεί προς αυτή την κατεύθυνση, χρηματοδοτώντας έργα στο πλαίσιο του προγράμματος «Ορίζοντας 2020». Ένα από τα πλέον σημαντικά ήταν το EURARE, το οποίο στόχευε στην ανάπτυξη μιας ευρωπαϊκής βιομηχανίας ΣΓ, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη αλυσίδα αξίας. Ο στόχος ήταν η διασφάλιση αδιάλειπτης προμήθειας πρώτων υλών και προϊόντων ΣΓ με τρόπο οικονομικά βιώσιμο και περιβαλλοντικά φιλικό (De Facto, 2020).

Στο πλαίσιο του έργου αυτού, πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες μελέτες, μεταξύ των οποίων η ανάλυση της συνολικής εξαγωγής των ΣΓ από μεταλλεύματα, ο διαχωρισμός τους, η επεξεργασία τους για την παραγωγή μετάλλων, κραμάτων και άλλων ενώσεων, καθώς και η κατασκευή τελικών προϊόντων. Παράλληλα, η ΕΕ έχει αναγνωρίσει τις κρίσιμες ορυκτές πρώτες ύλες, αναθεωρώντας τον κατάλογό τους το 2017 (De Facto, 2020).

Σε πολιτικό επίπεδο, ο Γάλλος πρόεδρος Εμανουέλ Μακρόν, το 2017, είχε δεσμευτεί να αναβιώσει τη μεταλλευτική βιομηχανία της Γαλλίας για να αξιοποιήσει τα εγχώρια κοιτάσματα ΣΓ, επισημαίνοντας ότι η εξόρυξή τους μπορεί να γίνει με βιώσιμο και κοινωνικά υπεύθυνο τρόπο (Mining Technology, 2017).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το 2017, ο τότε πρόεδρος Ντόναλντ Τραμπ υπέγραψε την Εκτελεστική Εντολή 13817, η οποία αποσκοπούσε στην ενίσχυση των εγχώριων προμηθειών κρίσιμων μετάλλων. Παράλληλα, οι ΗΠΑ και η Αυστραλία συμφώνησαν να αναπτύξουν ένα σχέδιο δράσης για τη μείωση της εξάρτησης από την Κίνα. Το σχέδιο περιλαμβάνει την αξιοποίηση των αυστραλιανών αποθεμάτων ΣΓ και άλλων κρίσιμων πρώτων υλών, απαραίτητων για σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές, από τα smartphones έως τις μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων (American Resources, 2019).

Ακολουθώντας το παράδειγμα της ΕΕ, το Υπουργείο Εσωτερικών των ΗΠΑ δημοσίευσε έναν κατάλογο 35 ορυκτών που θεωρούνται κρίσιμα για την εθνική οικονομία και ασφάλεια. Αν και υπάρχουν κοιτάσματα σε πολιτείες όπως η Αλάσκα, η Καλιφόρνια, το Νέο Μεξικό και το Κολοράντο, η αξιοποίησή τους συχνά συναντά αντιδράσεις από τις τοπικές κοινότητες, φαινόμενο γνωστό ως "NIMBY" (Not in my backyard), το οποίο παρατηρείται παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας και της Κύπρου (Federal Register of USA, 2018).

Παρά τις προσπάθειες, οι επενδύσεις στον τομέα των ΣΓ παραμένουν αβέβαιες λόγω της ασταθούς οικονομικής βιωσιμότητάς τους. Το βασικό γεωοικονομικό δίλημμα των κυβερνήσεων και των επιχειρήσεων των ανεπτυγμένων βιομηχανικών χωρών, ειδικά των ΗΠΑ, είναι ότι η αγορά των ΣΓ ελέγχεται από λίγες κινεζικές επιχειρήσεις, καθιστώντας εξαιρετικά δύσκολη την επιβίωση νέων ανταγωνιστών.

Επιπλέον, πέρα από τις τεχνικές προκλήσεις της εξόρυξης, το αυξημένο κόστος παραγωγής και εργασίας στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες, σε συνδυασμό με τα αυστηρότερα περιβαλλοντικά και εργασιακά πρωτόκολλα, καθιστά τις επενδύσεις στον κλάδο λιγότερο επικερδείς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το μεταλλείο Mountain Pass στις ΗΠΑ, το οποίο, ύστερα από χρόνια προβλημάτων, κήρυξε πτώχευση το 2015 και σήμερα λειτουργεί με κινεζική συνεργασία, εξάγοντας ελαφριές ΣΓ που αποστέλλονται στην Κίνα για τελική επεξεργασία.

Εάν οι βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες, όπως η ΕΕ και οι ΗΠΑ, επιθυμούν να απεξαρτηθούν από το κινεζικό μονοπώλιο, θα πρέπει να απορροφήσουν τις οικονομικές επιπτώσεις μιας τέτοιας γεωπολιτικής απόφασης. Αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστεί να επιδοτήσουν στρατηγικές επενδύσεις στον τομέα της εξόρυξης και επεξεργασίας ΣΓ (De Facto, 2020).

Εικόνα 2.1: Τα ποσοστά των Σπάνιων Γαιών για Βιομηχανική Χρήση



Πηγή: [Huffpost Greece, 2020]

2.3 Η συμπλοκή της Ευρωπαϊκής Ένωσης για Σπάνιες Γαίες

Τα τελευταία χρόνια, η Ευρωπαϊκή Ένωση έρχεται αντιμέτωπη με δύο μεγάλες προκλήσεις, οι οποίες γίνονται ολοένα και πιο πειστικές. Σε απάντηση, έχει υιοθετήσει στρατηγικές που αποσκοπούν αφενός στη μετάβαση προς μια πράσινη οικονομία και αφετέρου στη μείωση της εξάρτησής της από τις σπάνιες γαίες που προμηθεύεται από την Κίνα, με την οποία οι εμπορικές σχέσεις χαρακτηρίζονται από αυξανόμενες εντάσεις. Για να επιτύχει αυτούς τους στόχους, η Ε.Ε. καλείται να ενισχύσει την εγχώρια παραγωγή σπάνιων γαιών, οι οποίες περιλαμβάνουν 17 βασικά μέταλλα απαραίτητα για την τεχνολογική εξέλιξη και την ενεργειακή μετάβαση. Παρά τις θετικές εξελίξεις, όπως η ανακάλυψη νέων κοιτασμάτων, η έλλειψη κατάλληλων υποδομών και τεχνογνωσίας στον τομέα της εξόρυξης και επεξεργασίας αναμένεται να προκαλέσει σημαντικές καθυστερήσεις στην επίτευξη αυτών των στόχων (Σπάθη, 2024).

Σε αυτό το πλαίσιο, η Νορβηγία ανακοίνωσε πρόσφατα την ανακάλυψη ενός από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα σπάνιων γαιών εκτός Κίνας, με εκτιμώμενα αποθέματα 8,8 εκατομμυρίων μετρικών τόνων οξειδίων σπάνιων γαιών. Η εταιρεία Rare Earths Norway, που εντόπισε το κοιτάσμα, υπολογίζει ότι περιέχει επίσης 1,5 εκατομμύριο μετρικούς τόνους κρίσιμων μαγνητών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα και ανεμογεννήτριες. Παρόμοια ανακάλυψη είχε πραγματοποιήσει έναν χρόνο νωρίτερα η Σουηδία στην Αρκτική ζώνη της, με εκτιμώμενο απόθεμα ενός εκατομμυρίου τόνων. Επιπλέον, η γαλλική εταιρεία Solvay, που διαθέτει παραγωγική μονάδα στη Γαλλία, προχωρά στην ενίσχυση της παραγωγής κρίσιμων μετάλλων, ενισχύοντας την ευρωπαϊκή αυτάρκεια στον συγκεκριμένο τομέα (Σπάθη, 2024).

Ωστόσο, η προοπτική ανάπτυξης εγχώριας παραγωγής σπάνιων γαιών στην Ευρώπη εξακολουθεί να είναι αβέβαιη. Σύμφωνα με έρευνα του Reuters σε βιομηχανικούς κύκλους, η Ε.Ε. είναι πιθανό να μην καταφέρει να επιτύχει τους στόχους εξόρυξης, επεξεργασίας και παραγωγής που έχουν τεθεί μέσω της νομοθεσίας για τις κρίσιμες πρώτες ύλες. Οι βασικές αιτίες περιλαμβάνουν την ανεπαρκή ανάπτυξη των υποδομών, τη χαμηλή χρηματοδότηση, την προτίμηση της βιομηχανίας στις φθηνότερες κινεζικές εισαγωγές και τη μειωμένη ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα, που με τη σειρά της περιορίζει την ανάγκη για σπάνιες γαίες. Παράλληλα, οι αντιδράσεις

των τοπικών κοινωνιών απέναντι σε εξορυκτικά έργα αποτελούν έναν ακόμη ανασταλτικό παράγοντα που συχνά προκαλεί καθυστερήσεις ή ματαιώσεις έργων (Σπάθη, 2024).

Παρότι το ευρωπαϊκό υπέδαφος διαθέτει αξιόλογα κοιτάσματα, η απουσία ανεπτυγμένων ορυχείων καθιστά δύσκολη την αξιοποίησή τους στο άμεσο μέλλον. Έως το 2030, η πιο ρεαλιστική στρατηγική φαίνεται να είναι η ενίσχυση της επεξεργασίας και ανακύκλωσης σπάνιων γαιών, όπως το πρόγραμμα που έχει προγραμματίσει να υλοποιήσει η σουηδική LKAB. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση αναμένεται να καλύψει περίπου το 1% της ευρωπαϊκής ζήτησης σε οξείδια σπάνιων γαιών, τα οποία αποτελούν βασικά στοιχεία για την παραγωγή μαγνητών σε ηλεκτρικά οχήματα (Σπάθη, 2024).

Ταυτόχρονα, το σχέδιο εξόρυξης στην περιοχή Νόρα Καρ της Σουηδίας εξακολουθεί να βρίσκεται σε εκκρεμότητα εδώ και πάνω από μια δεκαετία, λόγω της καθυστέρησης στην αδειοδότηση και των περιβαλλοντικών αντιδράσεων, καθώς εκφράζονται ανησυχίες για πιθανές επιπτώσεις στον υδροφόρο ορίζοντα. Η εταιρεία Leading Edge Materials, που διαχειρίζεται το έργο, έχει επανυποβάλει αίτηση αδειοδότησης στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής στρατηγικής για τις κρίσιμες πρώτες ύλες, γεγονός που ενδέχεται να επιταχύνει τις διαδικασίες έγκρισης (Σπάθη, 2024).

Παρόμοιες καθυστερήσεις παρατηρούνται και στο εξορυκτικό σχέδιο του Σόκλι στη Φινλανδία, το οποίο δεν μπορεί να προχωρήσει καθώς εκκρεμεί η ολοκλήρωση της περιβαλλοντικής μελέτης. Επιπλέον, η πρόσφατη πτώση των τιμών των σπάνιων γαιών περιπλέκει περαιτέρω την κατάσταση, καθώς μειώνει τη βιωσιμότητα πολλών εξορυκτικών έργων. Σύμφωνα με τον Daan de Jonge της Benchmark Mineral Intelligence, «με τις τρέχουσες τιμές, τα περισσότερα ορυχεία σπάνιων γαιών δεν είναι κερδοφόρα, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη στήριξη από τις κυβερνήσεις και τη βιομηχανία αυτοκινήτων». Ωστόσο, οι αυτοκινητοβιομηχανίες αντιμετωπίζουν πτώση 9% στις πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη τον Μάιο, γεγονός που περιορίζει τη ζήτηση για σπάνιες γαίες (Σπάθη, 2024).

Εικόνα 2.2: Η Δύσκολη Μάχη της Ε.Ε για Σπάνιες Γαίες



Πηγή: [Καθημερινή, 2024]

Η κυριαρχία της Κίνας στην παγκόσμια αγορά σπάνιων γαιών δεν είναι τυχαία, αλλά αποτέλεσμα στοχευμένης κρατικής πολιτικής και στρατηγικών συμφωνιών. Η γενναιόδωρη κρατική στήριξη προς τις κινεζικές επιχειρήσεις έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο, καθώς οι επιδοτήσεις που λαμβάνουν τους επιτρέπουν να διατηρούν εξαιρετικά χαμηλό κόστος παραγωγής. Αυτή η πολιτική καθιστά σχεδόν αδύναμο τον ανταγωνισμό από άλλες χώρες, οι οποίες δεν μπορούν να προσφέρουν τις ίδιες χαμηλές τιμές. Παράλληλα, η Κίνα έχει συνάψει σημαντικές συμφωνίες με χώρες που η Ε.Ε. θεωρεί πολιτικά ασταθείς ή οικονομικά αναξιόπιστες. Έθνη όπως το Μάλι, η Βολιβία, το Ζιμπάμπουε και η Ινδονησία διασφαλίζουν στην Κίνα σταθερές προμήθειες πρώτων υλών, επιτρέποντάς της να διατηρεί τον έλεγχο της παγκόσμιας αγοράς σπάνιων γαιών.

Αντιμέτωπη με τη γεωπολιτική πρόκληση που θέτει η κινεζική κυριαρχία, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει επιταχύνει τις πρωτοβουλίες της για τη διαφοροποίηση των προμηθευτών της και τη διασφάλιση κρίσιμων πρώτων υλών. Στις 5 Απριλίου, ο αντιπρόεδρος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, Βάλντις Ντομπρόβσκις, υπέγραψε συμφωνία στρατηγικής συνεργασίας με το Ουζμπεκιστάν, στοχεύοντας στη διασφάλιση προμηθειών σπάνιων γαιών και άλλων βασικών μετάλλων. Αυτή η

συμφωνία αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης διπλωματικής προσπάθειας που προωθεί η πρόεδρος της Κομισιόν, Ούρσουλα φον ντερ Λάιεν, με σκοπό την εξασφάλιση πόρων όπως ο χαλκός, το λίθιο και το κοβάλτιο, απαραίτητα για τη μετάβαση της Ευρώπης σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο.

Τα τελευταία τρία χρόνια, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υπογράψει αθόρυβα μια σειρά μνημονίων συνεργασίας με πιθανούς προμηθευτές σπάνιων γαιών και κρίσιμων πρώτων υλών. Η πρώτη σημαντική συμφωνία πραγματοποιήθηκε με τον Καναδά τον Ιούνιο του 2021, επεκτείνοντας τη συμφωνία ελεύθερου εμπορίου που είχε συναφθεί μεταξύ των δύο πλευρών το 2017. Λίγο αργότερα, τον Ιούλιο του ίδιου έτους, ακολούθησε μνημόνιο συνεργασίας με την Ουκρανία, λόγω των πλούσιων αποθεμάτων πρώτων υλών που διαθέτει η χώρα. Ο Ευρωπαίος Επίτροπος Εσωτερικής Αγοράς, Τιερί Μπρετόν, είχε τότε επισημάνει την ανάγκη εκσυγχρονισμού του μεταλλευτικού κλάδου της Ουκρανίας, ώστε να δημιουργηθεί ένα πιο ευνοϊκό νομικό και επενδυτικό περιβάλλον για ξένες εταιρείες. Ωστόσο, η ρωσική εισβολή το 2022 περιόρισε σημαντικά την υλοποίηση αυτών των σχεδίων.

Αντιμέτωπη με τις νέες γεωπολιτικές συνθήκες, η Κομισιόν έχει ενισχύσει τις διπλωματικές της προσπάθειες, διευρύνοντας τις συνεργασίες της με χώρες όπως η Νορβηγία, που αποτελεί στρατηγικό σύμμαχο της Ευρώπης στον ενεργειακό τομέα. Παράλληλα, έχει προχωρήσει σε συμφωνίες με κράτη όπως η Αργεντινή, το Καζακστάν, η Χιλή, η Γροιλανδία, η Ναμίμπια, η Ζάμπια, το Κονγκό και η Ρουάντα. Αυτές οι συμφωνίες κρίνονται ζωτικής σημασίας, καθώς ενισχύουν την ευρωπαϊκή πρόσβαση σε κρίσιμες πρώτες ύλες και ενδυναμώνουν τη στρατηγική αυτονομία της Ένωσης στον τομέα των σπάνιων γαιών (Σπάθη, 2024).

3^ο Κεφάλαιο

Σπάνιες Γαίες κι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

3.1 Εισαγωγή

Η στροφή της παγκόσμιας οικονομίας προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον βασίζεται στην ευρεία χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι ανεμογεννήτριες και τα ηλεκτρικά οχήματα. Η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών, ωστόσο, απαιτεί την εκμετάλλευση κρίσιμων ορυκτών, όπως το λίθιο, το κοβάλτιο και οι σπάνιες γαίες, τα οποία είναι αναγκαία για τη λειτουργία μπαταριών, ηλεκτρικών κινητήρων και άλλων βασικών στοιχείων της πράσινης τεχνολογίας.

Παρόλα αυτά, η εξάρτηση από την εξόρυξη αυτών των πρώτων υλών εγείρει σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα. Οι συμβατικές μέθοδοι εξόρυξης συνδέονται με σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς συχνά προκαλούν καταστροφή φυσικών οικοσυστημάτων, ρύπανση των υδάτινων πόρων και αύξηση των ατμοσφαιρικών ρύπων λόγω της σκόνης και άλλων επιβλαβών εκπομπών. Επιπλέον, η ανάγκη για εκτεταμένους χώρους εξόρυξης και η διαχείριση των μεταλλευτικών αποβλήτων καθιστούν την όλη διαδικασία ιδιαίτερα απαιτητική από πλευράς βιωσιμότητας (Energy Game, 2024).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα σε πηγές ενέργειας χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας μπορεί να δημιουργήσει νέες προκλήσεις, καθώς ενδέχεται να αυξηθεί η πίεση για την αξιοποίηση άλλων φυσικών πόρων, όπως το ξύλο και ο άνθρακας. Ενώ οι υδρογονάνθρακες, οι γαιάνθρακες και ο λιγνίτης υπόκεινται σε φορολογικά μέτρα λόγω των εκπομπών τους, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιδοτούνται ως πιο φιλικές προς το περιβάλλον (Μπάσιας, 2021).

Εάν οι τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα δεν καταστούν σύντομα οικονομικά και τεχνολογικά βιώσιμες, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξόρυξης κρίσιμων πρώτων υλών ενδέχεται να αυξηθούν. Η τρέχουσα συζήτηση επικεντρώνεται κυρίως στον έλεγχο και τη ρύθμιση της εξόρυξης των σπάνιων γαιών και άλλων σημαντικών μετάλλων που είναι απαραίτητα για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ένα βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο δεν εξαρτάται μόνο από τη μείωση των εκπομπών άνθρακα αλλά

και από τις πρακτικές εξόρυξης και επεξεργασίας των πρώτων υλών που υποστηρίζουν αυτήν τη μετάβαση (Μπάσιας, 2021).

3.2 Αξιοποίηση Σπάνιων Γαιών στις ΑΠΕ

Οι σπάνιες γαίες αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο των ανανεώσιμων τεχνολογιών, συμβάλλοντας σημαντικά στη βελτίωση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας των ανεμογεννητριών και των ηλιακών συλλεκτών. Η αξιοποίησή τους επιτρέπει την αύξηση της αποδοτικότητας αυτών των τεχνολογιών, καθιστώντας τις πιο βιώσιμες και αποδοτικές από πλευράς ενεργειακής απόδοσης.

Η εξέλιξη των πράσινων τεχνολογιών θεωρείται καθοριστικός παράγοντας για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την επίτευξη ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος. Ωστόσο, η εξάρτηση από κρίσιμα υλικά, όπως οι σπάνιες γαίες, δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις, καθώς τα αποθέματα αυτών των στοιχείων είναι περιορισμένα, ενώ η αυξανόμενη ζήτηση οδηγεί συχνά σε διακυμάνσεις των τιμών. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να επηρεάσει την οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας, καθιστώντας δυσκολότερη την ευρεία τους εφαρμογή και τον ανταγωνισμό τους με τις παραδοσιακές ενεργειακές πηγές.

Παρόλα αυτά, οι πιέσεις που δημιουργεί η κλιματική αλλαγή και τα ζητήματα ενεργειακής ασφάλειας καθιστούν επιτακτική την ανάπτυξη και διάδοση τεχνολογιών που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η επάρκεια ηλεκτρικής ενέργειας και η διαθεσιμότητα των κρίσιμων πρώτων υλών, όπως οι σπάνιες γαίες, αναμένεται να διαμορφώσουν το κόστος και την αποτελεσματικότητα των μελλοντικών ενεργειακών τεχνολογιών. Ανάμεσα στις πιο υποσχόμενες λύσεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου συγκαταλέγονται τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι κυψέλες καυσίμου, οι μπαταρίες νέας γενιάς και οι ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες φωτισμού (Μπάσιας, 2021).

Αιολική Ενέργεια κι Ανεμογεννήτριες

Οι σπάνιες γαίες διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην αιολική ενέργεια, με στοιχεία όπως το νεοδύμιο (Nd) και το δυσπρόσιο (Dy) να χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ισχυρών μόνιμων μαγνητών για ανεμογεννήτριες. Οι μαγνήτες αυτοί συμβάλλουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, καθώς επιτρέπουν στις ανεμογεννήτριες να λειτουργούν ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, διασφαλίζοντας συνεχή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Χωρίς τη χρήση αυτών των κρίσιμων μετάλλων, η απόδοση των ανεμογεννητριών θα ήταν αισθητά μειωμένη. Σύμφωνα με μελέτες, το 2015, περίπου το 23% των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών παγκοσμίως βασίστηκε σε γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες NdFeB, που περιλαμβάνουν στοιχεία σπάνιων γαιών. Οι υπόλοιπες βασίστηκαν σε ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες που χρησιμοποιούν χαλκό και χάλυβα, υλικά που δεν θεωρούνται κρίσιμα για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Οι μόνιμοι μαγνήτες που κατασκευάζονται από κράματα νεοδυμίου ή σαμαρίου παράγουν ισχυρά μαγνητικά πεδία, επιτρέποντας στις γεννήτριες να λειτουργούν με χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, κάτι που τις καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικές τόσο σε συμβατικές ανεμογεννήτριες όσο και σε συστήματα χωρίς προσανατολισμό.

Οι συγκεκριμένοι μαγνήτες διακρίνονται για την ικανότητά τους να παράγουν υψηλή μαγνητική ισχύ με μικρό όγκο, γεγονός που τους καθιστά απαραίτητους σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. Σε αντίθεση με τους ηλεκτρομαγνήτες, οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν τα δικά τους μαγνητικά πεδία χωρίς να απαιτούν εξωτερική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Το νεοδύμιο αποτελεί περίπου το 28% έως 31% της σύνθεσης αυτών των μαγνητών, ενώ άλλα στοιχεία, όπως το δυσπρόσιο, το πρασεοδύμιο και το τέρβιο, παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσής τους (Yang et al., 2017).

Εκτός από την αιολική ενέργεια, οι σπάνιες γαίες είναι καθοριστικές και για τη βιομηχανία της ηλιακής ενέργειας, ειδικά στην παραγωγή ηλιακών πλαισίων λεπτής μεμβράνης. Στοιχεία όπως το ίνδιο (In) και το γάλλιο (Ga) συμβάλλουν στη βελτίωση της ηλεκτρικής απόδοσης των ημιαγωγών, επιτρέποντας την καλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια, ενισχύοντας έτσι την αποτελεσματικότητα των ηλιακών συλλεκτών.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) εξακολουθούν να κυριαρχούν στην παγκόσμια αγορά ηλιακής ενέργειας, καθώς ανήκουν στις πρώτες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν και εμπορευματοποιήθηκαν. Διακρίνονται σε μονοκρυσταλλικά (mc-Si), πολυκρυσταλλικά (pc-Si) και κύτταρα κορδέλας σιλικόνης, με την αποδοτικότητά τους να κυμαίνεται συνήθως κάτω από το 25%, ανάλογα με τον τύπο. Αυτά τα φωτοκύτταρα κατασκευάζονται κυρίως από πυρίτιο και συνδέονται μέσω μεταλλικών λωρίδων που περιέχουν κράματα σπάνιων γαιών και αργύρου, λόγω της υψηλής αγωγιμότητας του τελευταίου. Αν και καταβάλλονται προσπάθειες για τη μείωση της χρήσης αργύρου και την αντικατάστασή του με άλλα υλικά, εξακολουθεί να αποτελεί βασικό συστατικό των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Μια εναλλακτική τεχνολογία αποτελούν τα ηλιακά κύτταρα με βαφή, τα οποία ανήκουν στην τρίτη γενιά φωτοβολταϊκών και βρίσκονται ακόμη σε αρχικό στάδιο εμπορευματοποίησης. Αυτά τα οργανικά ηλιακά κύτταρα παρουσιάζουν αποδοτικότητα μεταξύ 8% και 12% και είναι χαμηλότερου κόστους σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Το φωτοδραστικό τους υλικό μπορεί να αποτελείται από διάφορες χημικές ενώσεις, με εκείνες που βασίζονται στο ρουθίνιο και το ευρώπιο να προσφέρουν την καλύτερη απόδοση. Η προστατευτική επικάλυψη των ηλιακών κυττάρων συχνά περιλαμβάνει άργυρο, ενώ καταλύτες όπως το λανθάνιο και η πλατίνα συμβάλλουν στη βελτίωση της συνολικής τους απόδοσης.

Παράλληλα, στην αγορά διατίθενται και φωτοβολταϊκά πάνελ με λεπτές μεμβράνες, που ανήκουν στη δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών τεχνολογιών. Αυτά τα πάνελ περιλαμβάνουν διαφορετικά υλικά ημιαγωγών, με τα λεπτά τους στρώματα να επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση πρώτων υλών.

Εκτός από την ηλιακή και αιολική ενέργεια, οι σπάνιες γαίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην κατασκευή μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα. Στοιχεία όπως το λανθάνιο (La) και το δημήτριο (Ce) χρησιμοποιούνται ως καταλύτες και σταθεροποιητές σε μπαταρίες υψηλής απόδοσης, ιδιαίτερα στις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Η προσθήκη αυτών των στοιχείων συμβάλλει στην αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας, της διάρκειας ζωής και της απόδοσης των μπαταριών, επιτρέποντας στα ηλεκτρικά οχήματα να έχουν μεγαλύτερη αυτονομία και ταχύτερη φόρτιση.

Η ενσωμάτωση σπάνιων γαιών στις τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας είναι κρίσιμη για τη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Οι σπάνιες γαίες βελτιώνουν την αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών, των ηλιακών συλλεκτών και των μπαταριών, συνεισφέροντας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην ανάπτυξη πιο περιβαλλοντικά φιλικών ενεργειακών λύσεων (Λαμπρίδης, 2023).

Συμπερασματικά, τα κρίσιμα ορυκτά, συμπεριλαμβανομένων των σπάνιων γαιών, αποτελούν θεμελιώδη συνιστώσα της ενεργειακής μετάβασης, διευκολύνοντας την ανάπτυξη καινοτόμων και αποδοτικών τεχνολογιών καθαρής ενέργειας. Ωστόσο, η περιορισμένη διαθεσιμότητά τους, τα ζητήματα που αφορούν την εφοδιαστική αλυσίδα και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξόρυξης καθιστούν απαραίτητο τον συντονισμό πολιτικών για την υπεύθυνη διαχείριση, ανακύκλωση και αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων. Η διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής που ισορροπεί μεταξύ τεχνολογικής προόδου, βιώσιμων εξορυκτικών πρακτικών και κυκλικής οικονομίας είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος (Πουλλικκάς, 2024).



Εικόνα 3.1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Σπάνιες Γαίες

Πηγή: [Voria, 2019]

3.3 Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι

Η σημασία των σπάνιων γαιών και άλλων κρίσιμων μετάλλων, όπως το κοβάλτιο και το λίθιο, είναι αδιαμφισβήτητη για την επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης και την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης. Ωστόσο, παρά την αναγκαιότητά τους, η εξόρυξη και η επεξεργασία τους συνοδεύονται από σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους. Τα τελευταία χρόνια, η Κίνα έχει εφαρμόσει μέτρα για τη ρύθμιση της εξορυκτικής δραστηριότητας, κλείνοντας παράνομα ή περιβαλλοντικά μη συμμορφούμενα ορυχεία και περιορίζοντας τις εξαγωγές σπάνιων γαιών. Παρόλα αυτά, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα παραμένει η ανεξέλεγκτη εξόρυξη μικρής κλίμακας, η οποία πραγματοποιείται χωρίς κανονισμούς, προκαλώντας σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Κωνσταντινίδης, 2020).

Ένας από τους πιο ανησυχητικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους που σχετίζονται με την εξόρυξη σπάνιων γαιών είναι η παρουσία ραδιενεργών στοιχείων, όπως το θόριο και το ουράνιο, στα ορυκτά που τις περιέχουν. Τα κυριότερα ορυκτά που φιλοξενούν σπάνιες γαίες, όπως ο μοναζίτης, ο μαστναζίτης και ο ξενοτίμης, περιέχουν ραδιενεργά κατάλοιπα, ενώ έχουν καταγραφεί περισσότερα από 200 ακόμα ορυκτά με παρόμοια χαρακτηριστικά. Η ανεπαρκής διαχείριση αυτών των αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή ρύπανση του εδάφους και των υδάτινων πόρων. Παράλληλα, η ίδια η διαδικασία εξόρυξης απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα σωματίδια που περιέχουν θόριο και ουράνιο, επιβαρύνοντας το περιβάλλον και δημιουργώντας κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, ειδικά για τους εργαζομένους και τις τοπικές κοινότητες. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και του διαχωρισμού των σπάνιων γαιών, χρησιμοποιούνται ισχυρά οξέα, τα οποία, αν δεν διαχειριστούν σωστά, μπορούν να προκαλέσουν μόλυνση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, καθώς και να έχουν αρνητικές συνέπειες για τη δημόσια υγεία (Κατσικάρης, 2015).

Η ρύπανση των υδάτων αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους κινδύνους που συνδέονται με τη βιομηχανία των σπάνιων γαιών. Τα υπολείμματα της εξόρυξης και της επεξεργασίας περιέχουν τοξικές ενώσεις, όπως βαρέα μέταλλα και ραδιενεργές ουσίες, οι οποίες, αν διαφύγουν στο περιβάλλον, μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένη μόλυνση. Τα υγρά και στερεά απόβλητα συνήθως αποθηκεύονται σε δεξαμενές, οι οποίες, αν δεν είναι επαρκώς προστατευμένες,

μπορεί να επιτρέψουν τη διείσδυση επικίνδυνων ουσιών στο έδαφος και στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Σε περίπτωση έντονων βροχοπτώσεων, οι δεξαμενές αυτές μπορεί να υπερχειλίσουν, με αποτέλεσμα τη διαρροή μολυσμένου νερού στο περιβάλλον. Επιπλέον, αν υπάρχουν φυσικές σχισμές στο υπέδαφος, οι τοξικές ουσίες μπορούν να απορροφηθούν και να μολύνουν τοπικά υδάτινα οικοσυστήματα, προκαλώντας επιπτώσεις που μπορεί να διαρκέσουν για δεκαετίες (Κατσικάρης, 2015).

Ένας από τους πιο σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους είναι η πιθανή κατάρρευση των φραγμάτων αποθήκευσης αποβλήτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση τοξικών καταλοίπων. Αν ένα τέτοιο φράγμα καταρρεύσει, μεγάλες ποσότητες μολυσμένου νερού μπορεί να απελευθερωθούν στο περιβάλλον, καταστρέφοντας τη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής. Παράγοντες όπως η διάβρωση, οι έντονες καιρικές συνθήκες και οι σεισμικές δραστηριότητες αυξάνουν τον κίνδυνο τέτοιων καταστροφών. Για τον λόγο αυτό, η συνεχής παρακολούθηση και συντήρηση αυτών των δομών είναι κρίσιμη, όχι μόνο κατά τη διάρκεια της εξόρυξης, αλλά και για δεκαετίες μετά την ολοκλήρωσή της, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε ανεξέλεγκτη περιβαλλοντική ρύπανση. Αντίστοιχα, τα εξορυγμένα πετρώματα που παραμένουν εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες μπορούν, μέσω της απορροής των βρόχινων υδάτων, να απελευθερώσουν βαρέα μέταλλα και ραδιενεργά στοιχεία, επιβαρύνοντας περαιτέρω το οικοσύστημα (Κατσικάρης, 2015).

Εκτός από τους κινδύνους που συνδέονται με τη διαχείριση αποβλήτων, η ανοιχτή εξόρυξη αποτελεί επίσης μια περιβαλλοντική απειλή, καθώς οδηγεί σε μεγάλης κλίμακας καταστροφή φυσικών οικοσυστημάτων. Μετά το κλείσιμο ενός ορυχείου, οι εκτεθειμένες περιοχές συχνά παραμένουν ευάλωτες σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, με αποτέλεσμα τη συνεχή διάβρωση του εδάφους και την πιθανή διαρροή τοξικών στοιχείων. Οι ανεξέλεγκτες πρακτικές εξόρυξης επιδεινώνουν την κατάσταση, καθώς δεν εφαρμόζονται πάντα κατάλληλες μέθοδοι αποκατάστασης των εξορυκτικών περιοχών. Η αποτυχία διαχείρισης αυτών των περιβαλλοντικών κινδύνων μπορεί να οδηγήσει σε μακροχρόνιες επιπτώσεις για τα οικοσυστήματα και τις τοπικές κοινότητες.

Συνοψίζοντας, η εξόρυξη και επεξεργασία σπάνιων γαιών, αν και κρίσιμη για τη στήριξη της ενεργειακής μετάβασης και της τεχνολογικής ανάπτυξης, συνοδεύεται από σοβαρές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Η ρύπανση του εδάφους,

των υδάτων και της ατμόσφαιρας, η παρουσία ραδιενεργών στοιχείων, η διαχείριση των τοξικών αποβλήτων και οι κίνδυνοι από πιθανές καταρρεύσεις φραγμάτων καθιστούν απαραίτητη την εφαρμογή αυστηρών περιβαλλοντικών πρωτοκόλλων. Η αειφόρος ανάπτυξη στον τομέα των σπάνιων γαιών απαιτεί την υιοθέτηση υπεύθυνων πρακτικών εξόρυξης και ανακύκλωσης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και να διασφαλιστεί η βιώσιμη αξιοποίηση αυτών των πολύτιμων πόρων (Κατσικάρης, 2015).

3.4 Τεχνολογίες Ανακύκλωσης

Το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος του ΟΗΕ έχει διαπιστώσει ότι τα ποσοστά ανακύκλωσης πολύτιμων μετάλλων, όπως το παλλάδιο και η πλατίνα, βρίσκονται ήδη σε υψηλά επίπεδα. Αντίθετα, οι υποδομές για την ανακύκλωση σπάνιων γαιών είναι σχεδόν ανύπαρκτες, γεγονός που δημιουργεί προβληματισμό για τη βιωσιμότητα της χρήσης τους στο μέλλον (Κωνσταντινίδης, 2020).

Διεθνείς οργανισμοί, όπως το Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ, το Παγκόσμιο Ταμείο Περιβάλλοντος και το Παγκόσμιο Επιχειρηματικό Συμβούλιο για την Αειφόρο Ανάπτυξη, έχουν ενώσει τις προσπάθειές τους με διάφορους φορείς του ΟΗΕ, με στόχο την αναμόρφωση του συστήματος διαχείρισης ηλεκτρονικών αποβλήτων. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις τους, λιγότερο από το 20% των ηλεκτρονικών αποβλήτων ανακυκλώνεται επισήμως, ενώ το υπόλοιπο 80% είτε καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής είτε ανακυκλώνεται ανεπίσημα, υπό μη ελεγχόμενες συνθήκες (Κωνσταντινίδης, 2020).

Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ανεπίσημης ανακύκλωσης λαμβάνει χώρα σε αναπτυσσόμενες χώρες, εκθέτοντας τους εργαζόμενους σε επικίνδυνες και καρκινογόνες ουσίες, όπως ο υδράργυρος, ο μόλυβδος και το κάδμιο. Επιπλέον, τα ηλεκτρονικά απόβλητα που απορρίπτονται σε χώρους ταφής μολύνουν το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, δημιουργώντας κινδύνους για την ασφάλεια των τροφίμων και την ποιότητα των υδάτινων πόρων. Η ασφαλής και περιβαλλοντικά υπεύθυνη ανακύκλωση αποτελεί επομένως υποχρέωση όλων των κρατών, ανεξαρτήτως γεωγραφικής περιοχής (Κωνσταντινίδης, 2020).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει από το 2002 την Οδηγία 2002/96/EC για τη διαχείριση των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ), επιβάλλοντας στους κατασκευαστές την υποχρέωση διάλυσης, ανάκτησης, επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης προϊόντων, όπως οικιακές συσκευές, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ιατρικός εξοπλισμός και τηλεπικοινωνιακά προϊόντα. Το 2015, τα κράτη-μέλη της ΕΕ κατάφεραν να ανακτήσουν κατά μέσο όρο το 87,5% των αποβλήτων πληροφορικής και το 88,6% των ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης. Παρά τη θεσμοθέτηση της οδηγίας και την περιοδική επικαιροποίησή της, ορισμένες χώρες έχουν δεχθεί καταγγελίες για μη συμμόρφωση. Παρόμοια νομοθεσία έχει τεθεί σε εφαρμογή στην Ιαπωνία από το 1997 (De Facto, 2020).

Ο τομέας της αιολικής ενέργειας προσφέρει μια μοναδική ευκαιρία για την ενίσχυση της ανακύκλωσης των σπάνιων γαιών. Οι ανεμογεννήτριες έχουν εκτιμώμενη διάρκεια ζωής περίπου 25 χρόνια, και καθώς αρκετές από τις πρώτες εγκαταστάσεις στις ΗΠΑ και την Ευρώπη πλησιάζουν το τέλος του κύκλου τους, η ανακύκλωση των στροβίλων και των κιβωτίων μετάδοσης κίνησης αποτελεί μια εξαιρετική ευκαιρία για την ανάκτηση κρίσιμων μετάλλων. Εάν δεν δημιουργηθούν συστήματα ανακύκλωσης, αυτά τα εξαρτήματα ενδέχεται να καταλήξουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, αυξάνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κλάδου. Σήμερα, στην Ευρώπη, μόνο οι μπαταρίες και οι λαμπτήρες φθορισμού ανακυκλώνονται σε μεγάλη κλίμακα για την ανάκτηση των σπάνιων γαιών που περιέχουν (De Facto, 2020).

Η ζήτηση για τεχνολογίες καθαρής ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες και τα ηλεκτρικά οχήματα, αναμένεται να ενισχύσει την ανακύκλωση των σπάνιων γαιών στο μέλλον. Η αξιοποίηση των μεταχειρισμένων μαγνητών, που περιέχουν στοιχεία όπως το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο, μπορεί να συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης από πρωτογενείς φυσικούς πόρους, των οποίων η διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη και άνισα κατανεμημένη παγκοσμίως. Μέσω της ανακύκλωσης, οι χώρες μπορούν να διασφαλίσουν μια πιο σταθερή αλυσίδα εφοδιασμού και να μειώσουν την εξάρτησή τους από αβέβαιες εξωτερικές πηγές (UnivDatos, 2023).

Παρά τις προοπτικές, η ανακύκλωση σπάνιων γαιών εξακολουθεί να βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, καθώς τα ανακτημένα υλικά από απορριφθέντα προϊόντα παραμένουν περιορισμένα. Η συλλογή και διαχείριση αποβλήτων, όπως οι παλιοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα και οι τηλεοράσεις, απαιτεί σημαντικές βελτιώσεις,

καθώς το 2009 μόλις το 34% των υπολογιστών, το 20% των τηλεοράσεων και το 10% των κινητών τηλεφώνων οδηγήθηκε προς ανακύκλωση. Οι επιστήμονες εκτιμούν ότι η ανακύκλωση είναι οικονομικά πιο αποδοτική και περιβαλλοντικά πιο βιώσιμη από την εξόρυξη νέων αποθεμάτων σπάνιων γαιών, αρκεί να εφαρμοστούν πιο αποτελεσματικές μέθοδοι συλλογής και διαχωρισμού των υλικών (Haque et al., 2014).

Η πρόοδος στην τεχνολογία ανακύκλωσης επιτρέπει την ανάκτηση ολοένα και περισσότερων πολύτιμων πρώτων υλών από απόβλητα, όπως μαγνήτες νεοδυμίου και οθόνες LCD, που περιέχουν βαρέες σπάνιες γαίες. Νέες μέθοδοι υδρομεταλλουργικής και πυρομεταλλουργικής επεξεργασίας καθιστούν δυνατή την εξαγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων σπάνιων γαιών, ενώ τα βιομηχανικά απόβλητα, όπως τα θραύσματα από την παραγωγή μαγνητών, μπορούν να συλλεχθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν με αποδοτικό τρόπο. Παρόλα αυτά, η ανακύκλωση χρησιμοποιημένων προϊόντων, όπως οι σκληροί δίσκοι και οι ηλεκτρονικές οθόνες, παραμένει προκλητική λόγω της διάσπαρτης κατανομής των σπάνιων γαιών σε μικροσκοπικά εξαρτήματα (Haque et al., 2014).

Για να επιτευχθεί ένας αποδοτικός κύκλος ανακύκλωσης, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν εξειδικευμένες φυσικές και χημικές μέθοδοι διαχωρισμού. Οι φυσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την αποσυναρμολόγηση συσκευών, μια διαδικασία που ήδη εφαρμόζεται από εταιρείες όπως η Hitachi, η οποία αναπτύσσει φιλικές προς το περιβάλλον τεχνικές εξαγωγής σπάνιων γαιών από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές. Παράλληλα, οι χημικές μέθοδοι, όπως η υδρομεταλλουργία και η πυρομεταλλουργία, χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων, αν και απαιτούν σημαντικές ενεργειακές δαπάνες και περαιτέρω έρευνα για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους (Haque et al., 2014).



Εικόνα 3.2: Ρεαλιστικότητα Ανακύκλωσης Σπάνιων Γαιών

Πηγή: [Slobodna Dalmacija, 2018]

3.5 Σύγκριση Τεχνολογιών των ΑΠΕ που απαιτούν Σπάνιες Γαίες

Ηλεκτρικά οχήματα και μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων

Η ευρωπαϊκή αυτοκινητοβιομηχανία αποτελεί έναν ώριμο και εξαγωγικά προσανατολισμένο κλάδο, ο οποίος αναμένεται να διατηρήσει τη θέση του στην παγκόσμια αγορά καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα αντικαθιστούν σταδιακά τα συμβατικά αυτοκίνητα με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η Ευρώπη έχει ήδη δρομολογήσει σημαντικές επενδύσεις στην παραγωγή μπαταριών ιόντων λιθίου, με προγραμματισμένη ετήσια παραγωγική δυναμικότητα 540 GWh, ποσότητα ικανή να τροφοδοτήσει την παραγωγή από 5 έως 9 εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα. Παράλληλα, η ανάπτυξη της παραγωγής καθόδων και ανόδων—τομέων που σχετίζονται άμεσα με την επεξεργασία κρίσιμων μετάλλων—ακολουθεί ανοδική πορεία, αν και με βραδύτερο ρυθμό (Rawmathub, 2022).

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η Ευρωπαϊκή Πρωτοβουλία για την Ηλιακή Ενέργεια, η οποία τέθηκε σε εφαρμογή το 2021, έχει στόχο την αποκατάσταση και αναβάθμιση της εφοδιαστικής αλυσίδας των ηλιακών φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη. Η πρωτοβουλία αυτή επιδιώκει την ανακοπή της κυριαρχίας της Κίνας στον συγκεκριμένο τομέα, με αρχικό στόχο την

εγκατάσταση και παραγωγή 20 GW ηλιακής ενέργειας έως το 2025. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών δεν είναι απαλλαγμένη από προκλήσεις, καθώς, πέρα από τις δυσκολίες ανακύκλωσης, η τοποθέτησή τους σε πεδινές εκτάσεις και ακόμη και σε αρδευόμενες γαίες υψηλής παραγωγικότητας έχει εγείρει ανησυχίες σχετικά με την αποδιάρθρωση της αγροτικής παραγωγής (Rawmathub, 2022).

Ανεμογεννήτριες και Χρήση Σπάνιων Γαιών

Η Ευρώπη αποτελεί βασικό παραγωγό ανεμογεννητριών και εξαρτημάτων τους, με την τρέχουσα παραγωγική της ικανότητα να φτάνει τα 15 GW ετησίως. Παρόλο που υπάρχουν σχέδια για την περαιτέρω ενίσχυση της παραγωγής την επόμενη δεκαετία, δεν έχουν τεθεί επίσημοι ποσοτικοί στόχοι. Σημαντική εφαρμογή των σπάνιων γαιών στον κλάδο των ανεμογεννητριών είναι η χρήση τους στην κατασκευή μόνιμων μαγνητών υψηλής απόδοσης και χαμηλού βάρους, οι οποίοι αξιοποιούνται κυρίως στις γεννήτριες με τεχνολογία άμεσης κίνησης (*direct-drive*).

Μετά την κρίση του 2011, οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών άρχισαν να απομακρύνονται από την τεχνολογία *direct-drive* στις χερσαίες ανεμογεννήτριες, αν και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται εκτενώς στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις, όπου τα πλεονεκτήματα απόδοσης και βάρους είναι πιο σημαντικά. Οι κατασκευαστές συνεχίζουν να αναζητούν τρόπους περιορισμού της χρήσης σπάνιων γαιών, είτε αναπτύσσοντας εναλλακτικές τεχνολογίες χωρίς μόνιμους μαγνήτες, είτε μειώνοντας τη συγκέντρωση σπάνιων γαιών στους μαγνήτες, είτε προωθώντας την ανακύκλωσή τους από ανεμογεννήτριες που έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους και αποσύρονται (Rawmathub, 2022).

4^ο Κεφάλαιο

Ανάλυση Αξιολόγησης και Εκμετάλλευσης Σπάνιων Γαιών

4.1 Γεωπολιτική και Κανονισμός γύρω από την Εξόρυξη

Οι σπάνιες γαίες αναδείχθηκαν ως στρατηγικό ζήτημα στο διεθνές εμπόριο κατά την περίοδο της έντασης μεταξύ των Ηνωμένων Πολιτειών και της Κίνας, όταν οι δύο χώρες επιδόθηκαν σε έναν εμπορικό πόλεμο, επιβάλλοντας εκατέρωθεν δασμούς και κυρώσεις στα προϊόντα τους.

Στην κορύφωση αυτής της αντιπαράθεσης το 2019, ο Κινέζος πρόεδρος πραγματοποίησε επίσκεψη σε μονάδα εξόρυξης και επεξεργασίας σπάνιων γαιών, στέλνοντας ένα σαφές γεωπολιτικό μήνυμα. Στις δηλώσεις του, τόνισε ότι η Κίνα, ως κάτοχος σημαντικών κοιτασμάτων σπάνιων γαιών, διαθέτει ένα ισχυρό οικονομικό και στρατηγικό πλεονέκτημα, το οποίο μπορεί να αξιοποιήσει κατά βούληση, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας περιορισμού των εξαγωγών της, όποτε το κρίνει σκόπιμο.

Οι δηλώσεις αυτές προκάλεσαν έντονο προβληματισμό στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη, καθώς ανέδειξαν τους κινδύνους που προκύπτουν από την εξάρτηση των δυτικών οικονομιών από την Κίνα στον τομέα των σπάνιων γαιών. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη διαμόρφωση νέων στρατηγικών και πολιτικών, με στόχο τη διαφοροποίηση των πηγών εφοδιασμού και τη μείωση της εξάρτησης από την Κίνα, ενισχύοντας την εγχώρια παραγωγή και ανακύκλωση σπάνιων γαιών (Παγκαλιάς, 2023).



Εικόνα 4.1: ΗΠΑ εναντίον Κίνας

Πηγή: [Οικονομικός Ταχυδρόμος, 2023]

Η παγκόσμια εξάρτηση από την Κίνα στον τομέα των σπάνιων γαιών είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη, καθώς η χώρα αποτελεί τον κορυφαίο παραγωγό παγκοσμίως. Τα κινεζικά ορυχεία είναι υπεύθυνα για το 70% της παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών, ενώ η κυριαρχία της είναι ακόμα μεγαλύτερη στο στάδιο της επεξεργασίας, αφού η Κίνα επεξεργάζεται περίπου το 90% των αξιοποιήσιμων οξειδίων σπάνιων γαιών (TVXS, 2019).

Το μεγαλύτερο γνωστό κοίτασμα σπάνιων γαιών στον κόσμο βρίσκεται στο Μπάγιαν Όμπο, στην Εσωτερική Μογγολία της Κίνας, όπου εκτιμάται ότι υπάρχουν πάνω από 40 εκατομμύρια τόνοι σπάνιων γαιών. Ωστόσο, μέχρι σήμερα έχει εξορυχθεί μόλις το 35% των διαθέσιμων αποθεμάτων. Σε αντίθεση με την κυριαρχία της Κίνας, οι Ηνωμένες Πολιτείες διαθέτουν μόνο ένα ορυχείο σπάνιων γαιών, το Mountain Pass στην Καλιφόρνια. Παρά το γεγονός ότι η MP Materials, η οποία το διαχειρίζεται, εξορύσσει ετησίως περίπου 50.000 τόνους σπάνιων γαιών, το μεγαλύτερο μέρος αυτών αποστέλλεται στην Κίνα για επεξεργασία, ενισχύοντας περαιτέρω τη θέση της χώρας στην παγκόσμια αλυσίδα αξίας των κρίσιμων πρώτων υλών (TVXS, 2019).

Αυτή η εξάρτηση από την Κίνα έχει ωθήσει πολλές χώρες να αναζητήσουν εναλλακτικές πηγές προμηθειών, ιδιαίτερα μετά το 2010, όταν μια διπλωματική ένταση μεταξύ Κίνας και Ιαπωνίας ανέδειξε τη στρατηγική σημασία των σπάνιων

γαιών. Τότε, η Ιαπωνία κατηγόρησε την Κίνα ότι περιορίσε τις εξαγωγές σπάνιων γαιών για πολιτικούς λόγους, γεγονός που αύξησε την ανησυχία στη διεθνή κοινότητα για τους κινδύνους της εξάρτησης από έναν μοναδικό προμηθευτή (TVXS, 2019).

Το 2012, η Ιαπωνία, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ευρωπαϊκή Ένωση υπέβαλαν καταγγελία στον Παγκόσμιο Οργανισμό Εμπορίου (ΠΟΕ) κατά της Κίνας, καταγγέλλοντας τις μειώσεις στις εξαγωγές σπάνιων γαιών. Το 2014, ο ΠΟΕ αποφάσισε εναντίον της Κίνας, απορρίπτοντας το επιχείρημά της ότι οι ποσοστώσεις είχαν περιβαλλοντικά κίνητρα. Ως αποτέλεσμα, το 2015, το Πεκίνο αναγκάστηκε να αποσύρει τις περιοριστικές εξαγωγικές πολιτικές του, καθώς οι Ηνωμένες Πολιτείες είχαν ήδη κινηθεί νομικά και δικαιώθηκαν (TVXS, 2019).

Η σημασία της διαφοροποίησης των προμηθευτών κρίσιμων πρώτων υλών έγινε ακόμη πιο εμφανής κατά τη διάρκεια του πολέμου στην Ουκρανία, όταν η ενεργειακή εξάρτηση της Ευρώπης από τη Ρωσία εξελίχθηκε σε γεωπολιτικό εφιάλτη. Παρόμοιοι κίνδυνοι ισχύουν και για την κυριαρχία της Κίνας στις σπάνιες γαίες, καθώς η Δύση έχει πλέον αντιληφθεί την ανάγκη διαμόρφωσης μιας πιο ανεξάρτητης εφοδιαστικής αλυσίδας. Ωστόσο, η απεξάρτηση από την Κίνα είναι μια σύνθετη διαδικασία, καθώς οι δυτικές χώρες ανακαλύπτουν ότι η ανάπτυξη μιας εναλλακτικής βιομηχανίας σπάνιων γαιών είναι εξαιρετικά δύσκολη. Η αγορά, από μόνη της, δεν μπορεί να απομακρυνθεί από την κινεζική παραγωγή (Glenny, 2022).

Παρότι οι σπάνιες γαίες δεν είναι τόσο σπάνιες όσο υποδηλώνει το όνομά τους και σημαντικά αποθέματα υπάρχουν σε διάφορες χώρες, η εξόρυξη και η επεξεργασία τους παρουσιάζουν μεγάλες προκλήσεις. Πρώτον, για την εξόρυξη μικρών ποσοτήτων από τα 17 διαφορετικά μέταλλα των σπάνιων γαιών, απαιτείται η απομάκρυνση μεγάλων όγκων αδρανών υλικών, διαδικασία που, αν δεν ελεγχθεί σωστά, μπορεί να έχει σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Δεύτερον, η διαδικασία διαχωρισμού και προετοιμασίας των μετάλλων για χρήση σε τεχνολογίες, όπως οι ισχυροί μαγνήτες και τα συστήματα λείζερ, είναι εξαιρετικά δαπανηρή. Η Κίνα μπορεί να προσφέρει τα επεξεργασμένα προϊόντα της έως και 30% φθηνότερα από οποιαδήποτε άλλη χώρα, γεγονός που εξηγεί την απροθυμία των αγορών να επενδύσουν στη διαφοροποίηση της παραγωγής (Glenny, 2022).

Παρά ταύτα, η κινεζική κυριαρχία στον τομέα αυτό δεν ήταν πάντα δεδομένη. Η δεσπόζουσα θέση της Κίνας είναι αποτέλεσμα στρατηγικών επιλογών από τις αμερικανικές κυβερνήσεις στα τέλη της δεκαετίας του 1980, όταν οι ΗΠΑ αποφάσισαν να μεταφέρουν μεγάλο μέρος της μεταποιητικής τους δραστηριότητας στην Κίνα. Η εξόρυξη και η επεξεργασία των σπάνιων γαιών ήταν ένας από τους κλάδους που μεταφέρθηκαν εκτός αμερικανικού εδάφους, ενισχύοντας σταδιακά την εξάρτηση από την Κίνα.

Σε μια προσπάθεια αντιστροφής αυτής της κατάστασης, η Ευρωπαϊκή Ένωση δημιούργησε το 2017 την **Ευρωπαϊκή Συμμαχία Πρώτων Υλών** με σκοπό να μειώσει την εξάρτησή της από την Κίνα. Εκείνη την περίοδο, η ΕΕ προμηθευόταν το 98% των σπάνιων γαιών της από την Κίνα, ενώ ακόμη και σήμερα η κινεζική παραγωγή καλύπτει το 90% των παγκόσμιων αναγκών. Μέσω της Συμμαχίας, η ΕΕ έχει επιδιώξει στρατηγικές συνεργασίες, με σημαντικότερες εκείνες με τον Καναδά και την Ουκρανία. Ωστόσο, ο πόλεμος στην Ουκρανία έχει επηρεάσει αρνητικά αυτή τη στρατηγική, καθώς σημαντικά αποθέματα κρίσιμων πρώτων υλών βρίσκονται σε περιοχές που πλέον ελέγχονται από τη Ρωσία (Glenny, 2022).

Η Ουκρανία θεωρείται χώρα με πλούσιους φυσικούς πόρους, καθώς διαθέτει αποθέματα σε 117 από τα 120 ευρύτερα χρησιμοποιούμενα ορυκτά και μέταλλα, εκ των οποίων τουλάχιστον 40 είναι απαραίτητα για την πράσινη ενεργειακή μετάβαση. Σύμφωνα με έρευνα της канаδικής εταιρείας SecDev, περίπου το 20% των ουκρανικών φυσικών πόρων βρίσκεται πλέον υπό ρωσικό έλεγχο. Παράλληλα, η Ρωσία έχει ενισχύσει τις δικές της προσπάθειες στον τομέα των σπάνιων γαιών, αναγνωρίζοντας τη στρατηγική σημασία τους. Όπως επισημαίνει η Olivia Lazart του Carnegie Endowment, η ρωσική εισβολή στην Ουκρανία δεν υπαγορεύτηκε μόνο από γεωπολιτικούς και ιδεολογικούς λόγους, αλλά και από οικονομικά συμφέροντα που συνδέονται με κρίσιμες πρώτες ύλες (Glenny, 2022).

Παρόλο που υπάρχουν βορειοαμερικανικές, ευρωπαϊκές και αυστραλιανές εταιρείες που επενδύουν πλέον οργανωμένα στην εξόρυξη και επεξεργασία σπάνιων γαιών, τα αποτελέσματα είναι ακόμη περιορισμένα. Η πλήρης απεξάρτηση από την Κίνα θα απαιτήσει μακροπρόθεσμες επενδύσεις, τεχνολογική καινοτομία και ισχυρή πολιτική βούληση.

4.1.1 Η Κινέζικη Κυριαρχία

Η Κίνα αποτελεί τη μοναδική χώρα που καλύπτει όλα τα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας των σπάνιων γαιών και των κρίσιμων μετάλλων, από την εξόρυξη έως την παραγωγή τελικών προϊόντων. Η κυριαρχία της δεν περιορίζεται μόνο στην εξόρυξη, αλλά επεκτείνεται και στη διύλιση των πρώτων υλών, γεγονός που της έχει προσδώσει μονοπωλιακή ισχύ στον συγκεκριμένο τομέα. Ενδεικτικά, το 94% του λιθίου που εξορύσσεται στην Αυστραλία, το 99% του κοβαλτίου από το Κονγκό και το 70% της παγκόσμιας παραγωγής μαγγανίου διυλίζονται στην Κίνα. Συνολικά, το 87% της παγκόσμιας διύλισης μετάλλων πραγματοποιείται στην Κίνα, ενώ η χώρα διατηρεί ηγετικό ρόλο και στην αγορά των σπάνιων γαιών, με το 66% της εξορυκτικής δραστηριότητας και το 98% των ευρωπαϊκών εισαγωγών να εξαρτώνται από αυτήν (Glenny, 2022).

Πέρα από την ικανότητά της να επεξεργάζεται ακατέργαστες πρώτες ύλες, η ηγεμονία της Κίνας αποδίδεται και στη στρατηγική πρόσβαση που έχει σε αποθέματα ορυκτών άλλων χωρών. Μέσω του επενδυτικού και γεωπολιτικού σχεδίου *«Δρόμος του Μεταξιού»*, έχει εδραιώσει φιλικές σχέσεις με κράτη που διαθέτουν σημαντικά κοιτάσματα σπάνιων γαιών και κρίσιμων μετάλλων. Αυτή η αποκλειστική πρόσβαση στις πρώτες ύλες έχει ενισχύσει τη θέση της ως κυρίαρχου παράγοντα στην αγορά, μετατρέποντάς την από προμηθευτή σε καθοριστικό καταναλωτή αυτών των υλικών.

Η Κίνα εξελίχθηκε ταχύτατα σε μια από τις χώρες με τη μεγαλύτερη κατανάλωση σπάνιων γαιών. Στην περίοδο 2004-2014, η ετήσια κινεζική κατανάλωση αυξανόταν κατά 8%, τη στιγμή που η παγκόσμια ζήτηση μειωνόταν. Η αυξανόμενη αυτοκατανάλωση των σπάνιων γαιών συνδέεται άμεσα με την επιδίωξή της να καταστεί ηγέτης στον τομέα των «καθαρών τεχνολογιών», καθώς η διεθνής οικονομία στρέφεται προς την απανθρακοποίηση. Σε συνδυασμό με τη στρατηγική της για παγκόσμια τεχνολογική ηγεμονία έως το 2035, δημιουργείται προβληματισμός για το αν οι διαθέσιμες ποσότητες ορυκτών θα είναι επαρκείς για να καλύψουν τις παγκόσμιες ανάγκες (Glenny, 2022).

Ένας βασικός παράγοντας που συνέβαλε στην κινεζική κυριαρχία είναι η μακροχρόνια κρατική υποστήριξη σε επενδύσεις έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των μετάλλων.

Ήδη από το 1985, στην Κίνα λειτουργούσαν περισσότερα από 300 ερευνητικά ινστιτούτα αφιερωμένα στη βελτίωση των μεθόδων εξόρυξης και επεξεργασίας σπάνιων γαιών. Ως αποτέλεσμα αυτής της στρατηγικής, η χώρα έχει κατοχυρώσει περισσότερα διπλώματα ευρεσιτεχνίας στον τομέα των σπάνιων γαιών από ό,τι όλες οι άλλες χώρες μαζί.

Η κρατική χρηματοδότηση, σε συνδυασμό με ένα πιο ελαστικό ρυθμιστικό πλαίσιο για τη βιομηχανία των μετάλλων, έχει καταστήσει την Κίνα ελκυστικό προορισμό για ξένες επιχειρήσεις. Πολλές εταιρείες μετεγκαταστάθηκαν στην Κίνα, γεγονός που ενίσχυσε περαιτέρω την παραγωγική της ικανότητα, καθώς επωφελήθηκε από τη μεταφορά τεχνογνωσίας. Παράλληλα, η Κίνα εφάρμοσε στρατηγικές πολιτικές ελέγχου της προσφοράς, επιβάλλοντας ποσοτώσεις στην παραγωγή και τις εξαγωγές πρώτων υλών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η απαγόρευση εξαγωγής σπάνιων γαιών προς την Ιαπωνία το 2010, απόφαση που κινητοποίησε διεθνώς τις πρώτες σοβαρές προσπάθειες διαφοροποίησης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η απόφαση της Κίνας να περιορίσει τις εξαγωγές της προς την Ιαπωνία πυροδότησε έντονη ανησυχία στη διεθνή κοινότητα και οδήγησε σε αυξημένες επενδύσεις στον τομέα των σπάνιων γαιών εκτός Κίνας. Μέσα σε μία δεκαετία, οι ιαπωνικές εισαγωγές σπάνιων γαιών από την Κίνα μειώθηκαν από 90% στο 60%, καθώς η Ιαπωνία επένδυσε στη διαφοροποίηση των προμηθευτών της και στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για τη μείωση της εξάρτησής της (Glenny 2022)

4.1.2 Η Ενασχόληση του Υπόλοιπου Πλανήτη

Αφρική: Νέος Γεωπολιτικός Παίκτης στην Εξόρυξη Κρίσιμων Μετάλλων

Καθώς ο ανεπτυγμένος κόσμος, από τη Νορβηγία και την Ιαπωνία έως τις αναπτυσσόμενες χώρες της Λατινικής Αμερικής, επιδιώκει την εξασφάλιση σπάνιων γαιών και κρίσιμων μετάλλων για την ενεργειακή μετάβαση, η Αφρική, πλούσια σε ορυκτούς πόρους, έχει μετατραπεί σε πεδίο έντονου ενδιαφέροντος.

Από τις αρχές του 2024, ένα από τα μεγαλύτερα εξορυκτικά έργα παγκοσμίως βρίσκεται σε εξέλιξη στη Γουινέα. Πρόκειται για μια κοινοπραξία μεταξύ του αυστραλο-βρετανικού ομίλου **Rio Tinto**, της κυβέρνησης της Γουινέας και επτά ακόμη εταιρειών, εκ των οποίων οι πέντε είναι κινεζικές. Το έργο περιλαμβάνει την κατασκευή ορυχείου εξόρυξης σιδηρομεταλλεύματος από τη Rio Tinto, σε συνεργασία με κοινοπραξία υπό την καθοδήγηση της **Chinalco**, της μεγαλύτερης βιομηχανίας αλουμινίου στον κόσμο. Παράλληλα, η κινεζική **Baowu**, η κορυφαία χαλυβουργία παγκοσμίως, σχεδιάζει την ανάπτυξη δεύτερου ορυχείου σε συνεργασία με τη **Winning International Group**. Επιπλέον, οι εμπλεκόμενες εταιρείες θα συγχρηματοδοτήσουν την κατασκευή σιδηροδρομικής γραμμής 552 χιλιομέτρων και ενός λιμένα βαθέων υδάτων στις ακτές του Ατλαντικού (Money Review, 2024).

Παράλληλα, στην Ουγκάντα, το **Makuutu Heavy Rare Earth Project** έλαβε άδεια εξόρυξης μεγάλης κλίμακας, την πρώτη που έχει εκδοθεί στη χώρα υπό το νέο νομοθετικό πλαίσιο για τις κρίσιμες πρώτες ύλες, το οποίο θεσπίστηκε το 2022. Η συμφωνία υπογράφηκε μεταξύ της κυβέρνησης της Ουγκάντας και της **Ionic Rare Earths**, σηματοδοτώντας ένα σημαντικό βήμα προς την εκμετάλλευση των ορυκτών της χώρας.

Στο πλαίσιο των στρατηγικών της πρωτοβουλιών, η **Ευρωπαϊκή Ένωση** έχει υπογράψει μνημόνια συνεργασίας με τη **Δημοκρατία του Κονγκό** και τη **Ζάμπια**, δύο χώρες με πλούσια κοιτάσματα κρίσιμων μετάλλων, όπως το κοβάλτιο και ο χαλκός. Η ΕΕ δεσμεύεται να επενδύσει στην ανάπτυξη υποδομών για την εξόρυξη και επεξεργασία αυτών των πρώτων υλών, περιορίζοντας έτσι την εξάρτησή της από την Κίνα (Money Review, 2024).

Η **Δημοκρατία του Κονγκό** αποτελεί τον μεγαλύτερο παραγωγό κοβαλτίου παγκοσμίως, καλύπτοντας το **70% της παγκόσμιας παραγωγής**, ενώ είναι η δεύτερη χώρα σε εξόρυξη χαλκού, μετά το Περού. Η **Ζάμπια** συγκαταλέγεται επίσης στις κορυφαίες χώρες εξόρυξης χαλκού, καθιστώντας την έναν σημαντικό στρατηγικό εταίρο. Αντίστοιχες συμφωνίες με το Κονγκό και τη Ζάμπια έχουν συνάψει και οι Ηνωμένες Πολιτείες, ενώ πολλές δυτικές κυβερνήσεις επιδιώκουν συνεργασίες αυτού του είδους. Επιπλέον, η ΕΕ έχει διευρύνει τις στρατηγικές της συνεργασίες με χώρες όπως ο **Καναδάς, το Καζακστάν, η Ναμίμπια, η Ουκρανία, η Αργεντινή** (πλούσια σε λίθιο) και η **Χιλή** (πλούσια σε χαλκό) (Money Review, 2024).

Βραζιλία: Αναδύομενη Δύναμη στις Σπάνιες Γαίες και την Πράσινη Ενέργεια

Τον τελευταίο χρόνο, η **Σαουδική Αραβία** έχει δραστηριοποιηθεί στον εξορυκτικό τομέα μέσω της **Manara Minerals**, μιας κοινοπραξίας του κρατικού επενδυτικού ταμείου και της κρατικής εταιρείας εξορύξεων. Στόχος της είναι η εξαγορά ορυχείων και αποθεμάτων ορυκτών πόρων σε διάφορες χώρες. Η πρώτη της συμφωνία αφορούσε την απόκτηση **10% του ορυχείου Vale στη Βραζιλία**, ενώ έχει δρομολογήσει περαιτέρω επενδύσεις συνολικής αξίας **15 δισεκατομμυρίων δολαρίων** (Money Review, 2024).

Η **Βραζιλία** αναβαθμίζει τη θέση της στον παγκόσμιο χάρτη των σπάνιων γαιών, επιδιώκοντας να καταστεί ένας από τους κορυφαίους παραγωγούς. Από τον Ιανουάριο του 2024, η χώρα έχει ξεκινήσει εντατική παραγωγή σπάνιων γαιών στο κοιτάσμα **Serra Verde**, με την ομώνυμη εταιρεία εξόρυξης να εκτιμά ότι η ετήσια παραγωγή της θα φτάσει τους **5.000 τόνους οξειδίων σπάνιων γαιών**. Παράλληλα, σχεδιάζει να επεκτείνει τις δραστηριότητές της στο κοιτάσμα **Pela Ema**, το οποίο διαθέτει σημαντικά αποθέματα νεοδυμίου, πρασεοδυμίου και δυσπροσίου, μετάλλων κρίσιμων για την ανάπτυξη τεχνολογιών πράσινης ενέργειας (Money Review, 2024).

Ο πρόεδρος της Βραζιλίας, **Λούλα ντα Σίλβα**, έχει δηλώσει επανειλημμένα την πρόθεσή του να καταστήσει τη χώρα ηγετική δύναμη στη βιώσιμη ανάπτυξη και την πράσινη ενέργεια. Στο πλαίσιο αυτό, επιδιώκει να προσελκύσει επενδύσεις σε τομείς όπως η εξουδετέρωση του άνθρακα και η ανανεώσιμη ενέργεια. Κατά την επίσκεψή του στον **Περσικό Κόλπο** το 2023, δεσμεύτηκε ότι μέσα σε **δέκα χρόνια η Βραζιλία θα εξελιχθεί**

στη "**Σαουδική Αραβία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας**", αντανακλώντας τη φιλοδοξία της χώρας να καταστεί παγκόσμιος κόμβος βιώσιμης ανάπτυξης (Money Review, 2024).

Η Λατινική Αμερική, συνολικά, διαθέτει τεράστιες δυνατότητες αξιοποίησης των φυσικών της πόρων. Στην περιοχή βρίσκονται τα **δύο τρίτα των παγκόσμιων αποθεμάτων λιθίου** και περίπου το **40% των αποθεμάτων χαλκού**. Η **Αργεντινή**, με τα πλούσια κοιτάσματά της σε λίθιο, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον επενδυτών, ιδιαίτερα μετά την εκλογή του **Χαβιέ Μιλέι**, γεγονός που οδήγησε σε αυξημένες αγορές μετοχών και κρατικών ομολόγων (Money Review, 2024).

Η δυναμική της Βραζιλίας και των υπόλοιπων χωρών της Λατινικής Αμερικής στον εξορυκτικό τομέα ενισχύει τις προσπάθειες της Δύσης για διαφοροποίηση των προμηθευτών κρίσιμων πρώτων υλών, μειώνοντας σταδιακά την εξάρτηση από την Κίνα.

4.1.3 Εμπορικές Εντάσεις κι Απειλές

Η Κίνα και η Στρατηγική Χρήση των Σπάνιων Γαιών

Η Κίνα, έχοντας πλήρη επίγνωση της μονοπωλιακής της θέσης στον τομέα των σπάνιων γαιών, έχει αξιοποιήσει αυτήν τη δύναμη ως μέσο άσκησης γεωπολιτικής πίεσης, επιβάλλοντας περιορισμούς στις εξαγωγές της. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι κυρώσεις κατά της Ιαπωνίας το 2010, στο πλαίσιο των εδαφικών διενέξεων για τα νησιά **Σενκάκου/Ντιαογού**, καθώς και η απειλή απαγόρευσης των εξαγωγών προς τις αμερικανικές αμυντικές εταιρείες **Raytheon** και **Lockheed Martin** το 2020, σε αντίδραση για την πώληση οπλικών συστημάτων στην Ταϊβάν. Παρόλο που η τελευταία απειλή δεν υλοποιήθηκε, υπογράμμισε την ικανότητα της Κίνας να αξιοποιεί τις σπάνιες γαίες ως εργαλείο διαμόρφωσης διεθνών ισορροπιών (Κόκκινος, 2022).

Πέρα από κυρίαρχος προμηθευτής, η Κίνα αποτελεί επίσης και τον μεγαλύτερο καταναλωτή σπάνιων γαιών, απορροφώντας πάνω από **70% της παγκόσμιας ζήτησης**. Ο ρόλος της αναμένεται να ενισχυθεί περαιτέρω, καθώς οι ανάγκες της για σπάνιες γαίες αυξάνονται λόγω της μετάβασής της σε μια πιο πράσινη οικονομία. Σύμφωνα με τις κινεζικές προβλέψεις, έως το **2030**, το **25% των οχημάτων** στην Κίνα θα είναι

ηλεκτρικά, ενώ η **αιολική ενέργεια** θα καλύπτει το **24% του ενεργειακού της μείγματος έως το 2060**. Δεδομένης της αυξημένης ζήτησης, υπάρχει η πιθανότητα επιβολής ποσοστώσεων στις εξαγωγές σπάνιων γαιών από το **2025**, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επάρκεια για την εσωτερική αγορά. Αυτή η εξέλιξη θα επηρεάσει άμεσα την Ευρωπαϊκή Ένωση, καθώς η Κίνα προμηθεύει **πάνω από το 90% των μαγνητών** που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς κινητήρες για ανεμογεννήτριες και ηλεκτρικά οχήματα που κατασκευάζονται στην ΕΕ (Κόκκινος, 2022).

Η Ευρωπαϊκή Εξάρτηση και οι Προκλήσεις της Εξόρυξης

Η **Ευρωπαϊκή Επιτροπή** αναγνωρίζει την απόλυτη εξάρτηση της ΕΕ από τις κινεζικές εισαγωγές σπάνιων γαιών. Ωστόσο, οι προσπάθειες για την ανάπτυξη εγχώριων κοιτασμάτων έχουν αποτύχει, καθώς οι τρεις πιο πρόσφατες απόπειρες για την έναρξη εξορύξεων στη **Γροιλανδία (Δανία)**, τη **Σουηδία** και την **Ισπανία** απορρίφθηκαν. Ως αποτέλεσμα, **δεν υπάρχει κανένα λειτουργικό ορυχείο σπάνιων γαιών στην Ευρώπη**.

Η διαδικασία ανάπτυξης νέων ορυχείων είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, καθώς απαιτούνται **10-15 έτη** για τη δημιουργία νέων εξορυκτικών μονάδων και **6-8 έτη** για την κατασκευή εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και αν εγκριθούν νέες επενδύσεις άμεσα, η Ευρώπη θα παραμείνει σχεδόν πλήρως εξαρτημένη από την Κίνα για τα επόμενα χρόνια. Αυτή η εξάρτηση είναι ιδιαίτερα έντονη στα χαμηλότερα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς η ΕΕ διαθέτει μεν δύο μεγάλα κέντρα διαχωρισμού σπάνιων γαιών—το **Solvay στη Γαλλία** και το **Sillamae στην Εσθονία**—αλλά δεν έχει πρόσβαση σε εγχώριες πρώτες ύλες. Τα κέντρα αυτά αποτελούν σπάνιες μονάδες όχι μόνο για την Ευρώπη, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο, και θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως στρατηγικά πλεονεκτήματα στη μείωση της εξάρτησης από την Κίνα (Κόκκινος, 2022).

Οι πιθανοί επενδυτές στον τομέα της εξόρυξης σπάνιων γαιών στην Ευρώπη αντιμετωπίζουν επιπλέον προκλήσεις. Εκτός από το υψηλό κόστος και τη μακροχρόνια διαδικασία αδειοδότησης, καλούνται να λειτουργήσουν σε ένα περιβάλλον αβεβαιότητας, καθώς η Κίνα μπορεί να **χειραγωγήσει τις τιμές των σπάνιων γαιών** κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των νέων έργων, αποτρέποντας έτσι τις επενδύσεις. Παράλληλα, οι αυστηροί περιβαλλοντικοί κανονισμοί της ΕΕ δυσκολεύουν περαιτέρω τη

δραστηριοποίηση στον συγκεκριμένο τομέα, ενώ δεν λαμβάνεται πάντα υπόψη η **στρατηγική σημασία των σπάνιων γαιών για την εθνική ασφάλεια** (Κόκκινος, 2022).

Οι Ευρωπαϊκές Επιχειρήσεις και η Κινεζική Κυριαρχία

Αντιμέτωπες με τις προκλήσεις της εξορυκτικής βιομηχανίας στην Ευρώπη, πολλές ευρωπαϊκές εταιρείες που εξαρτώνται από τις σπάνιες γαίες επιλέγουν είτε να εισάγουν απευθείας κινεζικά προϊόντα είτε να μετεγκαταστήσουν τις δραστηριότητές τους στην Κίνα. Ο βασικός λόγος είναι ότι η Κίνα προσφέρει ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερο **περιβαλλοντικό κόστος, φορολογικά κίνητρα και μειωμένο εργατικό κόστος**, διαμορφώνοντας ένα ευνοϊκότερο επιχειρηματικό περιβάλλον.

Τον **Δεκέμβριο του 2020**, η ΕΕ υπέγραψε τη μεγαλύτερη εμπορική συμφωνία της με την Κίνα, γνωστή ως **Παγκόσμια Επενδυτική Συμφωνία**. Ωστόσο, η εφαρμογή της τέθηκε σε αμφισβήτηση μετά την επιβολή κυρώσεων από την ΕΕ λόγω της κινεζικής πολιτικής απέναντι στη μειονότητα των **Ουιγούρων** στην επαρχία **Σιντζιάνγκ**. Παρά το γεγονός ότι η συμφωνία δεν έχει ακόμη τεθεί σε ισχύ, αντικατοπτρίζει τη σημασία που αποδίδεται στις οικονομικές σχέσεις μεταξύ των δύο πλευρών. Μια μελλοντική επικύρωσή της θα μπορούσε να εξαρτηθεί από τη στάση της **Γερμανίας**, της μεγαλύτερης οικονομίας της ΕΕ, η οποία ήδη από το **2018** είχε χρηματοδοτήσει την υπογραφή στρατηγικών συμφωνιών μεταξύ κινεζικών και γερμανικών εταιρειών (Κόκκινος, 2022).

Προοπτικές και Δυνητικές Κλιμακώσεις

Μέχρι στιγμής, οι αμοιβαίες κυρώσεις ΕΕ-Κίνας έχουν περιοριστεί στο διπλωματικό επίπεδο, χωρίς να επηρεάζουν άμεσα τις οικονομικές τους σχέσεις. Ωστόσο, αν οι εντάσεις μεταξύ των δύο πλευρών αυξηθούν ή αν η ΕΕ πιεστεί να υιοθετήσει πιο σκληρή στάση έναντι της Κίνας στο πλαίσιο της **εξωτερικής πολιτικής των ΗΠΑ**, τότε δεν αποκλείεται η κλιμάκωση ενός **εμπορικού πολέμου** που θα μπορούσε να επηρεάσει σοβαρά τις προμήθειες σπάνιων γαιών και κρίσιμων πρώτων υλών στην Ευρώπη (Κόκκινος, 2022).



Εικόνα 4.2: Συμφωνία ΗΠΑ - Κίνα

Πηγή: [Economy today, 2022]

Ο Παγκόσμιος Ανταγωνισμός για τις Στρατηγικές Πρώτες Ύλες

Οι στρατηγικής σημασίας πρώτες ύλες υπήρξαν ανέκαθεν πεδίο αντιπαράθεσης μεταξύ των κρατών, καθώς αποτελούν βασικό παράγοντα οικονομικής ανάπτυξης και γεωπολιτικής ισχύος. Στη σύγχρονη συγκυρία, η ένταση αυτού του ανταγωνισμού έχει κορυφωθεί λόγω της επιτακτικής ανάγκης για ενεργειακή μετάβαση, της αυξανόμενης ζήτησης για κρίσιμα μέταλλα και της προόδου των τεχνολογιών εξόρυξης, που καθιστούν δυνατή την ανεύρεση και αξιοποίηση πρώτων υλών με πρωτοφανείς μεθόδους (Money Review, 2024).

Παρά τις αντιδράσεις περιβαλλοντικών οργανώσεων που θεωρούν τις υποθαλάσσιες εξορύξεις εξαιρετικά επιβλαβείς, η **Νορβηγία** γίνεται η πρώτη χώρα που υιοθετεί αυτήν τη μέθοδο, με στόχο τη διασφάλιση κρίσιμων μετάλλων. Στις **11 Ιανουαρίου 2024**, το νορβηγικό κοινοβούλιο ενέκρινε κυβερνητικό σχέδιο που προβλέπει εξορύξεις σε παράκτια περιοχή **280.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων**—μια έκταση μεγαλύτερη από τη Βρετανία.

Η νορβηγική κυβέρνηση εκτιμά ότι η περιοχή περιέχει σε αφθονία μέταλλα, όπως κοβάλτιο, νικέλιο, χαλκό και μαγγάνιο, τα οποία εντοπίζονται σε ορυκτά οξίδια στον βυθό. Παρότι η χώρα δεν θα ξεκινήσει άμεσα εξορυκτικές δραστηριότητες, θα εξετάζει προσεκτικά κάθε πρόταση ενδιαφερόμενων εταιρειών. Ωστόσο, η απόφασή της προκαλεί αντιδράσεις από το **Ηνωμένο Βασίλειο** και την **Ευρωπαϊκή Επιτροπή**, που ζητούν προσωρινή απαγόρευση της μεθόδου λόγω των πιθανών επιπτώσεών της στο περιβάλλον (Money Review, 2024).

Αντίστοιχα, και η **Ιαπωνία** προετοιμάζεται να εφαρμόσει εξορύξεις στον θαλάσσιο χώρο της, με στόχο τη μείωση της εξάρτησής της από την Κίνα στις σπάνιες γαίες. Στη **Στρατηγική Εθνικής Ασφάλειας** του 2022, η ιαπωνική κυβέρνηση επισήμανε ότι προτεραιότητά της είναι η διασφάλιση της προσφοράς κρίσιμων πρώτων υλών και η υποστήριξη των επιχειρήσεων που κατέχουν τεχνολογίες υψηλής στρατηγικής σημασίας.

Ήδη από το **2022**, η Ιαπωνία προχώρησε σε δοκιμαστικές εξορύξεις σπάνιων γαιών από τον βυθό, σε βάθος **2.500 μέτρων**, στην παράκτια περιοχή **Μινάμι – Τορισίμα**. Σύμφωνα με επιστημονική μελέτη που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό **Nature**, η περιοχή αυτή διαθέτει αποθέματα σπάνιων γαιών που θα μπορούσαν να καλύψουν τις παγκόσμιες ανάγκες για αόριστο χρονικό διάστημα (Money Review, 2024).

Η Σαουδική Αραβία και η Νέα Στρατηγική της για Ορυκτούς Πόρους

Την ίδια στιγμή, οι **Ηνωμένες Πολιτείες** επανεστιάζουν τη στρατηγική τους στη **Σαουδική Αραβία**, όχι λόγω των υδρογονανθράκων της, αλλά εξαιτίας του ευρύτερου ορυκτού της πλούτου. Στο πλαίσιο της προσπάθειας ανεξάρτησης από το πετρέλαιο, η σαουδαραβική κυβέρνηση επιδιώκει την αξιοποίηση των κοιτασμάτων κρίσιμων μετάλλων που βρίσκονται στο έδαφός της.

Σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις, το Ριάντ αναθεώρησε την αποτίμηση των ορυκτών του αποθεμάτων από **1,3 τρισεκατομμύρια δολάρια το 2016** σε **2,5 τρισεκατομμύρια δολάρια το 2024**, καθιστώντας τη χώρα πιθανό σημείο έντονου ανταγωνισμού μεταξύ **ΗΠΑ, Κίνας και Ρωσίας**.

Ήδη, οι **Ηνωμένες Πολιτείες** και η **Ρωσία** έχουν υπογράψει μνημόνια συνεργασίας με τη Σαουδική Αραβία για την αξιοποίηση των στρατηγικών της μεταλλευτικών πόρων, κάτι

που αναμένεται να εντείνει περαιτέρω τον παγκόσμιο ανταγωνισμό στον τομέα των κρίσιμων πρώτων υλών (Money Review, 2024).

Συμπεράσματα και Προοπτικές

Ο παγκόσμιος ανταγωνισμός για τις στρατηγικές πρώτες ύλες έχει ενταθεί, με χώρες και εταιρείες να επιδιώκουν την πρόσβαση σε κρίσιμα μέταλλα που είναι απαραίτητα για την πράσινη μετάβαση και τις τεχνολογίες αιχμής.

- **Η Νορβηγία** πρωτοστατεί στις υποθαλάσσιες εξορύξεις, απηφώντας τις περιβαλλοντικές ανησυχίες, γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει συγκρούσεις με την ΕΕ και το Ηνωμένο Βασίλειο.
- **Η Ιαπωνία** ενισχύει την εξορυκτική της δραστηριότητα σε μεγάλα βάθη, με σκοπό την εξασφάλιση ανεξαρτησίας στις σπάνιες γαίες.
- **Η Σαουδική Αραβία**, βλέποντας τον τεράστιο ορυκτό της πλούτο ως στρατηγικό πλεονέκτημα, προσελκύει μεγάλες δυνάμεις όπως οι ΗΠΑ και η Ρωσία, γεγονός που ενδέχεται να αναδιαμορφώσει τη γεωπολιτική ισορροπία στην αγορά των κρίσιμων πρώτων υλών.

Η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί τα επόμενα χρόνια, καθώς η παγκόσμια οικονομία εξαρτάται όλο και περισσότερο από τα σπάνια μέταλλα για την ανάπτυξη τεχνολογιών όπως τα ηλεκτρικά οχήματα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα. Σε ένα τόσο δυναμικό περιβάλλον, η πρόσβαση στις κρίσιμες πρώτες ύλες δεν είναι μόνο οικονομικό, αλλά και γεωπολιτικό ζήτημα στρατηγικής σημασίας (Money Review, 2024).

4.1.4 Στρατιωτικές Εφαρμογές Σπάνιων Γαιών

Ο Ρόλος των Σπάνιων Γαιών στη Σύγχρονη Στρατιωτική Τεχνολογία

Οι σπάνιες γαίες διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην ανάπτυξη της στρατιωτικής τεχνολογίας, προσελκύοντας το ενδιαφέρον κυβερνήσεων και ειδικών παγκοσμίως. Λόγω των μοναδικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους, ενσωματώνονται σε προηγμένα οπτικά συστήματα και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η καθοδήγηση λέιζερ, τα συστήματα επικοινωνίας και η θωράκιση. Η σημασία τους έχει αναγνωριστεί από χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ιαπωνία και η Κίνα, που έχουν επενδύσει στη βιομηχανική και στρατιωτική αξιοποίησή τους (Chem Xinglu Chemical, 2023).

Εφαρμογές Σπάνιων Γαιών στη Στρατιωτική Τεχνολογία

Οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται σε μια σειρά στρατιωτικών εφαρμογών, κυρίως στη βελτίωση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων διαφόρων κραμάτων, επηρεάζοντας την αντοχή, τη σκληρότητα και τη θερμική σταθερότητα των υλικών.

1. Χάλυβας Θωράκισης και Ειδικοί Χάλυβες

Η χρήση σπάνιων γαιών στον χάλυβα θωράκισης ξεκίνησε στην Κίνα τη δεκαετία του 1960, με την ανάπτυξη κραμάτων που αύξησαν την αντοχή και την απόδοση των αρμάτων μάχης. Ο **ανθρακούχος χάλυβας σπάνιων γαιών**, που δημιουργήθηκε με την προσθήκη 0,05% στοιχείων σπάνιων γαιών, παρουσίασε σημαντική βελτίωση στις ιδιότητες αντοχής του, καθιστώντας τον ιδανικό για χρήση σε θωρακισμένα οχήματα και πολεμικό εξοπλισμό (Chem Xinglu Chemical, 2023).

2. Κράματα Μαγνησίου Σπάνιων Γαιών

Τα κράματα μαγνησίου που περιέχουν σπάνιες γαίες προσφέρουν υψηλή αντοχή και μειωμένο βάρος, καθιστώντας τα κατάλληλα για αεροναυπηγικές εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται σε κρίσιμα εξαρτήματα μαχητικών αεροσκαφών, όπως τα περιβλήματα των κινητήρων και τα πτερύγια, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση των αεροσκαφών (Chem Xinglu Chemical, 2023).

3. Κράματα Τιτανίου Σπάνιων Γαιών

Η προσθήκη δημητρίου (Ce) σε κράματα τιτανίου έχει συμβάλει στη βελτίωση της αντοχής και της θερμικής σταθερότητας. Αυτή η τεχνολογία εφαρμόζεται στην κατασκευή περιβλημάτων συμπίεστών για κινητήρες αεροσκαφών, μειώνοντας το βάρος και αυξάνοντας την αποδοτικότητα καυσίμου (Chem Xinglu Chemical, 2023).

4. Κράματα Αλουμινίου Σπάνιων Γαιών

Η χρήση σπάνιων γαιών σε κράματα αλουμινίου έχει οδηγήσει σε βελτιώσεις στη θερμική αντοχή και την αντοχή στη φθορά, καθιστώντας αυτά τα κράματα ιδανικά για εξαρτήματα κινητήρων αεροσκαφών και μαχητικών ελικοπτέρων. Επιπλέον, η τροποποίηση της μικροδομής των κραμάτων αλουμινίου μέσω της προσθήκης σπάνιων γαιών έχει βελτιώσει τη μηχανική τους απόδοση και την αντοχή τους σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας (Chem Xinglu Chemical, 2023).

5. Καθαρά και Μικτά Μέταλλα Σπάνιων Γαιών

Τα καθαρά μέταλλα σπάνιων γαιών, λόγω της υψηλής τους δραστηριότητας, χρησιμοποιούνται σε εμπρηστικά όπλα και πολεμικά πυρομαχικά. Η ικανότητά τους να παράγουν έντονους σπινθήρες τα καθιστά κατάλληλα για τη δημιουργία εμπρηστικών βομβών, ενώ η χρήση τους σε σύγχρονα πυρομαχικά ενισχύει την καταστροφικότητά τους (Chem Xinglu Chemical, 2023).

Στρατιωτική Προστασία και Πυρηνική Τεχνολογία

1. Θωράκιση από Ακτινοβολία

Στοιχεία σπάνιων γαιών, όπως το γαδολίνιο και το δυσπρόσιο, έχουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης νετρονίων, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση σε στρατιωτικά θωρακισμένα οχήματα και εξοπλισμό πυρηνικής προστασίας. Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν ήδη αναπτύξει πολυμερή υλικά με σπάνιες γαίες που προσφέρουν 5-6 φορές καλύτερη προστασία από τη νετρονική ακτινοβολία (Chem Xinglu Chemical, 2023).

2. Πυρηνικοί Αντιδραστήρες και Στρατιωτική Χρήση

Το οξείδιο του γαδολινίου χρησιμοποιείται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ως απορροφητής νετρονίων, βελτιώνοντας την απόδοση των καυσίμων ουρανίου και αυξάνοντας την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, η χρήση υτρίου και δυσπροσίου έχει αποδειχθεί κρίσιμη στη διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων και την ανάπτυξη αντιδραστήρων νέας γενιάς (Chem Xinglu Chemical, 2023).

Εφαρμογές Σπάνιων Γαιών στα Λείζερ και τις Στρατιωτικές Επικοινωνίες

1. Συστήματα Καθοδήγησης με Λείζερ

Η τεχνολογία λέιζερ σπάνιων γαιών εφαρμόζεται στην ανάπτυξη αποστασιόμετρων λέιζερ για άρματα μάχης και κατευθυνόμενων βλημάτων. Το νεοδύμιο χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα λέιζερ των σύγχρονων οπλικών συστημάτων, όπως τα άρματα μάχης M1 Abrams και Leopard II (Chem Xinglu Chemical, 2023).

2. Επικοινωνία και Ηλεκτρονικός Πόλεμος

Η χρήση λέιζερ σπάνιων γαιών σε οπτικά συστήματα επικοινωνίας επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων με υψηλή ασφάλεια και ταχύτητα. Επιπλέον, τα λέιζερ αυτά χρησιμοποιούνται για τον τηλεχειρισμό ραντάρ και συστημάτων πλοήγησης, ενισχύοντας τις δυνατότητες ηλεκτρονικού πολέμου (Chem Xinglu Chemical, 2023).

Συμπερασματικά η εξέλιξη των σπάνιων γαιών στη στρατιωτική τεχνολογία αποτελεί κομβικό στοιχείο για την ανάπτυξη προηγμένων οπλικών συστημάτων και συστημάτων προστασίας. Από τα υπερσύγχρονα κράματα χάλυβα και τιτανίου έως τις τεχνολογίες λέιζερ και τις εφαρμογές στην πυρηνική ενέργεια, οι σπάνιες γαίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην εθνική ασφάλεια.

Η Κίνα έχει καταφέρει να κυριαρχήσει στον τομέα της επεξεργασίας και παραγωγής υλικών σπάνιων γαιών, προσδίδοντάς της γεωπολιτικό πλεονέκτημα έναντι άλλων δυνάμεων. Παρόλο που οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ευρώπη επιδιώκουν να μειώσουν την εξάρτησή τους από την Κίνα, η πολυπλοκότητα των διαδικασιών εξόρυξης και επεξεργασίας καθιστά αυτήν την προσπάθεια ιδιαίτερα απαιτητική.

Η συνεχής έρευνα και η επένδυση στη χρήση σπάνιων γαιών στη στρατιωτική τεχνολογία είναι αναγκαίες για τη διατήρηση της στρατιωτικής υπεροχής, ενώ η ανακύκλωση και η βιώσιμη διαχείριση των σπάνιων γαιών ενδέχεται να

διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη μελλοντική επάρκεια αυτών των κρίσιμων υλικών.

4.2 Αξιολόγηση Εξόρυξης Σπάνιων Γαιών

Αξιολόγηση της Εξόρυξης Σπάνιων Γαιών: Παράγοντες και Κριτήρια Βιωσιμότητας

Η διαδικασία αξιολόγησης της εξόρυξης των σπάνιων γαιών προϋποθέτει τον εντοπισμό και την ανάλυση κρίσιμων παραγόντων που σχετίζονται με την εξόρυξη και την επεξεργασία τους. Παράλληλα, είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός συστήματος κριτηρίων που να επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση της βιωσιμότητας ενός έργου σπάνιων γαιών.

Βασικά Κριτήρια Αξιολόγησης

Για να διασφαλιστεί η επιτυχία και η βιωσιμότητα ενός έργου εξόρυξης σπάνιων γαιών, είναι απαραίτητο να αναλυθούν και να ταξινομηθούν οι σχετικοί παράγοντες. Οι κύριες κατηγορίες που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν:

- **Όγκος και Βαθμός Κοιτασμάτων:** Ο καθορισμός της περιεκτικότητας του κοιτάσματος είναι βασικός παράγοντας για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη σκοπιμότητα της εξόρυξης.
- **Μέθοδοι Εκχύλισης και Επεξεργασίας:** Η επιλογή των κατάλληλων μεταλλουργικών διαδικασιών είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους.
- **Τοπογραφικές Απαιτήσεις και Υποδομές:** Περιλαμβάνει τις ανάγκες μεταφοράς, τη διαχείριση των αποβλήτων και τη διαθεσιμότητα βασικών υποδομών.
- **Οικονομική Βιωσιμότητα:** Το κοιτάσμα πρέπει να είναι αρκετά πλούσιο ώστε να καλύπτει το κόστος εξόρυξης, επεξεργασίας, λειτουργίας του ορυχείου και τελικής αποκατάστασης του περιβάλλοντος.
- **Περιβαλλοντικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις:** Η εξόρυξη πρέπει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις περιβαλλοντικής προστασίας και να αποφέρει κοινωνικά και οικονομικά οφέλη.

Η οικονομική βιωσιμότητα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην αξιολόγηση της εξόρυξης. Οι εταιρείες εξόρυξης καλούνται να διαχειριστούν τόσο το κόστος εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων όσο και τις απαιτήσεις αποκατάστασης του περιβάλλοντος. Επιπλέον, είναι κρίσιμο να διασφαλιστεί ότι η δραστηριότητα θα αποφέρει θετικά κοινωνικά και οικονομικά αποτελέσματα στις τοπικές κοινότητες και την ευρύτερη οικονομία (Barakos & Mischio, 2021).

Μεταλλουργική Επεξεργασία των Σπάνιων Γαιών

Σημαντικό μέρος της επεξεργασίας των σπάνιων γαιών είναι η απόκτησή τους υπό μορφή οξειδίων, τα οποία αποτελούν τα τελικά προϊόντα της διαχωριστικής διαδικασίας. Τα οξείδια των σπάνιων γαιών χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή των αντίστοιχων μετάλλων μέσω αναγωγής.

Η διαδικασία μετατροπής των οξειδίων σε αλογονίδια και στη συνέχεια η αναγωγή τους για την ανάκτηση των μετάλλων αποτελεί κρίσιμο στάδιο της μεταλλουργικής επεξεργασίας. Τα μέταλλα των σπάνιων γαιών χαρακτηρίζονται από υψηλή χημική σταθερότητα, καθιστώντας τη διαδικασία αναγωγής πολύπλοκη. Συνεπώς, απαιτείται η ανάπτυξη εξειδικευμένων στρατηγικών που λαμβάνουν υπόψη τις φυσικοχημικές ιδιότητες των στοιχείων αυτών (Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Επιπλέον, οι εταιρείες εξόρυξης πρέπει να προβαίνουν σε συνεχείς αξιολογήσεις της αγοράς και των τάσεων στις τιμές των μετάλλων, ώστε να προσαρμόζουν τη στρατηγική τους ανάλογα με τη ζήτηση και τις μεταβολές στις αγορές πρώτων υλών (Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Αβεβαιότητες και Κίνδυνοι στην Αξιολόγηση της Εξόρυξης

Η αξιολόγηση ενός έργου σπάνιων γαιών συνοδεύεται από υψηλά επίπεδα αβεβαιότητας. Σε πολλές περιπτώσεις, οι διακυμάνσεις στις συνθήκες της αγοράς, οι γεωλογικές αβεβαιότητες και οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι καθιστούν δύσκολη τη λήψη ακριβών προβλέψεων για τη βιωσιμότητα ενός έργου.

Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη όλοι οι σχετικοί παράγοντες προτού ληφθούν αποφάσεις για την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος. Η παράβλεψη αβέβαιων μεταβλητών μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς εκτιμήσεις και να επηρεάσει αρνητικά τη βιωσιμότητα του έργου.

Η προσεκτική ανάλυση όλων των παραμέτρων πριν από την έναρξη των εργασιών εξόρυξης είναι καθοριστική. Μια ολοκληρωμένη μελέτη σκοπιμότητας μπορεί να προστατεύσει τόσο την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον όσο και την οικονομική βιωσιμότητα του έργου. Η υπόγεια εξόρυξη, για παράδειγμα, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς η αλλαγή της μεθόδου εξόρυξης αφού έχει υιοθετηθεί είναι εξαιρετικά δύσκολη (Barakos & Mischo, 2021).

Συμπερασματικά η αξιολόγηση της εξόρυξης των σπάνιων γαιών απαιτεί μια πολυδιάστατη προσέγγιση που να συνυπολογίζει γεωλογικούς, τεχνικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες.

Η οικονομική βιωσιμότητα ενός έργου εξαρτάται από την ποιότητα του κοιτάσματος, τη διαθεσιμότητα καινοτόμων μεταλλουργικών τεχνολογιών και την ικανότητα διαχείρισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Παράλληλα, η αβεβαιότητα που συνοδεύει τις εκτιμήσεις κόστους και κερδοφορίας καθιστά αναγκαία την προσεκτική ανάλυση όλων των σχετικών δεδομένων.

Η λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, η διασφάλιση βιώσιμων πρακτικών και η συνεπής παρακολούθηση των εξελίξεων της αγοράς είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή αξιοποίηση των σπάνιων γαιών. Η ολιστική προσέγγιση στην αξιολόγηση των έργων εξόρυξης μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη μιας βιώσιμης και υπεύθυνης βιομηχανίας σπάνιων γαιών.

4.3 Παράγοντες Αξιολόγησης

4.3.1 Οικονομικοί Παράγοντες

Οικονομικοί Παράγοντες στην Εξόρυξη και Επεξεργασία Σπάνιων Γαιών

Κόστος και Οικονομική Βιωσιμότητα των Έργων Σπάνιων Γαιών

Ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που απασχολούν τις επιχειρήσεις εξόρυξης είναι το κόστος, το οποίο καθορίζει εάν ένα έργο είναι βιώσιμο ή όχι. Ορισμένες μέθοδοι εξόρυξης έχουν υψηλότερο κόστος από άλλες, ενώ το κόστος επεξεργασίας μπορεί να αποδειχθεί απαγορευτικό, επηρεάζοντας αρνητικά τη συνολική απόδοση του έργου. Στην πραγματικότητα, οι περισσότερες αποφάσεις σχετικά με το αν και πώς θα τεθεί σε παραγωγή ένα κοιτάσμα σπάνιων γαιών βασίζονται κυρίως σε οικονομικά κριτήρια και όχι στη φύση του κοιτάσματος (Barakos & Mischo, 2021).

Η αξιολόγηση των εξορυκτικών αποθεμάτων και ο υπολογισμός του ρυθμού παραγωγής αποτελούν βασικές οικονομικές παραμέτρους, καθώς προσδιορίζουν τη διάρκεια ζωής των εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Η ποιότητα του μεταλλεύματος και η τιμή των οξειδίων των σπάνιων γαιών διαδραματίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο, επιτρέποντας μια ακριβέστερη εκτίμηση της αξίας του κοιτάσματος και των δυνατοτήτων αξιοποίησής του. Η τιμή των σπάνιων γαιών εξαρτάται από τον τύπο και την αναλογία των στοιχείων που περιέχει το κοιτάσμα, ενώ η παρουσία σπάνιων και πολύτιμων στοιχείων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα του έργου (Kogarko, 2020).

Αγορά και Τιμολόγηση των Σπάνιων Γαιών

Η αναγνώριση των ιδιοτήτων της αγοράς σπάνιων γαιών είναι καίριας σημασίας για την επιλογή της οικονομικά αποδοτικότερης μεθόδου εξόρυξης. Σύμφωνα με έρευνες, πολλά από τα μελλοντικά έργα εξόρυξης σπάνιων γαιών σχεδιάζουν να επεξεργαστούν τις πρώτες ύλες τουλάχιστον μέχρι το στάδιο παραγωγής ενός ενδιάμεσου προϊόντος. Στη συνέχεια, οι σπάνιες γαίες υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία σε υδρομεταλλουργικές μονάδες, όπου διαχωρίζονται τα επιμέρους στοιχεία και πωλούνται ως οξείδια σπάνιων γαιών σε διαφορετικές τιμές.

Μία εναλλακτική επιλογή που ακολουθούν ορισμένες επιχειρήσεις είναι η πώληση του μικτού συμπυκνώματος σπάνιων γαιών σε τρίτες εταιρείες επεξεργασίας, αλλά σε

χαμηλότερες τιμές. Ωστόσο, η περαιτέρω επεξεργασία των σπάνιων γαιών μέχρι το στάδιο των διαχωρισμένων οξειδίων απαιτεί σημαντικά υψηλότερο κόστος και συμμόρφωση με αυστηρότερες προδιαγραφές ποιότητας. Η πώληση ενός μη διαχωρισμένου προϊόντος μπορεί να περιορίσει τους πιθανούς αγοραστές μόνο σε εταιρείες με πρόσβαση σε προηγμένες τεχνολογίες διαχωρισμού. Επιπλέον, ορισμένες σπάνιες γαίες, όπως το Holmium (Ho), το Erbium (Er), το Thulium (Tm), το Ytterbium (Yb) και το Lutetium (Lu), διαθέτουν περιορισμένες εξειδικευμένες αγορές, γεγονός που καθιστά δύσκολη την τιμολόγησή τους λόγω έλλειψης επαρκών στοιχείων συναλλαγών (Kogarko, 2020).

Η προσεκτική διαχείριση της τιμολόγησης αυτών των στοιχείων μειώνει τον οικονομικό κίνδυνο και βελτιστοποιεί την εξισορρόπηση των εσόδων και των εξόδων ενός έργου. Επιπλέον, οποιαδήποτε πρόσθετη οικονομική ροή από τα παραπάνω στοιχεία μπορεί να θεωρηθεί ως επιπλέον κέρδος για την επιχείρηση.

Κόστος Εξόρυξης και Επεξεργασίας

Το κόστος κεφαλαίου επηρεάζεται από τη μέθοδο εξόρυξης, το μέγεθος του κοιτάσματος, τις απαιτήσεις πρόσβασης και το ποσοστό παραγωγής. Τα κύρια στοιχεία κόστους περιλαμβάνουν:

- **Εξοπλισμός και Υποδομές:** Το κόστος των μηχανημάτων, των μεταφορικών συστημάτων και της μονάδας επεξεργασίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο συνολικό κόστος εξόρυξης.
- **Προανάπτυξη του Ορυχείου:** Περιλαμβάνει την προκαταρκτική έρευνα, την προετοιμασία της τοποθεσίας και τις απαιτούμενες αδειοδοτήσεις.
- **Κόστος Αποκατάστασης Περιβάλλοντος:** Ο σχεδιασμός ενός έργου πρέπει να περιλαμβάνει το κόστος αποκατάστασης των περιοχών εξόρυξης μετά το τέλος των δραστηριοτήτων.
- **Βασικές Υποδομές:** Οι επενδύσεις σε υποδομές, όπως παροχή νερού και ηλεκτρικής ενέργειας, δίκτυα μεταφορών και εγκαταστάσεις εργαζομένων, επηρεάζουν το συνολικό κόστος.
- **Κόστος Λειτουργίας:** Το καθημερινό κόστος παραγωγής και επεξεργασίας περιλαμβάνει μισθούς, καύσιμα, χημικά, ηλεκτρισμό και μεταφορές.

Σημαντική πρόκληση αποτελεί το γεγονός ότι ορισμένα κοιτάσματα σπάνιων γαιών βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το κόστος υποδομών.

Βελτιστοποίηση Εξορυκτικών Πρακτικών και Ρυθμός Παραγωγής

Σε αρκετές περιπτώσεις, οι συνθήκες της αγοράς επηρεάζουν την απόφαση εξόρυξης αρχικά των μεταλλευμάτων υψηλότερης ποιότητας, ώστε να μειωθεί ο επενδυτικός κίνδυνος και να αυξηθεί η ταμειακή ροή. Οι επιχειρήσεις, μέσω αυτής της στρατηγικής, επιδιώκουν ταχύτερη απόσβεση του κεφαλαίου και αύξηση της αξίας του έργου.

Ωστόσο, η επιλογή των πιο πλούσιων μεταλλευμάτων εξαρτάται από πολλούς τεχνικούς παράγοντες, όπως η δομή του κοιτάσματος και η γεωλογική κατανομή των στοιχείων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι αναγκαίο να δημιουργηθούν αποθέματα χαμηλότερης περιεκτικότητας που εξορύσσονται σταδιακά (Stefanakis, 2018).

Η προσεκτική διαχείριση των αποθεμάτων και η ευέλικτη στρατηγική εξόρυξης διασφαλίζουν την οικονομική βιωσιμότητα του έργου, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων.

Συμπερασματικά η εξόρυξη και επεξεργασία των σπάνιων γαιών αποτελεί μία πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί λεπτομερή ανάλυση οικονομικών, τεχνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Το υψηλό κόστος επεξεργασίας, οι διακυμάνσεις των τιμών στην αγορά και οι προκλήσεις της υποδομής και της μεταφοράς αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στη λήψη αποφάσεων. Οι επιχειρήσεις πρέπει να αναπτύσσουν στρατηγικές που λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική της αγοράς, επιλέγοντας οικονομικά αποδοτικές μεθόδους εξόρυξης και επεξεργασίας.

Η σωστή τιμολόγηση των στοιχείων σπάνιων γαιών, η στρατηγική διαχείριση των αποθεμάτων και η βελτιστοποίηση των διαδικασιών εξόρυξης μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο και να διασφαλίσουν τη βιωσιμότητα ενός έργου εξόρυξης. Η προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς είναι κρίσιμη για την επιτυχία των επιχειρήσεων στον τομέα των σπάνιων γαιών.

4.3.2 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

Περιβαλλοντικοί Παράγοντες στην Εξόρυξη και Επεξεργασία Σπάνιων Γαιών

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως και οι οικονομικοί, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις διαδικασίες εξόρυξης και επεξεργασίας των μετάλλων των σπάνιων γαιών. Η εκμετάλλευση αυτών των πολύτιμων πρώτων υλών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στις επιπτώσεις που μπορεί να έχει στο φυσικό περιβάλλον και στη δημόσια υγεία.

Ραδιενέργεια και Διαχείριση Ραδιενεργών Υλικών

Ένας από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες είναι η ύπαρξη ραδιενέργειας και ραδιενεργών στοιχείων, που μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα κατά την επιφανειακή και υπόγεια εξόρυξη. Τα πετρώματα που περιέχουν σπάνιες γαίες συχνά συνοδεύονται από ουράνιο και θόριο, τα οποία είναι ραδιενεργά στοιχεία και μπορούν να προκαλέσουν μόλυνση του εδάφους, του νερού και του αέρα.

Η δημιουργία σκόνης κατά τη διαδικασία εξόρυξης ενέχει σημαντικούς κινδύνους, καθώς τα ραδιενεργά σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν μέσω του αέρα και να καταλήξουν στην ατμόσφαιρα ή στα υπόγεια ύδατα. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί η παρουσία ραδονίου, ενός αερίου που παράγεται από τη διάσπαση του ουρανίου και του θορίου. Το ραδόνιο μπορεί να διαρρεύσει από το έδαφος και να συσσωρευτεί σε υπόγεια ορυχεία ή κλειστούς χώρους επεξεργασίας σπάνιων γαιών.

Η έκθεση των εργαζομένων στο ραδόνιο έχει συνδεθεί με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, καθώς αποτελεί τη δεύτερη κύρια αιτία καρκίνου του πνεύμονα μετά το κάπνισμα. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να αξιολογηθεί η καταλληλότερη μέθοδος εξόρυξης, προκειμένου να μειωθεί η παραγωγή σκόνης και η μακροχρόνια παρουσία ραδιενεργών στοιχείων στην ατμόσφαιρα (Barakos, 2017).

Εξαερισμός και Διαχείριση Ρύπων σε Υπόγεια Ορυχεία

Η ροή του αέρα σε υπόγεια ορυχεία (εξαερισμός) αποτελεί έναν ακόμη κρίσιμο περιβαλλοντικό παράγοντα, καθώς επηρεάζει τη συγκέντρωση ρύπων και ραδιενεργών αερίων στο εσωτερικό τους. Ο ανεπαρκής αερισμός μπορεί να οδηγήσει

στη συσσώρευση ραδονίου και άλλων επικίνδυνων αερίων, αυξάνοντας τον κίνδυνο για τους εργαζόμενους.

Κάθε μέθοδος εξόρυξης έχει διαφορετικές απαιτήσεις αερισμού, ενώ η κατανομή της πίεσης του αέρα είναι δυσκολότερο να ελεγχθεί όταν πραγματοποιούνται πολλαπλές εργασίες σε διάφορα επίπεδα του ορυχείου. Επομένως, η ύπαρξη επαρκούς και αποδοτικού συστήματος εξαερισμού είναι απαραίτητη για την προστασία των εργαζομένων και την απομάκρυνση επιβλαβών ρύπων (Barakos, 2017).

Διαχείριση και Διάθεση Απορριμμάτων

Ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την εξόρυξη σπάνιων γαιών είναι η διαχείριση των απορριμμάτων. Οι εξορυκτικές εργασίες παράγουν μεγάλες ποσότητες απόβλητων υλικών, τα οποία περιέχουν συχνά επικίνδυνες και ραδιενεργές ουσίες. Η ακατάλληλη διάθεση αυτών των αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε μόλυνση του εδάφους και των υδάτων, θέτοντας σε κίνδυνο τα οικοσυστήματα και τη δημόσια υγεία.

Η περιβαλλοντικά υπεύθυνη εξόρυξη απαιτεί την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας και αποθήκευσης αποβλήτων, ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι διαρροής επικίνδυνων ουσιών. Επιπλέον, στις υπόγειες εξορυκτικές εργασίες, τα απόβλητα που παράγονται κατά την εξόρυξη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πληρωτικά υλικά για την αποφυγή καθιζήσεων και άλλων γεωλογικών κινδύνων. Ωστόσο, εάν αυτά τα απορρίμματα είναι ραδιενεργά, η χρήση τους πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και να τηρούνται αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας (Barakos, 2017).

Επιπτώσεις στο Περιβάλλον και την Οικολογία

Οι διαδικασίες εξόρυξης σπάνιων γαιών επηρεάζουν σημαντικά τις περιβαλλοντικές συνθήκες, προκαλώντας επιπτώσεις που εκτείνονται πέρα από τη ρύπανση και τη ραδιενεργή μόλυνση. Μερικά από τα σημαντικότερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν περιλαμβάνουν:

- **Διάβρωση και Καθιζήσεις:** Η απομάκρυνση μεγάλων ποσοτήτων πετρωμάτων μπορεί να προκαλέσει γεωλογικές μεταβολές, όπως διάβρωση του εδάφους και καθιζήσεις. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφή φυσικών οικοσυστημάτων και υποδομών.

- **Μόλυνση των Υδάτων:** Τα απόβλητα από την εξόρυξη μπορούν να μολύνουν υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, επηρεάζοντας τις τοπικές κοινότητες και τη βιοποικιλότητα.
- **Καταστροφή Οικοσυστημάτων:** Η αποψίλωση των δασών και η καταστροφή των φυσικών οικοτόπων για τη δημιουργία ορυχείων μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα μιας περιοχής.
- **Εκπομπές Ρύπων στην Ατμόσφαιρα:** Οι διαδικασίες εξόρυξης και επεξεργασίας σπάνιων γαιών συμβάλλουν στην έκλυση επικίνδυνων αερίων και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, επιδεινώνοντας την ποιότητα του αέρα.

Η αποκατάσταση των περιοχών εξόρυξης αποτελεί απαραίτητο μέτρο για την αποφυγή μακροχρόνιων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η υιοθέτηση φιλικών προς το περιβάλλον τεχνικών εξόρυξης, όπως η ελάχιστη παρέμβαση στο τοπίο και η αποκατάσταση της γης μετά το πέρας των εργασιών, μπορεί να μειώσει τις επιπτώσεις της εξόρυξης και να συμβάλει στην αειφορία του κλάδου.

Η εξόρυξη λοιπόν των σπάνιων γαιών, αν και απαραίτητη για τη βιομηχανία υψηλής τεχνολογίας και την ενεργειακή μετάβαση, συνοδεύεται από σοβαρές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Η ραδιενεργή μόλυνση, η ατμοσφαιρική ρύπανση, η μόλυνση των υδάτων και η καταστροφή των οικοσυστημάτων αποτελούν κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν με υπεύθυνες πολιτικές και σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις.

Η βιωσιμότητα ενός έργου εξόρυξης σπάνιων γαιών δεν εξαρτάται μόνο από τους οικονομικούς παράγοντες, αλλά και από τη δυνατότητα περιορισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι κυβερνήσεις, οι βιομηχανίες και οι τοπικές κοινότητες πρέπει να συνεργαστούν για την ανάπτυξη στρατηγικών που θα εξασφαλίζουν την ασφαλή και βιώσιμη εκμετάλλευση αυτών των πολύτιμων φυσικών πόρων, διασφαλίζοντας παράλληλα την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

4.4 Επενδύσεις σε Σπάνιες Γαίες

Αγορά και Δυναμική των Σπάνιων Γαιών

Η κάθε σπάνια γαία διαμορφώνει τη δική της πορεία όσον αφορά την τιμολόγηση, την προσφορά και τη ζήτηση, ωστόσο παρατηρούνται ευρύτερες τάσεις στην αγορά που διαμορφώνουν το τοπίο του κλάδου. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της αγοράς είναι η έντονη κυριαρχία της Κίνας στην παγκόσμια παραγωγή. Το 2021, η χώρα παρήγαγε 168.000 μετρικούς τόνους σπανίων γαιών, αφήνοντας αρκετά πίσω τις Ηνωμένες Πολιτείες, που βρίσκονταν στη δεύτερη θέση με 43.000 τόνους.

Η μονοπωλιακή θέση της Κίνας έχει προκαλέσει αναταράξεις στην αγορά στο παρελθόν. Ενδεικτικά, μεταξύ 2010 και 2011, η απόφαση της κινεζικής κυβέρνησης να περιορίσει τις εξαγωγές είχε ως αποτέλεσμα απότομες αυξήσεις στις τιμές των σπανίων γαιών. Αυτό οδήγησε πολλές χώρες και εταιρείες να εντείνουν την έρευνα και την εξόρυξη νέων κοιτασμάτων εκτός Κίνας. Ωστόσο, η πτώση των τιμών που ακολούθησε οδήγησε σε αποτυχίες πολλών επενδυτικών εγχειρημάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Molycorp, μια εταιρεία που κάποτε αποτελούσε τον βασικό παραγωγό σπανίων γαιών στη Βόρεια Αμερική, αλλά το 2015 οδηγήθηκε σε πτώχευση.

Παρά τα προβλήματα του παρελθόντος, το ενδιαφέρον για τον κλάδο δεν σταμάτησε. Η MP Materials, η οποία απέκτησε τα περιουσιακά στοιχεία της Molycorp, εισήχθη στο χρηματιστήριο το 2020 με αποτίμηση 1,47 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Μέσα σε έναν χρόνο, η αξία της εκτινάχθηκε στα 6 δισεκατομμύρια δολάρια. Σήμερα, η εταιρεία είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός σπανίων γαιών στη Δύση και εξειδικεύεται στη διάθεση προϊόντων όπως το νεοδύμιο, το πρασεοδύμιο, καθώς και βαριά συμπτυκνώματα και ανθρακικά άλατα λανθανίου και δημητρίου.

Η Κίνα, από την πλευρά της, δεν επιβάλλει πλέον περιορισμούς στις εξαγωγές σπανίων γαιών. Μετά από απόφαση του Παγκόσμιου Οργανισμού Εμπορίου το 2014, η χώρα αναγκάστηκε να άρει τους περιορισμούς το 2015. Παρ' όλα αυτά, η παγκόσμια εξάρτηση από την Κίνα παραμένει ισχυρή και το ζήτημα της κυριαρχίας της επανήλθε στο προσκήνιο το 2019, ιδιαίτερα λόγω του εμπορικού πολέμου μεταξύ ΗΠΑ και Κίνας. Σήμερα, μία από τις σημαντικότερες εναλλακτικές εκτός Κίνας είναι

η αυστραλιανή εταιρεία Lynas, η οποία πραγματοποιεί επεξεργασία σπανίων γαιών σε εργοστάσιο στη Μαλαισία.

Όσον αφορά τη ζήτηση, οι αναλυτές προβλέπουν ραγδαία ανάπτυξη της αγοράς λόγω της αύξησης των ηλεκτρικών οχημάτων και των τεχνολογιών αιχμής. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το δυσπρόσιο, το οποίο χρησιμοποιείται στην παραγωγή χάλυβα και λείζερ, με τη ζήτησή του να αυξάνεται λόγω των νέων περιβαλλοντικών προδιαγραφών στην παραγωγή χάλυβα. Παράλληλα, οι σπάνιες γαίες παραμένουν βασικές πρώτες ύλες για τηλεοράσεις, επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ανεμογεννήτριες, καταλυτικούς μετατροπείς και μια σειρά από συσκευές υψηλής τεχνολογίας.

Καθώς η εξασφάλιση σπανίων γαιών αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία, η ανακύκλωση σπανίων γαιών κερδίζει έδαφος. Ο κλάδος στοχεύει στην ανάκτηση σπανίων γαιών από παλιά ηλεκτρονικά και άλλες τεχνολογικές συσκευές, ώστε να μειωθεί η εξάρτηση από την πρωτογενή εξόρυξη. Παράλληλα, μια νέα τεχνική ανάκτησης αφορά την εξόρυξη σπανίων γαιών από τον βυθό των ωκεανών, η οποία προσελκύει αυξανόμενο ενδιαφέρον.

Οι επενδυτές παρακολουθούν με μεγάλο ενδιαφέρον τις προοπτικές του κλάδου, καθώς η αύξηση της ζήτησης αναμένεται να οδηγήσει σε υψηλότερες τιμές τα επόμενα χρόνια. Ωστόσο, η πρόσβαση σε επενδυτικές επιλογές παραμένει περιορισμένη. Οι φυσικές σπάνιες γαίες δεν είναι διαπραγματεύσιμες σε χρηματιστήρια, ενώ μόνο λίγες εταιρείες προσφέρουν επενδυτικά προϊόντα που σχετίζονται με το συγκεκριμένο μέταλλο.

Ο πιο άμεσος τρόπος επένδυσης στον τομέα είναι μέσω εταιρειών εξόρυξης. Αν και πολλές από αυτές βρίσκονται στην Κίνα και δεν είναι εισηγμένες στα χρηματιστήρια, υπάρχουν εταιρείες στις ΗΠΑ, την Αυστραλία και τον Καναδά που προσφέρουν πρόσβαση στις αγορές. Μερικές από τις μεγαλύτερες εταιρείες σπανίων γαιών που διαπραγματεύονται στα χρηματιστήρια TSXV, TSX και ASX είναι:

- **Alkane Resources (ASX: ALK)**
- **Energy Fuels (TSX: EFR)**
- **Greenland Minerals and Energy (ASX: GGG)**
- **Ionic Rare Earths (ASX: IXR)**
- **Hastings Technology Metals (ASX: HAS)**
- **Mkango Resources (TSXV: MKA)**
- **Neo Performance Materials (TSX: NEO)**
- **Peak Resources (ASX: PEK)**
- **Search Minerals (TSXV: SMY)**

Εκτός από τις μεγάλες επιχειρήσεις, υπάρχουν και μικρότερες εταιρείες εξόρυξης που είναι εισηγμένες στα ίδια χρηματιστήρια. Παρόλο που έχουν μικρότερη κεφαλαιοποίηση, προσφέρουν ενδιαφέρουσες επενδυτικές ευκαιρίες:

- **Avalon Advanced Materials (TSX: AVL)**
- **Canada Rare Earth (TSXV: LL)**
- **Commerce Resources (TSXV: CCE)**
- **Defense Metals (TSXV: DEFN)**
- **E-Tech Resources (TSXV: REE)**
- **Geomega Resources (TSXV: GMA)**
- **Leading Edge Materials (TSXV: LEM)**
- **Midland Exploration (TSXV: MD)**
- **Marvel Discovery (TSXV: MARV)**
- **Medallion (TSXV: MDL)**
- **Namibia Critical Metals (TSXV: NMI)**
- **PVW Resources (ASX: PVW)**
- **Reach Resources (ASX: RR1)**
- **Ucore Rare Metals (TSXV: UCU)**

Συνολικά, η αγορά σπανίων γαιών εξελίσσεται δυναμικά και οι επενδυτικές ευκαιρίες αυξάνονται. Με τις χώρες της Δύσης να επιδιώκουν τη διαφοροποίηση της εφοδιαστικής τους αλυσίδας και την Κίνα να διατηρεί την κυριαρχία της στον κλάδο, η εξέλιξη της αγοράς θα εξαρτηθεί από τις γεωπολιτικές και οικονομικές εξελίξεις των επόμενων ετών.

5^ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας

Οι σπάνιες γαίες έχουν εξελιχθεί σε στρατηγικά κρίσιμες πρώτες ύλες, καθορίζοντας σε μεγάλο βαθμό τη σύγχρονη τεχνολογική και βιομηχανική πρόοδο. Η σημασία τους εκτείνεται σε τομείς όπως η ηλεκτροκίνηση, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αεροδιαστημική βιομηχανία, καθώς και η στρατιωτική τεχνολογία. Η αυξανόμενη ζήτηση έχει οδηγήσει σε έντονο παγκόσμιο ανταγωνισμό για την εξασφάλιση αξιόπιστων εφοδιαστικών αλυσίδων, με την Κίνα να παραμένει ο κυρίαρχος παράγοντας στον τομέα της εξόρυξης και της επεξεργασίας.

Ένα από τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν από την κυριαρχία της Κίνας είναι η γεωπολιτική εξάρτηση των υπολοίπων χωρών από τις εξαγωγές της. Η ιστορία έχει δείξει ότι κάθε φορά που επιβάλλονται εμπορικοί περιορισμοί, οι διεθνείς αγορές βιώνουν απότομες διακυμάνσεις τιμών, γεγονός που επηρεάζει τη σταθερότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ωστόσο, η προσπάθεια διαφοροποίησης των πηγών εξόρυξης, όπως παρατηρείται στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη και την Αυστραλία, σηματοδοτεί μια σταδιακή αλλά σταθερή απομάκρυνση από το κινεζικό μονοπώλιο.

Σημαντικό ζήτημα αποτελεί επίσης το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της εξόρυξης και επεξεργασίας των σπάνιων γαιών. Οι διαδικασίες αυτές συνδέονται με υψηλά επίπεδα ρύπανσης, λόγω των τοξικών χημικών που χρησιμοποιούνται, αλλά και των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται. Παρόλο που οι σύγχρονες περιβαλλοντικές πολιτικές επιδιώκουν τη μείωση των επιπτώσεων, το κόστος αυτών των μέτρων αποτελεί ακόμη έναν παράγοντα που επηρεάζει την οικονομική βιωσιμότητα των νέων επενδύσεων στον τομέα.

Η έρευνα έδειξε επίσης ότι η ανακύκλωση σπανίων γαιών, αν και βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, θα μπορούσε να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μείωση της εξάρτησης από την πρωτογενή εξόρυξη. Η ανάκτηση αυτών των πολύτιμων υλικών από χρησιμοποιημένες ηλεκτρονικές συσκευές και βιομηχανικά κατάλοιπα θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για το μέλλον.

Συνολικά, η ανάλυση κατέδειξε ότι οι σπάνιες γαίες βρίσκονται στο επίκεντρο μιας συνεχώς εξελισσόμενης αγοράς, όπου οι οικονομικοί, περιβαλλοντικοί και γεωπολιτικοί παράγοντες διαμορφώνουν το πλαίσιο για τις μελλοντικές εξελίξεις. Το ζητούμενο δεν είναι μόνο η εξεύρεση νέων πηγών εξόρυξης, αλλά και η ανάπτυξη τεχνολογιών που θα μειώσουν την ανάγκη για αυτές, διατηρώντας παράλληλα τη βιομηχανική ανάπτυξη και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

5.2 Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των σπανίων γαιών είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα του κλάδου και να μειωθεί η εξάρτηση από περιορισμένους προμηθευτές. Με βάση τα ευρήματα της παρούσας μελέτης, οι κύριοι άξονες για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν:

1. Ανάπτυξη Νέων Μεθόδων Εξόρυξης και Επεξεργασίας

Οι παραδοσιακές μέθοδοι εξόρυξης και διαχωρισμού των σπανίων γαιών χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η έρευνα θα πρέπει να εστιάσει στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών και βιώσιμων τεχνολογιών, όπως:

- Εξόρυξη χαμηλού αντίκτυπου με χρήση βιολογικών ή χημικών μεθόδων που μειώνουν την παραγωγή τοξικών αποβλήτων.
- Εναλλακτικές τεχνικές διαχωρισμού, όπως η χρήση νανοτεχνολογίας και προηγμένων καταλυτών για την απομόνωση των σπανίων γαιών με μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

2. Ανακύκλωση και Κυκλική Οικονομία στις Σπάνιες Γαίες

Η ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων ανάκτησης των σπανίων γαιών από απόβλητα ηλεκτρονικών συσκευών και άλλες βιομηχανικές χρήσεις είναι ζωτικής σημασίας. Προς αυτή την κατεύθυνση, μελλοντικές έρευνες μπορούν να επικεντρωθούν σε:

- Τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων, ώστε να ανακτώνται περισσότερες ποσότητες σπανίων γαιών από μεταχειρισμένα προϊόντα.

- Βελτίωση της αποδοτικότητας ανακύκλωσης, με στόχο τη μείωση του κόστους και την αύξηση της οικονομικής βιωσιμότητας της διαδικασίας.

3. Αντικατάσταση των Σπανίων Γαιών με Εναλλακτικά Υλικά

Η έρευνα για νέα υλικά που μπορούν να αντικαταστήσουν τις σπάνιες γαίες σε κρίσιμες εφαρμογές θα μειώσει την εξάρτηση από αυτές. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν:

- Ανάπτυξη συνθετικών υλικών με παρόμοιες ή βελτιωμένες ιδιότητες.
- Χρήση εναλλακτικών ενώσεων σε ηλεκτροκινητήρες και μαγνήτες υψηλής απόδοσης.

4. Γεωπολιτικές και Οικονομικές Στρατηγικές για τη Διαχείριση των Σπανίων Γαιών

Η εξόρυξη και η διαχείριση των σπανίων γαιών δεν είναι μόνο τεχνολογικό αλλά και γεωπολιτικό ζήτημα. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να εξετάσει:

- Τρόπους διαφοροποίησης της εφοδιαστικής αλυσίδας, προκειμένου να μειωθεί η μονοπωλιακή εξάρτηση από την Κίνα.
- Δημιουργία στρατηγικών αποθεμάτων σπανίων γαιών σε εθνικό και διακρατικό επίπεδο.
- Ανάλυση του κόστους και των κινδύνων επένδυσης σε νέα ορυχεία και μονάδες επεξεργασίας.

5. Περιβαλλοντικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις της Εξόρυξης Σπανίων Γαιών

Οι επιπτώσεις της εξόρυξης στις τοπικές κοινότητες και το περιβάλλον παραμένουν αμφιλεγόμενο ζήτημα. Περαιτέρω μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν:

- Τις συνέπειες της εξόρυξης σε ευαίσθητα οικοσυστήματα και τρόπους αποκατάστασής τους.
- Τη βιωσιμότητα των αναδυόμενων πρακτικών "πράσινης εξόρυξης" και τη σύγκρισή τους με τις παραδοσιακές τεχνικές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

Barakos, G. (2017). *An assessment tool for the mineability of rare earth element deposits*. 1^η Έκδοση, Technische Universität Bergakademie, Freiburg, Germany.

Brumme, A. (2014). *Wind Energy Deployment and the Relevance of Rare Earths*. 1^η Έκδοση, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Germany.

Gupta, K, & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive metallurgy of rare earths*. 1^η Έκδοση, CRC Press, Νέα Υόρκη.

Άρθρα

Alonso, E. Sherman, AM. Wallington, TJ. Everson, MP. Field, FR. Roth, R, et al. (2012). Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies. *Environ Sci Technol*, 46 (6), 3406–3414.

Barakos, G. & Mischo, H. (2021). Insertion of the social license to operate into the early evaluation of technical and economic aspects of mining projects: Experiences from the Norra Kärr and Bokan Dotson rare earth element projects. *The Extractive Industries and Society*, 8 (2), 100-114.

Binnemans, K. Jones, PT. Blanpain, B. Van Gerven, T. Yang, Y, Walton, A. et al (2013). Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 5 (1), 1–22.

Binnemans, K. & Jones, PT. (2015). Rare Earths and the Balance Problem. *J Sustain Metall*, 1 (1), 29–38.

Charalampides, G. Vatalis, KI. Apostoplos, B. Ploutarchos-Nikolas, B. (2015). Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe. *Procedia Economics and Finance*, 24 (1), 126–135.

Fu, W., Ge, J., Li, J., Han, A., (2001). Market impacts of environmental regulations on the production of rare earths: *A computable general equilibrium analysis for China*. 1, 123-150.

- Giri, S. Karakoti, A. Graham, RP. Maguire, JL. Reilly, CM. Seal, S. et al. (2013). Nanoceria: A Rare-Earth Nanoparticle as a Novel Anti-Angiogenic Therapeutic Agent in Ovarian Cancer. *Batra SK*, 8 (1), 545-578.
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S., and Vernon, C. (2014). Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, *Uses, Sustainability and Environmental Impact*, 1 (2), 44-62.
- Haxel, G.B., Hedrick, J.B. & Orris, G.J. (2002). Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology. *USGS Mineral Resources Program*, 1 (2), 87-90.
- Jaireth S, Hoatson D, Miezeitis Y. (2014). Geological setting and resources of the major rare earth-element deposits in Australia. *Ore Geology Reviews*. 1, 72–128.
- Kogarko, N. (2020). Geochemistry of Rare Earth Metals in the Ore Eudialyte Complex of the Lovozero Rare Earth Deposit. *Dokl Earth Sc.* 1 (2), 231–234.
- Mancheri, A. (2015). World trade in rare earths. *Chinese export restrictions, and implications. Resources Policy*, 1, 262–271.
- McLing, T. Smith. W, Smith. R. (2014). Utilizing Rare Earth Elements as Tracers in High TDS Reservoir Brines in CCS Applications. *Energy Procedia*. 1, 3963–3974.
- Pavel, G., Korkmaz, K., Alemrajabi, M., Rasmuson, A., Forsberg, K., (2014). Separation of valuable elements from NiMH battery leach liquor via antisolvent precipitation, 3(1), 32-39.
- Romero, J.L. & McCord, S.A. (2012). Rare Earth Elements: Procurement, Application, and Reclamation. *Sandia Report*, 12 (1), 61-63.
- Stefanakis, M. (2018). *Mining Stewardship in Milos Island. Bulletin of the Geological Society of Greece*. 53 (1), 50–63.
- Tyler, K., (2004). The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies, 1, 12-23.
- Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Long, K.R., Gambogi, J. & Seal, R.R. (2014). The Rare-Earth Elements - Vital to Modern Technologies and Lifestyles. *USGS Mineral Resources Program*, 14 (1), 121-131.

Διαδικτυακά Άρθρα

American Resources, (2019). *U.S. and Australia to Roll Out “Mutually Beneficial” Action Plan to Improve Security and Supply of Rare Earths*: <https://americanresources.org/u-s-and-australia-to-roll-out-mutually-beneficial-action-plan-to-improve-security-and-supply-of-rare-earths/>

(04/06/2024)

Chem Xinglu Chemical, (2023). *Εφαρμογή Υλικών Σπάνιων Γαιών στη Σύγχρονη Στρατιωτική Τεχνολογία*: <https://www.xingluchemical.com/el/news/application-of-rare-earth-materials-in-modern-military-technology/>

(24/06/2024)

De Facto, (2020). *Σπάνιες Γαίες - Οικονομικό Υπερόπλο για όποιον τις κατέχει*: <https://de-facto.gr/spanies-gaies/>

(04/06/2024)

Energy Game, (2024). *Πράσινη εξόρυξη για ένα «καθαρό» μέλλον*: <https://www.energygame.gr/protes-yles/379117/prasini-eksoryksi-gia-ena-katharo-mellon/>

(07/06/2024)

Federal Register of USA, (2018). *Final List of Critical Minerals*: <https://www.federalregister.gov/%20documents/2018/05/18/%202018-10667/final-list-of-critical-minerals-2018>

(04/06/2024)

Glenny, M. (2022). *Οι Γεωπολιτικοί Κίνδυνοι στο Κυνήγι των Σπάνιων Γαιών*: https://economytoday.sigmalive.com/oikonomia/kosmos/53189_ft-oi-geopolitikoi-kindynoi-sto-kynigi-ton-spanion-gaion

(24/06/2024)

Mindwest, (2015). *Smart Phones, Smart Chemistry*: <https://blog.midwestind.com/wp-content/%20uploads/2017/11/chemmatters-april2015-smartphones.pdf>

(04/06/2024)

Mining Technology, (2017). *Will President Macron resurrect the French mining industry?*: <https://www.mining-technology.com/features/featurewill-president-macron-resurrect-the-french-mining-industry-5864307/>

(04/06/2024)

Money Review, (2024). *Φουντώνει η Μάχη για τις Σπάνιες Γαίες*: <https://www.moneyreview.gr/green-economy/134092/foyntonei-i-machi-gia-tis-spanies-gaies/>

(22/07/2024)

Rawmathub, (2022). *Ενεργειακή μετάβαση στην Ευρώπη κι ανάγκη για κρίσιμα μέταλλα*.: <https://rawmathub.gr/enimerosi-gia-tin-aksiaki-alytida-proton-ylon-kai-ylikon/enimerosi-gia-ton-tomea-tis-energeiakis-metavasis/energeiaki-metavasi-stin-evropi-kai-i-anagki-gia-krisima-metalla>

(07/06/2024).

Rawmathub, (2022). *Πώς να επενδύσετε στις Σπάνιες Γαίες*: <https://rawmathub.gr/enimerosi-gia-katigories-proton-ylon/enimerosi-gia-ta-metalla/pos-na-ependysete-stis-spanies-gaies>

(23/07/2024).

TVXS, (2019). *Η γεωπολιτική των σπάνιων γαιών και το «μυστικό όπλο» της Κίνας*.: <https://tvxs.gr/news/kosmos/i-geopolitiki-ton-spanion-gaion-kai-mystiko-oplo-tis-kinas/>

(06/06/2024)

UnivDatos, (2023). *Ανακύκλωση μετάλλων σπάνιων γαιών. Τρέχουσα ανάλυση και πρόβλεψη*.: <https://univdatos.com/el/report/rare-earth-metal-recycling-market/>

(07/06/2024)

Κατσικάρης, Δ. (2015). *Μελέτη της ραδιενεργούς μόλυνσης του περιβάλλοντος λόγω των εξορύξεων σπάνιων γαιών*.: https://www.researchgate.net/publication/271832379_Melete_tes_radienergous_molynses_tou_periballontos_logo_ton_exoryxeon_spanion_gaion

(07/06/2024)

Κόκκινος, Ε. (2022). *Ειδική Ανάλυση – Η ΕΕ κι οι «ενεργειακά» επικίνδυνες φιλίες της*: https://www.pentapostagma.gr/kosmos/7093839_eidiki-analysi-i-ee-kai-oi-energeiaka-epikindynes-filies-tis-apo-rosiko-aerio-stis

(24/06/2024)

Κωνσταντινίδης, Δ. (2020). *Σπάνιες Γαίες «Βιταμίνες» της βιομηχανίας κι οικονομικό υπερόπλο σε όποιον τις κατέχει*: https://www.huffingtonpost.gr/entry/spanies-yaies-oi-vitamines-tes-viomechanias-kai-o-emporikos-polemos-metaxe-ton-meyalon-denameon_gr_5ef5e217c5b612083c4c3c6e

(07/06/2024)

Λαμπρίδης, Γ. (2023). *Σπάνιες γαίες: Η κρυμμένη σημασία τους στη σύγχρονη τεχνολογία*: <https://value-invest.gr/spanies-gaies-i-krymmeni-simasia-toys/>

(07/06/2024)

Μπάσιας, Γ. (2021). *Ξέρετε ότι κι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ρυπογόνες*: <https://slpress.gr/oikonomia/ki-omos-oi-ananeosimes-piges-energeias-einai-ki-aytes-rypogones/>

(07/06/2024)

Παγκαλιάς, Γ. (2023). *Ποιες είναι και γιατί είναι στρατηγικής σημασίας*: <https://www.ot.gr/2023/01/16/diethni/spanies-gaies-poies-einai-kai-giati-einai-stratigikis-simasia-grafima/>

(06/06/2024)

Πουλλικκάς, Α. (2024). *Αναγκαίοι ορυκτοί πόροι για την ενεργειακή μετάβαση*: <https://inbusinessnews.reporter.com.cy/article/2024/3/27/766257/anagkaioi-oruktoi-poroi-gia-ten-energeiake-metabase/>

(07/06/2024)

Σπάθης, Ρ. (2024). *Η Δύσκολη Μάχη της Ε.Ε για Σπάνιες Γαίες*: <https://www.kathimerini.gr/economy/563102029/i-dyskoli-machi-tis-e-e-gia-spanies-gaies/>

(20/07/2024)

Εικόνες (Πηγές)

Economy Today, (2022). *Εικόνα 4.2: Συμφωνία ΗΠΑ – Κίνα:*
https://economytoday.sigmalive.com/oikonomia/kosmos/10196_ipa-kina-mikri-i-pithanotita-gia-symfonia

(24/06/2024)

Huffpost Greece, (2020). *Εικόνα 2.1: Τα Ποσοστά των Σπάνιων Γαιών για Βιομηχανική Χρήση:* https://www.huffingtonpost.gr/entry/spanies-yaies-oi-vitamines-tes-viomechanias-kai-o-emporikos-polemos-metaxe-ton-meyalon-denameon_gr_5ef5e217c5b612083c4c3c6e

(04/06/2024)

Slobodna Dalmacija, (2018). *Εικόνα 3.2: Ρεαλιστικότητα Ανακύκλωσης Σπάνιων Γαιών:* <https://slobodnadalmacija.hr/mozaik/prostorija/ponestaje-vam-ladica-zacuvanje-starih-mobitela-tableta-punjaca-doznali-smo-gdje-ih-mozete-39-baciti-39-554798>

(07/06/2024)

Voria, (2019). *Εικόνα 3.1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Σπάνιες Γαίες:*
<https://www.voria.gr/article/wwf-131-alithies-gia-tis-ananeosimes-piges-energias>

(07/06/2024)

Απεροπία, (2017). *Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση Σπάνιων Γαιών:*
<https://aperopia.fr/09-2017/i-spanies-gaies-aitia-polemon-tou-21ou-aiona/>

(04/06/2024)

Καθημερινή, (2024). *Εικόνα 2.2: Η Δύσκολη Μάχη της Ε.Ε για Σπάνιες Γαίες:*
<https://www.kathimerini.gr/economy/563102029/i-dyskoli-machi-tis-e-e-gia-spanies-gaies/>

(20/07/2024)

Οικονομικός Ταχυδρόμος, (2023). *Εικόνα 4.1: ΗΠΑ εναντίον Κίνας:*
<https://www.ot.gr/2023/01/16/diethni/spanies-gaies-poies-einai-kai-giati-einai-stratigikis-simasias-grafima/>

(06/06/2024)

Πίνακες (Πηγές)

Αθηνοδρόμιο (2023). *Πίνακας 1.1: Περιοδικός Πίνακας Αποτύπωσης Σπάνιων Γαιών:*
<https://www.athinodromio.gr/%CF%83%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B9%CE%B5%CF%82-%CE%B3%CE%B1%CE%AF%CE%B5%CF%82-%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CF%80%CE%BF%CF%8D-%CE%B2%CF%81%CE%AF%CF%83%CE%BA%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%B1%CE%B9/>

(04/06/2024)

Σχήματα (Πηγές)

Ελληνικός Ορυκτός Πλούτος, (2018). *Σχήμα 2.1: Η Κινέζικη Κυριαρχία:*
https://www.oryktosploutos.net/2018/08/blog-post_6-7/

(04/06/2024)