



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΑΡΣΕΝΙΟΣ ΔΗΜΑΡΑΣ

Η ΚΡΙΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2023



ΑΡΣΕΝΙΟΣ ΔΗΜΑΡΑΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5679

Η ΚΡΙΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων

Μέλφος Βασίλειος, Καθηγητής

©Αρσένιος Δημαράς, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Η ΚΡΙΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ–
Διπλωματική Εργασία

©Arsenios Dimaras, School of Geology, Dept. of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2023

All rights reserved.

THE IMPORTANCE OF RARE- EARTH ELEMENTS IN GLOBAL INDUSTRY –
Bachelor Thesis



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

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

Εικόνα Εξωφύλλου: <https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-are-rare-earth-elements-and-why-are-they-important>



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Ορισμός των σπάνιων γαιών.....	7
2. ΓΕΩΧΗΜΙΚΑ-ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	10
2.1 Γεωχημική συμπεριφορά.....	10
2.2 Ορυκτά με REE.....	11
2.2.1 Μοναζίτης.....	12
2.2.2 Μπαστναζίτης.....	13
3. ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.....	15
3.1. Βασικές χρήσεις και εφαρμογές σπανίων γαιών.....	15
3.1.1. Καταλύτες.....	15
3.1.2. Μαγνήτες.....	15
3.1.3. Φωταύγεια	16
3.2. Σπάνιες γαίες στη γεωργία.....	16
3.3. Σπάνιες γαίες στην ιατρική.....	17
3.4. Γενικότερες εφαρμογές	18
3.5. Χρήσεις και εφαρμογές σπανίων γαιών ανά στοιχείο.....	18
3.6. Ανακύκλωση σπανίων γαιών	26
4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ.....	28
4.1 Τάσεις τιμών για τις σπάνιες γαίες.....	30
4.2 Επιπτώσεις στους παραγωγούς τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα.....	37
5. ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ	40
5.1 Η «βρώμικα» καθαρή ενέργεια.....	40
5.2 Πρόκληση προβλημάτων υγείας.....	41
6. ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.....	43
7. ΤΑ ΤΡΙΑ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ.....	45
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κρισιμότητα των σπάνιων γαιών στην παγκόσμια οικονομία

Αρσένιος Δημαράς

Τα στοιχεία σπάνιων γαιών (REEs) είναι μια ομάδα 17 χημικών στοιχείων που είναι ζωτικής σημασίας για πολλές βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της άμυνας και των ιατρικών συσκευών. Οι μοναδικές μαγνητικές, οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των REE τα καθιστούν απαραίτητα συστατικά σε ένα ευρύ φάσμα προϊόντων. Η κρισιμότητα των REE πηγάζει από τη σπανιότητά τους, καθώς και από το γεγονός ότι συχνά βρίσκονται μόνο σε μικρές ποσότητες και σε δυσπρόσιτες τοποθεσίες. Επιπλέον, η παραγωγή REE απαιτεί μια πολύπλοκη και επιβλαβή για το περιβάλλον διαδικασία εξόρυξης, η οποία αυξάνει τη σπανιότητά τους και καθιστά δύσκολη την αύξηση της προσφοράς.

Η Κίνα είναι σήμερα ο κυρίαρχος παγκόσμιος παραγωγός REE, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 80% της παγκόσμιας προσφοράς. Αυτό έχει εγείρει ανησυχίες σχετικά με το ενδεχόμενο διακοπής του εφοδιασμού και γεωπολιτικών εντάσεων, καθώς ο κόσμος εξαρτάται ολοένα και περισσότερο από μια μόνο πηγή για αυτά τα κρίσιμα υλικά. Καθώς η ζήτηση για REE συνεχίζει να αυξάνεται, γίνεται όλο και πιο σημαντικό για άλλες χώρες να αναπτύξουν τις δικές τους εγχώριες παραγωγικές ικανότητες REE, καθώς και να βρουν εναλλακτικά υλικά και τεχνολογίες που μπορούν να αντικαταστήσουν τους REE σε ορισμένες εφαρμογές.

Συμπερασματικά, η κρισιμότητα των REE για την παγκόσμια βιομηχανία υπογραμμίζει τη σημασία της ανάπτυξης βιώσιμων και ανθεκτικών αλυσίδων εφοδιασμού για αυτά τα βασικά υλικά, προκειμένου να διασφαλιστεί η συνεχής ανάπτυξη και ανάπτυξη βιομηχανιών υψηλής τεχνολογίας σε όλο τον κόσμο.



ABSTRACT

The criticality of rare earths in the global economy

Arsenios Dimaras

Rare earth elements (REEs) are a group of 17 chemical elements that are crucial for many high-tech industries, including electronics, renewable energy, defense, and medical devices. The unique magnetic, optical, and electrical properties of REEs make them essential components in a wide range of products. The criticality of REEs stems from their scarcity, as well as the fact that they are often only found in small quantities and in hard-to-reach locations. In addition, the production of REEs requires a complex and environmentally-harmful extraction process, which adds to their scarcity and makes it difficult to increase supply.

China is currently the dominant global producer of REEs, accounting for over 80% of the world's supply. This has raised concerns about the potential for supply disruptions and geopolitical tensions, as the world becomes increasingly dependent on a single source for these critical materials. As the demand for REEs continues to grow, it's becoming increasingly important for other countries to develop their own domestic REE production capacities, as well as to find alternative materials and technologies that can replace REEs in certain applications.

In conclusion, the criticality of REEs to the global industry underscores the importance of developing sustainable and resilient supply chains for these essential materials, in order to ensure the continued growth and development of high-tech industries around the world.



Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε το Μάιο του 2022 από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο, τον οποίο ευχαριστώ ιδιαιτέρως για την υπόδειξη του θέματος, την στήριξη και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας συγγραφής.

Κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας έγινε εκτενής μελέτη της κρισιμότητας των σπάνιων γαιών και κυρίως εμβάθυνση στο καθοριστικό ρόλο της Κίνας στην ισορροπία στην παγκόσμια οικονομία. Επίσης μελετώνται οι εμφανίσεις των σπάνιων γαιών στον ελλαδικό χώρο. Τέλος έγινε μια ιδιαίτερη αναφορά στις επιπτώσεις της χρήσης των σπάνιων γαιών, στην κοινωνία.

κόσμο της τεχνολογίας. Επιτρέπουν την ανάπτυξη σύγχρονων συσκευών υψηλής τεχνολογίας, πράσινης ενέργειας και ιατρικών τεχνολογιών και επιπλέον, υποστηρίζουν βασικές τηλεπικοινωνίες και αμυντικά συστήματα.

Αν και ονομάζονται σπάνιες γαίες λόγω της γαιώδους εμφάνισής τους, στην πραγματικότητα δεν είναι σπάνια στον φλοιό της Γης. Για παράδειγμα, το δημήτριο (^{58}Ce) που είναι το πιο κοινό στοιχείο σπάνιων γαιών έχει μια μέση περιεκτικότητα 66,5 ppm στο φλοιό της Γης και έτσι ξεπερνά σε αφθονία, για παράδειγμα, την μέση περιεκτικότητα του μόλυβδου (^{82}Pb) τα 10 ppm ενώ παράλληλα ένα από τα λιγότερο κοινά στοιχεία σπάνιων γαιών, το λουτήσιο (^{71}Lu) με μέση περιεκτικότητα 0,8 ppm, έχει 200 φορές μεγαλύτερη αφθονία από αυτή του χρυσού (^{79}Au) τα 0,0031 ppm (Haxel et al. 2002, Voncken 2016) (Πίν. 1). Ωστόσο, η εμφάνιση αυτών των μετάλλων σε αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις ώστε να είναι οικονομικά εφικτή η εξόρυξή τους είναι σπάνια, ενώ η δημιουργία τέτοιων κοιτασμάτων με ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι ακόμη πιο σπάνια.

Πίνακας 1: Πίνακας με την εμφάνιση των σπάνιων γαιών στο στερεό φλοιό (Lide 2004, Krishnamurthy and Gupta 2015, Van Gosen et al. 2017).

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ	ΑΤΟΜΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΑΦΘΟΝΙΑ ΣΤΟ ΣΤΕΡΕΟ ΦΛΟΙΟ (ppm)
<u>Ελαφριές REE</u>				
Σκάνδιο	Sc	21	44,96	22
Λανθάνιο	La	57	138.91	39
Δημήτριο	Ce	58	140.12	66.5
Πρασεοδύμιο	Pr	59	140.91	9.2
Νεοδύμιο	Nd	60	144.24	41.5
Προμήθειο	Pr	61	145	9,2
Σαμάριο	Sm	62	150.36	7.05
Ευρώπιο	Eu	63	151.96	2.0
<u>Βαριές REE</u>				
Υττριο	Y	39	88.91	33
Γαδολίνιο	Gd	64	157.25	6.2
Τέρβιο	Tb	65	158.92	1.2
Δυσπρόσιο	Dy	66	162.50	5.2
Όλμιο	Ho	67	164.93	1.3
Έρβιο	Er	68	167.26	3.5
Θούλιο	Tm	69	168.93	0.52
Υττέρβιο	Yb	70	173.04	3.2
Λουτήσιο	Lu	71	174.97	0.8

Η κύρια διαφοροποίηση ανάμεσα στις REE βασίζεται στο ατομικό τους βάρος. Με αποτέλεσμα, η κατηγοριοποίησή τους να γίνεται σε δύο ομάδες. Πιο συγκεκριμένα, στις

ελαφριές σπάνιες γαίες (LREE), που αποτελούνται από τα: λανθάνιο (^{57}La), δημήτριο (^{58}Ce), πρασεοδύμιο (^{59}Pr), νεοδύμιο (^{60}Nd), προμήθειο (^{61}Pm), σαμάριο (^{62}Sm) και ευρώπιο (^{63}Eu) και στις βαριές σπάνιες γαίες (HREE), που αποτελούνται από τα κάτωθι: γαδολίνιο (^{64}Gd), το τέρβιο (^{65}Tb), το δυσπρόσιο (^{66}Dy), το όλμιο (^{67}Ho), το έρβιο (^{68}Er), το θούλιο (^{69}Tm), το υπτέρβιο (^{70}Yb), το λουτήσιο (^{71}Lu) συν το ύτριο (^{39}Y) και το σκάνδιο (^{21}Sc). Γενικότερα, οι βαριές σπάνιες γαίες (HREE) σπανίζουν σε σχέση με τις ελαφριές σπάνιες γαίες (LREE) (Haxel et al. 2002, Voncken 2016, Van Gosen et al. 2017, Μέλφος 2020).

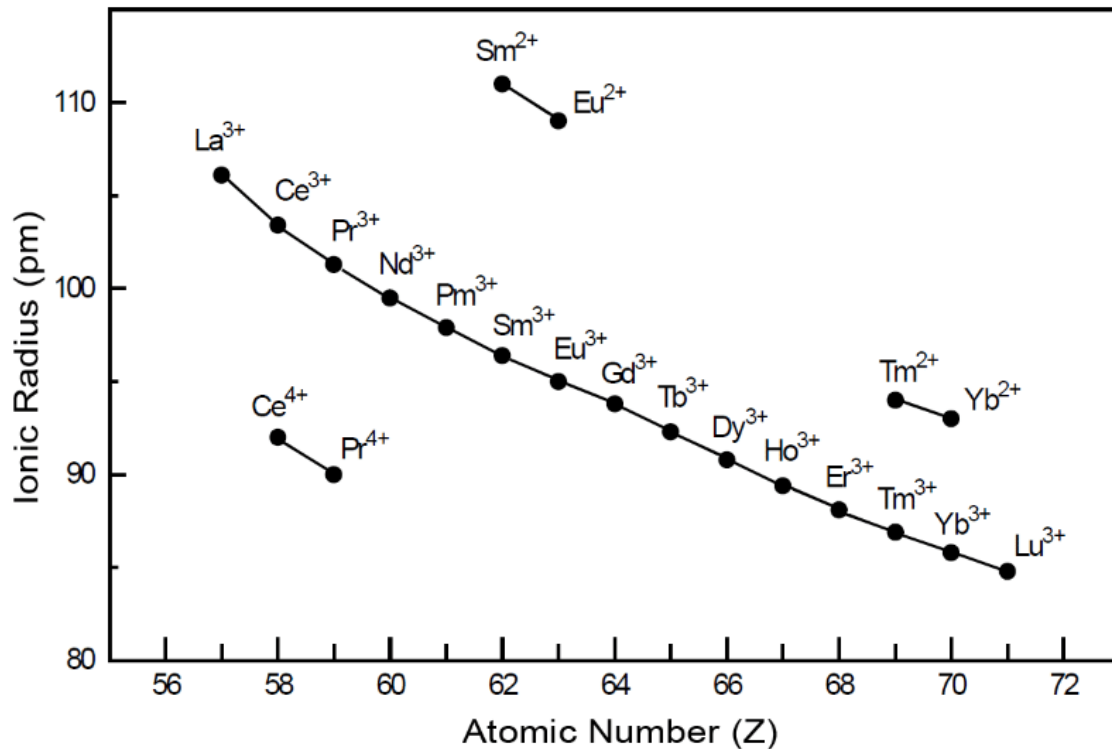
2. ΓΕΩΧΗΜΙΚΑ-ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 Γεωχημική συμπεριφορά

Ο λόγος που οι σπάνιες γαίες βρίσκονται μαζί στο φλοιό της Γης οφείλεται στο κοινό τρισθενές φορτίο (REE^{3+}) και στις παρόμοιες ιοντικές ακτίνες. Το δημήτριο (^{58}Ce) και το ευρώπιο (^{63}Eu) αποτελούν εξαιρέσεις από το τρισθενές φορτίο, καθώς μπορούν να βρεθούν σε κατάσταση σθένους Ce^{4+} και με σθένος Eu^{2+} , αντίστοιχα. Οι λανθανίδες, που περιλαμβάνουν όλα τα στοιχεία του Πίνακα 1 εκτός από το σκάνδιο και το ύτριο, έχουν μια μοναδική ιδιότητα: Αντί να προστίθεται ένα ηλεκτρόνιο σε μία εξωτερική στιβάδα κάθε φορά που αυξάνεται ο ατομικός αριθμός, που είναι το σύννηθες, αυτό που συμβαίνει κατά μήκος της συγκεκριμένης ομάδας είναι ότι η προσθήκη γίνεται σε μία εσωτερική ατελή στιβάδα (4f).

Αυτή η ιδιότητα της επιλεκτικής πλήρωσης των εσωτερικών στιβάδων οδηγεί σε προοδευτική μείωση της ιοντικής ακτίνας των τρισθενών ιόντων των λανθανίδων από La^{3+} έως Lu^{3+} και αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως «συστολή των λανθανίδων» (Σχ. 2). Η συστηματική αυτή μείωση των ιοντικών ακτινών σημειώνει δύο σημαντικές συνέπειες: α) επηρεάζει την κλασμάτωση των REE σε υψηλό βαθμό, γεγονός που επιτρέπει τον ατομικό διαχωρισμό τους σε διαφορετικά γεωλογικά περιβάλλοντα και στην επεξεργασία μεταλλευμάτων και β) προσδίδει στις REE ασυνήθιστες και χρήσιμες χημικές και φυσικές ιδιότητες, όπως μοναδικές μαγνητικές ή/και οπτικές ιδιότητες (Chakhmouradian and Wall 2012, Van Gosen et al. 2017).

Στα μαγματικά συστήματα, το υψηλό φορτίο των REE ιόντων αποτελεί τροχοπέδη στην ικανότητα αυτών των στοιχείων να επιτύχουν ισορροπία φορτίου και να ενσωματωθούν στη δομή των κοινών ορυκτών που αποτελούν τα πετρώματα, εκτός εάν βρίσκονται σε κατάσταση σθένους +2 ή +1. Αυτό έχει ως συνέπεια οι περισσότερες REE να τείνουν να παραμένουν στο τήγμα όταν τα κοινά πυριτικά ορυκτά (όπως αμφίβολοι, άστριοι και ολιβίνης) κρυσταλλώνονται. Τέτοια στοιχεία που τείνουν να μη συμμετέχουν στα πρώιμα στάδια σχηματισμού ορυκτών ονομάζονται ασυμβίβαστα στοιχεία. Ωστόσο, υπάρχουν εξαιρέσεις στον κανόνα, για παράδειγμα το ευρώπιο (^{63}Eu), το οποίο συχνά εξαντλείται στα μάγματα καθώς είναι ενσωματωμένο σε αστρίους ως αποτέλεσμα της κατάστασης σθένους του Eu^{2+} . Διαδοχικές γενιές της διαδικασίας της κλασματικής κρυστάλλωσης, αυξάνει τις συγκεντρώσεις των REE στο υπόλοιπο τήγμα έως ότου κρυσταλλωθούν μεμονωμένες φάσεις πλούσιες σε ορυκτά με REE.



Σχήμα 2: Γραφική παράσταση της Λανθινιδικής συστολής (De Decker, 2017).

Επιπρόσθετα, εκτός από το ιοντικό φορτίο (κατάσταση σθένους), άλλα χαρακτηριστικά που έχουν επιπτώσεις στην κατανομή των REE ενός ορυκτού σε σχέση με το τήγμα είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η σύσταση υγρού, η μαγματική μεταφορά και ο βαθμός διαφοροποίησης μεταξύ των ορυκτών (Henderson 1984, McLennan 2011, Voncken 2016, Van Gosen et al. 2017).

2.2 Ορυκτά με REE

Τα ορυκτά πλούσια σε REE είναι πολυάριθμα, ποικίλλουν και συχνά παρουσιάζουν πολυπλοκότητα στη σύνθεση. Επί του παρόντος, τουλάχιστον 245 ορυκτά θεωρείται ότι περιέχουν REE ως κύριο συστατικό της κρυσταλλικής τους δομής και του χημικού τους τύπου. Από αυτά το 43% περίπου είναι πυριτικά, ακολουθούν τα ανθρακικά με 23%, τα οξείδια με 14% και τα φωσφορικά άλατα με τα συναφή οξυσταλτικά με 14%, ενώ λιγότερο κοινά είναι τα θειικά άλατα. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ορυκτών REE (96%) κυριαρχείται από τα στοιχεία ^{58}Ce , ^{39}Y , ^{57}La , ^{60}Nd , γεγονός που δικαιολογείται αν ληφθεί υπόψιν η αφθονία του στερεού φλοιού σε ppm για τα συγκεκριμένα REE (Πίν.1).

Παρότι μεγάλες ποσότητες REE περιέχονται σε εκατοντάδες ορυκτά, μόνο λίγα κρίνονται επιδεκτικά επεξεργασίας ώστε να προκύψει ένα εμπορεύσιμο προϊόν σε ποσότητες

επαρκείς για μηχανοποιημένη εκμετάλλευση. Μέχρι σήμερα, οι σπάνιες γαίες έχουν παραχθεί κυρίως από 20 ορυκτά αλλά ένα μικρό ποσοστό από αυτά αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της ιστορικής παραγωγής (95% των αποθεμάτων). Τα τρία κυριότερα ορυκτά που περιέχουν REE είναι ο μοναζίτης, ο μπαστναζίτης και το ξενότιμο (Chakhmouradian and Wall 2012, Voncken 2016).

2.2.1 Μοναζίτης

Το φωσφορικό ορυκτό μοναζίτης [(Ce,La,Y,Th)PO₄] αποτέλεσε τη πρώτη πηγή εκμετάλλευσης REE για βιομηχανικούς σκοπούς. Τυπικά, περιέχει περίπου 70% οξείδια REE με την πλειονότητα αυτών να είναι ελαφριές σπάνιες γαίες (LREE) με 20-30% Ce₂O₃, 10-40% La₂O₃ και σημαντικές ποσότητες από νεοδύμιο, πρασεοδύμιο και σαμάριο. Ακόμη, εμφανίζει μικρότερες ποσότητες από δυσπρόσιο, όλμιο, έρβιο και ύτριο με περιεκτικότητα περίπου 5% Y₂O₃ καθώς και περιεκτικότητα 4-12% σε θόριο με παρουσία ουρανίου (Krishnamurthy and Gupta 2015). Η συνύπαρξη των προαναφερθέντων στοιχείων μαζί με τις REE στον μοναζίτη, δημιουργεί μια σημαντική πρόκληση όσον αφορά την εξόρυξη και την επεξεργασία τους, η οποία οφείλεται στη ραδιενέργεια και τα ζητήματα διαχείρισης αποβλήτων που προκύπτουν (Μέλφος 2020).

Συνήθως, ο μοναζίτης αποτελεί δευτερεύον ορυκτό στους γρανίτες, στους γρανοδιορίτες, σε συναφείς πηγματίτες και σε μεταμορφωμένα πετρώματα. Εξαιτίας του υψηλού ειδικού βάρους του 4,8- 5,5 και της ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση, έχει την τάση να εμφανίζεται, μαζί με άλλα ανθεκτικά ορυκτά (μαγνητίτης, ιλμενίτης, ρουτίλιο, ζirkόνιο) σε πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα ξενιστές μετά από τη διάβρωση και τη μεταφορά τους, οδηγώντας στο σχηματισμό προσχωματικών κοιτασμάτων (Voncken, 2016). Είναι πιθανή η εμφάνισή τους σε ποικίλα γεωλογικά περιβάλλοντα σχετιζόμενα με αλλούβια μεταφορά (όπως ποτάμια) με αποτέλεσμα η πλειονότητα των αποθεμάτων τους να βρίσκεται σε βαριές παράκτιες άμμους.(Krishnamurthy and Gupta 2015, Van Gosen et al. 2017).



Σχήμα 3: Πορτοκαλί κρύσταλλοι Μοναζίτη-(Ce)
(http://www.geo.auth.gr/106/7_phosphates/monazite.htm)

2.2.2 Μπαστναζίτης

Ο μπαστναζίτης $[(\text{REE,Ce})(\text{CO}_3)\text{F}]$, είναι ένα μαγματικής προέλευσης φθοριούχο ανθρακικό ορυκτό με ποσοστό σε REE 65-75% η πλειοψηφία των οποίων είναι LREE. Κάποιες από αυτές είναι τα: δημήτριο, λανθάνιο, νεοδύμιο, πρασεοδύμιο (Krishnamurthy and Gupta 2015, Anderson et al. 2014). Όσον αφορά τις HREE, εκτός από το ύτριο που εμφανίζεται συστηματικά, τα υπόλοιπα στοιχεία βρίσκονται σε μικρές ποσότητες. Συχνά, αυτός εμφανίζεται σε διάφορα χρώματα και μορφές (συμπαγή και κοκκώδη), συμπεριλαμβανομένων μικρών στρογγυλεμένων εξαγωνικών ή μικροπρισματικών κρυστάλλων.

Αναφορικά με το γεωλογικό περιβάλλον, ο μπαστναζίτης συναντάται σε διάφορα πυριγενή πετρώματα, παραδείγματος χάριν στους καρμπονατίτες, σε φλεβικού τύπου κοιτάσματα, σε μεταμορφωμένα πετρώματα ζωνών επαφής και σε πηγματίτες (Abaka-Wood et al. 2016). Θεωρείται το σημαντικότερο ορυκτό REE επειδή δεν έχει ραδιενεργά στοιχεία (Th,U) και είναι το κύριο ορυκτό που βρίσκεται στα δύο μεγαλύτερα κοιτάσματα REE στον κόσμο: το κοιτάσμα Mountain Pass στην Καλιφόρνια και το κοιτάσμα Bayan Obo στην Κίνα (Van Gosen et al. 2017). Αντίθετα με τον μοναζίτη, ο μπαστναζίτης είναι χημικά επιρρεπής στη διάβρωση, η οποία μπορεί να προκαλέσει τη διάλυση οξειδίων REE καθώς και άλλα προβλήματα σε μεταγενέστερο στάδιο (Krishnamurthy and Gupta, 2015).



Σχήμα 4: Κρύσταλλος Μπαστναζίτη-(Ce)

(http://webmineral.com/data/Bastnasite-%28Ce%29.shtml#.Y_YbcHZBxPY)

3. ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Οι σπάνιες γαίες συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στην αναβάθμιση και στην τεχνολογική εξέλιξη πολλών σημαντικών για τον άνθρωπο επιστημών. Η σπουδαιότητα και η ανάγκη των σπανίων γαιών δεν περιορίζεται πλέον μόνο στην κατασκευή κραμάτων σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα στην μεταλλουργία. Η τεχνολογική εξέλιξη τις τελευταίες δεκαετίες έδωσε ώθηση στις σπάνιες γαίες, ικανοποιώντας την ανάγκη για την κατασκευή ενός μεγάλου φάσματος από καταναλωτικά και μη αγαθά. Αμυντικά εθνικά συστήματα, ιατρική και πυρηνική τεχνολογία έχουν την τιμητική τους όσον αφορά την σπουδαιότητα των σπανίων γαιών. Αρκετές όμως είναι οι τεχνολογίες που εξαρτώνται από τις REE και τα προϊόντα τους. Εφαρμογές που έχουν σχέση με την ηλεκτρονική, την οπτική, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά και πολλά άλλα εργαλεία που αφορούν στην βιομηχανία, εξαρτώνται πλέον από τις σπάνιες γαίες. Ο ρόλος στις εφαρμογές αυτές βασίζεται κυρίως στην εξοικονόμηση της ενέργειας και στην ανάπτυξη της ψηφιακής τεχνολογίας.

3.1. Βασικές χρήσεις και εφαρμογές σπανίων γαιών

3.1.1. Καταλύτες

Η σημασία που έχουν οι σπάνιες γαίες στην μετατροπή των πρωτογενών ρύπων της καύσης σε μη τοξικά συστατικά είναι καθοριστική. Η χρήση τους στην κατασκευή καταλυτών και η αντικατάσταση άλλων ακριβότερων μετάλλων όπως για παράδειγμα ο λευκόχρυσος, έχει μειώσει κατά πολύ το κόστος κατασκευής των καταλυτών. Ωστόσο η χρήση τους στο χώρο της αυτοκίνητο-βιομηχανίας δεν περιορίζεται μόνο έως εκεί, καθώς οι σπάνιες γαίες έχουν σημαντική δράση στην διαδικασία κατάλυσης του αργού πετρελαίου και της μετατροπής του σε άλλες αξιοποιήσιμες ενώσεις όπως η αμόλυβδη βενζίνη και η βενζίνη ντίζελ.

3.1.2. Μαγνήτες

Η εξέλιξη της τεχνολογίας αλλά και η ανάγκη για όλο και περισσότερα άλλα και μικρότερες σε μέγεθος συσκευές (gadgets), οδήγησε στην αυξημένη ζήτηση των μαγνητών από σπάνιες γαίες. Μια κατηγορία μαγνητών είναι και οι μαγνήτες νεοδυμίου. Οι μαγνήτες νεοδυμίου χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή απόδοση και μικρό μέγεθος. Η χρήση τους εκτείνεται στα μικρόφωνα των κινητών τηλεφώνων (και γενικής χρήσης συσκευών μαγνητοφώνησης) καθώς και στην κατασκευή DVD αλλά και σκληρών δίσκων. Οι μαγνήτες όπου κατασκευάζονται από σπάνιες γαίες βρίσκουν εφαρμογή και στις ανανεώσιμες πηγές

ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες για την αύξηση απόδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν. Η χρήση των μαγνητών από σπάνιες γαίες αποσκοπεί στην εξοικονόμηση της κατανάλωσης την ενέργειας, με ποσοστά που αγγίζουν το 50%, κρατώντας παράλληλα υψηλή απόδοση.

3.1.3. Φωταύγεια

Η δυνατότητα των σπανίων γαιών να παρέχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση βοήθησε στην κατασκευή λαμπών υψηλής ενεργειακής τάξης κα σε λάμπες εξοικονόμησης ενέργειας, όπως οι τύπου LED, OLED και CFL. Χάρη στην ιδιότητα των σπανίων γαιών, την φωταύγεια, στηρίζεται και η κατασκευή των οθονών υψηλής ευκρίνειας, όπου σήμερα χρησιμοποιούμε καθημερινά μέσω των τηλεοράσεων, των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphones).

3.2. Σπάνιες γαίες στη γεωργία

Οι ίδιες οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται στη γεωργία ως λίπασμα για τη βελτίωση της παραγωγής και της ανάπτυξης των καλλιεργειών, με σκοπό την αύξηση των συγκεντρώσεων του έδαφος σε θρεπτικά στοιχεία. Γενικά, τα ανόργανα λιπάσματα (δηλαδή φωσφορικά λιπάσματα) και τα βελτιωτικά εδάφους περιέχουν μακροθρεπτικά συστατικά (Ca, Mg, N, P και S), μικροθρεπτικά συστατικά (όπως Fe και Si) και σπάνιες γαίες. Στα εδάφη, οι REE μπορεί επίσης να προέρχονται από τοπικά μητρικά πετρώματα. Τα λιπάσματα που περιέχουν REE εφαρμόζονται άμεσα σε μεγάλη κλίμακα σε φυτά της γεωργίας στην Κίνα για τη βελτίωση της απόδοσης και της ποιότητας (Guo et al. 1988, Diatloff et al. 1995). Οι συγκεντρωμένες αποθέσεις σπανίων γαιών έχουν αναφερθεί ότι είναι πολύ χαμηλές. Ωστόσο, η ικανότητα συσσώρευσης ενός συγκεκριμένου φυτού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τα είδη των φυτών, τις συνθήκες καλλιέργειάς τους, την περιεκτικότητα σε REE στο έδαφος ή το πέτρωμα του υποστρώματος (Fu et al. 2001).

Για παράδειγμα, βρέθηκαν υψηλότερες τιμές στο ρύζι, που έδειξε ότι το ρύζι έχει μεγαλύτερη ικανότητα συσσώρευσης σε REE από το καλαμπόκι. Μετά την υπερβολική εφαρμογή των REE στη γεωργία, υπάρχει μια αυξανόμενη περιβαλλοντική ανησυχία ότι αυτά τα στοιχεία μπορεί να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα μέσω της πρόσληψης των φυτών, η οποία μπορεί να είναι επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία. Μερικές μελέτες (Redling, 2006) επιβεβαίωσαν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις REE στους κόκκους δημητριακών και καμία σημαντική συσσώρευση. Έτσι, τα σιτηρά και τα προϊόντα που κατασκευάζονται από αυτά,

όπως το αλεύρι σίτου, θεωρούνται ασφαλή. Οι Thomas et al. (2014) έχουν δηλώσει ότι χώρες όπως η Ρωσία και η Νιγηρία, όπου τα επίπεδα φυσικής αφθονίας σπανίων γαιών είναι υψηλά στα εδάφη τους, θα έχουν περισσότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους που προκύπτουν από την αυξημένη εισροή τους στην γεωργία. Ενδέχεται να απαιτείται στενή παρακολούθηση σε χώρες όπου τα λιπάσματα με βάση φωσφορικά άλατα εφαρμόζονται σε μεγάλη κλίμακα.

3.3. Σπάνιες γαίες στην ιατρική

Οι μοναδικές τους ιδιότητες, όπως η εκπομπή ακτινοβολίας ή ο μαγνητισμός, επιτρέπουν στις σπάνιες γαίες να χρησιμοποιηθούν σε πολλές διαφορετικές θεραπευτικές και διαγνωστικές εφαρμογές στη σύγχρονη ιατρική. Επί του παρόντος υπάρχουν μερικές σημαντικές εφαρμογές των REE στην ιατρική, ενώ και πολλές άλλες αναμένονται στο κοντινό μέλλον. Αρκετές μελέτες (Zhang et al. 2000a, Zhang et al. 2000b, Wakabayashi et al. 2016) επιβεβαίωσαν τις αντιβακτηριακές και αντιμυκητιασικές δραστηριότητες στοιχείων των REE, οι οποίες είναι συγκρίσιμες με εκείνες των ιόντων χαλκού και αυτά τα στοιχεία αρχίζουν να βρίσκουν διάφορες φαρμακευτικές εφαρμογές. Οι σπάνιες γαίες μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν ως μυκητοκτόνο και να αναστείλουν το σχηματισμό και τη βλάστηση των μυκητιακών σπόρων με αποτέλεσμα να επηρεάσουν μεγάλο αριθμό οργανισμών (Zhang et al., 2000b). Ακόμη και τα φαρμακευτικά δείγματα όταν αναλύονται για ανόργανες ακαθαρσίες, βρέθηκαν να περιέχουν αξιόλογες ποσότητες σπανίων γαιών, ιδιαίτερα σε LREE (La: 25 μg/g, Ce: 7 μg/g, Gd: 8 μg/g) όταν αναλύονται από ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectrometry, ένας τύπος φασματομετρίας μάζας που χρησιμοποιεί ένα επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα για ιονισμό του δείγματος) (Balaram, 2016b). Οι επιπτώσεις της παρουσίας αυτού του εύρους συγκεντρώσεων REE στα φαρμακευτικά προϊόντα, δεν είναι προς το παρόν σαφείς. Οι REE έχουν βρεθεί ότι προκαλούν ασθένειες και επαγγελματική δηλητηρίαση κατοίκων σε περιοχές εξόρυξης, ρύπανση των υδάτων και καταστροφή γεωργικών εκτάσεων κ.λπ. Αντίθετα, ένα σύνολο αποδεικτικών στοιχείων έχει δείξει αντιοξειδωτικές επιδράσεις που σχετίζονται με REE στη θεραπεία πολλών ασθενειών. Πρόσφατα, οι ιατρικές και βιολογικές ιδιότητες των σπανίων γαιών έχουν αναθεωρηθεί. Νέες ιατρικές εφαρμογές για αυτά τα στοιχεία βρίσκονται με αυξανόμενο ρυθμό και αναδυόμενες εξελίξεις, όπως η νανοτεχνολογία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη χρήση τους στην ιατρική στο μέλλον.

3.4. Γενικότερες εφαρμογές

Κεραμική, οθόνες ηλεκτρονικών υπολογιστών, τηλεοράσεις, κινητά τηλέφωνα ακόμη και χρωματισμοί γυαλιών. Οι σπάνιες γαίες είναι αναγκαίες πλέον στην καθημερινότητα της σύγχρονης κοινωνίας, έχοντας ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών εφαρμογών στη βιομηχανία. Μερικές από τις σπάνιες γαίες έχουν την ικανότητα να παραμένουν θερμοδυναμικά σταθερές σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες αλλά και να απορροφούν νετρόνια. Η δημιουργία υπέρ-μετάλλων και πολύ ανθεκτικών μετάλλων βασίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στις σπάνιες γαίες. Αυτό έχει βοηθήσει στην ανάπτυξη της αεροδιαστημικής λόγω των ανθεκτικών σε θερμότητα κραμάτων.

Το φάσμα αξιοποίησης των σπανίων γαιών εξαπλώνεται και στο χώρο της στρατιωτικής βιομηχανίας. Ηλεκτρονικά συστήματα πολεμικών αεροπλάνων, συστήματα παρακολούθησης ραντάρ, υψηλής αντοχής υλικά για την κατασκευή τανκ, πυρομαχικά υψηλής ακριβείας στόχου αλλά και αμυντικά συστήματα ξηράς, αέρος και θαλάσσης συμπληρώνουν την σημαντικότητα των σπανίων γαιών στο χώρο της στρατιωτικής βιομηχανίας.

3.5. Χρήσεις και εφαρμογές σπανίων γαιών ανά στοιχείο

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να πούμε κάποια βασικά για τις λανθανίδες ώστε να συνεχίσουμε την μελέτη μας. Οι λανθανίδες είναι μέταλλα και αποτελούνται από 15 χημικά στοιχεία με ατομικό αριθμό 57 έως 71. Βρίσκονται στη 6η περίοδο του περιοδικού πίνακα, όμως απεικονίζονται ξεχωριστά στην προτελευταία σειρά κάτω από το κύριο σώμα του περιοδικού πίνακα καθώς αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία χημικών στοιχείων. Το όνομα λανθανίδες προέρχεται από το πρώτο χημικό στοιχείο της ομάδας, το λανθάνιο, ενώ το κύριο χαρακτηριστικό τους που τις υπάγει στην ίδια κατηγορία είναι ότι παρουσιάζουν σχεδόν τις ίδιες φυσικές και χημικές ιδιότητες.

Τα χημικά στοιχεία που αποτελούν τις σπάνιες γαίες είναι:

➤ Λανθάνιο (La): Το χημικό στοιχείο Λανθάνιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 57 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 138,9055 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 920 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 3469 °C. Αποτελεί το πρώτο μέλος της ομάδας των λανθανίδων. Το λανθάνιο ανακαλύφθηκε το 1893 σε ορυκτά του δημητρίου από τον Mosander και η ονομασία του προέρχεται από το αρχαίο ελληνικό ρήμα λανθάνειν, που σημαίνει περνά απαρατήρητος, καθώς κατά τη διάρκεια μελέτης του, ο Mosander αδυνατούσε να το ταυτοποιήσει με τις κλασσικές μεθόδους, καθώς παρουσίαζε ακριβώς τις ίδιες αντιδράσεις με το δημήτριο.

➤ **Δημήτριο (Ce):** Το χημικό στοιχείο δημήτριο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 58 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 140,12 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 795 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 3257 οC. Το δημήτριο ανακαλύφθηκε το 1803 σε ορυκτό σουηδικής προέλευσης και πήρε το όνομα του από του Berzelius και Χάινριχ Κλάπορτ Μάρτιν προς τιμή της ανακάλυψης από τον Πιάτζι (1801) του αστεροειδούς Δήμητρα.

➤ **Πρασινοδύμιο (Pr):** Το χημικό στοιχείο πρασινοδύμιο ή πρασεοδύμιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 59 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 140,9077 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 935 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 3127 οC. Η ονομασία του προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις πράσιος ή αλλιώς πράσινος και δίδυμος και δόθηκε από τον C.A. Von Welsbach το 1885, ο οποίος διαπίστωσε ότι το πράσινο χρώμα του νιτρικού άλατος του μετάλλου του διδύμιου δεν είναι μόνο ένα μέταλλο άλλα 2 διαφορετικά. Το άλλο ήταν το νεοδύμιο (Nd).

➤ **Νεοδύμιο (Nd):** Το χημικό στοιχείο νεοδύμιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 60 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 144,242 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1010 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 3127 οC. Η ονομασία του προέρχεται από τις αρχαία ελληνική νέος και δίδυμος που δόθηκε από τον C.A. Von Welsbach το 1885 παρατηρώντας το μέταλλο του διδύμιου.

➤ **Προμήθειο (Pm):** Το χημικό στοιχείο το προμήθειο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 61 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 145 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1042 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 3000 οC. Η ανακάλυψη του έγινε τεχνητά από μία ερευνητική ομάδα με τα επικεφαλής τον Τσαρλς Κορυέλ το 1945 και είναι το τελευταίο υπο-ουράνιο στοιχείο. Το προμήθειο είναι ένα εξαιρετικά ραδιενεργό στοιχείο με το χρόνο ζωής του να μην ξεπερνάει τα 17,7 έτη.

➤ **Σαμάριο (Sm):** Το χημικό στοιχείο σαμάριο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 62 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 150,4 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1072 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 1794 οC. Η ονομασία του προέρχεται από την λατινική λέξη samarium και δόθηκε το 1879 προς τιμήν του Γάλλου χημικού Λεκόκ Ντε Μπουαμπωντράν, ο οποίος το ανακάλυψε φασματοσκοπικά από ακάθαρτο οξείδιό του ορυκτό σαμαρσκίτης.

➤ **Ευρώπιο (Eu):** Το χημικό στοιχείο ευρώπιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 63 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 151,96 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 822 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 1597 οC. Η ανακάλυψή του προέρχεται από το Γάλλο χημικό Εζέν Ανατόλ Νεμαρσέ το 1901 και η ονομασία του πηγάζει από τη νεολατινική

λέξη *europium* και την αρχαία ελληνική Ευρώπη. Το ευρώπιο το συναντάμε σε σχηματισμούς ασθενούς ροδόχρου οξειδίου και άλατα. Είναι ένα λαμπερό αλλά παράλληλα τοξικό μέταλλο.

➤ **Γαδολίνιο (Gd):** Το χημικό στοιχείο γαδολίνιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 64 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 157,25 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1311 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 3233 οC. Η ονομασία του προέρχεται από το Φινλανδό χημικό και γεωλόγο Γιόχαν Γκαδολίν, οπού και πήρε το όνομα του. Η ανακάλυψη του έγινε από το Γιεν Καρλες Γκαλिसαρντ το 1880. Τα διαλύματα των οξειδίων που σχηματίζει το γαδολίνιο καθώς και τα άχρωα άλατά του, δείχνουν φάσμα απορρόφησης μόνο στο υπεριώδες.

➤ **Τέρβιο (Tb):** Το χημικό στοιχείο τέρβιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 65 ενώ το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 158,925 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1360 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 3041 οC. Η ονομασία του προέρχεται από την σουηδική λέξη *Ytterby*, το οποίο είναι ένα χωριό στην Σουηδία, όπου βρίσκεται το μεταλλείο του *Ytterby*. Η ανακάλυψή του έγινε από τον Καρλ Γκούσταφ Μοσάντερ το 1843.

➤ **Δυσπρόσιο (Dy):** Το χημικό στοιχείο δυσπρόσιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 66 και το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 162,5 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1407 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 2562 οC. Η ονομασία του προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη *δυσπρόσιτος*. Ανακαλύφθηκε στο Παρίσι το 1886 από τον Λεκόκ ντε Μπαμπουντράν.

➤ **Όλμιο (Ho):** Το χημικό στοιχείο όλμιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 67 και το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 164,9304 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1470 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 2720 οC. Η ονομασία του προήλθε από το Σουηδό Κλέβε όπου έδωσε το όνομα της γενέτειρας πόλης του, της Στοκχόλμης. Νωρίτερα το 1878 είχε προηγηθεί η ανακάλυψη του στη Γενεύη από τους Ελβετούς ερευνητές Ντελαφοντέν και Σορέ.

➤ **Έρβιο (Er):** Το χημικό στοιχείο έρβιο είναι ένα αργυρόλευκο στερεό μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 68 και το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 167,26 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1522 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 2510 οC. Πήρε το όνομά του από το χωριό όπου ανακαλύφθηκε, στην Σουηδία, Το *Ytterby* το 1842 από τον Καρλ Γκούσταφ

➤ **Θούλιο (Tm):** Το χημικό στοιχείο θούλιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 6 και το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 168,934 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1545 οC, ενώ το σημείο βρασμού στους 1950 οC. Ανακαλύφθηκε το 1879 από τον Σουηδό χημικό Περ Τεοδώρα Κλεβ. Η όψη του θουλίου είναι φωτεινή ασημένια έως λαμπερό γκρι.

➤ **Υπτέρβιο (Yb):** Το χημικό στοιχείο υπτέρβιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 70 και το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 173,04 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 824 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 1466 οC. Το υπτέρβιο ανακαλύφθηκε το 1878 στο Μαρίγνακ της Γαλλίας οπού και πήρε το όνομα του. Το οξείδιο που σχηματίζει το υπτέρβιο είναι λευκό, ενώ τα άλατά του είναι άχρωα και δεν δίνουν χαρακτηριστικό φάσμα απορρόφησης.

➤ **Λουτήτιο (Lu):** Το χημικό στοιχείο λουτήτιο ή λουτέτσιο είναι μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 71 και το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 174,967 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1656 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 3315 οC. Η ανακάλυψη του έγινε το από τον Γάλλο χημικό Ζωρζ Υρμπαιν το 1907 και η προέλευση του ονόματός του είναι από τη Ρωμαϊκή πόλη, Λουτεσία, η οποία ήταν χτισμένη στην θέση του σημερινού Παρισιού.

➤ **Ύττριο (Y):** Το χημικό στοιχείο ύττριο είναι μέταλλο μετάπτωσης και χημικά παρόμοιο με τις λανθανίδες, έχει ατομικό αριθμό (Z) 39 και το ατομικό του βάρος (Ar) είναι 88,906 g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1979 οC ενώ το σημείο βρασμού στους 3336 οC. Η ανακάλυψή του έγινε το 1789 από τον Γιόχαν Γκούσταφ, όπου βρήκε οξείδιο του υττρίου σε ένα δείγμα του Αρρένιους. Ο Κάρλ Άλεξ Αρρένιους 2 χρόνια νωρίτερα το 1987 ανακάλυψε το ορυκτό στο Ύττερμπυ της Σουηδίας και το ονόμασε υττερβίτη (αρχική ονομασία ορυκτού), όνομα που προήλθε από το χωρό αυτό. Η πρώτη φορά που το στοιχείο του υττρίου απομονώθηκε ήταν το 1828 από τον Φρίντριχ Βέλερ.

➤ **Σκάνδιο (Sc):** Το χημικό στοιχείο σκάνδιο είναι αργυρόλευκο μέταλλο, έχει ατομικό αριθμό (Z) 21 και το ατομικό του βάρος (Ar) 44,956 είναι g/mol. Το σημείο τήξης του βρίσκεται στους 1541 οC, ενώ το σημείο βρασμού στους 2836 οC. Η ανακάλυψή του έγινε από το Λαρς Φρέντρικ Νίλσον το 1879 στη Σκανδιναβία, με φασματοσκοπική ανάλυση σε μεταλλεύματα ευξενίτη και γαδολινίτη. Η ονομασία του προήλθε από την ευρύτερη περιοχή ανακάλυψης του την Σκανδιναβία.

Το σκάνδιο σε συνδυασμό με το αλουμίνιο δημιουργούν κράματα τα οποία χρησιμοποιούνται στο χώρο της αεροδυναμικής για εξαρτήματα. Μία ακόμη ιδιότητα του χημικού στοιχείου του σκανδίου είναι ότι συμβάλει και ως δευτερογενές υλικό σε λαμπτήρες αλογόνου μετάλλου και λαμπτήρες υδραργύρου. Τέλος το συναντάμε και ως υλικό για την ανίχνευση της ραδιενέργειας στα διωλιστήρια πετρελαίου.

Ένα από τα πιο πολύ διαδεδομένα χημικά στοιχεία είναι το ύττριο, το οποίο βρίσκει πολλές χρήσεις στο χώρο των μηχανών. Επίσης, το ύττριο χρησιμοποιείται στην οδοντιατρική ως υλικό κατασκευής για το στέμμα των τεχνητών δοντιών. Η φήμη του όμως δεν σταματάει εκεί καθώς το συναντάμε και σε άλλες χρήσεις όπως:

- Σε επιστρώσεις κινητήρων
- Σε κεραμικούς ηλεκτρολύτες (χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου στερεού)
- Σε ηλεκτροκεραμικά (χρησιμοποιείται για την μέτρηση του οξυγόνου και του pH των διαλυμάτων)
- Σε κοσμήματα (αύξηση της σκληρότητάς τους και ανάδειξη των οπτικών τους ιδιοτήτων)
- Σε φίλτρα μικροκυμάτων υτρίου (YIG)
- Σε ενεργειακούς αποδοτικούς λαμπτήρες
- Σε μανδύες αερίου
- Σε κράματα αλουμινίου και μαγνησίου
- Στη θεραπεία του καρκίνου
- Σε διαθλαστικούς φακούς τηλεσκοπικής κάμερας (λόγω υψηλού δείκτη διάθλασης και πολύ χαμηλής θερμικής διαστολής)
- Σε φίλτρα καθετήρων αναρρόφησης

Ένα άλλο στοιχείο με μεγάλη ζήτηση είναι το λανθάνιο. Η ιδιότητά του να προσφέρει υψηλό δείκτη διάθλασης το κάνει ξεχωριστό, ενώ προσδίδει και ανθεκτικό αλκαλικό περιβάλλον. Το λανθάνιο χρησιμοποιείται επίσης στο μηχανισμό αποθήκευσης υδρογόνου στα ηλεκτρόδια των μπαταριών, στην κατασκευή διαθλαστικού φακού στα τηλεσκόπια, ενώ τέλος εισάγεται και στην βιομηχανία πετρελαίου καθώς βρίσκει εφαρμογές ως καταλύτης στη διεργασία καταλυτικής πυρόλυσης FCC (ρευστής κλίνης) στα διυλιστήρια.

Το δημήτριο χρησιμοποιείται ευρέως ως ένας σημαντικός χημικός οξειδωτικός παράγοντας, ενώ άλλη μια πιο διαδεδομένη χρήση είναι ο χρωματισμός κεραμικών και γυαλιών σε αποχρώσεις του κίτρινου. Η βιομηχανία πετρελαίου εμπλέκει και το δημήτριο όπως και το λανθάνιο με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ως καταλύτη στη διεργασία καταλυτικής πυρόλυσης FCC στα διυλιστήρια. Επιπλέον εφαρμογές βρίσκει στην στίλβωση, στα νιάματα σιδήρου των αναπτήρων (κράμα σιδήρου-δημήτριου), ως καταλύτης για τον καθαρισμό μαγειρικών φούρνων και τέλος στην δημιουργία υδρόφοβων στρώσεων στις επικαλύψεις των λεπίδων των στροβίλων (τουρμπίνων).

Ένα από τα κύρια μέταλλα που συναντάμε στους μαγνήτες σπανίων γαιών είναι το πρασινοδύμιο. Σημαντική είναι η χρήση του μετάλλου αυτού και στην δημιουργία των ακτίνων λέιζερ. Άλλες σημαντικές χρήσεις του πρασινοδυμίου είναι, η χρωστική ουσία που χρησιμοποιείται σε γυαλιά και στο σμάλτο των δοντιών, η κατασκευή ενισχυτών οπτικής ίνας μονής λειτουργίας (λειτουργεί ως επικολλητής σε γυαλί φθορίου). Αποτελεί επίσης πρόσθετο

σε γυαλί διδυμίου, που χρησιμοποιείται σε γυαλιά συγκόλλησης, ενώ επίσης αποτελεί και υλικό πυρήνα για το φωτισμό τόξου άνθρακα.

Το νεοδύμιο όπως και προηγουμένως το πρασινοδύμιο αποτελεί κύριο μέταλλο για την κατασκευή μαγνητών σπανίων γαιών, αλλά επίσης και για την κατασκευή λείζερ. Μια από τις κυρίες εφαρμογές στις οποίες συμμετέχει το νεοδύμιο είναι στην κατασκευή ηλεκτρικών κινητήρων για τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα. Επιπλέον χρήσεις του μετάλλου είναι ο χρωματισμός σε γυαλιά στις αποχρώσεις του μωβ, στο σχηματισμό του διδυμίου και τέλος συμβάλει στην κατασκευή κεραμικών πυκνωτών.

Όλες οι λανθανίδες έχουν κάποιες ξεχωριστές χρήσεις, έτσι και ένα από τα πιο επικίνδυνα χημικά στοιχεία αυτών, το προμήθειο. Έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή των πυρηνικών μπαταριών (ή ατομικών μπαταριών), όπου γίνεται η χρήση ισοτόπων του προμηθείου για την παραγωγή ενέργειας. Τέλος το προμήθειο χρησιμοποιείται για να προσδώσει μια πιο έντονη φωτεινή όψη στις βαφές.

Η κατασκευή των μαγνητών από σπάνιες γαίες γίνεται και με την προσθήκη ενός αλλού χημικού στοιχείου των λανθανίδων, του σαμάριου. Το σαμάριο χρησιμοποιείται και στην κατασκευή λείζερ, για τη σύλληψη νετρονίων. Επιπλέον έχει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή μείζερ (maser). Το μείζερ δημιουργεί ισχυρή ακτινοβολία στην περιοχή των μικροκυμάτων σε σύγκριση με το γνωστό κοινό λείζερ που είναι πηγή ορατού φωτός. Επίσης, το σαμάριο χρησιμοποιείται ως συστατικό για τη κατασκευή ράβδων ελέγχου πυρηνικών αντιδραστηρίων.

Η κυριότερη και σημαντικότερη χρήση του ευρώπιου στη βιομηχανία, είναι στην χαλάρωση του NMR (Nuclear Magnetic Resonance), δηλαδή του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού, το φυσικό φαινόμενο στο οποίο οι πυρήνες σε ένα μαγνητικό πεδίο, αρχικά απορροφούν και στην συνέχεια επανεκπέμπουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ο NMR χρησιμοποιείται ευρέως στο χώρο της ιατρικής και πιο συγκεκριμένα στην μαγνητική τομογραφία. Επίσης το ευρώπιο βρίσκει πιο κοινή χρήση ως κόκκινο και μπλε χρώμα σε φωσφορίζοντες λαμπτήρες, ως συνθετικό υλικό λαμπτήρων υδραργύρου και τέλος σε λαμπτήρες φθορισμού.

Το μέταλλο του γαδολινίου προσδίδει την ιδιότητα της υψηλής διαθλαστικότητας σε γυαλιά ή γυαλάκια, αποτελεί υλικό κατασκευής λείζερ, καθώς και υλικό κατασκευής σωλήνων ακτίνων X. Επίσης, από το γαδολίνιο κατασκευάζονται οι μνήμες φυσαλίδων (Bubblememory - ένας τύπος μη πτητικής μνήμης υπολογιστή, όπου γίνεται χρήση ενός λεπτού μαγνητικού φιλμ, με σκοπό τη συγκράτηση μικρών μαγνητισμένων περιοχών). Το γαδολίνιο βρίσκει εφαρμογή επίσης:

- Στην σύλληψη νετρονίων

➤ Ως στοιχείο αποφόρτισης NMR (Nuclear Magnetic Resonance – Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός)

➤ Ως στοιχείο δημιουργίας αντίθεσης για τη βελτιστοποίηση εικόνων στη μαγνητική τομογραφία (MRI) και στην μαγνητική αγγειογραφία (MRA)

➤ Στην κατασκευή μαγνητοσυστατικών κραμάτων (κράματα με μαγνητικές ιδιότητες) και ως πρόσθετο κραμάτων Gralfenal (κράμα σιδήρου – γαλλίου)

➤ Για μαγνητική ψύξη

➤ Ως ανιχνευτής σε σπινθηριστή τομογραφίας εκπομπών ποζιτρονίων

➤ Ως υπόστρωμα για οπτικομαγνητικές μεμβράνες

➤ Για την κατασκευή κεραμικών ηλεκτρολυτών που εφαρμόζονται σε κυψέλες στερεού καυσίμου

➤ Ως καταλύτης για τη μετατροπή καπνών αυτοκινήτου

➤ Ως υπεραγωγός υψηλής απόδοσης της θερμοκρασίας

Ένα άλλο μέταλλο των λανθανίδων το οποίο και εκείνο χρησιμοποιείται ευρέως ως πρόσθετο σε μαγνήτες (μαγνήτες κυρίως με βάση το νεοδύμιο), είναι το τέρβιο. Το τέρβιο χρησιμοποιείται για το χρωματισμό σε πρασίνους φωσφόρους, σε λαμπτήρες φθορισμού (όπου χρησιμοποιείται ως κομμάτι της επικάλυψης φώσφορου λευκού τριβάνδου). Γίνεται επίσης χρήση σε ναυτικά συστήματα Σόναρ, σε σταθεροποιητές κυψελών καυσίμου και τέλος αποτελεί μαγνητο-συστατικό σε κράματα.

Οι κυριότερες χρήσεις στις οποίες λαμβάνει χώρα το δυσπρόσιο είναι ως πρόσθετο στην κατασκευή λείζερ. Επίσης το συναντάμε και σε μαγνητο-συστατικά κράματα κυρίως με βάση το νεοδύμιο, όπως το Terfenal-D. Εκεί που το δυσπρόσιο είναι πιο διαδεδομένο, είναι ο χώρος της πληροφορικής, καθώς χάρη σε αυτό κατασκευάζονται όλο και καλύτεροι και πιο χρηστικοί σκληροί δίσκοι.

Όπως τα περισσότερα μέταλλα των λανθανίδων έτσι και το ολμίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή μαγνητών αλλά και λείζερ. Ωστόσο η πιο διαδεδομένη χρήση του ολμίου είναι στα χημικά εργαστήρια, όπου και λειτουργεί ως πρότυπο βαθμονόμησης μήκους κύματος στα οπτικά φασματόμετρα.

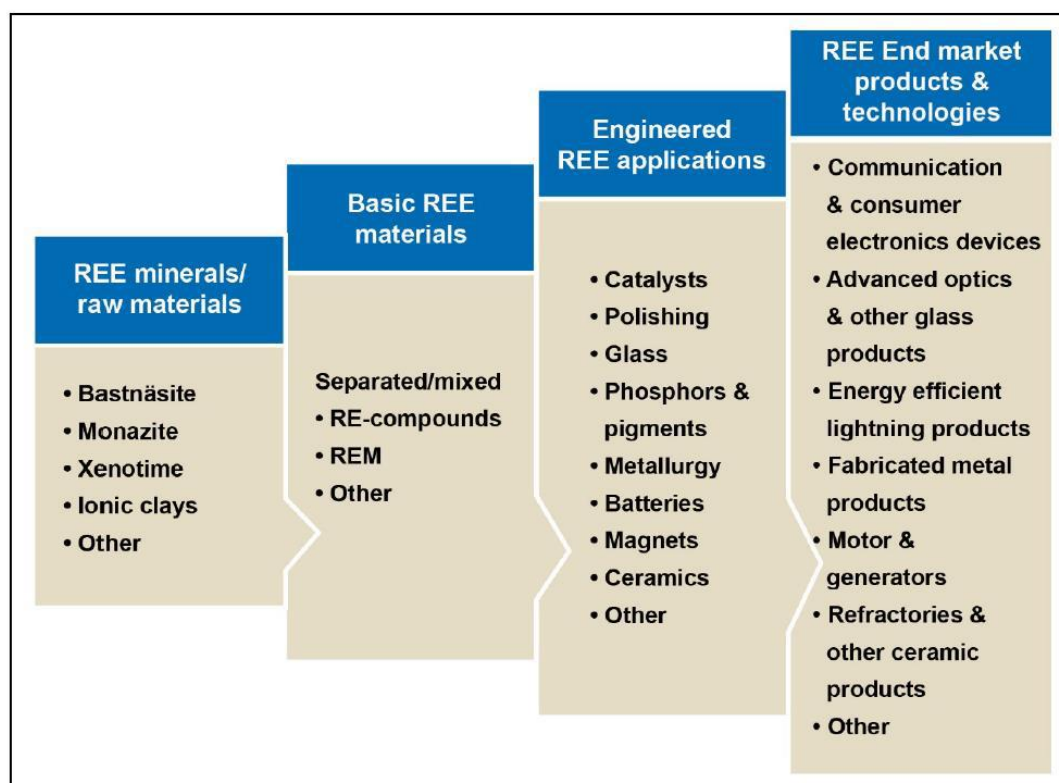
Το γεγονός ότι το μέταλλο του ερβίου δεν το συναντάμε πότε μόνο του στον φλοιό της γης, έχει περιορίσει τις έως σήμερα χρήσεις του. Παρόλα αυτά, το έρβιο χρησιμοποιείται ως υλικό στην κατασκευή υπέρυθρων λείζερ, σε κράματα για χάλυβα βαναδίου και τέλος, είναι ευρέως διαδεδομένο στην τεχνολογία των οπτικών ινών.

Το πιο επικίνδυνο και πιο ακριβό μέταλλο από τις σπάνιες γαίες είναι το θούλιο. Η ιδιαιτερότητα του θούλιου δίνει την δυνατότητα στην πηγή ακτινοβολίας και κατασκευή

φορητών μηχανών για τις ακτίνες Χ, καθώς και την κατασκευή λέιζερ στερεάς κατάστασης. Παρόλα αυτά η χρήση του θούλιου δεν περιορίζεται μόνο στις ακτίνες λέιζερ, άλλα χρησιμοποιείται σε λαμπτήρες μετάλλου-αλογόνου, σε εξοπλισμό μικροκυμάτων και σε προσωπικά δοσίμετρα ανίχνευσης της ραδιενεργού ακτινοβολίας.

Το υτέρβιο είναι ένα χημικό στοιχείο το οποίο βρίσκει εφαρμογές σε πιο ασυνήθιστες δραστηριότητες της τεχνολογίας. Η χρήση του υτερβίου στην πυρηνική ιατρική βοήθησε σημαντικά στην εξέλιξη του κλάδου. Επιπλέον χρήσεις του είναι στους μετρητές πίεσης, στην κατασκευή φωτοβολίδων, στην κατασκευή υπέρυθρων λέιζερ και ως πρόσθετο στο ανοξείδωτο ατσάλι. Τέλος, το υτέρβιο χρησιμοποιείται και στην παρακολούθηση της σεισμικής δραστηριότητας.

Το λουτήσιο, αλλιώς λουτσέσιο, είναι το τελευταίο χημικό στοιχείο των λανθανίδων. Το λουτσέσιο χρησιμοποιείται στη τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων, καθώς και στο χώρο της βιομηχανίας πετρελαίου ως καταλύτης στα διωλιστήρια. Επίσης, εκτεταμένη χρήση έχει το μέταλλο σε λαμπτήρες τύπου LED. Τέλος, χρησιμοποιείται και για την κατασκευή ανιχνευτών σάρωσης PET (το PET χρησιμοποιείται ως όργανο της ιατρικής για την ανίχνευση κακοήθειας, διαταραχών του εγκεφάλου, πνευμονολογικών καθώς και μυοκαρδιακών προβλημάτων).



Σχήμα 3.1. Απλοποιημένη αλυσίδα ζωής REE. Από ορυκτές πρώτες ύλες έως τα τελικά προϊόντα και τεχνολογίες (πηγή: προσαρμόστηκε από το RareEarthTechnologyAlliance, 2014)

3.6. Ανακύκλωση σπανίων γαιών

Τα στρατηγικά μέταλλα υψηλής τεχνολογίας όπως το κοβάλτιο, το λίθιο, το PGE, το άφνιο, το ταντάλιο, το γάλλιο και ειδικά οι σπάνιες γαίες είναι θεμελιώδη για τον κόσμο σήμερα για την ανάπτυξη αποτελεσματικών υψηλής τεχνολογίας και φιλικών προς το περιβάλλον προϊόντων. Για παράδειγμα, όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που απαιτούν λίθιο και νεοδύμιο ανεμογεννήτριες που απαιτούν νεοδύμιο και δυσπρόσιο. Από τη μία πλευρά, ο κόσμος κινείται προς ένα καθαρότερο και πιο πράσινο μέλλον (μέσω των ανανεώσιμων και πιο πρασίνων πηγών ενεργείας), από την άλλη καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση των REE, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής βρίσκεται μόνο σε λίγες χώρες όπως η Κίνα, οι ΗΠΑ, η Αυστραλία και η Ινδία. Πολλά είναι τα ερευνητικά έργα που συνεχίζουν να αντικαθιστούν άλλα υλικά με σπάνιες γαίες σε κρίσιμες τεχνολογίες όπως οι υπερμαγνήτες.

Τα τεχνολογικά άλματα όμως οδηγούν γρήγορα σε τεράστιους σωρούς ηλεκτρονικών αποβλήτων, η απόρριψη των οποίων ενέχει κινδύνους για το περιβάλλον. Τα απόβλητα αυτά περιέχουν σημαντικές συγκεντρώσεις σπανίων γαιών και άλλων πολύτιμων μετάλλων όπως Au, Pt, Pd και Rh. Αποτελούν επομένως έναν πολύτιμο πόρο, η αξιοποίηση του οποίου μπορεί να καλύψει τις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες και ίσως να μειώσει την πρωτογενή παραγωγή ορυκτών πρώτων υλών. Ειδικά στην περίπτωση των σπανίων γαιών τα ηλεκτρονικά απόβλητα θα μπορούσαν θεωρητικά να καλύψουν ένα σημαντικό μέρος της ζήτησης. Πρόσφατες μελέτες για το κύκλο ζωής των προϊόντων έδειξαν ότι η ανακύκλωση καταναλωτικών υλικών είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής (Sprecher et al., 2014). Εκτιμάται ότι σήμερα περίπου 50 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι ηλεκτρονικών αποβλήτων διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής σε όλο τον κόσμο κάθε χρόνο. Ωστόσο, περίπου το 12,5% των ηλεκτρονικών αποβλήτων ανακυκλώνεται επί του παρόντος για όλα τα μέταλλα.

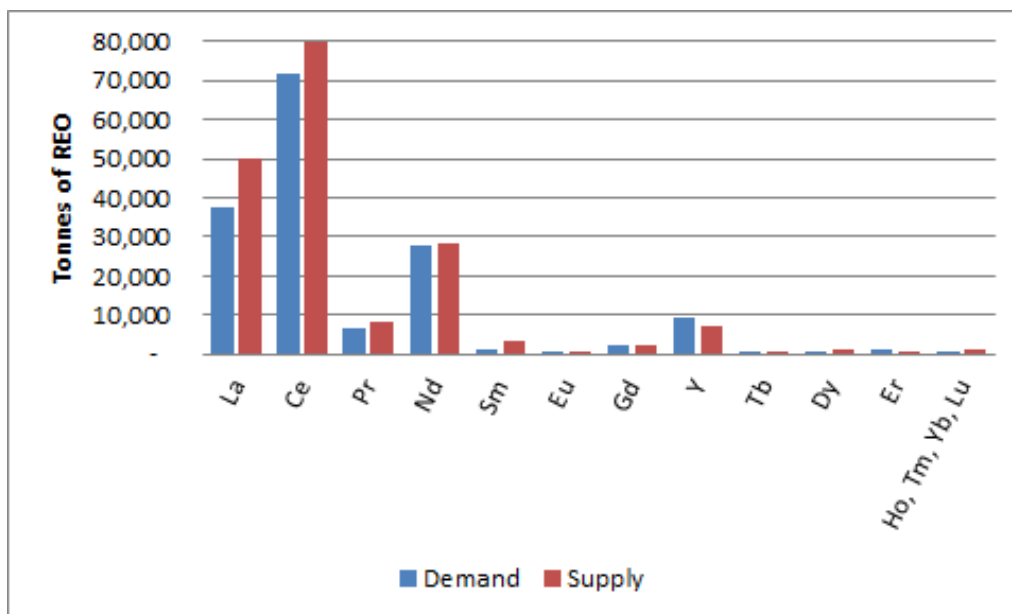
Η ανακύκλωση βέβαια των REE παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες. Πρώτα απ' όλα, αυτά τα στοιχεία υπάρχουν σε μικρές ποσότητες σε μικροσκοπικά ηλεκτρονικά μέρη συσκευών όπως τα κινητά τηλέφωνα. Σε ορισμένα υλικά όπως οι οθόνες αφής, αυτά τα μέταλλα κατανέμονται ομοιόμορφα καθιστώντας πολύ πιο δύσκολη τη διαδικασία ανάκτησής τους. Ανεξάρτητα από την τελική χρήση, οι REE δεν ανακυκλώνονται σε μεγάλες ποσότητες κυρίως λόγω της χαμηλής απόδοσης και του αυξημένου κόστους, αλλά η ανακύκλωση θα μπορούσε να είναι εφικτή εάν γίνει κατ' εντολή καθώς οι τιμές των REE θα γίνουν εξαιρετικά υψηλές

στο μέλλον. Προκειμένου να μειωθεί η μελλοντική κρίση των σπανίων γαιών, διεξάγονται πολλές μελέτες παγκοσμίως για την οικονομική ανάκτησή τους από τα ηλεκτρονικά απόβλητα (Bogart et al. 2015, Nguyen et al. 2017). Αυτές οι μελέτες περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις για την αποσυναρμολόγηση ηλεκτρονικών αποβλήτων, καθώς και χημεία για την εξαγωγή REE από αυτές. Πρόσφατα, η Apple παρουσίασε ένα ρομπότ για αποσυναρμολόγηση iPhone, το οποίο μπορεί να αποσυναρμολογήσει έως και 200 συσκευές/ώρα. Η επεξεργασία 100.000 iPhone έχει τη δυνατότητα να παράγει 1900 kg αλουμινίου, 770kg κοβαλτίου, 710 kg χαλκού, 93 kg βολφραμίου, 42 kg κασσίτερου, 11 kg σπανίων γαιών, 7,5 kg αργύρου, 1,8 kg ταντάλιο, 0,97 kg χρυσού και 0,1 kg παλλαδίου. Η εταιρεία επανέλαβε τη δέσμευσή της, ότι από το 2017 θα χρησιμοποιεί μόνο ανακυκλωμένα υλικά στην αλυσίδα εφοδιασμού της, γεγονός που δεν έχει υλοποιηθεί ακόμη σε μεγάλο βαθμό.

Οι χημικές διεργασίες διαχωρισμού των REE είναι μια μεγάλη πρόκληση και ένα σημαντικό εμπόδιο για πιθανή εκτεταμένη δραστηριότητα ανακύκλωσης, η οποία επί του παρόντος εκτελείται με ρυθμό περίπου 1%. Ο διαχωρισμός και ο καθαρισμός των μεμονωμένων REE είναι δύσκολος λόγω των χημικών τους ομοιοτήτων. Υπάρχει σαφής ανάγκη για νέες τεχνολογίες διαχωρισμού που μειώνουν το κόστος των διαχωρισμών και της ανακύκλωσης REE βιομηχανικής κλίμακας. Αυτό αποσκοπεί στην συλλογή επιπλέον ανακυκλωμένων πηγών REE και παράλληλα στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την απομόνωσή τους.

4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει εκτιμήσεις ζήτησης και προσφοράς για το 2016. Από τα πέντε κρίσιμα μέταλλα, το ύτριο και το τέρβιο φαίνεται να παρουσιάζουν έλλειψη προσφοράς, ενώ η προβλεπόμενη ζήτηση νεοδυμίου, δυσπροσίου και ευρωπίου είναι μόνο ελαφρώς κατώτερη από τα αντίστοιχα στοιχεία προσφοράς. Ωστόσο, με περαιτέρω αύξηση της ζήτησης για σπάνιες γαίες, μαγνήτες, από τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα, υψηλής τεχνολογίας και ιατρικές εφαρμογές, τα πρώτα τρία θα μετατραπούν επίσης σε υποτροφοδοτούμενα. Πολύ περισσότερο, αφού η Κίνα μπορεί να δημιουργήσει περαιτέρω σύσφιξη της προσφοράς HREE. Υπό αυτό το πρίσμα, ο Kingsnorth (2013) κάνει προβλέψεις ότι η μη κινεζική προμήθεια HREE θα μπορούσε να καλύψει μόλις το 10% των παγκόσμιων αναγκών το 2016.



Σχήμα 4.1 Πρόβλεψη παγκόσμιας ζήτησης και προσφοράς για μεμονωμένες σπάνιες γαίες (Barteková, 2014).

Αυτή η ενότητα εξετάζει τη ζήτηση και την προσφορά σε συνδυασμό με την κινεζική βιομηχανία πολιτικών, προκειμένου να προσφέρουμε μια πλήρη εικόνα σχετικά με τις κινητήριες δυνάμεις πίσω από τις τιμές των σπάνιων γαιών. Τόσο η ζήτηση όσο και η

προσφορά είναι σε μεγάλο βαθμό ανελαστικές. Οι σπάνιες γαίες εξορύσσονται ως επί το πλείστον ως υποπροϊόντα, οι αποφάσεις εξόρυξης τους συχνά εξαρτώνται από την χρήση των προϊόντων. Ωστόσο, με το άνοιγμα του Mountain Pass and Mount Weld για την πρωτογενή εξόρυξη σπάνιων γαιών, η προμήθεια LREE αναμένεται να γίνει πιο ελαστική. Η ζήτηση με τη σειρά της είναι ανελαστική λόγω της έλλειψης υποκατάστατων για σπάνιες γαίες με ίδιες ή ανώτερες ιδιότητες. Αυτό συνεπάγεται ότι η σύσφιξη της προμήθεια από την Κίνα θα ανέβαζε τις τιμές και θα προκαλούσε υψηλότερο κόστος παραγωγής για τεχνολογικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν σπάνιες γαίες ως βάση. Ενώ οι τιμές από μόνες τους δεν είναι ο μόνος παράγοντας που προκαλεί την καινοτομία, αλλά χρησιμεύουν ως δείκτης σπανιότητας στο ότι ενσωματώνουν τις εξελίξεις στην αγορά. Ως εκ τούτου, αποδεικνύεται σημαντικό να κατανοήσουμε την ιστορική εξέλιξη των τιμών των σπάνιων γαιών.

Καθώς η ζήτηση για REE αυξάνεται, οι τιμές τείνουν να αυξάνονται. Ωστόσο, τα REE είναι επίσης αρκετά σπάνια και η προμήθεια αυτών των στοιχείων είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένη σε λίγες χώρες. Αυτή η συγκέντρωση παραγωγής εγκυμονεί κινδύνους για την παγκόσμια οικονομία, καθώς καθιστά την αγορά των REE ευάλωτη σε διακοπές εφοδιασμού. Για παράδειγμα, το 2010, η Κίνα διέκοψε τις εξαγωγές REE στην Ιαπωνία μετά από διπλωματική διαμάχη, προκαλώντας αύξηση των τιμών και δημιουργώντας ελλείψεις στην παγκόσμια αγορά. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τις τιμές των REE είναι το κόστος παραγωγής. Η εξόρυξη, η διύλιση και η επεξεργασία REE μπορεί να είναι μια πολύπλοκη και δαπανηρή διαδικασία και οι αλλαγές στο κόστος παραγωγής μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις τιμές. Αυτός ο παράγοντας είναι ιδιαίτερα σημαντικός για REE που δεν εξάγονται εύκολα και που απαιτούν πιο προηγμένη τεχνολογία και τεχνικές για την εξαγωγή.

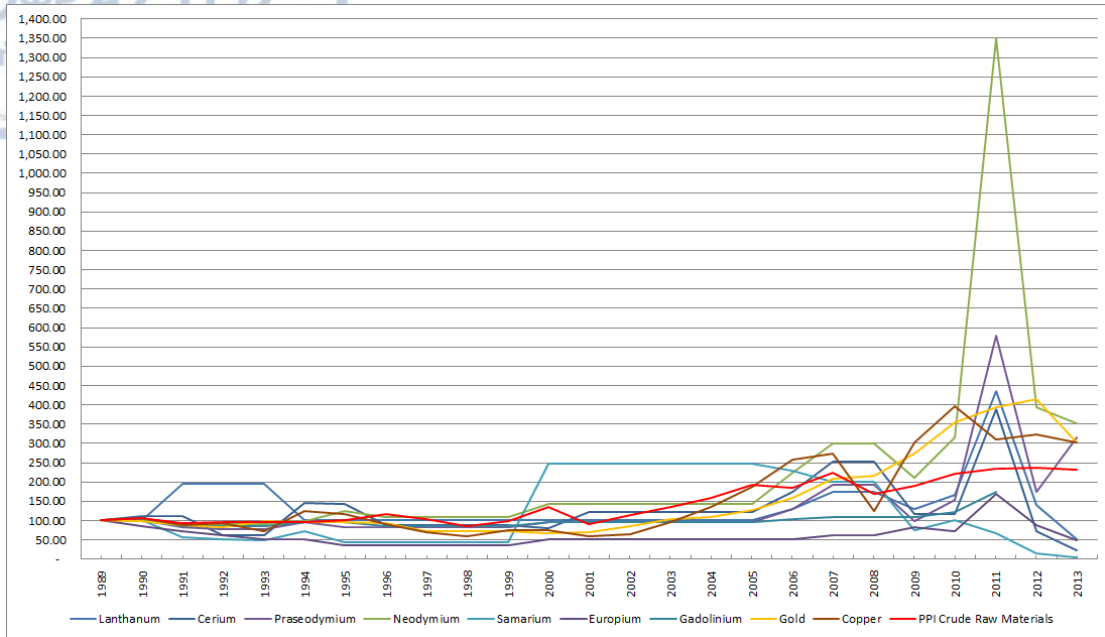
Οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στον επηρεασμό των τιμών των REE. Η εξόρυξη και η διύλιση των REE έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι κυβερνήσεις αυστηροποιούν ολοένα και περισσότερο τους κανονισμούς για αυτές τις δραστηριότητες. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αύξηση του κόστους παραγωγής και συνεπώς να επηρεάσει τις τιμές. Οι γεωπολιτικοί παράγοντες παίζουν επίσης ρόλο στον επηρεασμό των τιμών των REE. Για παράδειγμα, οι εμπορικές εντάσεις μεταξύ των χωρών μπορεί να οδηγήσουν σε περιορισμούς στις εξαγωγές REE και να δημιουργήσουν ελλείψεις στην παγκόσμια αγορά, προκαλώντας αύξηση των τιμών. Επιπλέον, η διπλωματική σχέση των χωρών με τις κύριες χώρες παραγωγής REE, όπως η Κίνα, θα μπορούσε επίσης να επηρεάσει την πρόσβαση και την τιμή των στοιχείων. Τέλος, οι τεχνολογικές εξελίξεις επηρεάζουν επίσης τις τιμές REE. Καθώς αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες, η ζήτηση για ορισμένες REE μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί. Επιπλέον, οι νέες τεχνολογίες μπορούν επίσης να καταστήσουν την

εξόρυξη, τη διύλιση και την επεξεργασία των REE πιο αποτελεσματική, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερες τιμές.

Συμπερασματικά, οι τιμές των στοιχείων σπάνιων γαιών επηρεάζονται από μια σειρά παραγόντων, όπως η προσφορά και η ζήτηση, το κόστος παραγωγής, οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί, οι γεωπολιτικοί παράγοντες και οι τεχνολογικές εξελίξεις. Η κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη και τη διαχείριση των τιμών REE, οι οποίες είναι κρίσιμες για την παγκόσμια οικονομία. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την καλύτερη κατανόηση αυτών των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεών τους, για να βοηθήσει τη βιομηχανία να διαχειριστεί τον κίνδυνο και την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τις τιμές REE.

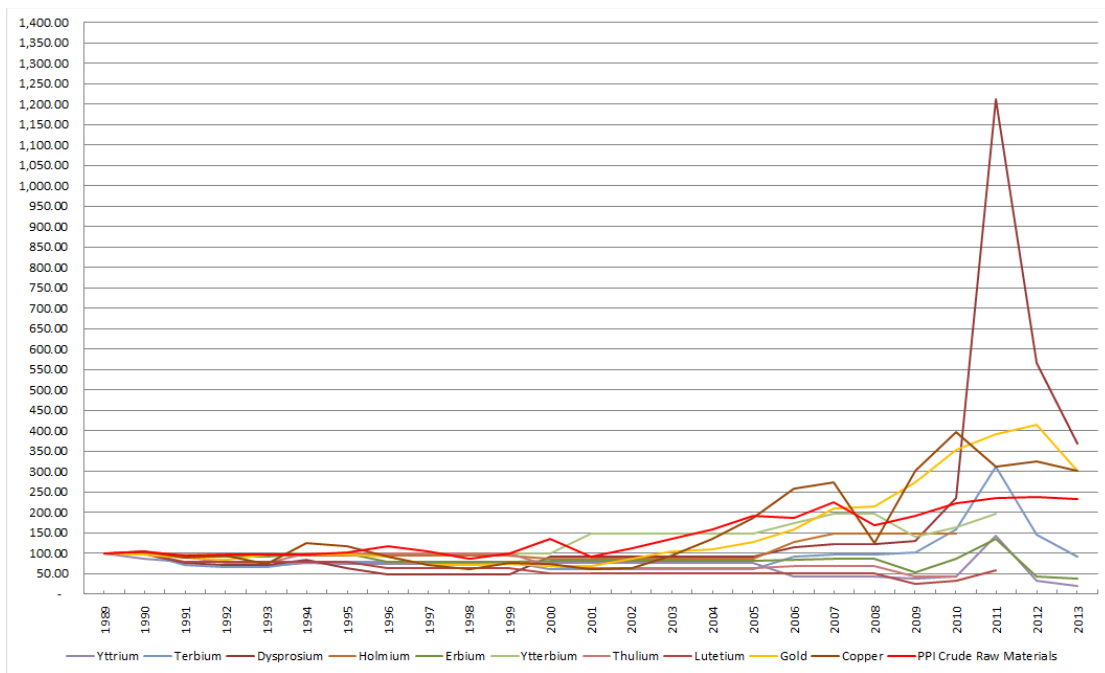
4.1 Τάσεις τιμών για τις σπάνιες γαίες

Τα σχήματα 4,2α και 4,2β αναφέρουν ιστορικές εξελίξεις των τιμών για τις 2 ομάδες των οξειδίων των σπάνιων γαιών, αντίστοιχα. Στοιχεία ονομαστικής τιμολόγησης συλλέχθηκαν από διάφορες πηγές από 100 έως 1989 για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αλλαγών κατά την εξεταζόμενη περίοδο (1989-2013). Σημειώστε ότι οι τιμές ποικίλλουν ανάλογα με την ποσότητα και ποιότητα των οξειδίων, καθώς και σε όλες τις εταιρείες παραγωγής. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι σπάνιες γαίες δεν αποτελούν αντικείμενο ανταλλαγής, δεν υπάρχουν επίσημες τιμές. Οι τιμές στο τέλος ενός έτους καταγράφονται όπως αναφέρθηκαν από διάφορους προμηθευτές ή χρήστες βάσει μακροπρόθεσμων συμβάσεων (BGR, 2014, USGS, 2013). Αντίθετα, οι ημερήσιες χρονοσειρές υπολογίζονται στις μεσαίες τιμές από το Datastream, 2014. Επιπλέον, τα δεδομένα τιμολόγησης δεν είναι διαθέσιμα ιστορικά για ενιαίες καθαρότητες, αυτό προκάλεσε κάποια άλματα τιμών στις ιστορικές τάσεις για το σαμάριο, το τέρβιο και το δυσπρόσιο μεταξύ των 1999 και 2000. Λήφθηκαν ειδικές καθαρότητες οξειδίων οι οποίες δηλώνονται στο Σχήμα. Το οξύδιο του σκανδίου εξαιρέθηκε λόγω της έλλειψης επαρκών ιστορικών στοιχείων τιμολόγησης. Το προμήθειο αποκλείστηκε λόγω της μικρής χρήσης του. Εξετάζοντας το Σχήμα 4,2 γίνεται προφανές ότι οι τιμές των οξειδίων των σπάνιων γαιών ήταν μικτές αλλά αρκετά σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 και τα πρώτα πέντε χρόνια του 21ου αιώνα.



Σχήμα 4,2: Ονομαστικές τιμές σπάνιων γαιών, στο τέλος έτους σε USD/kg, Δείκτης 1989 = 100.

α) Τιμές ελαφρών σπάνιων γαιών, δείκτης 1989 = 100.



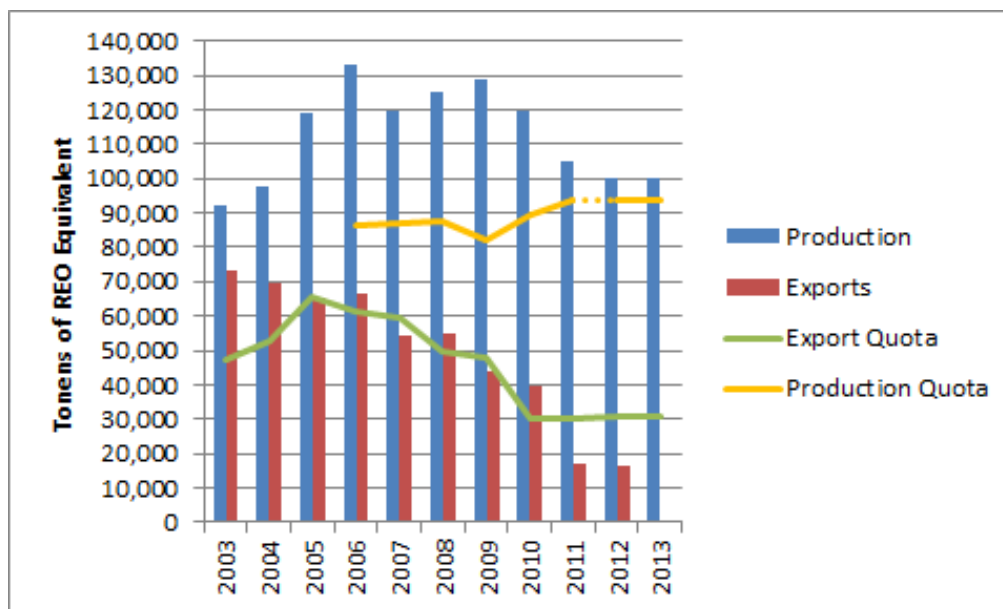
β) Τιμές βαρέων σπάνιων γαιών, δείκτης 1989=100.

Σημείωση: Τιμές για τέλους έτους για αντίστοιχα οξείδια που αναφέρθηκαν σε διαφορετικές καθαρότητες ιστορικά: 1989-1999: Dy, Nd 95%; Pr, Er, Sm 96%; Yb 99%, Ce 99,5%; Ho, Tb, Tm 99,9%; Eu, Gd, La, Lu, Y 99,99%; 2000-2009: Dy 99%, Sm, Tb 99,99%, τα υπόλοιπα παραμένουν ίδια. το 2010 και το 2011 αλλάζει σε σχέση με το προηγούμενο έτος: Dy 96% και Sm 99,9% και Dy 99,5%, αντίστοιχα. 2012-2013: La, Y 99,999% και τα υπόλοιπα 99,9%. (Πηγή: Ίδιοι υπολογισμοί που βασίζονται σε δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από BGR, 2014; Datastream, 2014; FRED, 2014; USGS, 2013).

Αν και η πλειοψηφία έχει υψηλότερες μεταβολές τιμών από αυτές του χαλκού και του χρυσού παραμένουν κάτω από τον PPI Ακατέργαστες Πρώτες Ύλες. Συνολικά, οι τιμές για το HREE παρουσίασαν τάση να είναι πιο ομαλές όσον αφορά τις αιχμές και επίσης πιο συσχετισμένες. Σε γενικές γραμμές, ήταν επίσης σημαντικά υψηλότερες από αυτές του LREE. Οι τιμές του λανθανίου και του δημήτριου αυξήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 λόγω της ζήτησης από την αυτοκινητοβιομηχανία για μπαταρίες NiMH και για καταλύτες πυρόλυσης υγρών πετρελαίου καθώς και για καταλυτικούς μετατροπείς και για υπεριώδες απορροφητικό γυαλί, αντίστοιχα (USGS, 2013). Η τιμή για το samarium μειώθηκε λόγω της αντικατάστασης του κλάδου από την SmCo σε NdFeB οι οποίοι είναι μόνιμοι μαγνήτες. Οι μόνιμοι μαγνήτες αποτέλεσαν τη μεγαλύτερη αύξηση σε όλες τις χρήσεις κραμάτων και μετάλλων. Σύμφωνα με αυτό, η τιμή για το νεοδύμιο αυξανόταν όλη αυτήν την περίοδο (USGS, 2013). Τα δυσπρόσιο, τέρβιο και πρασεοδύμιο, που χρησιμοποιούνται επίσης στην παραγωγή αυτών των μαγνητών, μειώνονταν ελαφρώς λόγω της αυξανόμενης προσφοράς από την Κίνα.

Εκτός από την ώθηση προς τα κάτω των τιμών, από τις ανταγωνιστικές τιμές από κινέζους παραγωγούς προκάλεσε επίσης συνεχή μείωση στην υπόλοιπη παγκόσμια παραγωγή σπάνιων γαιών από το 1991 και μετά. Με το κλείσιμο του Molycorp και τις ρωσικές εξορυκτικές δραστηριότητες το 2002 και το 2003, η Κίνα απέκτησε μονοπώλιο και μέχρι το 2005 παρήγαγε περίπου το 95% των παγκόσμιων σπάνιων γαιών. Το 2005 η έκπτωση ΦΠΑ κατά την εξαγωγή καταργήθηκε από την κινεζική κυβέρνηση. Μετά το 2005, οι τιμές και οι αποκλίσεις τους αυξάνονταν τόσο για το HREE όσο και για το LREE. Αυτή η τάση ήταν λόγω της αυξανόμενης ζήτησης που προήλθε κυρίως από μόνιμους μαγνήτες και επαναφορτιζόμενες μπαταρίες στις βιομηχανίες αυτοκινήτων και ηλεκτρονικών ειδών, καθώς και από οπτικές ίνες και ιατρικές εφαρμογές (USGS, 2013). Ξεκίνησε να αυξάνεται σημαντικά από το 2006 και μετά, με αύξηση 20% σε ένα μόνο έτος - ένα σημαντικό μέρος του προέρχεται από την Κίνα. Εκτός από αυτό, η Κίνα επίσης εισήγαγε ποσοτώσεις παραγωγής και εξαγωγής για να καλύψει τις παραγόμενες ποσότητες οι οποίες εξάγονται. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4,3, τα τελευταία μειώνονται από τότε έφθασαν στα χαμηλότερα επίπεδα το 2011. Το 2007 η Κίνα υιοθέτησε εξαγωγικούς δασμούς προς περιορίζουν περαιτέρω τις εξαγωγές σπάνιων γαιών (Tse, 2011). Αυτά επί του παρόντος κυμαίνονται από 15% έως 25% (Metal-Pages, 2009) και οδηγούν σε διακρίσεις τιμών με βάση την τιμολόγηση σε εγχώριες και ξένες εταιρείες αναλόγως.

Ο παρακάτω πίνακας παρέχει μια σύγκριση μεταξύ εγχώριων κινέζικων τιμών και κινεζικών τιμών FOB για το κρίσιμο REO. Όπως φαίνεται η σφήνα μεταξύ τους αυξανόταν από το 2007 και μετά, με το FOB οι τιμές είναι κατά καιρούς διπλάσιες από τις εγχώριες τιμές, ακόμη και πριν από τη μεταφορά και περιλαμβάνονται τα έξοδα αποθήκευσης. Αν και τα τελευταία αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου λοιπόν, το κενό δεν έχει καλυφθεί ακόμα.



Σχήμα 4.3: (Πηγή: Βάσει δεδομένων που συλλέχθηκαν από τη Στατιστική Διεύθυνση UN Statistics Division, 2013; MOFCOM, 2014; USGS, 2013; USGS, 2014 και Tse, 2011).

Το 2008 οι τιμές παρέμειναν σταθερές, παρακωλύόμενες από την οικονομική ύφεση και τη στασιμότητα αγορά για τα περισσότερα οξείδια σπάνιων γαιών καθώς και για μόνιμους μαγνήτες. Τα τελευταία μειώθηκαν περαιτέρω το 2009 από 66.000 τόνους το προηγούμενο έτος σε 58.000 τόνους (USGS, 2013). Από την πλευρά της προσφοράς, ορισμένοι από τους κινέζους παραγωγούς άρχισαν να διακόπτουν την παραγωγή τους. Αυξήθηκε περαιτέρω με την απόφαση να περιορίσει τις νέες άδειες εξόρυξης και να συγκεντρωθεί περαιτέρω με την ίδρυση της Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Trading Company (USGS, 2013). Τέλος, το 2011 η Κίνα άρχισε να καταστρέφει τα παράνομα ορυχεία και αύξησε τον φόρο των πόρων ο οποίος επιβάλλεται στον ασίτη και στα ορυκτά του μοναζίτη 10 φορές (Yuan, 2011). Το ίδιο έτος ξεκίνησε το πρόγραμμα αποθήκευσης αποθεμάτων που επρόκειτο να ασκήσει περαιτέρω πίεση κατόπιν ζήτησης σπάνιων γαιών.

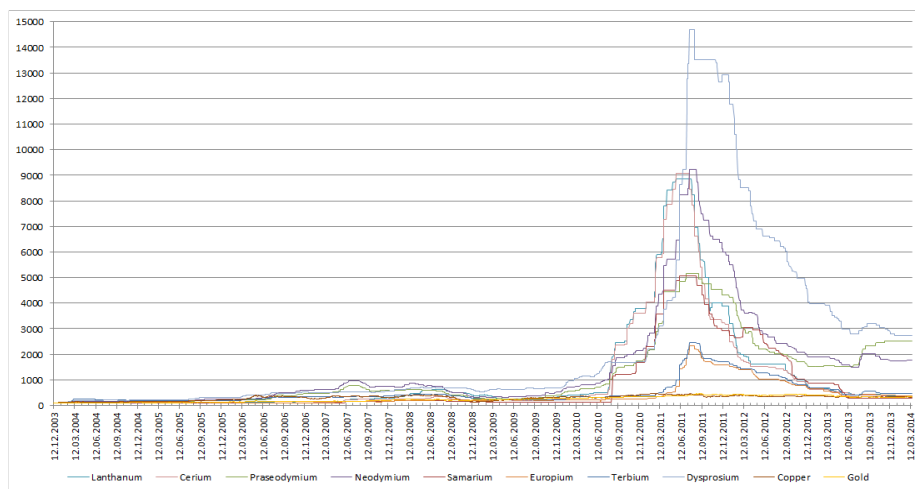
Πίνακας 2: Σύγκριση τιμών επιλεγμένων οξειδίων σπάνιων γαιών, μέσες ετήσιες τιμές. Δίνεται σε USD/kg, σε βάση FOB Κίνας και Κίνας (Πηγή: Ίδιοι υπολογισμοί που βασίζονται σε δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από το Thomson Reuters Datastream Database, 2014. FOB China (Freight on Board)).

Ετος	Οξείδιο του Y 99,999% / Εγχώριο FOB	Οξείδιο του Tb 99,9% / Εγχώριο FOB	Οξείδιο του Nd 99% / Εγχώριο FOB	Οξείδιο του Eu 99% / Εγχώριο FOB	Οξείδιο του Dy 99% / Εγχώριο FOB
2005	N/A / 5,28	311,19 / 300,99	7,34 / 7,38	278,08 / 267,55	41,38 / 41,43
2006	N/A / 4,72	463,94 / 452,35	15,26 / 14,81	243,85 / 236,28	71,54 / 69,20
2007	N/A / 6,39	582,57 / 517,61	29,85 / 26,25	314,54 / 279,45	88,20 / 78,24
2008	N/A / 9,41	663,65 / 508,54	26,28 / 21,02	471,98 / 370,20	112,92 / 88,20
2009	N/A / 6,28	361,09 / 253,82	14,83 / 12,29	475,06 / 362,99	107,55 / 85,25
2010	58,31 / 6,84	554,18 / 393,54	49,71 / 30,19	549,98 / 418,65	232,07 / 172,40
2011	141,82 / 42,48	2310,27 / 1674,42	248,39 / 136,23	2876,77 / 2137,80	1487,27 / 1070,21
2012	118,44 / 26,98	2037,78 / 964,69	124,23 / 77,03	2613,35 / 1240,29	1205,57 / 660,22
2013	25,74 / 12,34	925,86 / 602,10	72,09 / 51,80	1105,96 / 747,26	556,67 / 313,24
Q1/ 2014	20,96 / 10,07	788,73 / 554,18	69,81 / 51,07	925,91 / 727,72	465,36 / 294,02

Όλα αυτά τα μέτρα, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση για σπάνιες γαίες, επηρέασαν δυσμενώς τις τιμές που αυξάνονταν εκθετικά έως το 2010 και κορυφώθηκαν το καλοκαίρι του 2011. Μακράν η μεγαλύτερη αύξηση από το 1989 σημειώθηκε για το νεοδύμιο (1250%) και δυσπρόσιο (1112%), ακολουθούμενα από το πρασεοδύμιο, το λανθάνιο, δημήτριο και τέρβιο με αντίστοιχες αυξήσεις περίπου 480%, 330%, 290% και 210%. Ως εκ τούτου, και τα τέσσερα οξείδια που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος ως είσοδοι σε μόνιμους μαγνήτες, καθώς και το λανθάνιο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μπαταριών NiMH παρουσίασε εκθετικές αυξήσεις τιμών. Σε αντίθεση με αυτό, η τιμή του σαμάριου χρησιμοποιείται εν τω μεταξύ για εξειδικευμένα προϊόντα των μόνιμων μαγνητών SmCo, που υπέστη παιρετέρω μείωση κατά 30% από το 1989. Ομοίως, η τιμή του λουτέτιου που χρησιμοποιείται σε μικρές ποσότητες σε φωσφόρους ακτίνων X μειώθηκαν κατά περίπου 40%. Για τις υπόλοιπες σπάνιες γαίες που εξετάστηκαν, οι αυξήσεις των τιμών ήταν κάτω του 100% από το 1989. Συνολικά, από τον ορισμό του Nordhaus (1974), μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι λόγω των απότομων αυξήσεων των τιμών και από ποσοτικούς περιορισμούς που εμπόδισαν σημαντικά προσφορά από την αγορά, η αγορά σπάνιων γαιών βρισκόταν σε κρίση. Για σύγκριση, μέσα στην ίδια περίοδο οι τιμές του χρυσού και του χαλκού αυξήθηκαν κατά

περίπου 290% και 210%, ενώ ο PPI Ακατέργαστων Πρώτων Υλών αυξήθηκε κατά 140% μεταξύ 1989 και 2011.

Για καλύτερη επισκόπηση των εξελίξεων των τιμών, αναφέρονται οι ημερήσιες ιστορικές τιμές Σχήμα 4.4. Σημειώστε ότι τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν ημερήσιους μέσους όρους που υπολογίζονται από την Thomson Reuters Datastream Database (2014) οι οποίες επανατοποθετήθηκαν σε 100 το 2003. Εδώ διαπιστώνεται ότι οι αυξήσεις τιμών ξεκίνησαν τον Ιούλιο-Αύγουστο του 2010 και έφτασαν στο απόγειό τους τον Ιούνιο-Ιούλιο του 2011 όταν έσκασε η κερδοσκοπική φούσκα. Η διακύμανση των μετρούμενων τιμών ως τριμηνιαίες μεταβλητότητες αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα. Εκεί ήταν σημαντική η μεταβλητότητα κατά το 3ο τρίμηνο του 2011 για καθέναν από τους εξεταζόμενους REO που αυξήθηκε περαιτέρω το πρώτο εξάμηνο του 2012 για τους πέντε κρίσιμους REO. Η αβεβαιότητα σχετικά με την περαιτέρω σύσφιξη της προσφοράς από την Κίνα οδηγεί σε εικασίες. Εταιρείες που αποθησαυρίζουν σπάνιες γαίες ενόψει υψηλότερων κερδών και στη συνέχεια διαθέτουν προκάλεσαν περαιτέρω διακυμάνσεις τιμών.



Σχήμα 4,4: Ιστορικές τιμές για επιλεγμένα οξείδια σπάνιων γαιών, ημερησίως, δείκτης 12/12/2003 = 100, Μέση τιμή σε USD/kg, με βάση την κινέζικη FOB. Πηγή: Thomson Reuters Datastream Database, 2014.

Πίνακας 3: Ετήσιες τριμηνιαίες μεταβλητότητες για επιλεγμένα οξείδια σπάνιων γαιών, τριμηνιαία. Τιμές σε USD/kg, βάσει FOB Κίνας. Πηγή: Thomson Reuters Datastream Database, 2014.

	Q32010	Q4 2010	Q1 2011	Q2 2011	Q3 2011	Q4 2011	Q1 2012	Q2 2012
Lanthanum	16.37%	374.47%	366.10%	343.28%	348.71%	143.07%	140.42%	59.82%
Cerium	20.36%	439.84%	425.33%	410.26%	412.68%	139.05%	135.20%	65.63%
Praseodymium	46.15%	61.51%	59.72%	88.99%	94.00%	108.49%	120.27%	43.22%
Neodymium	37.13%	63.97%	64.58%	97.58%	84.79%	122.07%	138.34%	73.88%
Samarium	1.47%	865.67%	840.27%	808.42%	803.10%	122.45%	117.11%	45.00%
Europium	7.62%	5.85%	3.60%	77.71%	285.42%	296.18%	303.59%	322.21%
Terbium	48.30%	44.48%	45.35%	84.52%	191.66%	204.88%	211.99%	222.02%
Dysprosium	44.82%	48.99%	45.72%	76.68%	199.73%	199.38%	218.60%	242.57%

Οι τιμές ήταν σε ύφεση μέχρι το τέλος του πρώτου εξαμήνου του 2013. Από τη μία πλευρά, αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη μη κινεζική προσφορά κατά κύριο λόγο LREE από τη Lynas που ξεκίνησε την εξόρυξη το 2007 και την επεξεργασία στο εργοστάσιό της στη Μαλαισία στο τέλος του 2011, και από τη Molycorp που ξανάρχισε την εξόρυξη στα τέλη του 2010 και την επεξεργασία από επιχειρήσεις ένα χρόνο αργότερα. Σε συνδυασμό με αυτό, οι ποσοστώσεις εξαγωγών αυξήθηκαν κατά ορισμένους 3% από το 2011 έως το 2012 και παρέμεινε αμετάβλητο το 2013. Από την άλλη πλευρά, η παγκόσμια ζήτηση για σπάνιες γαίες μειώθηκε λόγω της οικονομικής ύφεσης. Αυτό είναι προφανές από το Σχήμα 4.3, όπου οι εξαγωγικές ποσοστώσεις παραμένουν απλήρωτες για το 2011 και το 2012. Επίσης, σε σύγκριση με το 1989, οι τιμές το 2013 αυξήθηκαν κατά 267% για το δυσπρόσιο, 252% για το νεοδύμιο και 215% για το πρασεοδύμιο. Αυτές οι αυξήσεις ξεπερνούν κατά πολύ την εξέλιξη των τιμών τόσο του χρυσού όσο και του χαλκού καθώς και του PPI αργού πετρελαίου, τα οποία είναι υλικά με αντίστοιχες αυξήσεις 201%, 203% και 133%.

Ωστόσο, οι περισσότερες από τις άλλες τιμές σπάνιων γαιών έχουν μειωθεί σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1989, για παράδειγμα το λανθάνιο κατά 48% και το δημήτριο κατά 78%. Σε γενικές γραμμές αναμένεται ότι η τιμή του LREE θα μειωνόταν περαιτέρω λόγω της πρόσθετης προσφοράς από τη Lynas και Molycorp, αλλά ταυτόχρονα οι τιμές για το κρίσιμο REO να παραμείνουν ισχυρές βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα λόγω της ανάκαμψης της ζήτησης από μεγάλες εισαγωγές και στην αυξημένη ζήτηση από νέες τεχνολογίες.

Από τα παραπάνω είναι ασφαλές να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ενώ οι αυξήσεις των τιμών την περίοδο του 2002-2008 οφείλονταν στην αυξημένη ζήτηση από την οικονομική ανάπτυξη των χωρών, από το 2005 και μετά, πρόσθετες μη εμπορικές δυνάμεις με τη μορφή

της κινεζικής βιομηχανίας και οι εκάστοτε πολιτικές στρεβλώνουν την αγορά σπάνιων γαιών. Το πιο σημαντικό, ήταν η μείωση στις ποσοστώσεις παραγωγής και εξαγωγών που τροφοδοτούσαν τις προσδοκίες για περαιτέρω ελλείψεις εφοδιασμού. Η κερδοσκοπία έχει αυξήσει τις τιμές που υπερβαίνουν τα θεμελιώδη, ειδικά στην περίοδο της κρίσης. Ενώ η αυξημένη μεταβλητότητα υποδηλώνει κίνδυνο, ταυτόχρονα σηματοδοτούν επίσης την ευκαιρία για κέρδη. Αυτά πυροδοτήθηκαν από έλλειψη διαφάνειας λόγω έλλειψης αγορών spot και προθεσμιακών αγορών. Μάλιστα, προηγούμενες συναλλαγές πραγματοποιούνταν με βάση μακροπρόθεσμα συμβόλαια και καθορισμένες τιμές από παραγωγούς. Μόλις οι τιμές άρχισαν να γίνονται ασταθείς, αυτές καθορίστηκαν σε μικρότερες περιόδους.

Τώρα, η Κίνα έχει δημιουργήσει μια πλατφόρμα συναλλαγών και ένα εθνικό σύστημα τιμολόγησης έτσι ώστε να ασκήσει μεγαλύτερο έλεγχο στις τιμές. Η ανταλλαγή σπάνιων γαιών Baotou ξεκίνησε τη διαπραγμάτευση στα τέλη Μαρτίου 2014 και θα πρέπει να φέρει με μεγαλύτερη διαφάνεια στην τιμολόγηση, ρυθμίζοντας την προσφορά και τη ζήτηση και τον καθορισμό της αστάθειας να θέσει υπό έλεγχο. Το ερώτημα όμως που παραμένει είναι, ποιες θα είναι οι επιπτώσεις τέτοιων μεταβλητοτήτων στους παραγωγούς ανεμογεννητριών και ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

4.2 Επιπτώσεις στους παραγωγούς τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα

Αν και η Κίνα κυριαρχεί στην αγορά σπάνιων γαιών από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 και οι ποσοστώσεις εξαγωγών και παραγωγής ίσχυαν ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, το πρόβλημα των σπάνιων γαιών έχει γίνει εξέχον θέμα τα τελευταία χρόνια. Οι λόγοι για αυτό είναι οι μικρές ποσότητες σπάνιων γαιών που χρησιμοποιούνται σε μεμονωμένες τεχνολογίες, καθώς και η σε μεγάλο βαθμό ανελαστική ζήτηση. Επιπλέον, αφού οι τιμές των σπάνιων γαιών είναι μάλλον χαμηλές σε σχέση με το συνολικό κόστος του τελικού προϊόντος, οι αλλαγές στις τιμές δεν έχουν ουσιαστική επίδραση στο κόστος του παραγωγού. Ωστόσο, αυξήσεις των τιμών όπως αυτές το 2010-2011 έφεραν σημαντική αβεβαιότητα, η οποία τελικά άσκησε πίεση στους κατασκευαστές και χαρακτήρισε εντατική την καινοτομία σπάνιων γαιών στις εν λόγω τεχνολογίες.

Στην πραγματικότητα, το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών επηρεάζεται κυρίως από την ίδια την ανεμογεννήτρια, από το περιβάλλον παραγωγής όπου κατασκευάζεται, από την κατάσταση παραγωγής της καθώς και από το κόστος της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται. Ενώ ο χάλυβας έχει το μεγαλύτερο μερίδιο έως και 85% του συνολικού

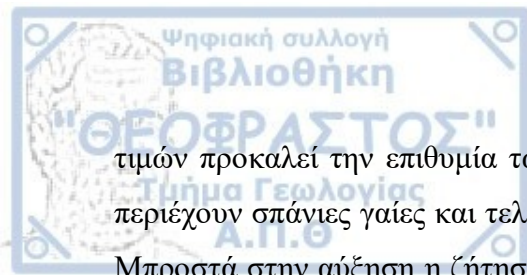
βάρους του στροβίλου, η σημασία των σπάνιων γαιών που χρησιμοποιούνται για μόνιμους μαγνήτες δεν πρέπει επίσης να παραμεληθεί. Υποθέτοντας μια διακύμανση των τιμών του μόνιμου μαγνήτη έως 420 USD/kg κατά τη διάρκεια της κρίσης των σπάνιων γαιών το 2011 (Polinder 2011), αυτό αυξάνει το μερίδιο για τον μόνιμο μαγνήτη ο οποίος θα κοστίζει σχεδόν τα 2/3 του κόστους της γεννήτριας και το ένα τέταρτο του κόστους όλων των εξαρτημάτων. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει το κόστος ανά kW κατά 50% σχετικά στην ανταγωνιστική τεχνολογία κιβωτίου ταχυτήτων DFIG με τις ίδιες παραμέτρους (σε σύγκριση με μόνο 7% όταν υπολογίζεται με 80 USD/kg). Σίγουρα, το χαμηλότερο κόστος συντήρησης και η επισκευή σε περίπτωση σχεδιασμού PMSG-DD συμβάλλουν στην καλύτερη οικονομία μακροπρόθεσμα και εξισορροπούν σε κάποιο βαθμό το υψηλότερο κόστος παραγωγής.

Ωστόσο, σπάνια η αβεβαιότητα για τις υψηλές και ασταθείς τιμές και η απειλή διακοπής του εφοδιασμού σπάνιων γαιών παρακινεί τους παραγωγούς να προσαρμόσουν τα σχέδια των συστημάτων μετάδοσης κίνησης τους. Στην πραγματικότητα, το υψηλό κόστος επένδυσης μπορεί να κάνει πολύ ακριβά τα μηχανήματα έντασης σπάνιων γαιών και αντιπαραγωγικά για τη μείωση του κόστους της ενέργειας. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια πρέπει να γίνει φθηνότερη για να ανταγωνιστεί τον άνεμο στην ξηρά αλλά και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Για ό,τι αφορά το κόστος πρώτων υλών σε οχήματα προηγμένης τεχνολογίας ενός ηλεκτροκινητήρα μόνιμου μαγνήτη 50 kW είναι κατά 30% - 200% υψηλότερο από αυτό ενός κινητήρα επαγωγής χάλκινου ρότορα 50 kW, ανάλογα με την τιμή των σπάνιων γαιών από μαγνήτες. Από την άποψη του κατασκευαστή, αυτό σημαίνει ότι η μετάβαση στη τελευταία τεχνολογία θα μειώσει το συνολικό κόστος του οχήματος (ακόμα και αν ληφθεί υπόψη η ανάγκη για αυξημένο μέγεθος μπαταρίας) και την εξάλειψη της εξάρτησης από σπάνιες γαίες.

Όσον αφορά τις μπαταρίες, αυτές αποτελούν το πιο ακριβό μέρος των ηλεκτρικών οχημάτων - που κυμαίνεται από το ένα τρίτο έως πάνω από το μισό του κόστους εξαρτημάτων του HEV. Στο κόστος της μπαταρίας, τώρα, σχεδόν το 60% είναι κόστος υλικών που σχετίζεται με πακέτα κυττάρων (Bitsche και Gutmann 2001). Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές μετάλλων από το τέλος Ιουνίου 2011 όταν η κρίση των σπάνιων γαιών κορυφώθηκε, το κόστος της συνολικής περιεκτικότητας σε σπάνιες γαίες ήταν 707 USD - αύξηση 3300% σε σύγκριση με το 2005. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των υψηλότερων τιμών οι παραγωγοί προφανώς εξαντλούν τα ιδιωτικά αποθέματά τους για να μετριάσουν τις προσωρινές αυξήσεις των τιμών.

Εν κατακλείδι, εκτός από την αβεβαιότητα διαθεσιμότητας προσφοράς, αυξάνονται οι τιμές των σπάνιων γαιών που είναι επίσης κρίσιμες για τη χρήση τους τόσο σε ανεμογεννήτριες όσο και σε οχήματα προηγμένης τεχνολογίας. Στην πραγματικότητα, αυτή η αστάθεια των



τιμών προκαλεί την επιθυμία των κατασκευαστών να απομακρυνθούν από τεχνολογίες που περιέχουν σπάνιες γαίες και τελικά καθιστά την καινοτομία σε αυτά οικονομικά μη βιώσιμη. Μπροστά στην αύξηση η ζήτηση για αυτά, μπορεί να ακολουθήσει τους κατασκευαστές, και επομένως όλη η καινοτομία στις δραστηριότητες, να γίνει με μετεγκατάσταση στην Κίνα με σκοπό την προμήθεια φθηνότερων εισροών με σταθερή προμήθεια.

5. ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Εκτός από το ιδιωτικό κόστος των σπάνιων γαιών, όσον αφορά τη μεταβλητότητα των τιμών και την αβεβαιότητα, υπάρχει επίσης κοινωνικό κόστος για την εξόρυξη ορυκτών σπάνιων γαιών που περιέχουν ραδιενεργό θόριο και ουράνιο. Αυτό εκδηλώνεται με τη μορφή εξωτερικών παραγόντων όσον αφορά το περιβάλλον και την υγεία. Στην πραγματικότητα, ενώ η Κίνα προμηθεύει σχεδόν όλο το κόσμο με τις σπάνιες γαίες τα τελευταία 30 χρόνια, το κόστος για το περιβάλλον, η υποβάθμιση και η υγεία των τοπικών κοινωνιών έχουν γεννηθεί εξ ολοκλήρου στο εσωτερικό. Στο διάσημο απόφθεγμα του, ο Wen Jiabao αναγνωρίζει ότι οι σπάνιες γαίες ήταν χαμηλότερης τιμής: «Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, πουλούσαμε σπάνιες γαίες στην τιμή του αλατιού, αλλά τους αξίζει η τιμή του χρυσού. Μόλις αρχίζουμε να προστατεύουμε τα δικά μας φυσικά ενδιαφέροντα» (Hayes-Labruto et al. 2013). Έχοντας πει αυτό, φαίνεται να δικαιολογείται για τις χώρες εισαγωγής το γεγονός πως πληρώνουν πλεόνασμα στις εισαγωγές τους προκειμένου να αντισταθμιστούν οι αρνητικές εξωτερικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τη ρύπανση. Παρακάτω θα συζητήσουμε το κοινωνικό κόστος της εκτεταμένης χρήσης της πρωτογενούς παραγωγής των σπάνιων γαιών.

5.1 Η «βρώμικα» καθαρή ενέργεια

Σύμφωνα με το τμήμα της κινεζικής κοινότητας σπάνιων γαιών και υλικών το Υπουργείο Βιομηχανίας και Πληροφορικής έως 12.000 κυβικά μέτρα καυσασερίων, 75 κυβικά μέτρα όξινων λυμάτων, καθώς και ένας τόνος υπολειμμάτων ραδιενεργών αποβλήτων και 2.000 τόνοι απορριμμάτων από ορυχεία, που περιέχουν θόριο εκπέμπονται για κάθε τόνο σπάνιων γαιών που παράγονται.

Με τα επίπεδα παραγωγής της Κίνας το 2013, να ανέρχονται σε 100.000 τόνους ραδιενεργών απορριμμάτων και 200 εκατομμυρίων τόνων απορριμμάτων ετησίως, να αποφορτίζονται σε ποτάμι χωρίς καμία επεξεργασία, αυτά δηλητηριάζουν το νερό που χρησιμοποιείται για την άρδευση των αγροτικών εδαφών και έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στη ζωή τόσο των κατοίκων της περιοχής, όσο και στην πανίδα και χλωρίδα. Η εγκατάσταση παραγωγής Baotou για την απόρριψη απορριμμάτων στον Κίτρινο Ποταμό αναφέρθηκε από πολλές ανεξάρτητες κινεζικές πηγές πληροφοριών καθώς και από ξένες εφημερίδες. Η ίδια η Κίνα έχει αναγνωρίσει ότι η εξόρυξη σπάνιων γαιών επιδεινώνει το περιβάλλον.

Στο γενικό πλαίσιο της προστασίας του περιβάλλοντος, η κυβέρνηση έχει θεσπίσει διάφορους νόμους από τη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, ενώ οι περιβαλλοντικές πολιτικές αυξάνονται, δεν αναμένεται να φτάσουν την αυστηρότητα των πολιτικών των αναπτυγμένων χωρών. Άλλα παραδείγματα προληπτικών μέτρων που λαμβάνονται για την αποφυγή της ρύπανσης του περιβάλλοντος που προκαλείται από την εξόρυξη και την επεξεργασία ορυκτών που περιέχουν ραδιενεργά στοιχεία υπάρχουν στις αναπτυγμένες χώρες. Η Γαλλία, κατά την επεξεργασία των σπάνιων γαιών στο εργοστάσιο La Rochelle, αποφάσισε να αλλάξει τις πρώτες ύλες των ζωοτροφών σε χλωριούχες σπάνιες γαίες χωρίς θόριο λόγω ανησυχιών για το ραδιενεργό θόριο ως υποπροϊόν του μοναζίτη (Hedrick 1994). Επιπλέον, η Molycorp στις Ηνωμένες Πολιτείες έκλεισε το 2002 μετά από μια σειρά διαρροών λυμάτων από την έρημο Μοχάβε, τα οποία περιέχουν βαρέα μέταλλα και ραδιενεργά υλικά (Nystrom 2003). Αντίθετα, η Lynas εξορύσσει σπάνιες γαίες στα ορυχεία Mount Weld στην Αυστραλία, αλλά αναθέτει την επεξεργασία των συμπυκνωμάτων σε εξωτερικούς συνεργάτες στο Lynas Advanced Materials Plant (LAMP) στο Kuantan της Μαλαισίας. Εδώ, τα απόβλητα της διαδικασίας απορρίπτονται επίσης, υποτίθεται λόγω των χαμηλότερων περιβαλλοντικών προτύπων της Μαλαισίας. Άλλωστε, αυτό δεν θα ήταν η πρώτη περίπτωση ρύπανσης από εξαγωγές των ανεπτυγμένων χωρών που μετεγκαθιστούν τη βιομηχανική παραγωγή σε αναπτυσσόμενη χώρα.

Ανάλογη περίπτωση είναι η Asia Rare Earth (ARE), της οποίας ο κύριος μέτοχος (Mitsubishi Chemicals) μετέφερε τη βιομηχανία επεξεργασίας σπάνιων γαιών το 1979 από την Ιαπωνία, μια χώρα με αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, στο Bukit Merah της Μαλαισίας. Παρά την εδραιωμένη τεχνογνωσία της στη διαχείριση ραδιενεργών υλικών, τα ραδιενεργά απόβλητα παρέμειναν στη Μαλαισία, ενώ τα προϊόντα μεταφέρθηκαν πίσω στην Ιαπωνία. Η κυβέρνηση αποφάσισε ότι το θόριο έπρεπε να αποθηκευτεί ως πυρηνικό καύσιμο για το μέλλον, παρόλο που το εργοστάσιο λειτουργούσε χωρίς κατάλληλο σύστημα διάθεσης αποβλήτων και χωρίς μόνιμο χώρο υγειονομικής ταφής τα πρώτα χρόνια, και παρατηρήθηκε ότι χρησιμοποιούσε μια αμφίβολη διαδικασία για την εξόρυξη σπάνιων γαιών και ότι παραβίαζε όλα τα πρότυπα ασφαλείας.

5.2 Πρόκληση προβλημάτων υγείας

Η ύπαρξη τεκμηρίων για τις ασθένειες που προκαλούνται από την εξόρυξη σπάνιων γαιών είναι δυσεύρετη. Επί του παρόντος, υπάρχει μόνο μία τεκμηριωμένη περίπτωση, αυτή του Bukit Merah στη Μαλαισία. Σημειώνονται μαρτυρίες κατοίκων, παιδιών και ενηλίκων,

που πάσχουν από λευχαιμία και καρκίνο του εγκεφάλου, καθώς και σε περιπτώσεις νεογνών με συγγενή ελαττώματα και σε μητέρες που πάσχουν από υψηλότερα ποσοστά αποβολών. Η κατάσταση της υγείας τους έχει επίσης τεκμηριωθεί επιστημονικά από τον Bertell (1993), ο οποίος συνέκρινε την μονοκυτταρική κατάθλιψη μεταξύ των πληθυσμών παιδιών που εκτίθενται σε ραδιονουκλεΐδια που αναζητούν οστά. Παιδιά από το Bukit Merah αποτελούν ένα από τα δείγματα που εκτέθηκαν σε υδροξείδιο του θορίου και θεικό μόλυβδο, απόβλητα από την ARE και συγκρίθηκαν με ένα δείγμα παιδιών από το νησί Carey - εκτεθειμένα σε εκροές φοινικέλαιου, φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων, αλλά όχι ραδιενεργά αέρια.

Από τις δύο περιόδους δοκιμής το 1987 και το 1988, η μελέτη καταλήγει σε μια μετατόπιση προς ένα χαμηλότερο αριθμό μονοπύρηνων κυττάρων για τα παιδιά με μεγαλύτερη έκθεση, με περισσότερα από τα μισά παιδιά που εξετάστηκαν στη δεύτερη περίοδο να έχουν μετρήσεις κάτω από το φυσιολογικό εύρος. Αντίθετα, τα παιδιά από το νησί Carey, αν και είχαν παρόμοιο κοινωνικοοικονομικό υπόβαθρο, δεν παρουσίασαν σημαντικές αλλαγές.

Η μελέτη αυτή επιβεβαίωσε ότι τα αυξημένα επίπεδα μολύβδου στο αίμα των παιδιών από το Bukit Merah αποδίδονται στο εργοστάσιο ARE, καθώς ο μόλυβδος είναι δείκτης του υδροξειδίου του θορίου που βρίσκεται στο αίμα. Πράγματι, η ARE εξήγαγε σπάνιες γαίες από τον μοναζίτη, ο οποίος είναι γνωστό ότι περιέχει ραδιονουκλίδια της σειράς διάσπασης ουρανίου και θορίου, καθώς και μόλυβδο. Αυτά απελευθερώνονται από τα ορυκτά όταν θρυμματίζονται, αλέθονται και αποσυντίθενται σε ραδιενεργό ραδόνιο που μεταφέρεται στον αέρα μέσω της σκόνης.

Επιπλέον, μετά από τον διαχωρισμό των χλωριδίων των σπάνιων γαιών από τον μοναζίτη, η λάσπη από το υδροξείδιο του θορίου αφήνεται πλέον πίσω. Αυτό με τη σειρά του παράγει ακτινοβολία άλφα, στην οποία όταν εκτίθεται ανθρώπινος οργανισμός σε αυτή προκαλεί καρκίνο (Bertell 1993). Είναι γνωστό ότι η ακτινοβολία μειώνει τα λευκά αιμοσφαίρια στο μυελό των οστών και έτσι καταστρέφει το ανοσοποιητικό σύστημα που μειώνει την αντίσταση στις ασθένειες, δηλαδή το ανοσοποιητικό σύστημα. Λαμβάνοντας υπόψη τα Μαλαισιανά στατιστικά για τη λευχαιμία το 1986, με 3 περιπτώσεις που διαγνώστηκαν σε 6 μήνες, η συχνότητα εμφάνισης στην περιοχή του Bukit Meran ήταν περίπου 180 φορές υψηλότερη από τη συχνότητα εμφάνισης σε ολόκληρη τη Μαλαισία.

6. ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

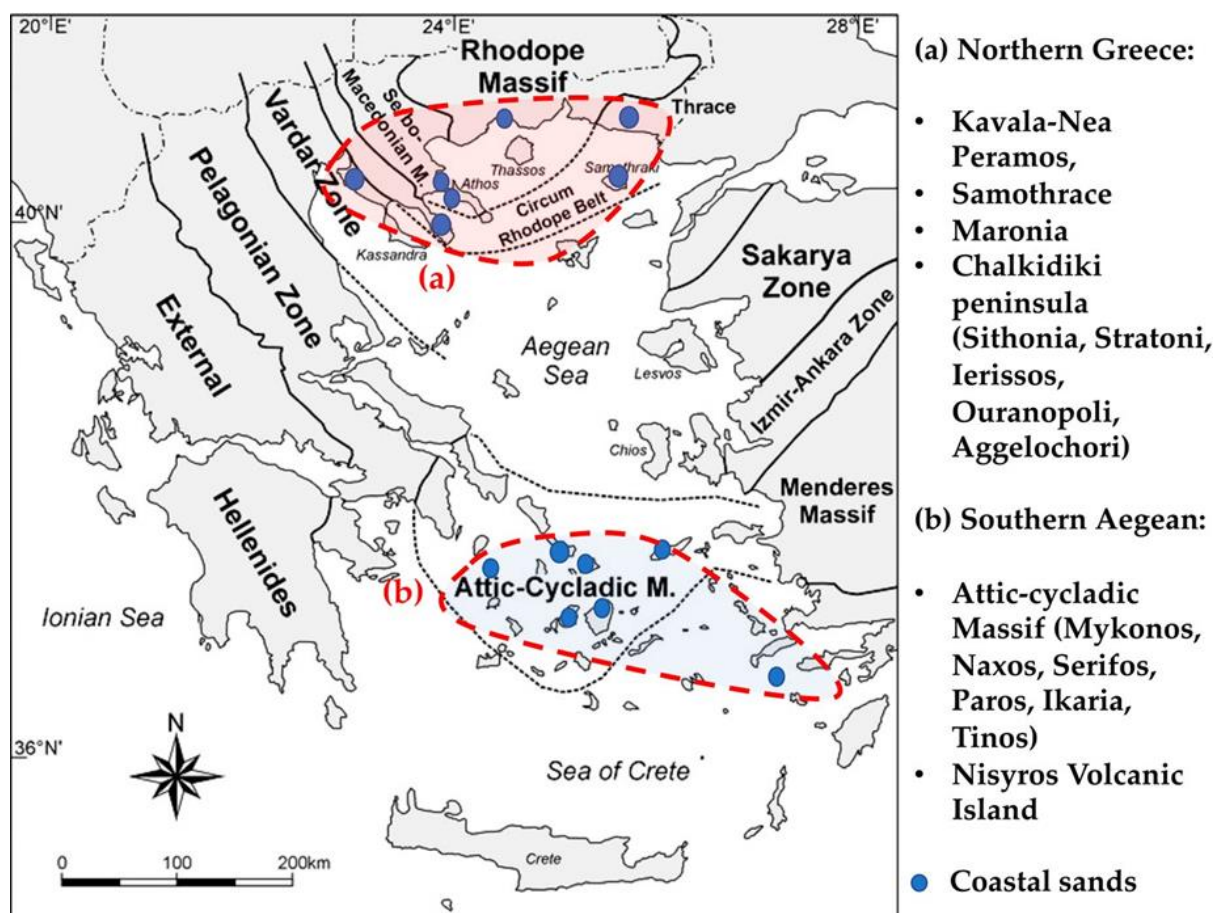
Σύμφωνα με τους Μέλφος και Βουδούρης (2012), Παπαδόπουλος κ.ά. (2019) και Τζίφας κ.ά. (2019), η Ελλάδα αναγνωρίζεται ως μία από τις σημαντικότερες μεταλλογενετικές επαρχίες στην Ευρωπαϊκή Ένωση, στην οποία εμφανίζεται σημαντικός αριθμός κοιτασμάτων ορυκτών που μπορούν να προσφέρουν μεγάλο ποσοστό ορυκτού πλούτου, που περιλαμβάνει και κρίσιμα μέταλλα. Οι εμφανίσεις σπάνιων γαιών (REE) στον Ελλαδικό χώρο μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες. Αρχικά, οι πρωτογενείς τύποι που σχετίζονται με γενικές μαγματικές διεργασίες ή τη δράση υδροθερμικών ρευστών και έπειτα, οι δευτερογενείς τύποι, όπου μια δευτερογενής συγκέντρωση REEs εμφανίζεται μετά από πρωτογενή εμπλουτισμό μέσω είτε των ιζηματογενών διεργασιών, είτε της αποσάθρωσης (Ηλιόπουλος κ.ά.. 2014, Καλαθά 2017).

Οι πρωτογενείς τύποι περιλαμβάνουν πορφυρικά, επιθερμικά κοιτάσματα και κοιτάσματα που σχετίζονται με τη διείσδυση των μεταλλογενετικών επαρχιών στην Ροδόπη και στην Σερβομακεδονική, εφόσον μπορούν να αποτελέσουν σημαντικές πηγές για εκμετάλλευση Sb (αντιμόνιου), Te (τελλούριου), Mo (μολυβδαίνιου), Re (ρήνιου), Ga (γάλλιου), In (ίνδιου), REE και PGE («Platinum Group Elements», στοιχεία της ομάδας του λευκόχρυσου). Ειδικότερα, το κοιτάσμα Pb-Zn-Cu στους γρανίτες της Πλάκας Λαυρίου, με 428 ppm La και 976 ppm Ce, και το πορφυρικό κοιτάσμα Cu-Au στη Βάθη του Κιλκίς, με 500 ppm La και 715 ppm Ce κρίνεται ότι έχουν ιδιαίτερη σημασία για εξόρυξη REE ως υποπροϊόντα στο μέλλον.

Οι δευτερογενείς τύποι περιλαμβάνουν τα κοιτάσματα βωξίτη και λατερίτη που βρίσκονται στις βόρειες και κεντρικές περιοχές της Ελλάδας. Τα κοιτάσματα αυτά έχουν ήδη υποβληθεί σε εκμετάλλευση Al και Ni, καθιστώντας την Ελλάδα ως τον κορυφαίο παραγωγό αλουμινίου και νικελίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Εκτός από την περιεκτικότητά τους σε Al και Ni, τα κοιτάσματα αυτά περιέχουν επίσης κοβάλτιο (Co) και σπάνιες γαίες (REE), με σημαντικές συγκεντρώσεις που θα μπορούσαν ενδεχομένως να προσελκύσουν το ενδιαφέρον της βιομηχανίας για μελλοντική εκμετάλλευση. Για παράδειγμα, το κοιτάσμα βωξίτη στον Παρνασσό έχει τη δυνατότητα εξόρυξης REE ως υποπροϊόν. (Μέλφος και Βουδούρης 2012, Καλαθά 2017, <https://www.oryktosploutos.net.pdf>).

Η βόρεια περιοχή της Ελλάδας φιλοξενεί πολύτιμα κοιτάσματα ορυκτών όχι μόνο στην ξηρά αλλά και σε παράκτιες και υποθαλάσσιες ζώνες. Τα κοιτάσματα αυτά βρίσκονται σε

περιοχές όπως η Χαλκιδική, η Καβάλα, η Μαρώνεια και αρκετά νησιά του νότιου Αιγαίου, δηλαδή η Μύκονος, η Σέριφος, η Νάξος και η Νίσυρος. Η παρουσία σημαντικών ποσοτήτων ορυκτών σε αυτές τις περιοχές θα μπορούσε ενδεχομένως να προσελκύσει βιομηχανικό ενδιαφέρον για τη μελλοντική εκμετάλλευσή τους (Papadopoulos et al. 2019, Lazaridis et al. 2019).



Σχήμα 6.1: Χάρτης με τις σημαντικότερες εμφανίσεις REE σε παράκτιες αποθέσεις (Papadopoulos et al. 2019)

7. ΤΑ ΤΡΙΑ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Η ζήτηση για τις σπάνιες γαίες αυξάνεται ραγδαία, καθιστώντας τα ένα πολύτιμο αγαθό. Οπότε σε αυτό το σημείο θεωρώ σημαντικό να αναφέρω λίγα λόγια σχετικά με τα τρία μεγαλύτερα κοιτάσματα στον κόσμο, σαν έναν επίλογο. Τα μεγαλύτερα γνωστά κοιτάσματα REE βρίσκονται στην Κίνα, την Αυστραλία και τη Ρωσία, θα ρίξουμε μια πιο προσεκτική ματιά σε καθεμία από αυτές τις χώρες και τη σημασία τους στην αγορά REE.

➤ Κίνα: Η Κίνα είναι ο κυρίαρχος παίκτης στην αγορά REE για δεκαετίες, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 70% της παγκόσμιας παραγωγής REE. Η πλειοψηφία των κινεζικών κοιτασμάτων REE βρίσκεται στη νότια επαρχία Jiangxi, όπου λειτουργούν πολλά μεγάλα ορυχεία REE. Η αφθονία των REE της χώρας, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος εργατικό δυναμικό της και την καθιερωμένη αλυσίδα εφοδιασμού, της επέτρεψαν να κυριαρχήσει στην παγκόσμια αγορά REE. Ωστόσο, το μονοπώλιο της Κίνας στα REE έχει προκαλέσει ανησυχίες μεταξύ άλλων χωρών, γεγονός που οδήγησε σε προσπάθειες για διαφοροποίηση της αλυσίδας εφοδιασμού και μείωση της εξάρτησης από κινεζικές REE. Για την Κίνα δεν θα αναφερθώ παραπάνω γιατί ήδη έχω αναφερθεί αρκετά.

➤ Αυστραλία: Η Αυστραλία είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός REE, με αρκετά σημαντικά κοιτάσματα που βρίσκονται στη Δυτική Αυστραλία. Η Αυστραλία φιλοξενεί πολλά σημαντικά κοιτάσματα σπάνιων γαιών (REEs) και είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός REE παγκοσμίως. Η πλειοψηφία των αυστραλιανών κοιτασμάτων REE βρίσκονται στη Δυτική Αυστραλία και περιλαμβάνουν το ορυχείο Mount Weld και το ορυχείο Nolans Bore. Το ορυχείο Mount Weld είναι το μεγαλύτερο ορυχείο REE στην Αυστραλία και ένα από τα μεγαλύτερα ορυχεία REE στον κόσμο. Παράγει μια ποικιλία από REE, όπως νεοδύμιο, πρασεοδύμιο και δυσπρόσιο, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών υψηλής τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένων των smartphone, των ανεμογεννητριών και των ηλεκτρικών οχημάτων. Το ορυχείο Nolans Bore είναι ένα νέο έργο REE στην Αυστραλία και αναμένεται να γίνει ένα από τα μεγαλύτερα ορυχεία REE στον κόσμο. Εκτός από αυτά τα ορυχεία REE, υπάρχουν πολλά άλλα έργα REE σε εξέλιξη στην Αυστραλία, συμπεριλαμβανομένου του έργου Browns Range και του έργου Dubbo. Αυτά τα έργα στοχεύουν στην ανάπτυξη της βιομηχανίας REE της Αυστραλίας και στην αύξηση της παραγωγής REE στη χώρα. Η αυστραλιανή κυβέρνηση έχει αναγνωρίσει τη στρατηγική

σημασία των REE και προωθεί την ανάπτυξη της βιομηχανίας REE της χώρας. Η κυβέρνηση έχει εφαρμόσει μια σειρά από πρωτοβουλίες που στοχεύουν στην προσέλκυση επενδύσεων στον τομέα των ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένων φορολογικών κινήτρων και επιχορηγήσεων.

Συμπερασματικά, η Αυστραλία φιλοξενεί πολλά σημαντικά κοιτάσματα REE και είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός REE παγκοσμίως. Ο κλάδος των REE της χώρας αναπτύσσεται, με αρκετά νέα έργα σε εξέλιξη με στόχο την αύξηση της παραγωγής και τη διαφοροποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ανάπτυξη της βιομηχανίας REE στην Αυστραλία θα είναι σημαντική για τη διασφάλιση μιας σταθερής και αξιόπιστης αλυσίδας εφοδιασμού για αυτά τα κρίσιμα στοιχεία.

➤ Ρωσία: Η Ρωσία είναι ένας σημαντικός παραγωγός REE, με πολλά μεγάλα κοιτάσματα που βρίσκονται στην περιοχή της Άπω Ανατολής της χώρας. Η χώρα έχει επενδύσει στην ανάπτυξη της βιομηχανίας REE, με αρκετά νέα έργα σε εξέλιξη. Το μεγαλύτερο ορυχείο REE στη Ρωσία είναι το ορυχείο Lonozero, το οποίο παράγει μια ποικιλία REE, συμπεριλαμβανομένων δημητρίου, ευρωπίου και τερβίου. Η ρωσική κυβέρνηση έχει αναγνωρίσει τη στρατηγική σημασία των REE και προωθεί την ανάπτυξη της βιομηχανίας REE. Ένα άλλο σημαντικό κοιτάσμα REE στη Ρωσία είναι το κοιτάσμα Semenovskiy στην περιοχή Krasnoyarsk, το οποίο πιστεύεται ότι περιέχει μεγάλη ποσότητα δημητρίου, λανθανίου και νεοδυμίου. Επιπλέον, υπάρχουν πολλά άλλα κοιτάσματα REE στη Ρωσία που αναπτύσσονται ή εξερευνούνται, συμπεριλαμβανομένου του κοιτάσματος Bystrinskoye στην περιοχή του Ιρκούτσκ και της Μαγνητικής ανωμαλίας Kursk στην περιοχή Belgorod. Παρά τους σημαντικούς πόρους REE της, η Ρωσία υπήρξε δευτερεύων παίκτης στην παγκόσμια αγορά REE, αντιπροσωπεύοντας μόνο ένα μικρό κλάσμα της παγκόσμιας παραγωγής REE. Ωστόσο, η χώρα επενδύει στην ανάπτυξη της βιομηχανίας REE, αναγνωρίζοντας τη στρατηγική σημασία αυτών των στοιχείων στην παγκόσμια αγορά. Η ρωσική κυβέρνηση προωθεί την ανάπτυξη της βιομηχανίας REE και αρκετά νέα έργα REE βρίσκονται σε εξέλιξη.

Συμπερασματικά, η αγορά REE κυριαρχείται από την Κίνα, την Αυστραλία και τη Ρωσία, με αυτές τις χώρες να αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία της παγκόσμιας παραγωγής REE. Η ανάπτυξη της βιομηχανίας REE έχει σημαντικές επιπτώσεις στην παγκόσμια οικονομία και έχει οδηγήσει σε αυξημένες επενδύσεις για την ανάπτυξη καταθέσεων REE σε άλλες χώρες. Η διαθεσιμότητα και η ποικιλία των πηγών REE θα είναι σημαντική για τη διασφάλιση μιας σταθερής και αξιόπιστης αλυσίδας εφοδιασμού για αυτά τα κρίσιμα στοιχεία.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καταλήγοντας στο τέλος αυτής της εργασίας προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν να αποσαφηνίσει τις εκτεταμένες συνέπειες των ανισορροπιών ζήτησης - προσφοράς σπάνιων γαιών λόγω της καινοτομίας τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Παρείχε μια διεξοδική επισκόπηση των δυνάμεων της αγοράς που υπάρχουν, διερευνώντας τις κύριες κινητήριες δυνάμεις της ζήτησης και της προσφοράς, καθώς και τις βιομηχανικές πολιτικές που επηρεάζουν την αγορά σπάνιων γαιών. Επιπλέον, η εργασία ερευνήσε το ιδιωτικό και κοινωνικό κόστος για τη χρήση σπάνιων γαιών σε τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα αλλά και αναθεωρημένες στρατηγικές μετριασμού που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στη μείωση της εξάρτησης από τις σπάνιες γαίες για το μέλλον.

Όσον αφορά την προσφορά, διαφαίνεται ότι αυτή βρίσκεται σε δυσμενή κατάσταση, λόγω της φυσικής έλλειψης. Αυτό προκύπτει από τη θεσμική αναποτελεσματικότητα εντός της αγοράς. Η Κίνα είναι σήμερα ο μεγαλύτερος παγκόσμιος παραγωγός με μερίδιο αγοράς 89% και διαθέτει επίσης τα μεγαλύτερα αποθέματα σπάνιων γαιών. Ωστόσο, σε αντίθεση κατά την κοινή πεποίθηση, η συγκέντρωση αυτή καθαυτή δεν είναι ο κύριος μοχλός της διακοπής του εφοδιασμού. Αντίθετα, είναι η κατάχρηση της ισχύος στην αγορά από την Κίνα ως πολιτικό μέσο για την επίτευξη των οικονομικών στόχων της. Στην πραγματικότητα, η Κίνα κατέχει το μονοπώλιο στις σπάνιες γαίες τα τελευταία 30 χρόνια, αλλά πρόσφατα ξεκίνησε να περιορίζει σημαντικά την προσφορά τους. Με βάση τους εθνικούς πόρους της, η Κίνα εισήγαγε διάφορες βιομηχανικές πολιτικές για να ικανοποιήσει τις δικές της ανάγκες για σπάνιες γαίες για μεταποίηση προϊόντων υψηλότερης προστιθέμενης αξίας. Περιορισμοί όπως η εισαγωγή των ποσοστώσεων παραγωγής και εξαγωγών, καθώς και η απαγόρευση δραστηριοποίησης ξένων εταιρειών στην αλυσίδα εφοδιασμού εντός της Κίνας, εμποδίζουν την προσφορά σπάνιων γαιών στην παγκόσμια αγορά. Οι ποσοστώσεις εξαγωγής και παραγωγής έχουν φθίνουσα τάση συνεχώς.

Αναφορικά με τις πιθανές επιπτώσεις των ποσοστώσεων παραγωγής και των περιορισμών των εξαγωγών στην παγκόσμια προσφορά σπάνιων γαιών (HREE), θεωρείται πως ενώ η τρέχουσα κατάσταση μπορεί να είναι προσωρινή, η μείωση των ποσοστώσεων παραγωγής θα οδηγήσει τελικά σε αυστηρότερα διεθνή και κινεζικά μέτρα εφοδιασμού. Στην πραγματικότητα, κύρια απειλή για τη σταθερότητα αποτελούν οι περιορισμοί στην παραγωγή και τις εξαγωγές HREE και όχι οι σωρευτικές ποσοστώσεις.

Επιπλέον, αυτές οι προστατευτικές πολιτικές, μαζί με άλλα μέτρα διακοπής της προσφοράς, όπως τα εθνικά συστήματα τιμολόγησης και οι πρακτικές διπλής τιμολόγησης, εξυπηρετούν την προώθηση των εθνικών συμφερόντων της Κίνας για βιομηχανική αναβάθμιση, ενώ παράλληλα δυσχεραίνουν την παγκόσμια αγορά. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε τις πιθανές συνέπειες αυτών των πολιτικών και τον αντίκτυπό τους στις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού και τις εμπορικές σχέσεις.

Ο υπόλοιπος κόσμος απάντησε σε αυτά τα απειλητικά μέτρα με διαφοροποίηση της προσφοράς. Μακροπρόθεσμα, το άνοιγμα νέων ορυχείων θα εξασφαλίσει νέα προσφορά σπάνιων γαιών. Ωστόσο, λόγω διαφόρων πολιτικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών εμποδίων, τα περισσότερα από αυτά τα ορυχεία αναμένεται να ξεκινήσουν την παραγωγή με καθυστέρηση έως και 10 ετών. Αν και τα συνολικά αποθέματα σπάνιων γαιών φαίνεται να κατανέμονται ομοιόμορφα παγκοσμίως, το 80% των ηπειρωτικών κοιτασμάτων HREE είναι συγκεντρωμένα στις ιοντικές αργίλους της Κίνας. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν οι μη κινεζικές σπάνιες γαίες καταφέρουν να ισορροπήσουν την προσφορά LREE, το HREE θα παραμείνει ένα κρίσιμο ζήτημα. Από αυτή την άποψη, η εξόρυξη από τον βυθό του Ειρηνικού Ωκεανού θα μπορούσε να αποτελέσει μια μακροπρόθεσμη εναλλακτική λύση, αλλά ταυτόχρονα θα αποτελούσε και μια πηγή γεωπολιτικών εντάσεων στην Ανατολική Ασία.

Στις βραχυπρόθεσμες στρατηγικές για την εξεύρεση νέων πηγών σπάνιων γαιών υπάρχουν περιορισμένες επιλογές που περιλαμβάνουν διαπραγματεύσεις με άλλες χώρες ή τη δημιουργία συμπράξεων μεταξύ διαφόρων εταιρειών στην αλυσίδα εφοδιασμού. Ενώ αυτές θα μπορούσαν να επιλύσουν πιθανές βραχυπρόθεσμες ελλείψεις εφοδιασμού LREE, δεν υπάρχουν άμεσες εναλλακτικές λύσεις για τον μετριασμό των διαταραχών του εφοδιασμού HREE εκτός Κίνας. Συνεπώς, η μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία και οι αυξημένες προσπάθειες ανακύκλωσης θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια πιο βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση του ζητήματος της προσφοράς σπάνιων γαιών. Αυτό θα συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης από τα πρόσφατα εξορυγμένα στοιχεία σπάνιων γαιών, τα οποία είναι περιορισμένα σε διαθεσιμότητα, και αντ' αυτού θα στηριχθεί σε υλικά που έχουν ήδη εξορυχθεί και χρησιμοποιηθεί.

"The Ames Laboratory to Lead New Research Effort to Address Shortages of Critical Materials," Accessed 29-4-2013, [ames-laboratory-lead-new-research-effort-address-shortages-critical-materials](#).

Abaka-Wood, G. B., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2016). Review of flotation and physical separation of rare earth element minerals. In 4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference, MR (pp. 55-62).

Alonso, E.; Sherman, A.M.; Wallington, T.J.; Everson, M.P.; Field, F.R.; Roth, R.; Kirchain, R.E. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environ. Sci. Technol.* 2012, 46, 3406–3414. [CrossRef] [PubMed]

Anderson, C. D. (2014). Fundamentals of rare earth flotation surface chemistry: Electrokinetic phenomena. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 31(3), 176-176.

Balaram, Recent advances in the determination of elemental impurities in pharmaceuticals – Status, challenges and moving frontiers, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Volume 80, 2016, Pages 83-95, ISSN 0165-9936, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.02.001>.

Barteková, Eva. (2014). An Introduction to the Economics of Rare Earths. Available from https://www.researchgate.net/publication/279514600_An_Introduction_to_the_Economics_of_Rare_Earths/figures?lo=1. Accessed: 12-10-2022

Bertell 1993, *Dialectical Investigations*

Bitsche, Gutmann, Schmolz, d'Ussel, DaimlerChrysler EPIC Minivan powered by lithium-ion batteries, in: *Proceedings of the evs-18, Electric Vehicle Symposium*, Berlin, Germany, 20–24 October 2001.

Bogart JA, Lippincott CA, Carroll PJ, Schelter EJ (2015) An Operationally Simple Method for Separating the Rare-Earth Elements Neodymium and Dysprosium. *Angew Chem Int Ed* 54:8222–8225. Available from <https://doi.org/10.1002/anie.201501659>

Borisavljevic, A., Polinder, H., & Ferreira, J. A. (2011). Calculation of unbalanced magnetic force in slotless PM machines. In *Proceedings of the Electrimacs 2011*, 6-8 June 2011, Paris, France (pp. 1-6).

Caro P (1998) Rare earths in luminescence. In: Saez R, Caro P (eds) *Rare Earths*. Editorial Complutense, SA, pp 323–325

Chakhmouradian and Wall 2012, *Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More)*

- De Decker, J. (2017). Functionalized metal-organic frameworks as selective metal adsorbents (Doctoral dissertation, Ghent University).
- DeWitt, E., Kwak, L.M., and Zartman, R.E., 1987, U-Th-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Mountain Pass carbonatite and alkalic igneous rocks, S.E. Cal. [abs.]: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 19, p. 642.
- Diatloff, F.W. Smith & C. J. Asher (1995) Rare earth elements and plant growth: III. Responses of corn and mungbean to low concentrations of cerium in dilute, continuously flowing nutrient solutions., *Journal of Plant Nutrition*, 18:10, 1991-2003, DOI: 10.1080/01904169509365039
- Fu, F., Akagi, T., Yabuki, S. et al. The variation of REE (rare earth elements) patterns in soil-grown plants: a new proxy for the source of rare earth elements and silicon in plants. *Plant and Soil* 235, 53–64 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1011837326556>
- Guo et al., B.S. Guo, W.M. Zhu, P.K. Xiong, Y.J. Ji, Z. Liu, Z.M. Wu, 1988, Rare Earths in Agriculture, Agricultural Scientific Technological Press, Beijing, China, pp. 23-208
- Haxel et al. 2002, The speciation of rare earth elements on kaolinite at basic pH
- Hayes-Labruto, Leslie & Schillebeeckx, Simon & Workman, Mark & Shah, Nilay. (2013). Contrasting perspectives on China's rare earths policies: Reframing the debate through a stakeholder lens. *Energy Policy*. 63. 55–68. 10.1016/j.enpol.2013.07.121.
- Hedrick, J.B. (1994). Thorium. Available from <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/thorium/690494.pdf>. Accessed: 01-03-2014.
- Henderson, P. A. U. L. (1984). General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. In *Developments in geochemistry* (Vol. 2, pp. 1-32). Elsevier.
- Henriksen, M. (2011). Feasibility study of induction generators in direct-drive wind turbines. Master's thesis, Technical University of Denmark. Accessed: 13-03-2014.
- Hitachi Ltd (2012). Highly efficient industrial 11kW permanent magnet synchronous motor without rare-earth metals. Available from <http://www.hitachi.com/New/cnews/120411.html>. Accessed: 13-03-2014.
- Honda Motor Co. Ltd (2013). Honda established world's first process to reuse rare earth metals extracted from nickel-metal hydride batteries for hybrid vehicles. Available from <http://www.hondanews.info/news/en/corporate/c130303eng>. Accessed: 04-03-2014.
- Hu, A.H.; Kuo, C.H.; Huang, L.H.; Su, C.C. Carbon footprint assessment of recycling technologies for rare earth elements: A case study of recycling yttrium and europium from phosphor. *Waste Manag.* 2017, 60, 765–774. [CrossRef] [PubMed]

JPH_Article_Vol26_No2_2014 The U.S. Rare Earth Industry: Its Growth and Decline

Krishnamurthy, N., & Gupta, C. K. (2015). *Extractive metallurgy of rare earths*. CRC press.

Lazaridis, S., Kipourou-Panagiotou, A., Papadopoulos, A., Kantiranis, N., Koroneos, A., & Albanakis, K. (2019). Rare Earth Elements In The Black Sands From Coastal Cliffs Sedimentary Deposits, of Aggelochori Area (No. 861).

LCA-Based_Carbon_Footprint_Accounting_of_Mixed_Rar

Lee, J.C.K.;Wen, Z.G. Pathways for greening the supply of rare earth elements in China. *Nat. Sustain.* 2018, 1, 598–605. [CrossRef]

Lide, D. R. (Ed.). (2004). *CRC handbook of chemistry and physics* (Vol. 85), p. 4-17 CRC press.

Lin, S.-L., Hwang, C.-S., 1996. Structures of $\text{CeO}^2\text{--Al}^2\text{O}^3\text{--SiO}^2$ glasses. *J. Non-Cryst. Solids* 202, 61–67.

McCallum, R. W. (2012). Replacing critical rare earth materials in high energy density magnets. *Bulletin of the American Physical Society*, 57.

McLennan, S. M., & Ross Taylor, S. (2011). *Geology, Geochemistry and Natural Abundances*. Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry.

Melfos, V., & Voudouris, P. C. (2012). Geological, mineralogical and geochemical aspects for critical and rare metals in Greece. *Minerals*, 2(4), 300-317.

Molycorp, Inc., 2012, Molycorp's rare earth reserves at Mountain Pass increase by 36%: Molycorp Press Release, April 9, 2012.

Nguyen, R.T., Diaz, L.A., Imholte, D.D. et al. Economic Assessment for Recycling Critical Metals From Hard Disk Drives Using a Comprehensive Recovery Process. *JOM* 69, 1546–1552 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2399-2>

Papadopoulos, A., Tzifas, I. T., & Tsikos, H. (2019). The potential for REE and associated critical metals in coastal sand (placer) deposits of Greece: A review. *Minerals*, 9(8), 469.

Redling, Kerstin (2006): *Rare Earth Elements in Agriculture with Emphasis on Animal Husbandry*. Dissertation, LMU München: Tierärztliche Fakultät

Thomas, Carpenter, Boutin, Allison, Rare earth elements (REEs): Effects on germination and growth of selected crop and native plant species, *Chemosphere*, Volume 96, 2014, Pages 57-66, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.020>

Tzifas, I. T., Papadopoulos, A., Misaelides, P., Godelitsas, A., Göttlicher, J., Tsikos, H. & Hatzidimitriou, A. (2019). New insights into mineralogy and geochemistry of allanite-

bearing Mediterranean coastal sands from Northern Greece. *Geochemistry*, 79(2), 247-267.

Van Gosen, B. S., Verplanck, P. L., Seal II, R. R., Long, K. R., & Gambogi, J. (2017). *Rare-earth elements* (No. 1802-O). US Geological Survey.

Voncken 2016, The Rare Earth Elements—A Special Group of Metals

Wakabayashi, T., Yamamoto, A., Kazaana, A. et al. Antibacterial, Antifungal and Nematicidal Activities of Rare Earth Ions. *Biol Trace Elem Res* 174, 464–470 (2016).
<https://doi.org/10.1007/s12011-016-0727-y>

Zaitsev, V., and Kogarko, L. N., 2012, Sources and perspective of REE in the Lovozero massif (Kola Peninsula, Russia): European Mineralogical Conference 2012, Frankfurt, Germany, v. 1, p. 290.

Zhang J, Cheng H, Gao Q, Zhang Z, Liu Q. [Effect of lanthanum on growth and biochemical property of *Sclerotinia sclerotiorum*]. *Ying Yong Sheng tai xue bao* = The Journal of Applied Ecology. 2000 Jun;11(3):382-384. PMID: 11767637.

Zhang, H., Feng, J., Zhu, W. et al. Bacteriostatic effects of cerium-humic acid complex. *Biol Trace Elem Res* 73, 29–36 (2000). <https://doi.org/10.1385/BTER:73:1:29>

Καλαθά, Σ. 2017. Μεταλλογενετικές διεργασίες που συνδέονται με τον σχηματισμό βωξιτικών λατεριτών και Ni–λατεριτών: εμπλουτισμός σπανίων γαιών (Doctoral dissertation, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Τομέας Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας).

Μέλφος, Β. 2020, Οι σπάνιες γαίες και η γεωπολιτική θέση της Ελλάδας, Ελληνικό πανόραμα, ΕΠ 124 <https://www.elliniko-panorama.gr>

Διαδικτυακές πηγές

<https://www.oryktosploutos.net/2021/04/rare-earth-metals-production-is-no-longer-monopolized-by-china/>

<https://www.ameslab.gov/news/news-releases/>

<https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information>