

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

UNIVERSITY OF THESSALY  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ  
ΣΤΗΝ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ**



Προπτυχιακός φοιτητής : ΑΝΥΦΑΝΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής : ΚΕΡΑΜΑΡΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2021

## ΔΗΛΩΣΗ

Βεβαιώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και ότι στο πλαίσιο αυτού έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφίες, κ.λ.π., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε κανονισμοί του Π.Θ. και του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών.

Ημερομηνία: 05/03/2021

Ανυφαντάκης Γεώργιος

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Σπάνιες γαίες και εφαρμογές στην σύγχρονη οικονομία», εκπονήθηκε από τον προπτυχιακό φοιτητή Ανυφαντάκη Γεώργιο στο πλαίσιο των υποχρεώσεων του για το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-2021.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της πτυχιακής μου εργασίας, τον καθηγητή κ. Κεραμάρη Ευάγγελο για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση του για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής. Οφείλω ακόμη ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή κ. Καρακασίδη Θεόδωρο για τις υποδείξεις του, που συνέβαλαν καθοριστικά για την συγγραφή και ολοκλήρωση της πτυχιακής. Επίσης, εκφράζω τις ευχαριστίες μου και στον καθηγητή κ. Κανακούδη Βασίλειο για την ανάγνωση, τα εποικοδομητικά σχόλια και τις πολύ χρήσιμες παρατηρήσεις.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για την συμπαράσταση που μου παρείχε με κάθε τρόπο σε όλη την διάρκεια της φοιτητικής μου διαδρομής, και στους φίλους και συμφοιτητές που με στήριξαν σε κάθε προσπάθεια όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια εκτενής μελέτη για τα μέταλλα σπάνιων γαιών που έχουν διεισδύσει δυναμικά τα τελευταία χρόνια στις νέες τεχνολογίες και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στόχος αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει αυτές τις βιταμίνες της τεχνολογίας και να παραθέσει τις μοναδικές τους ιδιότητες, που τις καθιστούν απαραίτητα υλικά για τις περισσότερες τεχνολογίες. Αρχικά, δίνονται σημαντικά στατιστικά και οικονομικά στοιχεία για τη ραγδαία αύξηση της χρήσης αυτών των μετάλλων και εκτιμάται το παγκόσμιο απόθεμα. Συνάμα, τονίζεται η κυριαρχία της Κίνας στο εμπόριο σπάνιας γης, ενώ παράλληλα περιγράφονται οι διαδικασίες εξόρυξης και επεξεργασίας των ορυκτών που περιέχουν σπάνιες γαίες. Οι διαδικασίες αυτές ωστόσο διατρέχουν σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους και για αυτό η τήρηση της νομοθεσίας είναι επιτακτική. Επιπλέον, λόγω του περιορισμένου αποθέματος τους και του υψηλού βαθμού δυσκολίας για την παραγωγή μεμονωμένων στοιχείων, εξετάζεται η ανάκτηση τους μέσω ανακύκλωσης από χρησιμοποιημένες συσκευές. Τέλος, δίνεται έμφαση στις εφαρμογές αυτών των στοιχείων σε σύγχρονες και οικολογικές τεχνολογίες για την αξιοποίηση ενέργειας, καθώς και στην επίδραση που έχουν αυτά τα μέταλλα σε μερικούς ακόμα κλάδους της οικονομίας.

## **ABSTRACT**

In this bibliography an extensive study is being done on the metals of the rare earths that have penetrated dynamically in new technologies and renewable energy sources in recent years. The aim of this paper is to present these vitamins of technology and to list their unique properties that make them essential materials for most technologies. Initially, an estimate for the total world stock and important statistical and economic data are given for the rapid increase in the use of these metals. Furthermore, China's dominance in the market and trade of rare earth is emphasized, while the processes of extraction and processing of minerals containing rare earths are described. These processes, however, present serious environmental risks and therefore compliance with legislation is imperative. In addition, due to the limited stock and the complexity for the production of individual components, their recovery through recycling from used devices is being considered. Finally, the applications of these elements in modern and ecological technologies for the utilization of energy are being described, as well as the impact that these metals have in a few more sectors of the economy.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT .....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	10
ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ.....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	16
1.1 ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	16
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	18
1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΙΣΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	20
1.4 ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	21
1.5 ΟΡΥΚΤΑ-ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΑΠΟΘΕΜΑ & ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	30
2.1 : ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ.....	30
2.2 : ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	34
2.3 : ΜΕΡΙΔΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	37
2.4 : ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΙΜΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ.....	39
2.4.1 : ΤΙΜΕΣ ΟΡΥΚΤΩΝ .....	39
2.4.2 : ΤΙΜΕΣ ΕΛΑΦΡΙΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	40
2.4.3 : ΤΙΜΕΣ ΒΑΡΕΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	41
2.5 : Η ΚΥΡΙΑΡΧΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΑΣ ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ.....	47
3.1 : ΕΞΟΡΥΞΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΩΦΕΛΙΜΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	47
3.2 : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΑΤΟΣ .....	48
3.3 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΗΞΗΣ .....	49
3.4 : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ .....	50
3.4.1 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ .....	51
3.4.2 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΙΟΝΤΩΝ .....	51
3.4.3 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΧΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΛΥΤΗ .....	51
3.5 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ/ΕΞΑΓΝΙΣΜΟΥ .....	53
3.5.1 : ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΛΙΩΜΕΝΟΥ ΑΛΑΤΟΣ .....	53

3.5.2 : ΜΕΙΩΣΗ ΚΕΝΟΥ .....	53
3.6 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	55
4.1 : ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ REs ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ .....	55
4.2 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΜΟΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ REs.....	59
4.3 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΠΡΑΣΙΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	67
4.3.1 : ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ .....	68
4.3.2 : ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ .....	70
4.3.3 : ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ.....	71
4.4 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ .....	73
4.4.1 ΑΥΞΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ .....	81
4.5 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΥΣ ΤΟΜΕΙΣ.....	84
4.5.1 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ REEs ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ.....	84
4.5.2 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ REEs ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ .....	85
4.5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΜΥΝΤΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	86
4.5.4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΛΑΜΠΕΣ LED ΚΑΙ ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ .....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ.....	88
5.1 : ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	88
5.1.1 : ΕΞΟΡΥΞΗ.....	88
5.1.2 : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΞΕΥΓΕΝΙΣΜΟΥ (ΡΑΦΙΝΑΡΙΣΜΑ) (REFINING) .....	89
5.1.3 : ΑΠΟΒΛΗΤΑ .....	89
5.2 : ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΞΟΡΥΞΗΣ .....	90
5.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΥΛΙΣΗΣ (REFINING).....	91
5.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	92
5.4.1 : ΚΑΘΙΖΗΣΗ .....	93
5.4.2 : ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΟΞΕΟΣ .....	93
5.5 : ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ .....	94
5.5.1 : ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΕΪΔΙΑ .....	95
5.5.2 : ΣΚΩΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΑ .....	96
5.5.3 : ΟΞΕΙΔΙΑ ΑΝΘΡΑΚΑ .....	96
5.5.4 : ΛΥΜΑΤΑ .....	97
5.6 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ REEs ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ .....	97

5.7 : ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΕΠΙΒΛΑΒΩΝ ΟΡΥΧΕΙΩΝ .....	99
5.7.1 : MOUNTAIN PASS, ΗΠΑ.....	99
5.7.2 : ΚΒΑΝΕΦJELD, ΓΡΟΙΛΑΝΔΙΑ.....	101
5.7.3 : ΒΑΟΤΟΥ, ΚΙΝΑ .....	101
5.8 : ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΕΧΟΥΣΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ .....	104
6.1 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ .....	104
6.1.1 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΙ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	105
6.1.2 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ.....	107
6.1.2.1 : ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ.....	108
6.1.2.2 : ΛΑΜΠΕΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ .....	109
6.1.2.3 : ΣΚΛΗΡΟΙ ΔΙΣΚΟΙ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ .....	109
6.1.2.4 : ΚΑΤΑΛΥΤΕΣ .....	109
6.1.2.5 : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	110
6.1.3 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ REEs ΑΠΟ ELVs .....	111
6.2 : ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ REs .....	119
6.2.1 : ΦΙΛΤΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ .....	120
6.2.2 : ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ .....	120
6.3 : ΘΕΣΠΙΣΗ ΝΕΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΦΥΠΝΙΣΗ ΚΙΝΑΣ .....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	127



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : «Στοιχεία σπάνιων γαιών»

Πίνακας 2 : «Κρίσιμα μέταλλα»

Πίνακας 3 : «Χημικά στοιχεία σπάνιων γαιών»

Πίνακας 4 : «Φυσικές ιδιότητες στοιχείων σπανίων γαιών»

Πίνακας 5 : «Τα σημαντικότερα ορυκτά σπανίων γαιών»

Πίνακας 6 : «Ποσοστά σπάνιων γαιών σε ορυκτά πετρώματα»

Πίνακας 7 : «Απόθεμα και παραγωγή σπάνιων γαιών το 2014»

Πίνακας 8 : «Απαιτήσεις σε REEs για διάφορα μεγέθη κινητήρα»

Πίνακας 9 : «Τύποι οχημάτων, μπαταρία και πηγή ενέργειας»

Πίνακας 10 : «Χρήσεις REEs στη στρατιωτική βιομηχανία»

Πίνακας 11 : «Περιβαλλοντικό αποτύπωμα REOs»

Πίνακας 12 : «Τεχνολογίες ανάκτησης REEs»

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 : «Αριθμός δημοσιεύσεων με αντικείμενο μελέτης τις σπάνιες γαίες»

Σχήμα 2 : «Χρονοδιάγραμμα ανακάλυψης σπάνιων γαιών»

Σχήμα 3 : «Πέτρωμα μπαστναζίτη»

Σχήμα 4 : «Πέτρωμα μοναζίτη»

Σχήμα 5 : «Πέτρωμα γαδολινίτη»

Σχήμα 6 : «Πέτρωμα ξενότιμου»

Σχήμα 7 : «Πέτρωμα σαμαρσκήτη»

Σχήμα 8 : «Πέτρωμα ευξενίτη»

Σχήμα 9 : «Μέση κατανομή REEs για κάθε ορυχείο, α) Bayan Obo, Κίνα (b) Mountain Pass, ΗΠΑ (c) Mount Weld, Αυστραλία (d) Lahat, Μαλαισία»

Σχήμα 10 : «Παραγωγή σπάνιων γαιών 1900-1984»

Σχήμα 11 : «Παραγωγή σπάνιων γαιών 1985-2015»

Σχήμα 12 : «Παγκόσμια παραγωγή REOs»

Σχήμα 13 : «Μερίδια κατανάλωσης σπάνιων γαιών»

Σχήμα 14 : «Μερίδια κατανάλωσης σπάνιων γαιών ανά 1000 κατοίκους»

Σχήμα 15 : «Τιμές μπαστναζίτη και μοναζίτη»

Σχήμα 16 : «Τιμές ελαφριών σπάνιων γαιών»

Σχήμα 17 : «Τιμές βαρέων σπάνιων γαιών»

Σχήμα 18 : «Περιοχές κοιτασμάτων σπάνιων γαιών στην Κίνα»

Σχήμα 19 : «Διαδικασία επεξεργασίας σπάνιων γαιών»

Σχήμα 20 : «Σημεία τήξης και βρασμού στοιχείων σπάνιων γαιών»

Σχήμα 21 : «Διαχωρισμός στοιχείων σπάνιων γαιών»

Σχήμα 22 : «Διάφορες εφαρμογές των REEs»

Σχήμα 23 : «Εφαρμογές μετάλλων σπάνιων γαιών»

- Σχήμα 24 : «Οι σπάνιες γαίες στα κινητά τηλέφωνα»
- Σχήμα 25 : «Σύσταση REEs σε διάφορες εφαρμογές»
- Σχήμα 26 : «Εφαρμογές REEs σε πράσινες τεχνολογίες»
- Σχήμα 27 : «Ανεμογεννήτριες»
- Σχήμα 28 : «Φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου»
- Σχήμα 29 : «Εφαρμογές REEs στα αυτοκίνητα»
- Σχήμα 30 : «Οι σπάνιες γαίες σε διάφορους τύπους οχημάτων»
- Σχήμα 31 : «Συνολική απαίτηση οχημάτων σε REEs»
- Σχήμα 32 : «Πιθανή απαίτηση σε REEs σε διαφορετικούς τύπους οχημάτων»
- Σχήμα 33 : «Εκτιμώμενες ποσότητες REEs σε διαφορετικά σενάρια»
- Σχήμα 34 : «Εκτιμώμενος αριθμός διάφορων τύπων οχημάτων το 2030»
- Σχήμα 35 : «Ετήσιες πωλήσεις PHEVs και EVs»
- Σχήμα 36 : «Ετήσια παραγωγή διάφορων τύπων οχημάτων»
- Σχήμα 37 : «Λάμπα LED βασισμένη σε REEs»
- Σχήμα 38 : «Κατανομή των επιπτώσεων για την παραγωγή REEs»
- Σχήμα 39 : «Αποτύπωμα οξειδίων REEs στο φαινόμενο του θερμοκηπίου»
- Σχήμα 40 : «Αεροφωτογραφία ορυχείου Mountain Pass»
- Σχήμα 41 : «Εγκαταλελειμμένη πισίνα κατακράτησης τοξικών λυμάτων στην Κίνα»
- Σχήμα 42 : «Σενάρια ανάκτησης REEs»
- Σχήμα 43 : «Εκτιμώμενες ποσότητες REEs από μπαταρίες και μόνιμους μαγνήτες»
- Σχήμα 44 : «Ανακτώμενες ποσότητες στοιχείων σπάνιων γαιών»
- Σχήμα 45 : «Ποσότητες REEs ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο»
- Σχήμα 46 : «Ποσοστά Nd και Dy που ανακτώνται από μαγνήτες και μπαταρίες»
- Σχήμα 47 : «Εργασίες εκσκαφής REEs στην επαρχία Sichuan της Κίνας»

## **ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ**

**CSRE : Chinese Society of Rare Earths**

**EV : Battery Electric Vehicle**

**FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle**

**HEV : Hybrid Electric Vehicle**

**HREEs : Heavy Rare Earth Element**

**IAGS : Institute Analysis of Global Safety**

**ISL : In Situ Leaching**

**LREEs : Light Rare Earth Element**

**MREEs : Medium Rare Earth Element**

**PHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicle**

**PPM : Parts Per Million**

**REEs : Rare Earth Elements**

**REOs : Rare Earth Oxides**

**REs : Rare Earths**

**USGS : United States Geological Survey**

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύγχρονη οικονομία μεταβάλλεται με ταχύτατους ρυθμούς και οι ανάγκες για νέα προϊόντα και τεχνολογίες είναι μεγάλη. Τα κινητά τηλέφωνα, οι ηλεκτρονικές συσκευές και τα αυτοκίνητα αποτελούν πλέον μέρος της καθημερινότητας ενός μεγάλου ποσοστού του ανθρώπινου πληθυσμού ενώ παράλληλα η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με το μικρότερο οικολογικό κόστος αποτελεί προτεραιότητα όλων των κυβερνήσεων παγκοσμίως. Πάνω σε αυτό το πλαίσιο προβλέπεται τα επόμενα χρόνια η αύξηση της παραγωγής φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών για να αξιοποιηθεί η ηλιακή και η αιολική ενέργεια αντίστοιχα. Παράλληλα, κατασκευάζονται όλο και περισσότερα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα και γίνεται χρήση καταλυτών έτσι ώστε να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων και να μην επιβαρυνθεί περαιτέρω το περιβάλλον.

Όλες οι συσκευές και οι τεχνολογίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως στηρίζονται, κάποιες σε μεγάλο και άλλες σε μικρότερο βαθμό, σε μια κατηγορία μετάλλων που ονομάζονται σπάνιες γαίες. Οι σπάνιες γαίες αποτελούν μια ομάδα χημικών στοιχείων του περιοδικού πίνακα που παρουσιάζουν μοναδικές ιδιότητες και είναι αναγκαίες για μια πληθώρα συσκευών. Ο συνολικός αριθμός αυτών των στοιχείων είναι 17 και αποτελείται από το ύτριο, το σκάνδιο και από τα 15 στοιχεία της υποομάδας των λανθανίδων, δηλαδή των χημικών στοιχείων με ατομικό αριθμό 57 μέχρι και 71. Αυτές οι βιταμίνες της τεχνολογίας παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες μεταξύ τους και για αυτό ομαδοποιούνται σε μια κατηγορία. Τα σημαντικότερα μέταλλα σπάνιων γαιών με βάση το απόθεμα τους και τις εφαρμογές τους είναι το νεοδύμιο, το πρασεοδύμιο, το δυσπρόσιο, το ύτριο και το γαδολίνιο. Ο όρος σπάνιες προσδίδεται εξαιτίας του μικρού αποθέματος ορισμένων μετάλλων και της πολύπλοκης και απαιτητικής διαδικασίας κατά την επεξεργασία και τον διαχωρισμό τους από διάφορα ορυκτά όπου εμπεριέχονται.

Οι σύγχρονες τεχνολογίες που εφαρμόζονται στις ανεμογεννήτριες και στα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες που βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε νεοδύμιο και δυσπρόσιο. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς και υβριδικούς κινητήρες περιέχουν μεγάλες ποσότητες λανθανίου και δημητρίου, που αποτελούν τις σπάνιες γαίες με το μεγαλύτερο απόθεμα στον φλοιό της γης.

Η κλιματική αλλαγή έχει στρέψει τους κατασκευαστές και τους κρατικούς φορείς να αναζητούν, πλέον όλο και περισσότερο, νέες και οικολογικές τεχνολογίες που βασίζονται σε

ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με σκοπό την μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων στην ατμόσφαιρα από την χρήση ορυκτών καυσίμων. Οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και οι κυψέλες καυσίμων που εφαρμόζονται στα οχήματα αποτελούν μερικές από τις σύγχρονες τεχνολογίες που μπορούν να βοηθήσουν στον περιορισμό των ρύπων και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτές οι τεχνολογίες βέβαια, απαιτούν μεγάλες ποσότητες κρίσιμων μετάλλων που περιλαμβάνουν το λίθιο, το κοβάλτιο, την πλατίνα καθώς και ορισμένα μέταλλα σπάνιων γαιών.

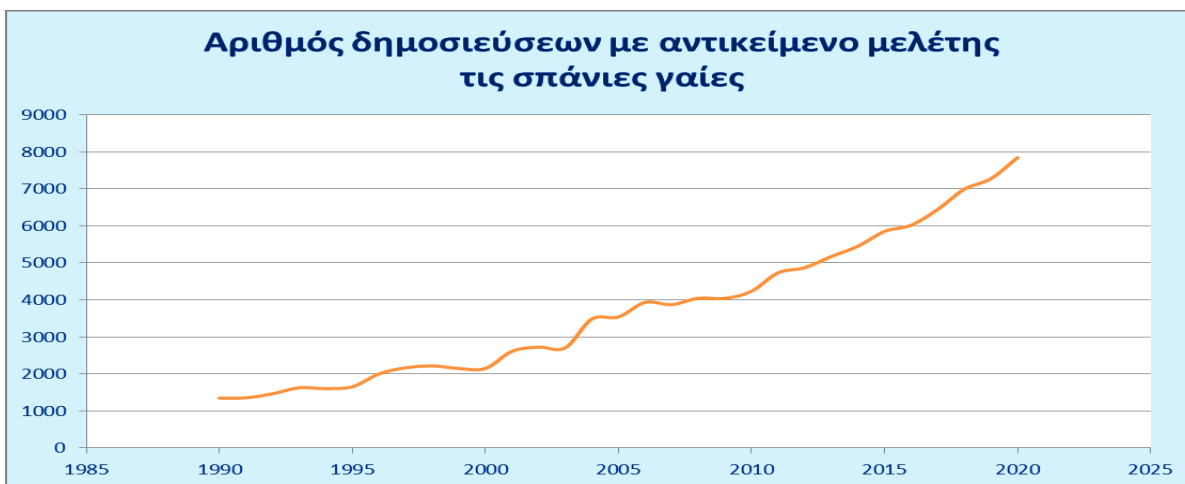
Το μικρό απόθεμα αυτών των μετάλλων αποτελεί το μεγαλύτερο ζήτημα για την μετάβαση στις πράσινες τεχνολογίες, αφού η εξόρυξη αυτών των μετάλλων παράγει τεράστιες ποσότητες ρύπων και γίνεται σε ολιγάριθμες χώρες, που επεξεργάζονται και παράγουν οι ίδιες τελικά προϊόντα και συσκευές. Τα μεγαλύτερα αποθέματα σπάνιων γαιών βρίσκονται στην λαϊκή δημοκρατία της Κίνας, καθιστώντας την τον μεγαλύτερο παραγωγό και προμηθευτή παγκοσμίως. Αυτό έχει οδηγήσει πολλά κράτη να εξαρτώνται άμεσα από τις εξαγωγές της Κίνας ενώ παράλληλα η αγορά κοιτασμάτων σπάνιας γης σε παγκόσμια κλίμακα από την κυβέρνηση της Κίνας έχει οδηγήσει σε μονοπώλιο στην αγορά των σπάνιων γαιών.

Ένας παράγοντας που μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο στην αντιμετώπιση της κυριαρχίας της Κίνας στο εμπόριο σπάνιων γαιών είναι η δυνατότητα ανακύκλωσης και ανάκτησης στοιχείων σπάνιων γαιών από χρησιμοποιημένες συσκευές και τεχνολογίες. Η ανακύκλωση αυτών των μετάλλων θα μπορούσε να μειώσει το υψηλό τους κόστος αλλά και να παρέχει την δυνατότητα σε χώρες με μικρούς πόρους να καλύψουν τις ανάγκες τους, αντιμετωπίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη μικρή προμήθεια των σπάνιων γαιών από την Κίνα. Με τα σημερινά δεδομένα, το ποσοστό των συσκευών που συλλέγεται για ανακύκλωση είναι πολύ μικρό ενώ η πλειοψηφία των διαδικασιών ανακύκλωσης έχει εξίσου μικρή επιτυχία. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι επενδύονται ήδη κονδύλια για έρευνα πάνω στις μεθόδους ανακύκλωσης έτσι ώστε να ανακτηθούν όσο το δυνατόν περισσότερες ποσότητες μετάλλων σπάνιων γαιών. Η ανακύκλωση βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ωστόσο τα οφέλη που παρουσιάζει αυτή η διαδικασία είναι μεγάλα τόσο από οικονομικής άποψης όσο και από περιβαλλοντικής.

Στην σημερινή οικονομία, οι τεχνολογίες καθαρής ενέργειας προσπαθούν να ανταγωνιστούν τις υφιστάμενες με στόχο να δώσουν το ίδιο ή καλύτερο αποτέλεσμα με τη λιγότερο δυνατή επιβάρυνση στο περιβάλλον. Συνεπώς, η προμήθεια και η αξιοποίηση μετάλλων

σπάνιας γης θα πρέπει να γίνεται με μικρό περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος. Ωστόσο, πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι αν η ανάγκη για οικολογικές τεχνολογίες αυξηθεί περαιτέρω τότε η ζήτηση για αυτά τα μέταλλα θα μεγαλώσει εξίσου. Έτσι, είναι αναγκαίο να υπάρξει ανακύκλωση αυτών των μετάλλων για να αποφευχθούν οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι της εξόρυξης, καθώς και να θεσπιστούν νέα περιβαλλοντικά μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών και λυμάτων από τις βιομηχανίες εξόρυξης και επεξεργασίας των σπάνιων γαιών.

Σήμερα, η μελέτη των μετάλλων της σπάνιας γης έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας τόσο για τις πολλαπλές εφαρμογές που βρίσκει στις τεχνολογίες όσο και για τα οφέλη που μπορεί να προσκομίσει στο περιβάλλον. Ο αριθμός των δημοσιεύσεων αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό με το πέρασμα των χρόνων κι αυτό φαίνεται άλλωστε και από το ακόλουθο διάγραμμα με τον συνολικό αριθμό των δημοσιεύσεων και των επιστημονικών άρθρων που εκδίδονται από το 1990 και έπειτα να αυξάνεται συνεχώς.



Σχήμα 1 «Αριθμός δημοσιεύσεων με αντικείμενο μελέτης τις σπάνιες γαίες»

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι κατά κύριο λόγο να δείξει την σημαντική συμβολή που έχουν οι σπάνιες γαίες στις υπάρχουσες και νέες τεχνολογίες, να παραθέσει το συνολικό εκτιμώμενο απόθεμα καθώς και σημαντικά οικονομικά στοιχεία. Παράλληλα, σε αυτήν την εργασία δίνεται έμφαση στις διαδικασίες παραγωγής και επεξεργασίας αυτών των σπάνιων μετάλλων καθώς και στους περιβαλλοντικούς κινδύνους που συνοδεύουν αυτές τις διαδικασίες. Τέλος, παρατίθενται κάποιες νέες τεχνικές επεξεργασίας για μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων ενώ τονίζεται η σημασία της ανακύκλωσης αυτών των μετάλλων καθώς και η ανάγκη θέσπισης νέων περιβαλλοντικών μέτρων για τον περιορισμό των εκπομπών παγκοσμίως.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό ορίζονται οι έννοιες των σπάνιων γαιών και κρίσιμων μετάλλων, αναφέρονται ορισμένα ιστορικά στοιχεία για την ανακάλυψη τους ενώ παράλληλα επισημαίνεται η σπουδαιότητά τους μέσω των πολλών εφαρμογών που βρίσκουν στις σημερινές τεχνολογίες. Πιο αναλυτικά, αναφέρονται όλα τα χημικά στοιχεία που αποτελούν τις σπάνιες γαίες, οι ιδιότητες του κάθε στοιχείου καθώς και τα κύρια ορυκτά πετρώματα από τα οποία εξάγονται οι σπάνιες γαίες.

### 1.1 ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Οι σπάνιες γαίες (REs) αποτελούν μια ομάδα δεκαεπτά (17) χημικών στοιχείων του περιοδικού πίνακα που εμφανίζουν παρόμοιες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα πρόκειται για το σκάνδιο (Sc), το ύτριο (Y) και τις λανθανίδες, μια ομάδα δεκαπέντε (15) χημικών στοιχείων του περιοδικού πίνακα με ατομικό αριθμό που κυμαίνεται από 57 (λανθάνιο) έως 71 (λουτήτιο).

**Rare Earth Elements**  
by Geology.com

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

Πίνακας 1 «Στοιχεία σπάνιων γαιών»

<https://geology.com/articles/rare-earth-elements/rare-earth-elements-periodic-table>

Οι REs δεν βρίσκονται στην φύση σε στοιχειακή κατάσταση και με εξαίρεση το σκάνδιο δεν απαντώνται στα ορυκτά σαν μεμονωμένες ενώσεις. Εντοπίζονται σε διάφορα πετρώματα όπως βασάλτες, γρανίτες και πυριτικά ορυκτά σε ικανοποιητικές συγκεντρώσεις (Λυμπεροπούλου, 1996). Στην βιβλιογραφία αναφέρονται ως σπάνιες αφενός γιατί δεν είναι συγκεντρωμένες σε



μεγάλες ποσότητες στον φλοιό της Γης και αφετέρου λόγω της πολύπλοκης και δύσκολης διαδικασίας διαχωρισμού και επεξεργασίας τους, όταν εκείνες συναντώνται σε διάφορα ορυκτά. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι μερικά από τα στοιχεία των σπάνιων γαιών, όπως το λανθάνιο, το δημήτριο και το νεοδύμιο, βρίσκονται σε μεγαλύτερα αποθέματα από αντίστοιχα μέταλλα όπως ο χρυσός, ο σίδηρος και ο μόλυβδος.

Οι σπάνιες γαίες έχουν ορισμένες μοναδικές και μη αντικαταστάσιμες ιδιότητες που τις καθιστούν σημαντικές στην σύγχρονη οικονομία αφού βρίσκουν εφαρμογή σχεδόν σε όλες τις νέες τεχνολογίες. Οι REs χρησιμοποιούνται στις ανανεώσιμες και πράσινες πηγές ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά καθώς και σε μαγνήτες, μπαταρίες, λέιζερ, καταλύτες και οθόνες. Το εύρος των αντικειμένων στα οποία τις συναντάμε είναι τεράστιο, επομένως πλέον γίνεται αντιληπτό το πόσο σημαντικές είναι τόσο για την οικονομία όσο και για την κοινωνία μας.

Τα 20 κρίσιμα μέταλλα και ορυκτά για την Ευρωπαϊκή Ένωση (2014)			
Αντιμόνιο	Βηρύλλιο	Κοβάλτιο	Γάλλιο
Γερμάνιο	Ινδίο	Μαγνήσιο, μαγνησίτης	Ταντάλιο
Νιόβιο	Βολφράμιο	Φθορίτης	Γραφίτης
Χρώμιο	Φωσφορικά	Σαμάριο	Πυρίτιο μεταλλικό
- Ελαφρές σπάνιες γαίες (Light Rare Earth Elements) - Βαριές σπάνιες γαίες (Heavy Rare Earth Elements)	Βολφράμιο	Μέταλλα της Ομάδας του λευκοχρύσου (Platinum Group Metals)	Βορικά

Πίνακας 2 «Κρίσιμα μέταλλα»

[http://www.orykta.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=110:zitisi-orykton-ylon&catid=2&Itemid=295](http://www.orykta.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=110:zitisi-orykton-ylon&catid=2&Itemid=295)

Κρίσιμα μέταλλα είναι τα σημαντικά, για την οικονομία, μέταλλα που βρίσκουν εφαρμογή στις σύγχρονες τεχνολογίες. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν έχουν πολλά πρόσθετα και ότι λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους δεν μπορούν να αντικατασταθούν από άλλα παρεμφερή μέταλλα. Η παραγωγή τους γίνεται σε λίγες χώρες παγκοσμίως ενώ η ανακύκλωση αυτών των στοιχείων είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα οι χώρες που τα εκμεταλλεύονται να καθορίζουν την τιμή τους. Η ζήτηση τους είναι αρκετά υψηλή ενώ το απόθεμα τους διαφέρει από στοιχείο σε

στοιχείο. Τα πιο κρίσιμα μέταλλα είναι ο μεταλλουργικός άνθρακας, ο μαγνησίτης, το ίνδιο, το κοβάλτιο, το χρώμιο, το βολφράμιο, το ταντάλιο και φυσικά οι σπάνιες γαίες.

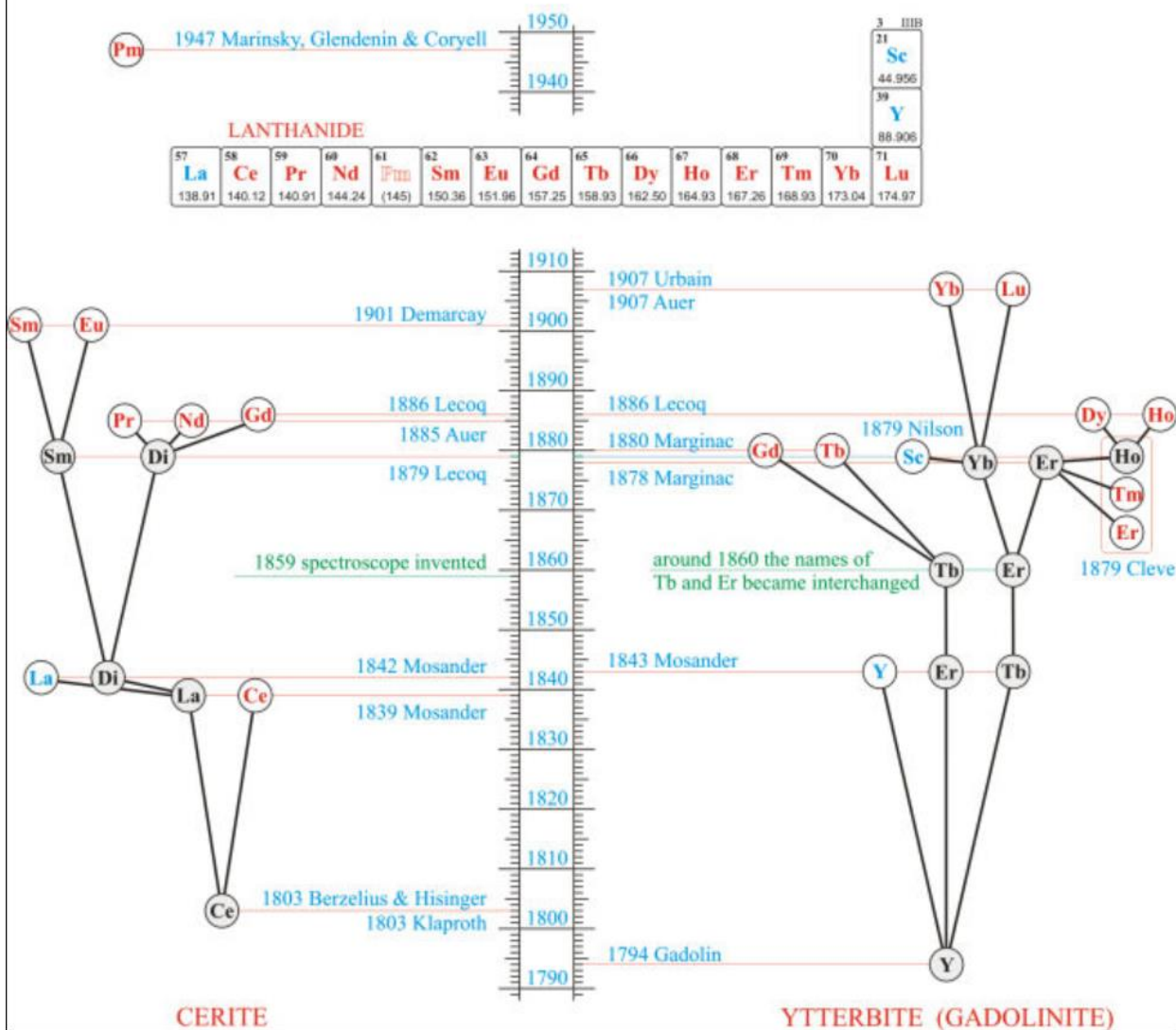
## 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ο εντοπισμός, ο διαχωρισμός και η μελέτη των σπάνιων γαιών ήταν ένα αντικείμενο που απασχόλησε την επιστημονική κοινότητα για παραπάνω από δυο αιώνες, από τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα έως και τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Το 1787, στο χωριό Ytterby της Σουηδίας ανακαλύφθηκε από τον αξιωματούχο και ερασιτέχνη γεωλόγο C.A Arrhenius ένα ορυκτό που πήρε το όνομα του (υττερβίτης) από το χωριό που ανακαλύφθηκε. Έπειτα από επτά χρόνια, το 1794, ο καθηγητής J.Gadolin κατάφερε να απομονώσει ένα άγνωστο οξείδιο, το οποίο ονομάστηκε terra yttria ενώ το ορυκτό μετονομάστηκε σε γαδολινίτης προς τιμήν του J.Gadolin. Το 1803 ανακαλύφθηκε ένα ακόμη ορυκτό στην Σουηδία που ονομάστηκε κερίτης και από το οποίο διαχωρίστηκε ένα οξείδιο που ονομάστηκε terra ceria. Έτσι, στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα είχαν ήδη προσδιοριστεί οι πρώτες δυο σπάνιες γαίες, το ύτριο (Y) και το δημήτριο (Ce).

Το 1839 ο καθηγητής G.Mosander απομόνωσε από το terra ceria το λανθάνιο (La) και έπειτα από τρία χρόνια απέδειξε ότι στο λανθάνιο περιέχεται μια ακόμη σπάνια γαία που ονόμασε διδύμιο. Το 1843 διαχώρισε το terra yttria σε 3 επιμέρους οξείδια, ένα οξείδιο με ροζ χρώμα που ονόμασε τέρβιο (Tb), ένα με κίτρινη απόχρωση που ονόμασε έρβιο (Er) και ένα άχρωμο οξείδιο που του έδωσε την ονομασία ύτριο (Y).

Μετά από αυτήν την ανακάλυψη από τον G.Mosander, δεν υπήρξαν νέες ανακαλύψεις σπάνιων γαιών για τα επόμενα 30 χρόνια. Ωστόσο, η εφεύρεση του φασματοσκοπίου το 1859, βοήθησε τους επιστήμονες να μελετήσουν περαιτέρω τα πετρώματα και να απομονώσουν και άλλες σπάνιες γαίες. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο διαχωρισμός και η ανακάλυψη του υττέρβιου από τον Marginac το 1878 και η απομόνωση δυο ακόμη στοιχείων από τον P.T Cleve το 1879, του θούλιου (Tm) και του όλμιου (Ho).

## SHORT HISTORY OF RARE EARTH ELEMENTS



Σχήμα 2 «Χρονοδιάγραμμα ανακάλυψης σπάνιων γαιών»

(<http://metalpedia.asianmetal.com/img/ree/his2.jpg>)

Παράλληλα, την ίδια χρονική περίοδο ο Lecoq ανακαλύπτει το σαμάριο (Sm) σε πετρώματα σαμαρσκήτη ενώ ο Nixon σε μια προσπάθεια να διασπάσει το υτέρβιο ανακαλύπτει μια άγνωστη σπάνια γαία που ονομάζει σκάνδιο (Sc). Το 1880 ο Marginac καταφέρνει να απομονώσει το γαδολίνιο (Gd) από το τέρβιο και πέντε χρόνια αργότερα, το 1885, ο C.Auer διαχωρίζει το διδύμιο σε δυο νέα στοιχεία, το πρασεοδύμιο (Pr) και το νεοδύμιο (Nd). Η τελευταία σπάνια γαία που ανακαλύφθηκε τον 19<sup>ο</sup> αιώνα ήταν το δυσπρόσιο (Dy) που διαχωρίστηκε από το όλμιο από τον Lecoq το 1886. Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα διαχωρίζεται από τον E.A Demarcay το ευρώπιο (Eu) ενώ λίγα χρόνια αργότερα, το 1907, ο G.Urbain απομονώνει το λουτήτιο (Lu).

Ο ακριβής αριθμός των στοιχείων των σπάνιων γαιών (REEs) ήταν ασαφής μέχρι το 1912 όταν ο H.Moseley με την χρήση φάσματος ακτίνων X κατάφερε να εκχωρήσει ατομικούς αριθμούς στα στοιχεία. Ο H.Moseley διαπίστωσε ότι ο ακριβής αριθμός λανθανίδων έπρεπε να είναι 15 και ότι το χημικό στοιχείο 61 δεν είχε ακόμη ανακαλυφθεί. Το 1947 οι Glendenin, Marinsky και Croyell επιβεβαίωσαν την ύπαρξη του τεχνητού στοιχείου 61 μέσω χημικών διαδικασιών ανταλλαγής ιόντων για το διαχωρισμό και τον καθαρισμό των στοιχείων σπάνιων γαιών. Το στοιχείο αυτό ονομάστηκε προμήθιο (Pm) και δεν εμφανίζεται στον φλοιό της γης σε ανιχνεύσιμες ποσότητες ενώ αποτελεί το μοναδικό ραδιενεργό στοιχείο των σπάνιων γαιών.

### **1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΙΣΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ**

Στο παρελθόν, πριν την εφαρμογή της διαδικασίας ανταλλαγής ιόντων, η ταξινόμηση των σπάνιων γαιών γινόταν με επαναλαμβανόμενη καθίζηση ή κρυστάλλωση. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν δυο μεγάλες κατηγορίες, οι γαίες που είχαν ως βάση τον κερίτη και οι γαίες που είχαν ως βάση τον υττερβίτη (γαδολίνιο). Έτσι, στην πρώτη κατηγορία ανήκαν τα δημήτριο, λανθάνιο, πρασεοδύμιο, νεοδύμιο, σαμάριο και ευρώπιο ενώ στην δεύτερη τα ύτριο, δυσπρόσιο, όλμιο, έρβιο, τέρβιο, γαδολίνιο, θούλιο, υττέρβιο και λουτήτιο. Στο Σχήμα 2 διακρίνονται με ερυθρό χρώμα τα στοιχεία που ανήκουν στην κάθε κατηγορία.

Σήμερα, οι σπάνιες γαίες χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον ατομικό αριθμό των στοιχείων. Σύμφωνα με τους ερευνητές οι λανθανίδες με ατομικό αριθμό από 57 έως 64 ανήκουν στις ελαφριές σπάνιες γαίες (LREEs, Light Rare Earth Elements) ενώ εκείνες με το ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 64 συγκαταλέγονται στις βαριές σπάνιες γαίες (HREEs, Heavy Rare Earth Elements), όπως επίσης και τα χημικά στοιχεία σκάνδιο και ύτριο που παρουσιάζουν κοινές ιδιότητες. Επομένως, στις LREEs ανήκουν το λανθάνιο, το δημήτριο, το πρασεοδύμιο, το νεοδύμιο, το προμήθιο, το σαμάριο, το ευρώπιο και το γαδολίνιο. Αντίθετα στις HREEs συγκαταλέγονται το τέρβιο, το δυσπρόσιο, το όλμιο, το έρβιο, το θούλιο, το υττέρβιο, το λουτήτιο καθώς και τα σκάνδιο και ύτριο, για τον λόγο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες μελέτες τα στοιχεία σαμάριο, ευρώπιο και γαδολίνιο αναφέρονται και ως μεσαίες σπάνιες γαίες (MREEs, Medium Rare Earth Elements), ωστόσο στην παρούσα διπλωματική η συγκεκριμένη κατηγορία δεν θα αναφερθεί περαιτέρω.

## 1.4 ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Οι σπάνιες γαίες, όπως ήδη αναφέρθηκε, αποτελούνται από το σκάνδιο, το ύτριο και τις λανθανίδες, μια υποομάδα του περιοδικού πίνακα που αποτελείται από 15 χημικά στοιχεία. Ουσιαστικά, πρόκειται για μέταλλα που παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και εμφανίζουν ομοιότητες μεταξύ τους. Σε αυτήν την ενότητα αναφέρονται και αναλύονται οι φυσικές ιδιότητες και των 17 μετάλλων σπάνιας γης, ενώ παράλληλα προσδιορίζεται το παγκόσμιο απόθεμά τους.

ΟΝΟΜΑ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ
Σκάνδιο	Sc	21
Ύτριο	Y	39
Λανθάνιο	La	57
Δημήτριο	Ce	58
Πρασεοδύμιο	Pr	59
Νεοδύμιο	Nd	60
Προμήθιο	Pm	61
Σαμάριο	Sm	62
Ευρώπιο	Eu	63
Γαδολίνιο	Gd	64
Τέρβιο	Tb	65
Δυσπρόσιο	Dy	66
Όλμιο	Ho	67
Έρβιο	Er	68
Θούλιο	Tm	69
Υττέρβιο	Yb	70
Λουτήτιο	Lu	71

Πίνακας 3 «Χημικά στοιχεία σπάνιων γαιών»

- **Λανθάνιο (La)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 57. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο με μεγάλη ολκιμότητα και ελασιμότητα και αποτελεί το πρώτο στοιχείο των λανθανίδων και των ελαφριών σπάνιων γαιών. Βρίσκεται σε σχετικά μεγάλη αφθονία στον φλοιό της Γης συγκριτικά με άλλα μέταλλα (18ppm) και συναντάται κυρίως σε πετρώματα μαστιναζίτη και μοναζίτη. Το σημείο τήξης είναι στους 918 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 3464 °C.
- **Δημήτριο (Ce)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 58. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των ελαφριών σπάνιων γαιών. Είναι ένα αργυρόλευκο, όλκιμο και μαλακό

μέταλλο και βρίσκεται σε μεγαλύτερο απόθεμα από όλες τις σπάνιες γαίες (46ppm) και εντοπίζεται κυρίως σε ορυκτά όπως ο μοναζίτης και ο μαστναζίτης. Το σημείο τήξης είναι στους 798 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 3433 °C.

- **Πρασεοδύμιο (Pr)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 59. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των ελαφριών σπάνιων γαιών. Πρόκειται για ένα μαλακό, ασημί, εύπλαστο και όλκιμο μέταλλο με πολλές μαγνητικές, ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες. Είναι ιδιαίτερα αντιδραστικό μέταλλο αφού όταν εκτίθεται στον αέρα αναπτύσσει μια επικάλυψη πράσινου οξειδίου. Το σημείο τήξης είναι στους 931 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 3520 °C.
- **Νεοδύμιο (Nd)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 60. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των ελαφριών σπάνιων γαιών. Πρόκειται για ένα σκληρό, ασημί και μερικώς εύπλαστο μέταλλο που οξειδώνεται πολύ γρήγορα σε αέρα παράγοντας ιώδεις επικαλύψεις οξειδίων. Βρίσκει πολλαπλές εφαρμογές στις σύγχρονες τεχνολογίες και το απόθεμα του είναι ικανοποιητικό (24ppm). Το σημείο τήξης είναι στους 1021 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 3074 °C.
- **Προμήθιο (Pm)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 61. Αν και ανήκει στις λανθανίδες, συχνά δεν λογίζεται ως σπάνια γαία εξαιτίας του ότι θεωρείται τεχνητό στοιχείο, αφού παρασκευάζεται από τα προϊόντα σχάσης του ουρανίου. Το στοιχείο αυτό είναι ραδιενεργό και είναι πάρα πολύ σπάνιο στην φύση αφού εικάζεται ότι υπάρχουν 500-600 gr σε όλο τον γήινο φλοιό.
- **Σαμάριο (Sm)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 62. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των ελαφριών σπάνιων γαιών. Πρόκειται για ένα σχετικά σκληρό αργυρόλευκο μέταλλο που οξειδώνεται με αργό ρυθμό στον αέρα. Το απόθεμα του εκτιμάται στα 6.5ppm και η εξόρυξη του γίνεται από πετρώματα σαμαρσκήτη (από όπου πήρε το όνομά του), γαδολινίτη, μαστναζίτη και μοναζίτη. Το σημείο τήξης είναι στους 1074 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 1794 °C.

- **Ευρώπιο (Eu)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 63. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των ελαφριών σπάνιων γαιών. Πρόκειται για το πιο αντιδραστικό και μαλακό λανθανίδιο και για αυτό αποθηκεύεται σε ένα αδρανές ρευστό για να προστατευτεί από τον ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Είναι από τις σπανιότερες σπάνιες γαίες, περίπου στο 1ppm και εντοπίζεται σε πολύ μικρές ποσότητες σε πετρώματα μπαστναζίτη, μοναζίτη και ξενότιμου. Το σημείο τήξης είναι στους 822 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 1529 °C.
- **Γαδολίνιο (Gd)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 64. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των ελαφριών σπάνιων γαιών. Πρόκειται για ένα αργυρόλευκο ελαφρώς ελατό και όλκιμο μέταλλο. Ανάλογα με την θερμοκρασία συμπεριφέρεται ως φερομαγνητικό ή παραμαγνητικό και για αυτό χρησιμοποιείται σε πολλούς μαγνήτες. Το απόθεμα του κυμαίνεται στα 6.4 ppm ενώ βρίσκεται σε ορυκτά μοναζίτη και γαδολινίτη. Το σημείο τήξης είναι στους 1313 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 3273 °C.
- **Τέρβιο (Tb)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 65. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών. Είναι ένα αργυρόλευκο, ελατό και μαλακό μέταλλο το οποίο δεν βρίσκεται στην φύση ως ελεύθερο στοιχείο αλλά περιέχεται σε διάφορα ορυκτά όπως ο μοναζίτης και το ξενότιμο. Το απόθεμα του είναι πολύ μικρό, γύρω στα 0.9ppm. Το σημείο τήξης είναι στους 1356 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 3230 °C.
- **Δυσπρόσιο (Dy)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 66. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο και όπως υποδηλώνει το όνομά του είναι δύσκολο να ανακτηθεί. Το δυσπρόσιο δεν εντοπίζεται σχεδόν ποτέ στην φύση ως ελεύθερο στοιχείο αλλά περιέχεται κυρίως σε πετρώματα ξενότιμου. Το απόθεμα του εκτιμάται στα 4.5 ppm. Το σημείο τήξης είναι στους 1412 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 2567 °C.
- **Όλμιο (Ho)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 67. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών. Πρόκειται για ένα αργυρόλευκο, σχετικά μαλακό και εύπλαστο μέταλλο το οποίο δεν συναντάται «ελεύθερο» στην φύση αλλά περιέχεται σε μικρές ποσότητες σε πετρώματα μοναζίτη και γαδολινίτη. Το απόθεμα του

είναι σχετικά μικρό (1.2ppm), το σημείο τήξης του είναι στους 1474 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 2700 °C.

- **Ερβιο (Er)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 68. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών και όπως και οι υπόλοιπες βαριές σπάνιες γαίες δεν εντοπίζεται ως ελεύθερο στοιχείο στην φύση παρά μόνο σε μικρές ποσότητες σε πετρώματα γαδολινίτη. Είναι ένα αργυρόλευκο εύπλαστο και μαλακό μέταλλο που δεν οξειδώνεται γρήγορα σε σχέση με άλλες σπάνιες γαίες. Το απόθεμα του είναι σχετικά χαμηλό (2.5ppm), το σημείο τήξης του είναι στους 1529 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 2868 °C.
- **Θούλιο (Tm)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 69. Αποτελεί στοιχείο των λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών και είναι το πιο σπάνιο στοιχείο των σπάνιων γαιών, με εξαίρεση το ραδιενεργό και τεχνητό προμήθιο, αφού το παγκόσμιο απόθεμα του εκτιμάται στα 0.2 ppm. Πρόκειται για ένα γκρίζο, μαλακό και εύχρηστο μέταλλο με σημείο τήξης στους 1545 °C και σημείο βρασμού στους 1950 °C.
- **Υπτέρβιο (Yb)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 70. Αποτελεί το προτελευταίο στοιχείο των λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών. Το απόθεμα του αν και είναι το δεύτερο μεγαλύτερο των HREEs παραμένει μικρό, γύρω στα 2.7ppm. Πρόκειται για ένα μαλακό, εύπλαστο και όλκιμο μέταλλο που αντιδρά αργά με κρύο νερό και οξειδώνεται αργά στον αέρα. Επίσης, δεν συναντάται ως ελεύθερο στοιχείο στην φύση παρά μόνο σε μικρές ποσότητες σε πετρώματα μοναζίτη και ξενότιμου. Το σημείο τήξης είναι στους 819 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 1196 °C.
- **Λουτήτιο (Lu)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 71. Αποτελεί το τελευταίο στοιχείο των λανθανίδων και των βαρέων σπάνιων γαιών. Πρόκειται για ένα αργυρόλευκο μέταλλο με την μεγαλύτερη πυκνότητα, σκληρότητα και το υψηλότερο σημείο τήξης από όλες τις σπάνιες γαίες. Χαρακτηριστικό του είναι ότι αντέχει στην διάβρωση του ξηρού αλλά όχι του υγρού αέρα (υγρασία). Το απόθεμα του είναι μικρότερο της μονάδας σε κλίμακα ppm, ενώ έχει σημείο τήξης τους 1663 °C και σημείο βρασμού τους 3402 °C.



- **Σκάνδιο (Sc)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 21. Αποτελεί στοιχείο των βαρέων σπάνιων γαιών επειδή παρουσιάζει παρόμοιες χημικές και φυσικές ιδιότητες με εκείνες, παρόλο που δεν ανήκει στην ομάδα των λανθανίδων. Πρόκειται για ένα αργυρό μαλακό μέταλλο που αναπτύσσει ένα ελαφρώς κιτρινωπό ή ροζ χρώμα όταν οξειδώνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Εντοπίζεται κυρίως σε πετρώματα γαδολινίτη και ευξενίτη, το σημείο τήξης είναι στους 1541 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 2836 °C.
- **Ύτριο (Y)** : είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 39. Αποτελεί μαζί με τον σκάνδιο τα μοναδικά στοιχεία πέρα των λανθανίδων που ανήκουν στις σπάνιες γαίες. Συγκεκριμένα συγκαταλέγεται στην ομάδα των βαρέων σπάνιων γαιών αφού παρουσιάζει κοινές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Πρόκειται για ένα αργυρόλευκο, λαμπερό και μαλακό μέταλλο, το οποίο δεν βρίσκεται ως ξεχωριστό στοιχείο στην φύση αλλά βρίσκεται σε διάφορα ορυκτά, όπως ο μοναζίτης και το ξενότιμο. Το απόθεμα του χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητικό, περίπου στα 28 ppm, το σημείο τήξης του είναι στους 1522 °C ενώ το σημείο βρασμού στους 3338 °C.

Στοιχείο	Ατομικό βάρος	Σημείο τήξης (°C)	Σημείο βρασμού (°C)	Αφθονία στο γήινο φλοιό (ppm)	Πυκνότητα
Y	39	1522	3338	28	4.469
La	57	918	3464	18	6.145
Ce	58	798	3433	46	6.770
Pr	59	931	3520	5.5	6.773
Nd	60	1021	3074	24	7.007
Pm	61	1042	3000	NA	7.260
Sm	62	1074	1794	6.5	7.520
Eu	63	822	1529	1.0	5.243
Gd	64	1313	3273	6.4	7.900
Tb	65	1356	3230	0.9	8.229
Dy	66	1412	2567	4.5	8.550
Ho	67	1474	2700	1.2	8.755
Er	68	1529	2868	2.5	9.066
Tm	69	1545	1950	0.2	9.321
Yb	70	819	1196	2.7	6.965
Lu	71	1663	3402	0.8	9.840

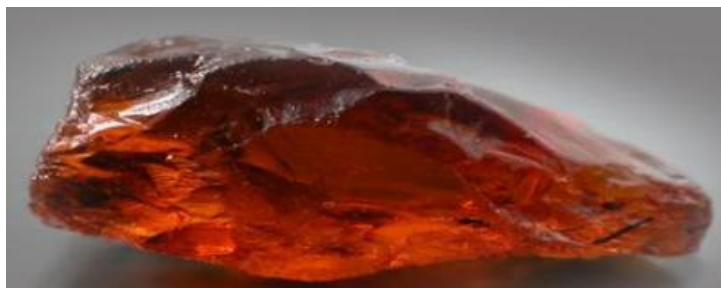
Πίνακας 4 « Φυσικές ιδιότητες των στοιχείων των σπάνιων γαιών»

Πηγή δεδομένων : (Murty & Gupta, 1980)

## 1.5 ΟΡΥΚΤΑ-ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Όπως ήδη αναφέρθηκε οι περισσότερες σπάνιες γαίες δεν συναντώνται ως ελεύθερα στοιχεία στην φύση αλλά εντοπίζονται σε μικρές ποσότητες μέσα σε άλλα ορυκτά, μάλιστα έρευνες έχουν δείξει ότι οι REs εντοπίζονται σε πάνω από 160 ορυκτά. Η πλειονότητα των οποίων είναι σπάνια πετρώματα με το περιεχόμενο ποσοστό REs σε αυτά (εκφρασμένο ως οξείδιο) μπορεί να φτάσει έως 60% σε οξείδια σπανίων γαιών (REO). Η διαδικασία εξόρυξης είναι σύνθετη και θα αναλυθεί παρακάτω, ωστόσο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν συνοπτικά κάποια ορυκτά που περιέχουν ικανοποιητικές ποσότητες REEs.

- **Μπαστναζίτης** : είναι ένα φθοριοανθρακικό ορυκτό, ερυθρού χρώματος που αποτελεί κύρια πηγή σπανίων γαιών και ιδιαίτερα LREEs, όπως το λανθάνιο, το δημήτριο και το ευρώπιο ενώ παράλληλα περιέχει μεγάλες ποσότητες υτρίου.



Σχήμα 3 «Πέτρωμα μπαστναζίτη»

<https://www.minedirect.com/Images/FacetingCabbingRough/Bastnaesite/Bastnaesite-14A.jpg>

- **Μοναζίτης** : είναι ένα φωσφορικό ορυκτό, καφέ χρώματος με κίτρινες αποχρώσεις που αποτελεί μαζί με τον μπαστναζίτη κύρια πηγή σπανίων γαιών. Έχει τουλάχιστον 4 διαφορετικά είδη ανάλογα με την σύνθεσή του και είναι πλούσιο σε REEs, όπως το δημήτριο, το λανθάνιο, το νεοδύμιο, το πρασεοδύμιο και το σαμάριο. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι στην ορυκτολογία του ενίοτε εμφανίζεται και θόριο, το οποίο είναι ένα ραδιενεργό στοιχείο και δυσχεραίνει τις διαδικασίες διαχωρισμού και επεξεργασίας των υπόλοιπων στοιχείων.



Σχήμα 4 «Πέτρωμα μοναζίτη»  
<https://geology.com/minerals/photos/monazite-crystal.jpg>

- **Γαδολινίτης** : είναι ένα πυριτικό ορυκτό, μελανέρυθρου χρώματος που περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό REs στην σύνθεσή του. Δεν είναι άφθονο στην φύση, όμως παρέχει ικανοποιητικές ποσότητες LREE, όπως το λανθάνιο, δημήτριο, νεοδύμιο, γαδολίνιο και μεγάλες ποσότητες υτρίου.



Σχήμα 5 «Πέτρωμα γαδολινίτη»

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1b/Gadolinitas.jpg/390px-Gadolinitas.jpg>

- **Ξενότιμο** : είναι ένα φωσφορικό ορυκτό, καφέ χρώματος με κίτρινες αποχρώσεις που περιέχει σημαντικές ποσότητες HREEs όπως το δυσπρόσιο, το τέρβιο, υτέρβιο και το ύτριο. Όμως, όπως και το άλλο φωσφορικό ορυκτό, περιέχει ποσότητες θορίου και ουρανίου και για αυτό η επεξεργασία του επιφυλάσσει περιβαλλοντικούς κινδύνους και απαιτείται μεγάλη προσοχή.



Σχήμα 6 «Πέτρωμα ξενότιμου»

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Xenotime\\_with\\_Rutile-08-2-78ab.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Xenotime_with_Rutile-08-2-78ab.jpg)

- **Σαμαρσκίτης** : είναι ένα ραδιενεργό ορυκτό, μαύρου χρώματος που παρέχει ικανοποιητικές ποσότητες samarium, erbium, yttrium και europium. Ωστόσο λόγω της ύπαρξης thorium στην σύστασή του χρειάζεται επίμονη και επίπονη διαδικασία για την εξόρυξη και την περαιτέρω εκμετάλλευση του.



Σχήμα 7 «Πέτρωμα σαμαρσκίτη»

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b8/Samarskite-%28Y%29-351417.jpg/330px-Samarskite-%28Y%29-351417.jpg>

- **Ευξενίτης** : είναι ένα ορυκτό, καφέ χρώματος που περιέχει αξιόλογες ποσότητες βαρέων σπάνιων γαιών όπως erbium, scandium και yttrium. Θεωρείται και αυτό ραδιενεργό εξαιτίας της παρουσίας thorium στην σύστασή του.



Σχήμα 8 «Πέτρωμα ευξενίτη»

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4b/Euxenite\\_-\\_Vegusdal%2C\\_Norvegia\\_01.jpg/300px-Euxenite\\_-\\_Vegusdal%2C\\_Norvegia\\_01.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4b/Euxenite_-_Vegusdal%2C_Norvegia_01.jpg/300px-Euxenite_-_Vegusdal%2C_Norvegia_01.jpg)

ΟΡΥΚΤΟ	ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΑ REs	
Αισχυνίτης	$(Ce, Ca, Th)(Ti, Nb)_2O_6$	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15-19.5	(Y, Er) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.9-4.5
Μπαστναζίτης	$(Ce, La, Pr)(CO_3)F$	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 36.9-40.5	(La, Pr...) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 36.3-36.6
Ευξενίτης	$(Y, Ce, Ca, U, Th)(Ti, Nb, Ta)_2O_6$	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 18.2-27.7	(Ce, La, ...) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 16-30
Φεργκουσονίτης	$(Y, Sr, Ce, U)(Ti, Nb, Ta)_2O_6$	(Ce, La, ...) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.9-6	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 31-42
Γαδολινίτης	$(Y, Ce)_2FeBe_2Si_2O_{10}$	(Ce, La, ...) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5.23	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30.7-46.5
Λοπαρίτης	$(Na, Ca, Ce, Sr)_2(Ti, Ta, Nb)_2O_6$	(Ce, La, ...) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 32-34	-
Μοναζίτης	$(Ce, La...)PO_4$	(Ce, La, ...) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 50-68	-
Αλλανίτης	$(Ca, Ce)_2(Al, Fe)_3Si_3O_{12}[O, OH]$	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0-6	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0-8
Παρισίτης	$Ca(Ce, La...)_2(CO_3)F_2$	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 26-31	(La, Nd, ...) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 27.3-30.4
Πριορίτης	$(Y, Er, Ca, Th)(Ti, Nb)_2O_6$	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3.7-4.3	(Y, Er) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 21.1-28.7
Σαμαρσκήτης	$(Y, Er, U, Ce, Th)_4(Nb, Ta)_6O_2$	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.25-3.2	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6.4-14.5

Πίνακας 5 «Τα σημαντικότερα ορυκτά σπάνιων γαιών»

Πηγή δεδομένων : (Gupta & Krishnamurthy, 2005)

Στον πίνακα 5 διακρίνονται όλοι οι τύποι ορυκτών που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες στην σύνθεσή τους. Ο μοναζίτης και ο μπαστναζίτης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελούν τις κυριότερες πηγές των REs αφού βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία στον φλοιό της γης σε σύγκριση με τα υπόλοιπα ορυκτά. Επίσης, από τον παραπάνω πίνακα μπορεί κανείς να διακρίνει ότι το δημήτριο, το λανθάνιο και το ύτριο βρίσκονται σε μορφή οξειδίων και αντιπροσωπεύουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις REEs στα πετρώματα. Από την άλλη πλευρά, οι βαρέες σπάνιες γαίες, με εξαίρεση το ύτριο, βρίσκονται σε πολύ μικρά ποσοστά σε όλα τα πετρώματα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΑΠΟΘΕΜΑ & ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Σε αυτή την ενότητα, επισημαίνονται οι χώρες που παράγουν ικανοποιητικές ποσότητες σπάνιων γαιών ενώ δίνεται κατά προσέγγιση το παγκόσμιο απόθεμα. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στο ιστορικό σκέλος της παραγωγής σπάνιων γαιών από την πρώτη τους εμφάνιση στο διεθνές εμπόριο μέχρι και σήμερα. Παράλληλα, σχολιάζεται και τεκμηριώνεται η αυξανόμενη ζήτηση που παρουσιάζουν οι σπάνιες γαίες καθώς και οι τιμές των οξειδίων των σπάνιων γαιών. Τέλος, τονίζεται η κυρίαρχη θέση της Κίνας τόσο στην παραγωγή και στο εμπόριο σπάνιων γαιών, ενώ δίνεται έμφαση στον τρόπο που επηρεάζει την τιμολόγηση των προϊόντων που προκύπτουν από την επεξεργασία σπάνιων γαιών.

### **2.1 : ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ**

Οι σπάνιες γαίες, όπως ήδη αναφέρθηκε, εντοπίζονται κυρίως σε πετρώματα μοναζίτη, μαστναζίτη, ξενότιμου και ορισμένων ακόμα ορυκτών και βρίσκονται σε σχετικά μικρή διαθεσιμότητα. Σύμφωνα με έρευνα των επιστημόνων της γεωλογικής υπηρεσίας των ΗΠΑ (USGS, United States Geological Survey) που έγινε το 2016, υπολογίστηκε ότι το συνολικό απόθεμα σπάνιων γαιών που περιέχεται σε αυτά τα ορυκτά είναι περίπου 130 εκατομμύρια τόνοι. Η Κίνα και η Βραζιλία παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα αποθέματα παγκοσμίως με ποσοστά 42.3% και 16.9% ενώ ακολουθούν με μικρότερα ποσοστά η Αυστραλία, οι ΗΠΑ, η Ινδία και η Μαλαισία.

Τα κοιτάσματα μαστναζίτη σε Κίνα και ΗΠΑ αποτελούν σήμερα την μεγαλύτερη πηγή REs παγκοσμίως, ενώ έπονται τα πετρώματα μοναζίτη και ξενότιμου που βρίσκονται σε Αυστραλία, Βραζιλία, Κίνα και Μαλαισία. Τα μέταλλα που ανήκουν στις LREEs παρουσιάζονται σε μεγαλύτερη αφθονία στην φύση συγκριτικά με εκείνα που ανήκουν στις HREEs. Έτσι σπάνιες γαίες όπως το δημήτριο και το λανθάνιο έχουν ικανοποιητικό απόθεμα ενώ άλλες όπως το όλμιο και το δυσπρόσιο είναι δυσεύρετες. Εξαιρεση αποτελεί το ύτριο, αφού αν και ανήκει στις βαριές σπάνιες γαίες βρίσκεται σε σχετική αφθονία στον φλοιό της γης.

Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι μαζί με τις σπάνιες γαίες συχνά εμφανίζονται και άλλα πολύτιμα μέταλλα όπως το νικέλιο και το ίνδιο. Στην Κίνα οι σπάνιες γαίες λαμβάνονται και ως υποπροϊόν της εξόρυξης σιδηρού όπως και στην Δυτική Αυστραλία όπου υπάρχουν αποθέματα που είναι αναμιγμένα με οξείδια ορυκτών σιδηρού. Η είδηση ότι οι σπάνιες γαίες εμφανίζονται ως



προσμίξεις και σε άλλα μέταλλα γεμίζει αισιοδοξία την επιστημονική κοινότητα αφού ενδέχεται το συνολικό απόθεμα να είναι μεγαλύτερο από το εκτιμώμενο.

Στον πίνακα 6 παρατηρούμε τα περιεχόμενα ποσοστά σε σπάνιες γαίες σε ορισμένα ορυκτά πετρώματα. Συγκεκριμένα, διακρίνεται ότι ο μπαστναζίτης έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε ελαφριές σπάνιες γαίες (λανθάνιο, δημήτριο και νεοδύμιο) και πολύ μικρές, αν όχι μηδαμινές, συγκεντρώσεις σε βαριές σπάνιες γαίες. Ομοίως, ο μοναζίτης παρουσιάζει και εκείνος υψηλές συγκεντρώσεις σε LREEs ενώ η περιεκτικότητά του σε HREEs είναι αρκετά μικρή. Αντίθετα με τα δυο προηγούμενα ορυκτά, το ξενότιμο παρουσιάζει ικανοποιητικές ποσότητες HREEs και ιδιαίτερα ύττριου, δυσπρόσιου, έρβιου και υτέρβιου ενώ τα ποσοστά συγκέντρωσης σε LREEs είναι χαμηλά.

Rare-earth contents of selected source minerals.

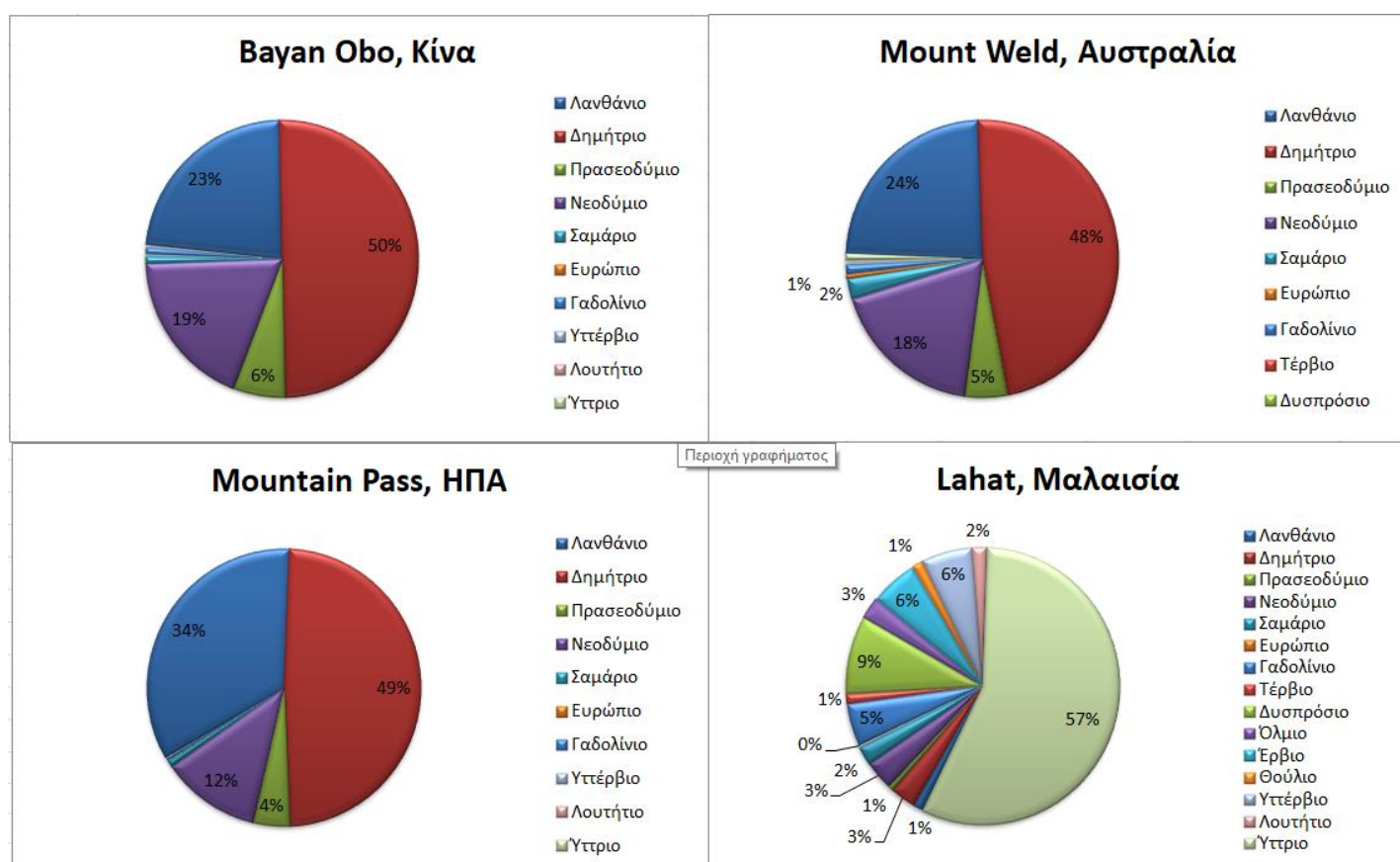
Primary source	Country	Location	Percentage of total rare-earth oxide														
			Light rare-earths							Heavy rare-earths							
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
Bastnäsite	China	Bayan Obo, Nei Mongol	23.00	50.00	6.20	18.50	0.80	0.20	0.70	0.10	0.10	-	-	-	-	-	-
		Dechang, Sichuan	35.63	43.81	4.73	13.06	1.22	0.23	0.52	0.06	0.09	0.05	0.04	0.01	0.06	-	0.40
		Maoniuping, Sichuan	29.49	47.56	4.42	15.18	1.24	0.23	0.65	0.12	0.21	0.05	0.06	0.04	0.05	0.01	0.70
		Weishan, Shandong	35.46	47.76	3.95	10.90	0.79	0.13	0.53	0.14	-	-	-	-	0.03	-	0.76
Loparite	U.S	Mountain Pass, CA	34.00	48.80	4.20	11.70	0.79	0.13	0.21	-	-	-	-	-	-	-	0.12
		Russia	Revda, Murmansk	25.00	50.50	5.00	15.00	0.70	0.09	0.60	-	0.60	0.70	0.80	0.10	0.20	0.15
Monazite	Australia	Mount Weld Central	23.88	47.55	5.16	18.13	2.44	0.53	1.09	0.09	0.25	0.03	0.06	0.01	0.03	-	0.76
	China	Nangang, Guangdong	23.00	42.70	4.10	17.00	3.00	0.10	2.00	0.70	0.80	0.12	0.30	-	2.40	0.14	2.40
	India	Manavalakurichi	22.00	46.00	5.50	20.00	2.50	0.02	1.20	0.06	0.18	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.45
Rare-earth laterite	China	Xunwu, Jiangxi	38.00	3.50	7.41	30.18	5.32	0.51	4.21	0.46	1.77	0.27	0.88	0.13	0.62	0.13	10.07
		Xinfeng, Jiangxi	27.26	3.23	5.62	17.55	4.54	0.93	5.96	0.68	3.71	0.74	2.48	0.27	1.13	0.21	24.26
		Longnan, Jiangxi	2.18	<1.09	1.08	3.47	2.34	<0.37	5.69	1.13	7.48	1.60	4.26	0.60	3.34	0.47	64.90
Xenotime	China	Southeast Guangdong	1.20	3.00	0.60	3.50	2.20	0.20	5.00	1.20	9.10	2.60	5.60	1.30	6.00	1.80	59.30

Πίνακας 6 «Ποσοστά σπάνιων γαιών σε ορυκτά πετρώματα» (USGS Minerals Yearbook, 2014)

Ακόμη ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι αν και υπάρχουν περίπου εκατοντάδες πηγές κοιτασμάτων σπάνιων γαιών στην γη, υπάρχουν ελάχιστα ορυχεία παγκοσμίως που εξορίσουν σπάνιες γαίες. Τα σημαντικότερα και μεγαλύτερα ορυχεία σπάνιων γαιών αναφέρονται στον

πίνακα 6 και είναι το Bayan Obo στην Κίνα, το Mountain Pass στις ΗΠΑ και το Mount Weld στην Αυστραλία.

Πολλοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι ο αριθμός αυτών των ορυχείων είναι ολιγάριθμος επειδή οι περισσότερες σπάνιες γαίες βρίσκονται σε μικρές συγκεντρώσεις σε πετρώματα με αποτέλεσμα το κόστος εξόρυξης τους να είναι πολύ υψηλό σε σχέση με την εξαγόμενη ποσότητα. Επιπλέον, οι διαδικασίες εξόρυξης είναι σύνθετες και περίπλοκες ενώ δεν πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι πολλές περιβαλλοντικές αρχές είναι αντίθετες στο άνοιγμα ορυχείων εξαιτίας του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που αφήνουν στην περιοχή.



Σχήμα 9 «Μέση κατανομή REEs για κάθε ορυχείο, α) Bayan Obo, Κίνα β) Mountain Pass, ΗΠΑ γ) Mount Weld, Αυστραλία δ) Lahat, Μαλαισία» Πηγή δεδομένων : (USGS Minerals Yearbook, 2014)

Στο σχήμα 9 δίνεται κατά προσέγγιση η μέση κατανομή στοιχείων σπάνιων γαιών ανά ορυχείο. Πιο αναλυτικά, στο ορυχείο Bayan Obo στην Κίνα όπου εξορύσσεται κυρίως μπαστναζίτης, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό REEs ανήκει στο δημήτριο, ενώ εξίσου σημαντικά ποσοστά εμφανίζουν και τα λανθάνιο, νεοδύμιο. Στο Mountain Pass διακρίνεται



παρόμοια κατανομή όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Παράλληλα, στο Mount Weld στην Αυστραλία όπου συναντάμε κυρίως πετρώματα μοναζιτή, εμφανίζεται ξανά μεγάλο ποσοστό LREEs ενώ συναντάμε μικρές αλλά σημαντικές ποσότητες έρβιου και γαδολινίου. Ωστόσο, μεγάλη διαφοροποίηση εμφανίζει το ορυχείο Lahat της Μαλαισίας από όπου εξάγεται ξενότιμο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ξενότιμο είναι πλούσιο σε βαριές σπάνιες γαίες οπότε οι συγκεντρώσεις του σε δυσπρόσιο, έρβιο και άλλες HREEs είναι μεγάλες.

Στοιχείο	Χημικό σύμβολο	Συνολικό εκτιμώμενο απόθεμα (τόνοι)	Ετήσια παραγωγή (τόνοι)	Αφθονία κρυστάλλων (ppm)	Τιμή οξειδίου σπάνιας γης (\$/tn)	Εκτιμώμενο κόστος αποθέματος (\$)
Σκάνδιο	Sc	4500000	600	22	99223	\$446,503,500,000.00
Ύτριο	Y	9000000	8900	30	44500	\$400,500,000,000.00
Λανθάνιο	La	22600000	12500	32	8750	\$197,750,000,000.00
Δημήτριο	Ce	31700000	24000	68	9250	\$293,225,000,000.00
Πρασεοδύμιο	Pr	4800000	2400	9.5	530000	\$2,544,000,000,000.00
Νεοδύμιο	Nd	16700000	7300	38	695000	\$11,606,500,000,000.00
Προμήθιο	Pm	-	-	-	-	-
Σαμάριο	Sm	2900000	700	7.9	13500	\$39,150,000,000.00
Ευρώπιο	Eu	244333	400	2.1	195000	\$47,644,935,000.00
Γαδολίνιο	Gd	3622143	400	7.7	251500	\$910,968,964,500.00
Τέρβιο	Tb	566104	10	1.1	9990000	\$5,655,378,960,000.00
Δυσπρόσιο	Dy	2980000	100	6	3050000	\$9,089,000,000,000.00
Όλμιο	Ho	350000	10	1.4	1075000	\$376,250,000,000.00
Έρβιο	Er	1850000	500	3.8	205000	\$379,250,000,000.00
Θούλιο	Tm	334255	50	0.48	220000	\$73,536,100,000.00
Υτέρβιο	Yb	1900000	50	3.3	15810	\$30,039,000,000.00
Λουτήτιο	Lu	395000	10	0.89	658460	\$260,091,700,000.00

Πίνακας 7 «Απόθεμα και παραγωγή σπάνιων γαιών το 2014»

Πηγή δεδομένων : (Haque et al., 2014)

Στον πίνακα 7 παρατίθενται τα αποθέματα όλων των στοιχείων των σπάνιων γαιών σε τόνους κατά το έτος 2014 καθώς και η ετήσια παραγωγή τους σε μονάδα τόνους ανά έτος. Αναλυτικότερα, παρατηρείται ότι το λανθάνιο, δημήτριο και το νεοδύμιο παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα αποθέματα από όλες τις σπάνιες γαίες, ενώ από τις HREEs αξιοσημείωτες ποσότητες εμφανίζουν το ύτριο, το δυσπρόσιο και το έρβιο. Αντιθέτως, από τις LREEs μικρό απόθεμα έχει το ευρώπιο ενώ το προμήθιο δεν εμφανίζει απόθεμα αφού δεν συναντάται ως ελεύθερο στοιχείο

στην φύση. Αρκετά σπάνια είναι και τα στοιχεία θούλιο, λουτήτιο με συνολικές εκτιμώμενες ποσότητες στο γήινο φλοιό κάτω των 400 χιλιάδων τόνων.

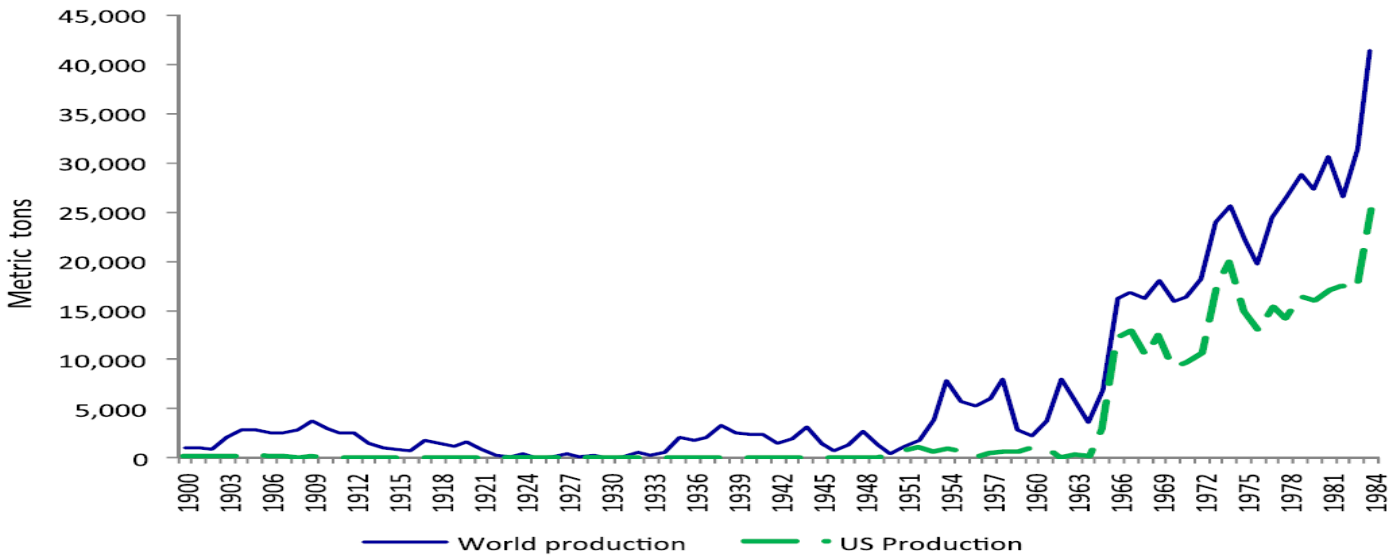
## **2.2 : ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ**

Η παραγωγή των σπάνιων γαιών άρχισε στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα με κύριες χώρες παραγωγής την Βραζιλία, την Ινδία και την Νότια Αφρική όπου είχαν εντοπιστεί πετρώματα μοναζίτη. Η ζήτηση σε σπάνιες γαίες μέχρι το 1965 ήταν πολύ μικρή διότι τότε δεν υπήρχαν τεχνολογίες που να έβρισκαν εφαρμογή οι REs, παρά μόνο σε κράματα με άλλα μέταλλα, όπως ο σίδηρος. Η χρήση μεμονωμένων μετάλλων σπάνιων γαιών ήταν μικρή μέχρι να βελτιωθούν οι διαδικασίες διαχωρισμού και οι μεταλλουργικές τεχνολογίες στη δεκαετία του 1950. Η αύξηση στην ζήτηση εμφανίστηκε με την κατασκευή και διάθεση των πρώτων έγχρωμων τηλεοράσεων στην αγορά το 1965. Ένα από τα βασικά υλικά για τις έγχρωμες εικόνες στις οθόνες αποτελούσε το ευρώπιο και έτσι με αυτόν τον τρόπο οι σπάνιες γαίες εισήχθησαν στις άμεσες ανάγκες της αγοράς.

Παράλληλα εκείνη την χρονική περίοδο εντοπίζονται στις ΗΠΑ πετρώματα μπαστναζίτη με αποτέλεσμα να αρχίσουν οι εργασίες για την δημιουργία ενός ορυχείου στο Mountain Pass στην Καλιφόρνια που να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε σπάνιες γαίες και ιδιαίτερα σε ευρώπιο. Το εν λόγω ορυχείο έγινε σε σύντομο χρονικό διάστημα ο μεγαλύτερος παραγωγός σπάνιων γαιών στον κόσμο και έθεσε τις ΗΠΑ ως την χώρα με την μεγαλύτερη παραγωγή παγκοσμίως. Μεταξύ το 1965 και το 1985, το Mountain Pass προμήθευε το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας κατανάλωσης μετάλλων σπάνιας γης.

Η απότομη αυτή αλλαγή στις ποσότητες παραγωγής αποτυπώνεται και σε αριθμούς, αφού η παραγωγή των ΗΠΑ από το 1965 στο 1966 αυξήθηκε από 2.900 σε 12.200 τόνους ενώ η παγκόσμια παραγωγή από 6.960 σε 16.200 τόνους. Επίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 10, μετά το 1965 το ποσοστό των ΗΠΑ στην παραγωγή σπάνιων γαιών είναι κυρίαρχο. Πράγματι, το μερίδιο των ΗΠΑ την χρονική περίοδο 1965-1984 στην παραγωγή εκτιμάται κατά μέσο όρο στο 63% της παγκόσμιας παραγωγής, φτάνοντας μάλιστα το μέγιστο 78% το 1974.

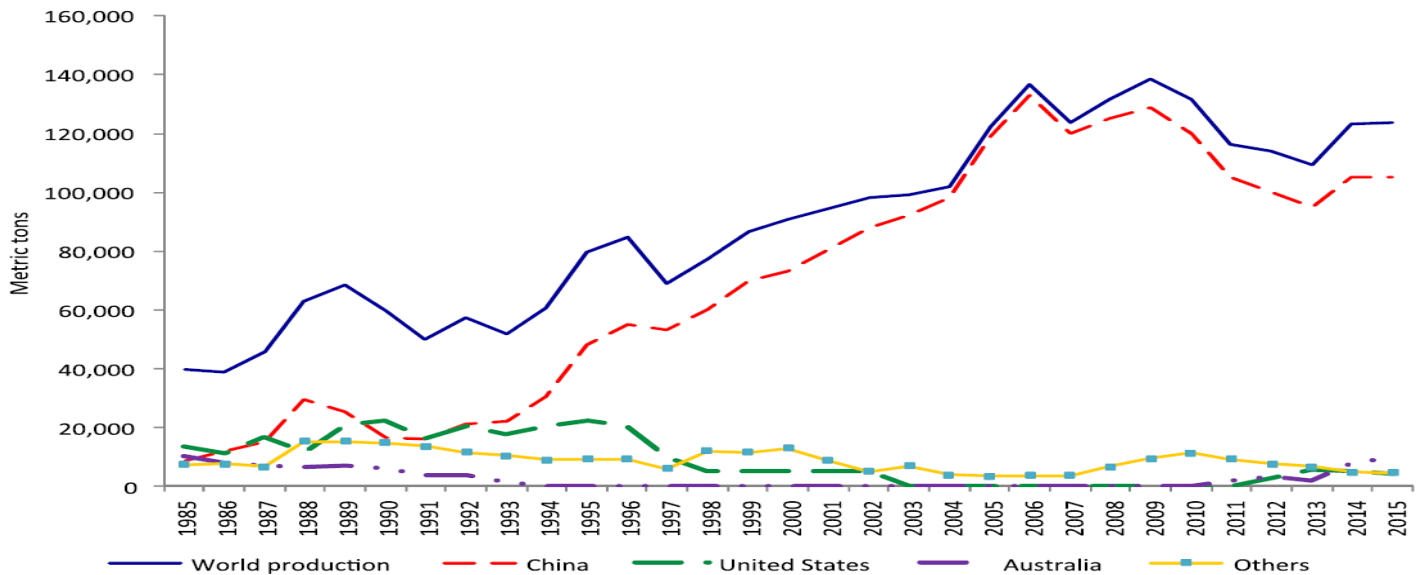
(a) 1900–1984: United States versus the World



Σχήμα 10 «Παραγωγή σπάνιων γαιών 1900-1984» (Fernandez, 2017)

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 και έπειτα οι ΗΠΑ χάνουν σταδιακά την δυναμική τους ενώ αντιθέτως η παραγωγή σπάνιων γαιών στην Κίνα αυξάνεται ραγδαία. Πράγματι, η Κίνα σημείωσε αισθητή άνοδο στην παραγωγή REs, από ποσοστό 20% της παγκόσμιας παραγωγής σε 80% ενώ μάλιστα το ποσοστό αυτό εκτοξεύτηκε το 2005 στο 95%. Το ίδιο χρονικό διάστημα, το μερίδιο των ΗΠΑ συρρικνώθηκε από το 30% το 1985 σε μόλις 6% το 2000.

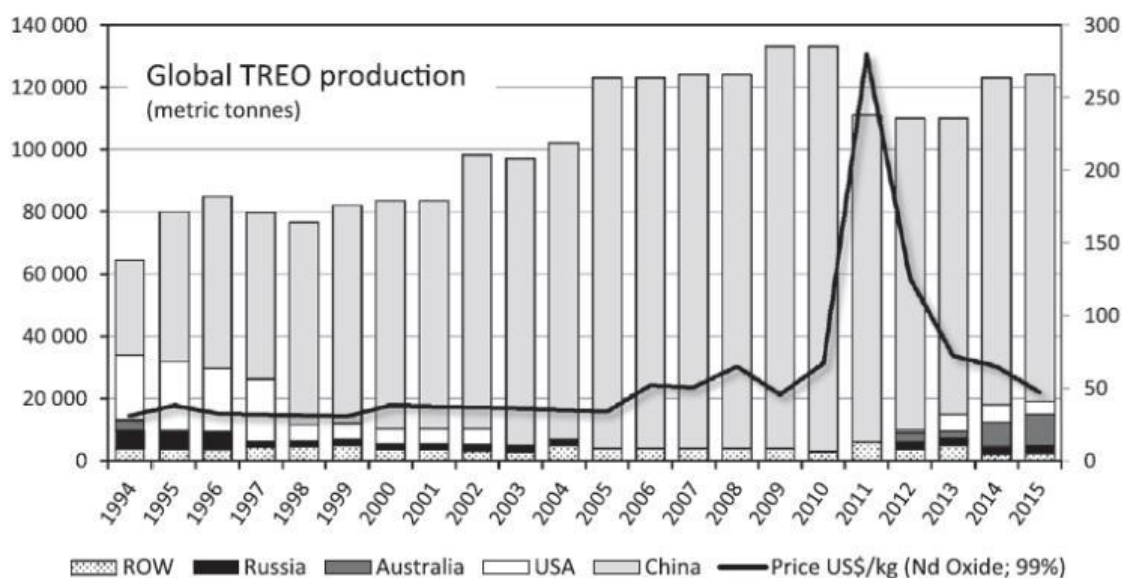
(b) 1985–2015: China’s awakening



Σχήμα 11 «Παραγωγή σπάνιων γαιών 1985-2015» (Fernandez, 2017)

Η Κίνα κατάφερε να αυξήσει σημαντικά την παραγωγή REOs και REEs στις αρχές της δεκαετίας του 1980 με αποτέλεσμα μέσα σε μια δεκαετία να αποτελέσει τον μεγαλύτερο παραγωγό παγκοσμίως. Αυτό επετεύχθη με την πάροδο των χρόνων αφού πέρα του μεγάλου όγκου αποθεμάτων που διαθέτει στα εδάφη της, η Κίνα πουλούσε σπάνιες γαίες σε τόσο χαμηλές τιμές που πολλά ορυχεία σε όλο τον κόσμο δεν μπορούσαν να την ανταγωνιστούν και σταμάτησαν τη λειτουργία τους, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα το Mountain Pass. Όλα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα να ενισχυθεί το μερίδιο της Κίνας στην αγορά οξειδίων σπάνιων γαιών στον κόσμο και να βρίσκεται σταθερά άνω του 90% της παγκόσμιας παραγωγής REs.

Η κατακόρυφη αύξηση της παραγωγής REs διακρίνεται και ποσοτικά στο σχήμα 11 αφού το 1994 η συνολική παραγωγή σπάνιων γαιών κυμάνθηκε περίπου στους 60 χιλιάδες τόνους και έφτασε το 2017 τους 130 χιλιάδες τόνους. Η ανάγκη για πράσινη ενεργεία, η συνεχής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρονικών προϊόντων και οι νέες τεχνολογίες σε αυτοκινητοβιομηχανίες είναι μερικοί από τους λόγους που η άνοδος που παρατηρείται στα νούμερα της παραγωγής σπάνιων γαιών ήταν έντονη. Ωστόσο, ενδέχεται ο πραγματικός αριθμός να είναι ακόμα μεγαλύτερος λόγω της αβεβαιότητας των αριθμών που παρουσιάζει η Κίνα, αφού δεν αποκλείεται να υπάρχει παράνομη και μη δηλούσα παραγωγή. Πάντως σε σύγκριση με άλλα μέταλλα η παραγωγή των REs παραμένει μικρή ακόμα και σήμερα.

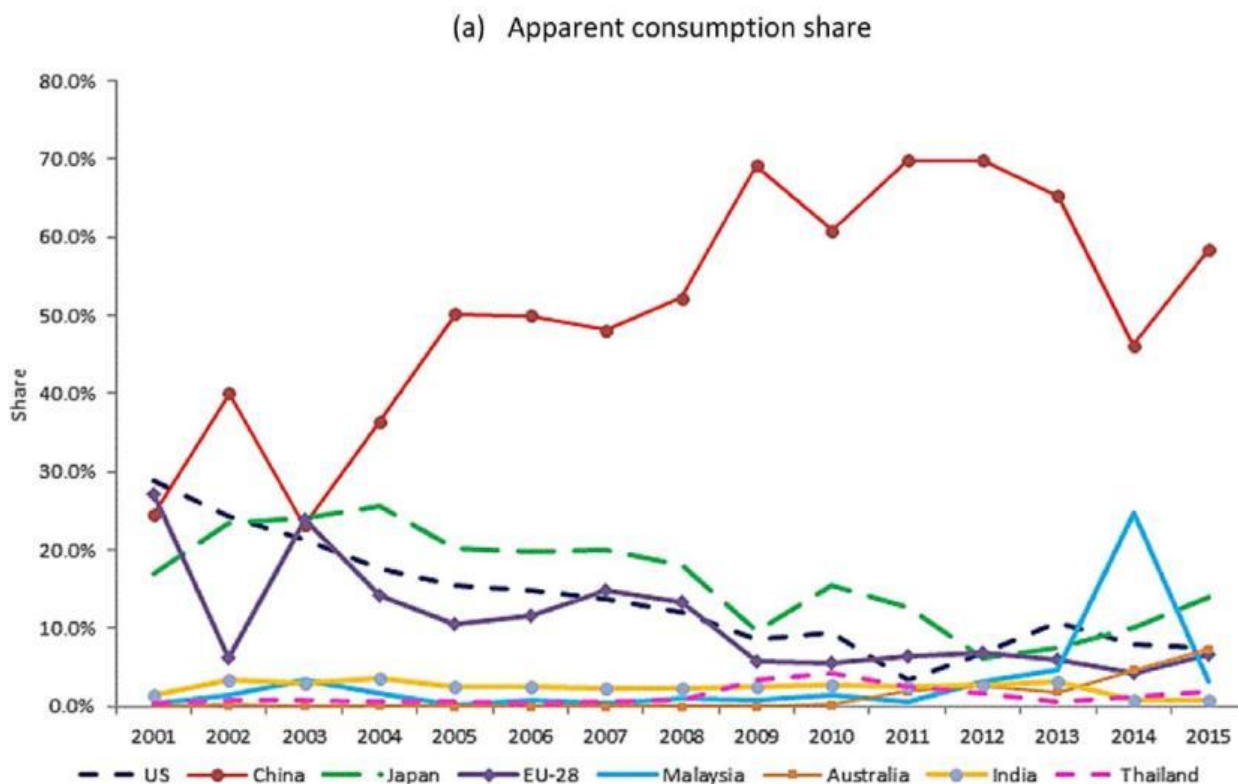


Σχήμα 12 «Παγκόσμια παραγωγή REOs» (Paulicka & Machacek, 2017)

Στο σχήμα 12 εμφανίζονται οι τόνοι παραγωγής κάθε χώρας, με ξεκάθαρη υπεροχή της Κίνας, ιδιαίτερα από την περίοδο 2003 έως 2011, όπου μειώνεται η παραγωγή στις ΗΠΑ. Σύμφωνα με έρευνα που έγινε από το USGS το 2017, η παραγωγή σπάνιων γαιών που εξορύχτηκαν από ορυχεία το προηγούμενο έτος κυμάνθηκε στους 130 χιλιάδες τόνους. Η Κίνα συνείσφερε στην παραγωγή με το συντριπτικό ποσοστό του 87.5% ενώ ακολούθησε η Αυστραλία με 8.3% και με μικρότερα ποσοστά οι ΗΠΑ, η Μαλαισία και η Ρωσία.

### 2.3 : ΜΕΡΙΔΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

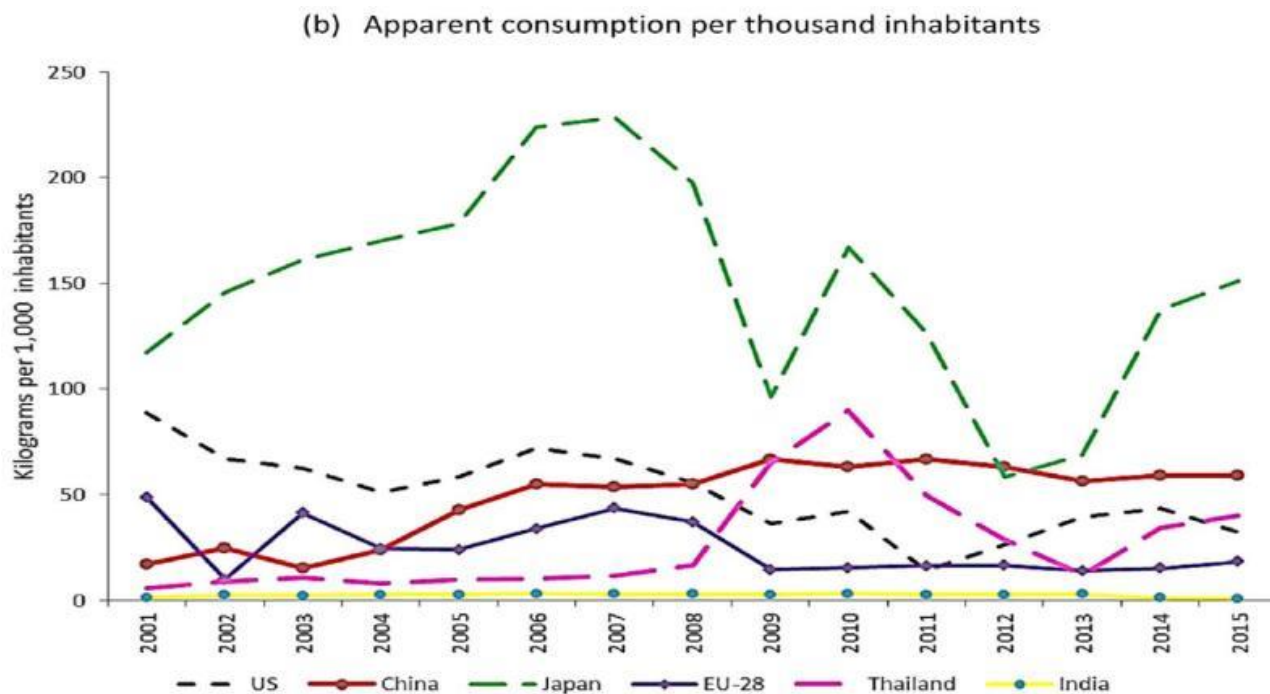
Μια ακόμη παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί είναι τα ποσοστά κατανάλωσης και ζήτησης σε σπάνιες γαίες από κάθε χώρα. Σύμφωνα, με το ακόλουθο γράφημα (σχήμα 13), το μερίδιο κατανάλωσης της Κίνας παρουσιάζει μια αυξανόμενη τάση με την πάροδο του χρόνου, σε αντίθεση με εκείνα των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας που φθίνουν.



Σχήμα 13 «Μερίδια κατανάλωσης σπάνιων γαιών» (Fernandez, 2017)

Συγκεκριμένα το 2001 τα ποσοστά κατανάλωσης είναι μοιρασμένα, με τις ΗΠΑ ωστόσο να έχουν ένα ποσοστό κοντά στο 30% και να αποτελούν την χώρα με την μεγαλύτερη ζήτηση σε σπάνιες γαίες. Παρόμοια ποσοστά εμφανίζουν η Κίνα και οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενώ ακολουθεί η Ιαπωνία. Μετά το 2003 η Κίνα μεγαλώνει συνεχώς το μερίδιο της στην παγκόσμια αγορά και εμφανίζει ποσοστά άνω του 60%, ταυτόχρονα το μερίδιο της Ιαπωνίας και των ΗΠΑ φθίνει και το 2015 φτάνει στο 14% και 8% αντίστοιχα.

Το αντίστοιχο διάγραμμα για τα φαινόμενα μερίδια κατανάλωσης ανά 1000 κατοίκους για την ίδια χρονική περίοδο παρουσιάζει σημαντικές διαφορές όπως φαίνεται παρακάτω (Fernandez, 2017). Ο λόγος που παρατίθεται είναι για να παρέχει μια μέτρηση που αντιστοιχεί στο μέγεθος της οικονομίας μιας χώρας με βάση τον πληθυσμό της.



Σχήμα 14 «Μερίδια κατανάλωσης σπάνιων γαιών ανά 1000 κατοίκους» (Fernandez, 2017)

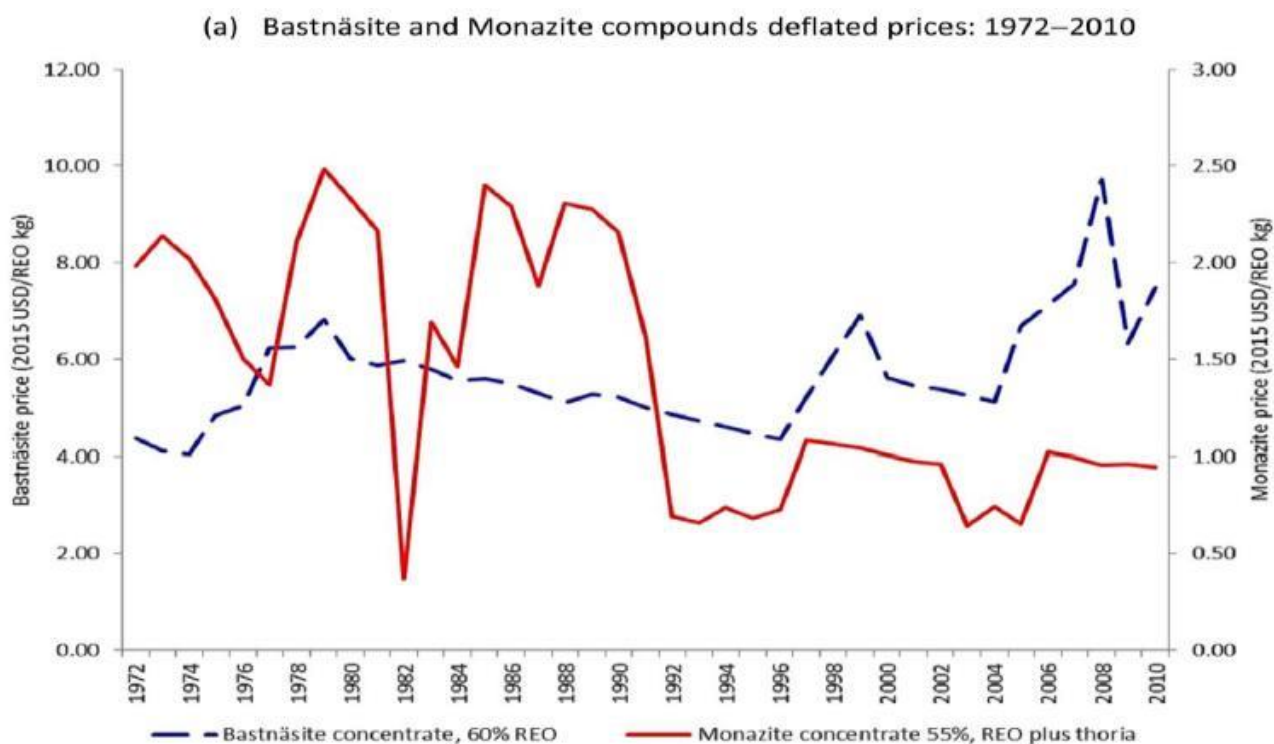
Μελετώντας το προηγούμενο διάγραμμα (σχήμα 14) διαπιστώνουμε εύκολα ότι η Ιαπωνία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής REs ανά 1000 κατοίκους σχεδόν σε όλη την διάρκεια του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Πράγματι, από το 2001 έως το 2015 η μέση φαινόμενη κατανάλωση της Ιαπωνίας έφτασε τα 148,5 κιλά ανά 1000 κατοίκους ενώ η αντίστοιχη κατανάλωση στις ΗΠΑ και στην Κίνα κυμαίνονταν στα 50,4 και 48,1 κιλά ανά 1000 κατοίκους, αντίστοιχα.



## 2.4 : ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΙΜΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

### 2.4.1 : ΤΙΜΕΣ ΟΡΥΚΤΩΝ

Οι σπάνιες γαίες, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν βρίσκονται ως ελεύθερα μέταλλα στην φύση, παρά μόνο συναντούνται μέσα σε διάφορα ορυκτά, όπως ο μαστναζίτης και ο μοναζίτης. Τα δυο αυτά πετρώματα χαρακτηρίζονται για την υψηλή περιεκτικότητά τους σε LREEs ενώ ο μοναζίτης παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερες ποσότητες σε HREEs σε σύγκριση με τον μαστναζίτη. Οι τιμές και των δυο ορυκτών παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, με την τιμή του μαστναζίτη να είναι μεγαλύτερη του μοναζίτη παρά τις μεγαλύτερες ποσότητες HREEs που περιέχει ο τελευταίος. Σύμφωνα με έρευνες, αυτό πιθανόν να συμβαίνει λόγω της ύπαρξης ραδιενεργού θορίου στην σύσταση του μοναζίτη και στην δυσκολία διαχωρισμού από τα οξείδια των σπάνιων γαιών.



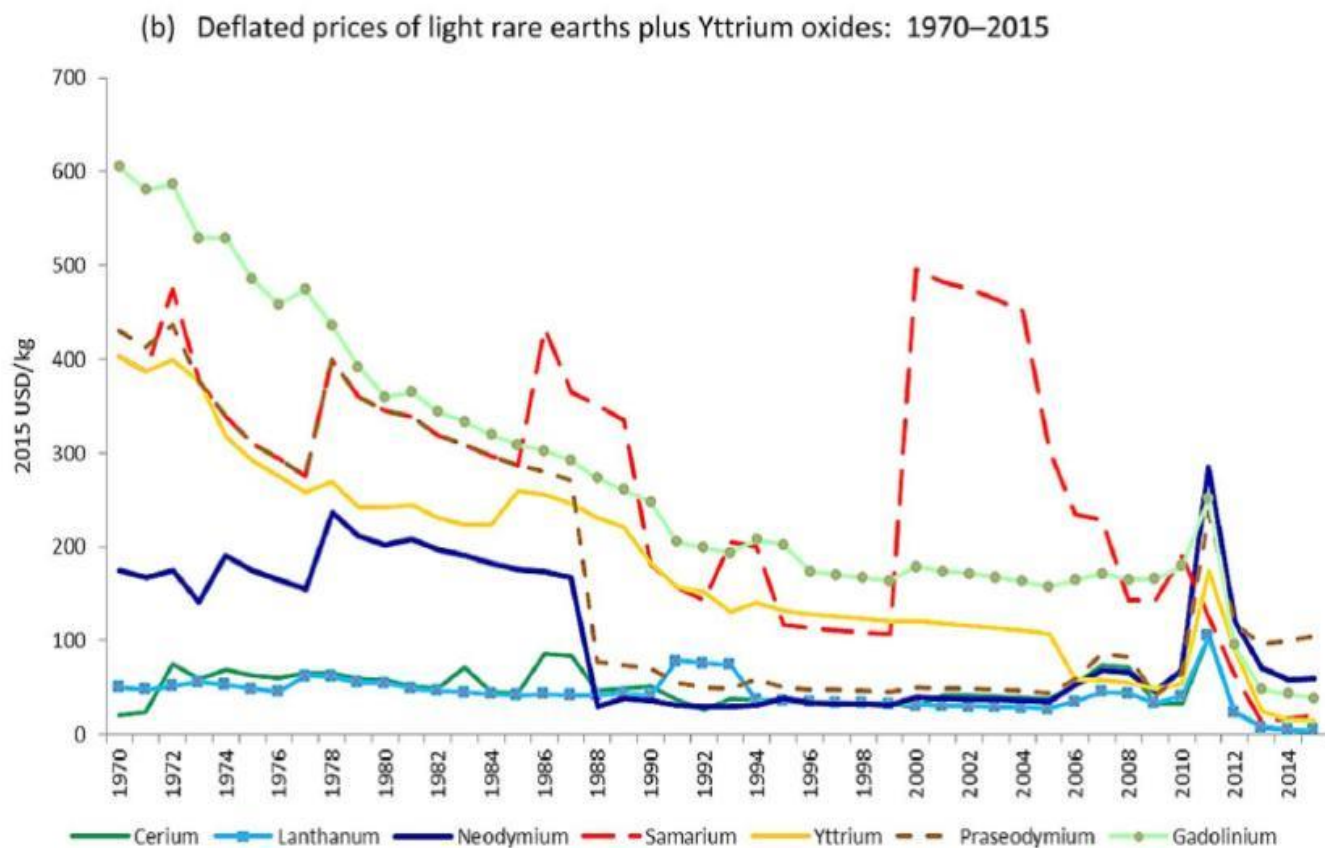
Σχήμα 15 «Τιμές μαστναζίτη και μοναζίτη» (Fernandez, 2017)

Στο σχήμα 15 αναπαριστάται η εξέλιξη των τιμών του μαστναζίτη και του μοναζίτη από το 1972 έως το 2010. Η μέγιστη τιμή ενός κιλού μαστναζίτη έφτασε τα 10\$ ενώ το 2010 η τιμή του έπεσε στα 4\$, αντίθετα ο μοναζίτης είχε αισθητά χαμηλότερες τιμές, με μέγιστη τα 2,5\$ ανά κιλό.

Μάλιστα, από την αρχή του αιώνα μέχρι και σήμερα η τιμή του κιλού του μοναζίτη κυμαίνεται κοντά στο δολάριο.

## 2.4.2 : ΤΙΜΕΣ ΕΛΑΦΡΙΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Οι σπάνιες γαίες διατίθενται στην αγορά κυρίως σε μορφή οξειδίων (REOs) με σκοπό την χρησιμοποίησή τους στις σύγχρονες τεχνολογίες. Οι διαδικασίες διαχωρισμού και επεξεργασίας των πετρωμάτων είναι πολύπλοκες και απαιτούν μεγάλη προσοχή, ιδιαίτερα στον διαχωρισμό του θορίου από πετρώματα μοναζίτη. Επίσης, το κόστος παραγωγής είναι μεγάλο αφού οι ποσότητες των παραγόμενων οξειδίων σπάνιων γαιών είναι μικρές. Όλα αυτά αποτυπώνονται στην τελική τιμή των οξειδίων, που είναι σαφώς υψηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές των πετρωμάτων.



Σχήμα 16 «Τιμές ελαφριών σπάνιων γαιών» (Fernandez, 2017)

Στο παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 16) εμφανίζονται οι διακυμάνσεις των τιμών ελαφριών σπάνιων γαιών και του ύττριου κατά την χρονική περίοδο 1970 έως 2015. Είναι εμφανές ότι οι



τιμές των περισσότερων σπάνιων γαιών βρίσκονταν στο ζενίθ στις αρχές της δεκαετίας του 1970, με εξαίρεση το σαμάριο που παρουσίασε μέγιστη τιμή το 2000, λόγω ευρείας χρήσης σε μαγνήτες (σαμάριου-κοβαλτίου) και ιατρικά μηχανήματα.

Η τιμή των μετάλλων καθορίζεται από τα διαθέσιμα αποθέματα καθώς και από την ζήτησή τους. Έτσι, μέταλλα όπως το γαδολίνιο, το πρασεοδύμιο και το σαμάριο εμφανίζουν υψηλές τιμές αφού τα αποθέματα τους είναι περιορισμένα σε σύγκριση με μέταλλα όπως το λανθάνιο και το δημήτριο που υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες.

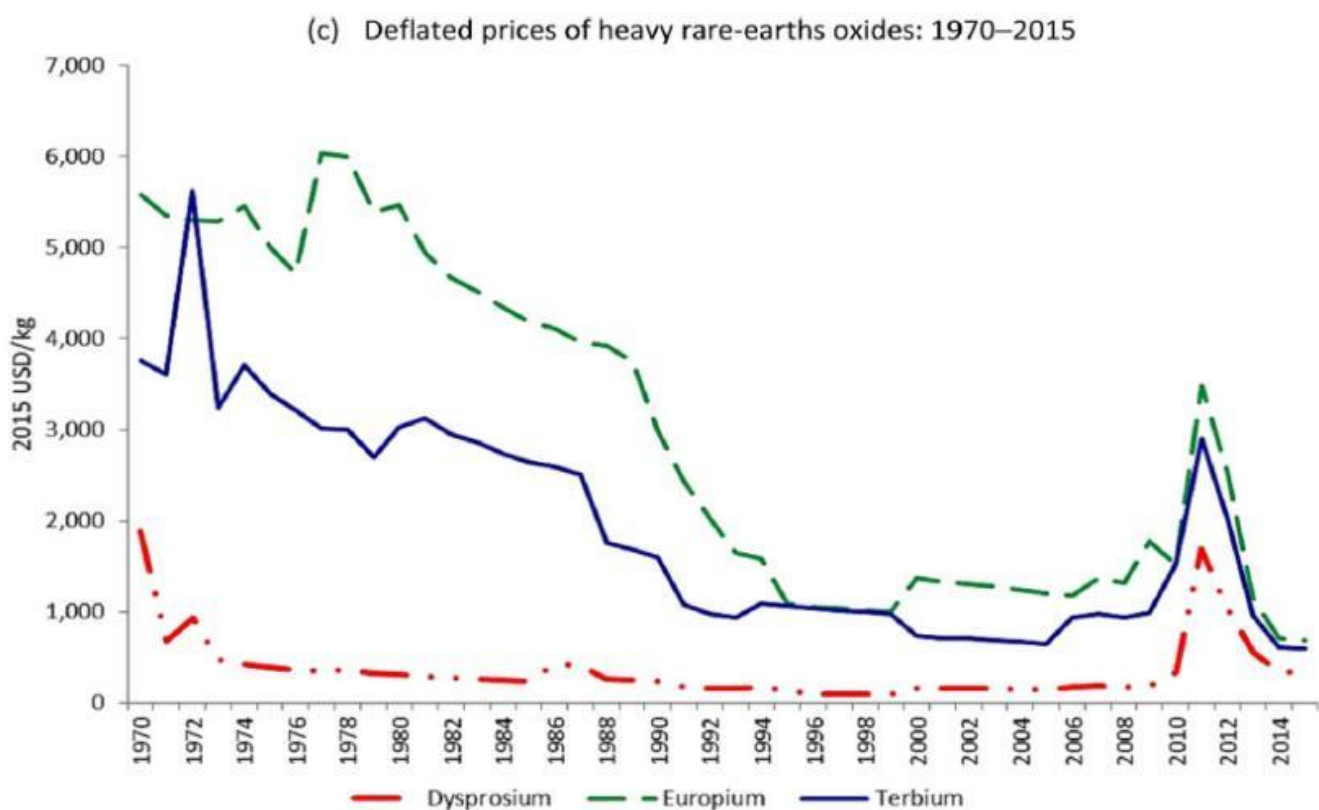
Επίσης, την τελευταία δεκαετία λόγω της ευρείας χρήσης μόνιμων μαγνητών στις βιομηχανίες, η ζήτηση για νεοδύμιο και πρασεοδύμιο έχει αυξηθεί. Ωστόσο, τα αποθέματά τους δεν είναι μεγάλα, (ιδιαίτερα του πρασεοδύμιου), και αυτό έχει οδηγήσει στην αύξηση των τιμών τους, σε επίπεδα άνω των 100\$ το κιλό. Παράλληλα, το λανθάνιο, το δημήτριο και το ύτριο εμφανίζουν μικρότερες τιμές όχι όμως λόγω μικρότερης ζήτησης αλλά αντιθέτως επειδή υπάρχει μεγάλο απόθεμα στον γήινο φλοιό.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά το προηγούμενο γράφημα ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρονική περίοδος 2010-2012 όπου οι τιμές όλων των REOs εμφανίζουν κατακόρυφη αύξηση. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο μεταρρυθμιστικό πλαίσιο που επέβαλε το 2011 η κινέζικη κυβέρνηση στην νομοθεσία για μείωση των εξαγωγών, απαιτώντας μεγαλύτερη ποσοστιαία εξαγόμενα προϊόντα καθώς και την επιβολή πρόσθετων αξιών. Εκείνη την περίοδο η ζήτηση σε σπάνιες γαίες αυξανόταν με ραγδαίους ρυθμούς και έτσι μετά τον ξαφνικό περιορισμό των εξαγωγών του μεγαλύτερου προμηθευτή παγκοσμίως οι τιμές των REOs αυξήθηκαν κατακόρυφα. Ωστόσο, η τιμή τους ακολούθησε σύντομα πτωτική πορεία λόγω επιπλήξεων από τον παγκόσμιο οργανισμό εμπορίου στην Κίνα και την εύρεση νέων αποθεμάτων σε άλλες χώρες, όπως η Αυστραλία και η Μαλαισία. Αξιοσημείωτο είναι ότι πολλά ορυχεία σε ΗΠΑ και Αυστραλία επαναλειτούργησαν μετά από χρόνια αφού πλέον η Κίνα δεν παρείχε τις χαμηλές τιμές του παρελθόντος.

### **2.4.3 : ΤΙΜΕΣ ΒΑΡΕΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ**

Οι βαριές σπάνιες γαίες, με εξαίρεση το ύτριο, βρίσκονται σε πολύ μικρό απόθεμα στον φλοιό της γης και εντοπίζονται κυρίως σε πετρώματα ξενότιμου, μπορούν ωστόσο να εντοπιστούν

σε ορυκτά όπως ο μαστναζίτης και ο μοναζίτης αλλά σε πολύ μικρότερες ποσότητες. Οι διαδικασίες εξόρυξης τους είναι οι πλέον πιο απαιτητικές και δαπανηρές αφού το ξενότιμο περιέχει ποσότητες ραδιενεργού θορίου, που δυσκολεύει τον διαχωρισμό και την επεξεργασία των REEs. Οι δυο παραπάνω λόγοι σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση αυτών των μετάλλων έχει οδηγήσει τις τιμές των HREEs σε υψηλά επίπεδα.



Σχήμα 17 «Τιμές βαρέων σπάνιων γαιών» (Fernandez, 2017)

Στο σχήμα 17 αποτυπώνεται ποσοτικά η διακύμανση των τιμών των HREEs από το χρονική περίοδο 1970-2015. Τα υπό μελέτη χημικά στοιχεία είναι το δυσπρόσιο, το ευρώπιο και το τέρβιο. Η μέγιστη τιμή και των τριών μετάλλων παρουσιάζεται στις πρώτες δεκαετίες διάθεσης τους στην αγορά ενώ με την πάροδο των χρόνων παρατηρείται μια γενική πτώση των τιμών μέχρι και το 2011, όπου υπήρξε απότομη αύξηση των τιμών λόγω των περιορισμών στις εξαγωγές που επέβαλε η Κίνα. Μετά τις επιπλήξεις από τον παγκόσμιο οργανισμό εμπορίου οι τιμές επανήλθαν σε φυσιολογικά επίπεδα με τις τιμές και των τριών μετάλλων να είναι κοντά στα 1000\$ ανά κιλό. Ενδεικτικά αναφέρονται με βάση το σχήμα 17 οι τιμές του ευρώπιου, του τέρβιου και του δυσπρόσιου οι οποίες έφτασαν το 2011 στα 3500\$/kg, 3000\$/kg και 2000\$/kg αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τις τιμές των δυο τελευταίων διαγραμμάτων, παρατηρούμε ένα τεράστιο χάσμα στις τιμές μεταξύ LREEs και HREEs. Οι τελευταίες παρουσιάζουν πολλαπλάσιες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες LREEs, χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το λανθάνιο και το δημήτριο που παρουσίασαν το 2015 τιμές 43\$/kg και 47\$/kg αντίστοιχα σε σύγκριση με το δυσπρόσιο και το τέρβιο που εμφάνισαν τιμές κοντά στα 1000\$/kg για το ίδιο έτος.

## 2.5 : Η ΚΥΡΙΑΡΧΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΑΣ ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Η αξιοποίηση των REs στην Κίνα ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1950, όταν άρχισε την ανάκτηση τους κατά την διάρκεια της διαδικασίας εξόρυξης σιδήρου και χάλυβα, στο ορυχείο Bayan Obo στην περιοχή Βαοτου στην Εσωτερική Μογγολία (Hurst, 2010; Tse, 2011). Την δεκαετία του 1960 βρέθηκαν νέα κοιτάσματα στην περιοχή Shandong και τη δεκαετία του 1980 στην περιοχή Sichuan.



Σχήμα 18 «Περιοχές κοιτασμάτων σπάνιων γαιών στην Κίνα»

[http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare\\_earth/resources&production.shtml](http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare_earth/resources&production.shtml)

Με τον εντοπισμό όλο και περισσότερων κοιτασμάτων σε όλη την επικράτεια της η Κίνα άρχισε την παραγωγή οξειδίων και μετάλλων σπάνιων γαιών τα οποία διέθετε στην αγορά. Μάλιστα, κατάφερε να αυξήσει την παραγωγή της σε τόσο μεγάλο βαθμό που από το 1992 και έπειτα αποτελεί τον κορυφαίο παραγωγό σπάνιων γαιών στον πλανήτη, φτάνοντας σε σημείο να ελέγχει το 90%-95% της παγκόσμιας παραγωγής. Σήμερα, η Κίνα αριθμεί πάνω από 70 ορυχεία σε όλη την επικράτεια της ωστόσο η μεγαλύτερη παραγωγή γίνεται στο ορυχείο Bayan Obo που είναι πλούσιο σε πετρώματα μπαστναζίτη.

Η Κίνα άρχισε να εξάγει REs ως πρώτη ύλη το 1970 ωστόσο έπειτα από μερικά χρόνια δραστηριοποιήθηκε και επένδυσε στον μεταποιητικό τομέα για να εξάγει προϊόντα στα οποία βρίσκουν εφαρμογή οι REs. Ως εκ τούτου, την δεκαετία του 1990 άρχισε να παράγει μαγνήτες, φώσφορους και άλλα προϊόντα που χρησιμοποιούνται σπάνιες γαίες ενώ σήμερα έχει φτάσει στο σημείο να παράγει τελικά προϊόντα όπως μπαταρίες αυτοκινήτων, smartphones, οθόνες τηλεόρασης, κινητήρες, ανεμογεννήτριες, μαγνητικούς τομογράφους και πολλές ακόμα νέες τεχνολογίες.

Η παραγωγή όλων αυτών των προϊόντων που έχουν ως βάση τις REs συνεπάγεται με ταυτόχρονη ανάπτυξη των εγχώριων βιομηχανιών και επιχειρήσεων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εκθετική αύξηση της ζήτησης σπάνιων γαιών στην Κίνα. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι από το 1978 έως το 2007, η ετήσια εγχώρια κατανάλωση REs στην Κίνα αυξήθηκε από 1000 τόνους σε 72.600 τόνους, με μια μέση ετήσια αύξηση της τάξεως του 14,5% (Neill & Speed, 2012).

Η Κίνα επιδίωξε τα επόμενα χρόνια να ενισχύσει ακόμη περισσότερο την κυρίαρχη της θέση στην αγορά σπάνιων γαιών, μέσω επενδύσεων σε χώρες που είχαν εμφανίσει κοιτάσματα REs. Κατά αυτόν τον τρόπο διαχειριζόταν η ίδια ένα συντριπτικό ποσοστό του παγκόσμιου αποθέματος, από το στάδιο της εξόρυξης πετρωμάτων μέχρι και την διάθεση των τελικών προϊόντων στην αγορά. Επιπλέον, εξαγόρασε πολλές εταιρίες εκτός Κίνας που δραστηριοποιούνταν σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έτσι ώστε να ισχυροποιήσει την θέση της.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι για πολλά χρόνια οι εισαγωγές REs από Κίνα στον υπόλοιπο κόσμο ήταν πολύ περισσότερες από τις αντίστοιχες εξαγωγές που δήλωνε εκείνη. Αυτή η ασυμφωνία μεταξύ των αριθμών υπάρχει ενδεχομένως εξαιτίας παράνομων εξαγωγών REEs και

κραμάτων μετάλλων που περιέχουν στοιχεία σπάνιων γαιών. Αυτή η επισήμανση ενισχύει ακόμη περισσότερο την υπεροχή της Κίνας στην αγορά των σπάνιων γαιών.

Όλα αυτά έκαναν την Κίνα να αποτελεί κυρίαρχη δύναμη στην παραγωγή και την κατανάλωση σπάνιων γαιών παγκοσμίως με ποσοστά που κυμαίνονται σταθερά άνω του 90%. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι σπάνιες γαίες διαθέτουν μοναδικά χαρακτηριστικά και για αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή ηλεκτρονικών προϊόντων και τεχνολογιών τόσο για εγχώριες όσο και για εξαγωγικές αγορές. Η Κίνα φάνηκε να γνωρίζει την δυναμική τους και με γνώμονα την δεσπόζουσα θέση που είχε αποκτήσει στην αγορά αποφάσισε το 2011 να μειώσει τις εξαγωγές μέσω ενός μεταρρυθμιστικού πλαισίου. Κατά αυτόν τον τρόπο απαιτούσε μεγαλύτερη ποσόστωση στα εξαγόμενα προϊόντα καθώς και την επιβολή πρόσθετων αξιών. Έτσι, με τον ξαφνικό περιορισμό των εξαγωγών του μεγαλύτερου προμηθευτή παγκοσμίως οι τιμές των REs αυξήθηκαν κατακόρυφα, δείγμα της εξάρτησης της αγοράς από την Κίνα. Ωστόσο, είναι πιθανό ότι η απροθυμία της κινέζικης κυβέρνησης να πουλήσει σπάνιες γαίες, να αποτελεί υπεράσπιση του εγχώριου κατασκευαστικού τομέα και προσπάθεια μείωσης των ρύπων που εκπέμπονται από τα ορυχεία και τις βιομηχανίες, αφού ουδείς μπορεί να αγνοήσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που αφήνουν πίσω τους οι διαδικασίες επεξεργασίας και εξόρυξης REs.

Εξάλλου, η κινέζικη κυβέρνηση ανακοίνωσε ότι μεταξύ του 2010 και του 2011, οι εξαγωγές REEs προς το εξωτερικό μειώθηκαν κατά 85% ενώ παράλληλα τα υπόλοιπα κράτη παρουσίασαν μείωση των εισαγωγών REEs από την Κίνα κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 40% για την ίδια χρονική περίοδο και σχεδόν 50% την επόμενη χρονιά (Fernandez, 2017). Αυτή η φθίνουσα τάση στις αναφερόμενες εξαγωγές και εισαγωγές αντιστράφηκε από το 2013 και μετά, και οι ονομαστικές τιμές άρχισαν να πέφτουν στα επίπεδα που παρατηρήθηκαν το 2010 για τα περισσότερα οξείδια.

Το χρονικό διάστημα 2010-2012, όπου οι τιμές ήταν υπερβολικά υψηλές, ήταν αρκετό για να αφυπνίσει τους καταναλωτές και τις βιομηχανίες σπάνιων γαιών σε όλο τον κόσμο. Πολλές εταιρείες εξόρυξης άρχισαν να επαναλειτουργούν ορυχεία που είχαν κλείσει και να επανεκτιμούν τα αποθέματα REs που υπάρχουν στα εδάφη τους. Επιπλέον πολλές κυβερνήσεις μεγάλων χωρών χρηματοδότησαν έρευνες με σκοπό τον εντοπισμό νέων κοιτασμάτων ορυκτών που περιέχουν σπάνιες γαίες.

Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών ήταν πολύ ενθαρρυντικά αφού ανέδειξαν και άλλες περιοχές με κοιτάσματα σπάνιων γαιών (Paulick & Machacek, 2017). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών που δημοσιεύτηκαν το 2015 βρέθηκαν 39 Mtn στην Γροιλανδία, 38 Mtn στον Καναδά και 10,3 Mtn στην Αφρική έπειτα από 3,15 και 11 ερευνητικές αποστολές αντίστοιχα. Το 2010 το εκτιμώμενο παγκόσμιο απόθεμα σε σπάνιες γαίες εκτός Κίνας κυμαίνονταν γύρω στους 16,5 Mtn, ενώ μετά τα αποτελέσματα των ερευνών τα συνολικά αποθέματα υπολογίζονται περίπου στους 88 Mtn.

Παράλληλα, οι κατασκευαστές για να αντιμετωπίσουν την απότομη αύξηση των τιμών ακολούθησαν μια σειρά από ενέργειες. Αρχικά προσπάθησαν να βρουν τρόπους για να μειωθεί η συνολική ποσότητα σε REEs στα τελικά προϊόντα, έπειτα αναζήτησαν άλλα υλικά και μέταλλα που να εμφανίζουν παρόμοιες ιδιότητες για να αντικαταστήσουν τις σπάνιες γαίες με αυτά. Τέλος, λήφθηκε υπόψη η ανάπτυξη εναλλακτικών προϊόντων που δεν θα περιείχαν REEs.

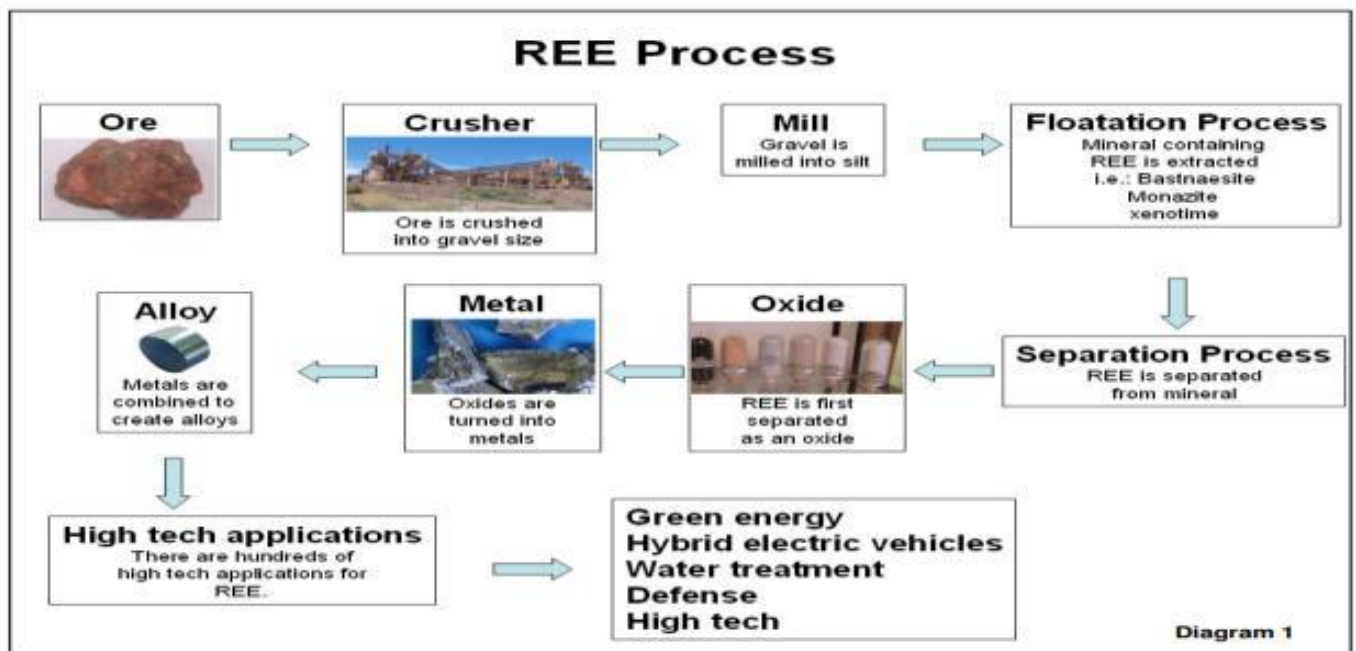
Αυτή η προσπάθεια είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης μετάλλων σπάνιας γης που χρησιμοποιούνται στους περισσότερους τύπους μόνιμων μαγνητών και στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου (King, 2015). Στις ΗΠΑ, η μέση κατανάλωση σπάνιων γαιών ανά μονάδα κατασκευασμένου προϊόντος έχει μειωθεί, αλλά η ζήτηση για περισσότερα προϊόντα που κατασκευάζονται με στοιχεία σπάνιων γαιών έχει αυξηθεί. Το αποτέλεσμα του εγχειρήματος ήταν η υψηλότερη κατανάλωση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

Η ανάκτηση των σπάνιων γαιών από ορυκτά πετρώματα, ο διαχωρισμός, η επεξεργασία τους και ακολούθως η παραγωγή καθαρών οξειδίων και τελικών μετάλλων σπάνιων γαιών είναι μια σύνθετη και απαιτητική διαδικασία που απασχολεί ακόμα και σήμερα την επιστημονική κοινότητα. Για τους παραπάνω λόγους, σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία που λαμβάνει μέρος έτσι ώστε τα κράματα, τα οξειδία ή και οι ίδιες σπάνιες γαίες να διατεθούν στην αγορά και να αξιοποιηθούν σε κάποια νέα ή υπάρχουσα τεχνολογία.

### 3.1 : ΕΞΟΡΥΞΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΩΦΕΛΙΜΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Μετά τον εντοπισμό κοιτασμάτων σπάνιων γαιών σε κάποιο ορυχείο, γίνεται η εξόρυξή τους. Η εξόρυξη για ένα τυπικό ορυχείο ανοιχτού λάκκου γίνεται με την απομάκρυνση της υπερφόρτωσης (χώμα, σκωρία, κλπ), την σύνθλιψη του ορυκτού σε μεγέθη χαλικιού και έπειτα την άλεση του μέσα σε λάσπη. Στην συνέχεια, λαμβάνει μέρος η διαδικασία επίπλευσης, όπου με την προσθήκη νερού και ορισμένων ειδικών αντιδραστικών ουσιών το μίγμα γίνεται πλέον υδαρές. Με αυτήν την διαδικασία εξάγεται ορυκτό που περιέχει στοιχεία σπάνιων γαιών (μπασταναζίτης, μοναζίτης) αφού το αρχικό ορυκτό ενδέχεται να περιέχει και άλλα πετρώματα χαμηλότερης αξίας.



Σχήμα 19 «Διαδικασία επεξεργασίας σπάνιων γαιών» (Hurst, 2010)

Έπειτα με υδρομεταλλουργικές ή πυρομεταλλουργικές διαδικασίες οι σπάνιες γαίες διαχωρίζονται ως καθαρά οξείδια μέσω χημικής αντίδρασης. Κατόπιν τα οξείδια μετατρέπονται σε μέταλλα, τα μέταλλα συνδυάζονται μεταξύ τους και δημιουργούν κράματα που βρίσκουν εφαρμογή σε νέες τεχνολογίες και προϊόντα.

### **3.2 : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΑΤΟΣ**

Η αξιοποίηση των ορυκτών των σπάνιων γαιών επιτυγχάνεται με την μέθοδο της επίπλευσης που αποτελεί μια τεχνολογική επεξεργασία η οποία συνοδεύεται από τον χημικό και φυσικό διαχωρισμό των στοιχείων των σπάνιων γαιών με βάση την βαρύτητα και την μαγνητική τους συμπεριφορά.

Οι REEs περιέχονται σε ανθρακικά, φωσφορικά ή πυριτικά ορυκτά πετρώματα σπάνιων γαιών, που χαρακτηρίζονται από την μικρή τους διαλυτότητα στο νερό. Τα πετρώματα αυτά υπόκεινται σε μια σειρά χημικών αλλαγών και μετατρέπονται σε υδροδιαλυτές ενώσεις οι οποίες μετά από διαδικασίες διάλυσης, διαχωρισμού, καθαρισμού, συμπύκνωσης ή καύσης, μετατρέπονται σε διάφορα είδη μικτών ενώσεων σπάνιων γαιών. Αυτές οι ενώσεις θα αποτελέσουν τις πρώτες ύλες για προϊόντα ή θα διαχωριστούν περαιτέρω για να προκύψουν μεμονωμένα REEs που θα διατεθούν στην αγορά. Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή και ως μέθοδος αποσύνθεσης του συμπυκνώματος.

Υπάρχουν πολλές υποκατηγορίες της παραπάνω μεθόδου, όμως τρία είναι τα κύρια είδη που μπορεί να διακριθεί, η αλκαλική, η χλωριωμένη και η αποσύνθεση οξέος. Η τελευταία χωρίζεται σε αποσύνθεση υδροχλωρικού οξέος, αποσύνθεση θειικού οξέος και αποσύνθεση υδροφθορικού οξέος, ενώ η αλκαλική αποσύνθεση χωρίζεται σε αποσύνθεση υδροξειδίου του νατρίου και τήξης υδροξειδίου του νατρίου. Γενικά, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογικής διαδικασίας εξαρτάται από πολλά χαρακτηριστικά, όπως ο τύπος και ο βαθμός συμπύκνωσης, το πλάνο αξιοποίησης της σπάνιας γης, η υγιεινή της εργασίας και μερικοί ακόμα οικονομικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες.

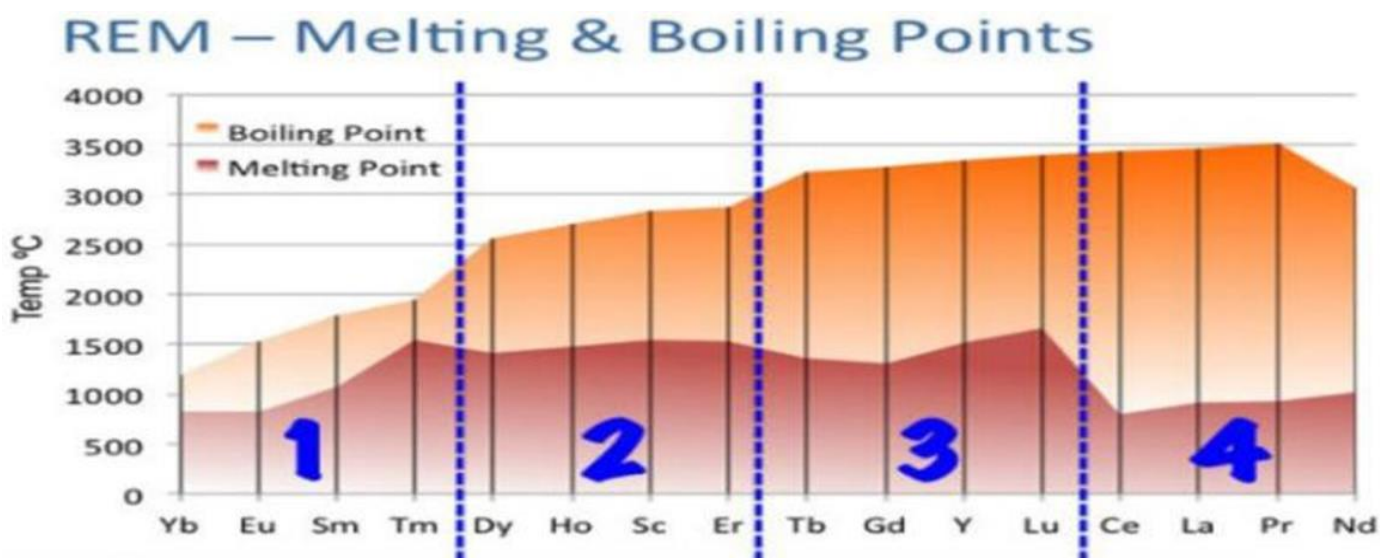


### 3.3 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΗΞΗΣ

Υπάρχουν δυο κύριες μέθοδοι τήξης των σπάνιων γαιών, αυτές είναι η υδρομεταλλουργία και η πυρομεταλλουργία οι οποίες θα συζητηθούν συνοπτικά παρακάτω :

- **Υδρομεταλλουργία**

Η υδρομεταλλουργία αποτελεί τη διαδικασία διαχωρισμού των πετρωμάτων των σπάνιων γαιών που προσδίδει τον μεγαλύτερο βαθμό καθαρότητας των REEs. Πρόκειται για περίπλοκη και απαιτητική διαδικασία όπου τα προϊόντα που προκύπτουν διαθέτουν υψηλό βαθμό εξευγενισμού και αξιοποιούνται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές ως καθαρά στοιχεία ή οξείδια.



Σχήμα 20 «Σημεία τήξης και βρασμού στοιχείων σπάνιων γαιών»

<https://www.ameslab.gov/mpc/ames-process-rare-earth-metals>

- **Πυρομεταλλουργία**

Η διαδικασία της πυρομεταλλουργίας παρουσιάζει λιγότερες δυσκολίες σε σχέση με την υδρομεταλλουργία, η οποία όμως έχει υψηλότερη παραγωγικότητα. Η πυρομεταλλουργία των σπάνιων γαιών καλύπτει κυρίως τη διαδικασία πυριτοθερμικής για την παρασκευή κραμάτων σπάνιων γαιών, τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης τήγματος αλατιού για την παρασκευή στοιχείων σπάνιων γαιών ή κραμάτων και τη

μεταλλοθερμική για την παρασκευή κραμάτων σπάνιων γαιών. Είναι αξιοσημείωτο ότι και οι τρεις μέθοδοι πραγματοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στο σχήμα 20 διακρίνεται πως στοιχεία όπως το δημήτριο και το λανθάνιο που ανήκουν στις LREEs εμφανίζουν τα υψηλότερα σημεία βρασμού ενώ αντιθέτως παρουσιάζουν τα χαμηλότερα σημεία τήξης. Όσον αφορά τα στοιχεία που ανήκουν στις HREEs (όλμιο, έρβιο, λουτήτιο, κλπ), εκείνα εμφανίζουν υψηλά σημεία τήξης ενώ τα σημεία βρασμού τους ποικίλουν.

### **3.4 : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ**

Το ανθρακικό άλας σπάνιων γαιών και τα χλωρίδια σπάνιων γαιών αποτελούν τα κύρια προϊόντα στη βιομηχανία σπάνιων γαιών και για την παραγωγή τους υπάρχουν δύο κύριες διαδικασίες. Η εξαγωγή τους γίνεται με την χρήση τοξικών ή αλκαλικών ουσιών ανάλογα με την ορυκτολογία των REs. Η πρώτη μέθοδος γίνεται με συμπυκνωμένο ψήσιμο θεικού οξέος, ενώ στην δεύτερη χρησιμοποιείται καυστική σόδα, και αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως αλκαλική μέθοδος.

Οι σπάνιες γαίες βρίσκονται κυρίως σε μια ποικιλία ανθρακικών, πυριτικών και άλλων ορυκτών, παράλληλα όμως ένα σημαντικό ποσοστό των REEs βρίσκεται σε φωσφορικά μεταλλεύματα όπως ο απατίτης. Το συνολικό απόθεμα φωσφορικών μεταλλευμάτων στον κόσμο εκτιμάται περίπου στους 100 δισεκατομμύρια τόνους, ενώ η μέση περιεκτικότητά τους σε REEs είναι 0,05%. Συνεπώς, τα μεταλλεύματα φωσφορικών πετρωμάτων διαθέτουν απόθεμα σε REEs που εκτιμάται περίπου στους 50 εκατομμύριους τόνους.

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά κάθε REE χρησιμοποιείται η κατάλληλη διαδικασία για την ανάκτηση τους. Όπως έχει αναφερθεί, οι διεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν σε υγρές και θερμές. Η υγρή μέθοδος μπορεί η ίδια να ταξινομηθεί σε μεθόδους νιτρικού οξέος, υδροχλωρικού οξέος και θεικού οξέος ενώ όσον αφορά την θερμή μέθοδο το ποσοστό ανάκτησης μπορεί να φτάσει έως και 60%, καθώς κατά την διαδικασία αυτή υπάρχουν απώλειες.

Παράλληλα, εξαιτίας των όμοιων κι ενίοτε κοινών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν όλα τα στοιχεία των σπάνιων γαιών, πολλά πρόσμικτα δεν διαχωρίζονται από εκείνα ενώ οι διαδικασίες εξαγωγής τους, με σκοπό να υπάρξει καθαρό οξείδιο ή στοιχείο σπάνιας γης, είναι αρκετά περίπλοκες. Στην παρούσα ενότητα θα μελετηθούν τρεις μέθοδοι εξαγωγής, η μέθοδος κλασματικής βαθμίδας, η μέθοδος ανταλλαγής ιόντων και η μέθοδος εκχύλισης με διαλύτη.

### **3.4.1 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ**

Η μέθοδος της κλασματικής απόσταξης έχει ως στόχο την εξαγωγή και τον καθαρισμό των REEs ανάλογα με την διαλυτότητα των ενώσεων τους στον διαλύτη. Από το ύτριο έως το λουτήτιο πραγματοποιήθηκαν όλοι οι διαχωρισμοί του μοναδικού στοιχείου σπάνιων γαιών, που εξήχθησαν από ενώσεις σπάνιων γαιών στη φύση, συμπεριλαμβανομένης της ανακάλυψης του ραδίου από την M.Curies. Η διαδικασία της παραπάνω μεθόδου είναι σύνθετη και απαιτητική και για την εξαγωγή όλων των στοιχείων σπάνιων γαιών χρειάστηκε περίπου ένας αιώνας, επειδή η διαδικασία για την εξαγωγή ενός στοιχείου έπρεπε να επαναληφθεί χιλιάδες φορές. Συνεπώς, αυτή η μέθοδος, αν και αποτελεσματική, να μην είναι ιδανική για την παραγωγή μεγάλου όγκου μεμονωμένων REEs.

### **3.4.2 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΙΟΝΤΩΝ**

Η μέθοδος ανταλλαγής ιόντων ή χρωματογραφία ιόντων χρησιμοποιήθηκε αρχικά προκειμένου να ελεγχθεί ότι τα προϊόντα πυρηνικής σχάσης περιέχουν στοιχεία σπάνιων γαιών και ότι εκείνα μπορούσαν να αφαιρεθούν από τυχόν προσμίξεις με τα ραδιενεργά ουράνιο και το θόριο, ενώ ως επακόλουθο χρησιμοποιήθηκε και για το διαχωρισμό των REEs. Το κύριο πλεονέκτημα της χρωματογραφίας είναι ότι τα προϊόντα της έχουν υψηλό βαθμό εξευγενισμού και ότι τα στοιχεία σπάνιας γης διαχωρίζονται με μόνο μια επανάληψη.

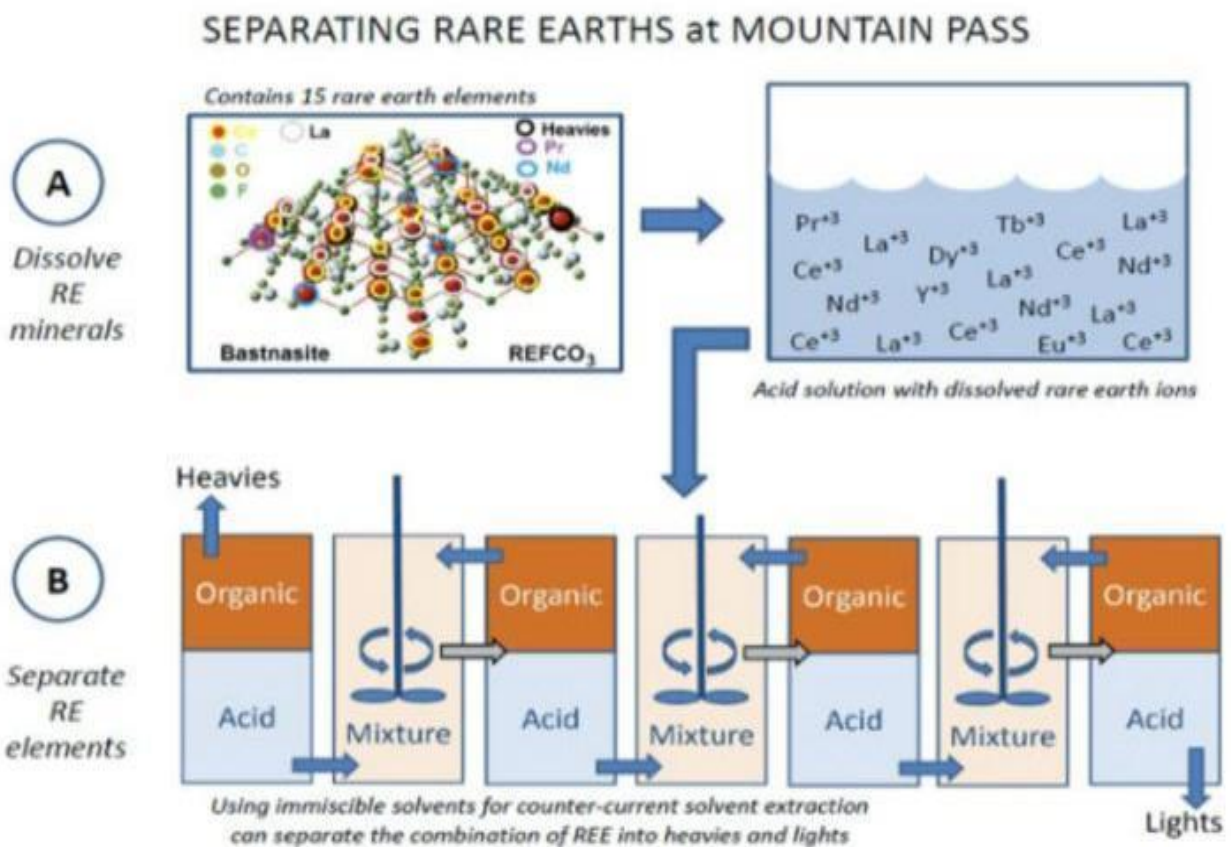
Ωστόσο, αδυνατεί να επεξεργαστεί τα στοιχεία των σπάνιων γαιών συνεχόμενα και για αυτό απαιτείται μεγάλος χρόνος για κάθε επανάληψη. Επίσης, ορισμένες άλλες διαδικασίες που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν τον χρόνο, πρόσθεταν επιπλέον κόστος και για αυτό δεν υιοθετήθηκαν. Σήμερα, η μέθοδος ανταλλαγής ιόντων χρησιμοποιείται από τις βιομηχανίες για προϊόντα υψηλού βαθμού καθαρότητας από μεμονωμένα REEs, ενώ για κάθε άλλη περίπτωση η χρωματογραφία έχει αντικατασταθεί από την μέθοδο εκχύλισης με διαλύτη.

### **3.4.3 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΧΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΛΥΤΗ**

Η μέθοδος εκχύλισης με διαλύτη αποτελεί την πιο διαδεδομένη και αξιοποιήσιμη μέθοδο εξαγωγής σπάνιων γαιών και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή στοιχείων σπάνιας γης από ένα υδατικό διάλυμα με την χρήση οργανικών διαλυτών. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια

υδρομεταλλουργική διαδικασία κατά την οποία τοποθετούνται μέσα στο διάλυμα τμήματα της στερεάς φάσης. Οι ευδιάλυτες ουσίες διαλύονται στην υγρή φάση με αποτέλεσμα να διαχωρίζονται από αυτή οι αδιάλυτες της στερεάς φάσης, δηλαδή τα ζητούμενα στοιχεία σπάνιας γης.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε πετροχημικά και στην οργανική και αναλυτική χημεία. Η μέθοδος εξαγωγής διαλύτη έχει βελτιωθεί αισθητά με την πάροδο των χρόνων και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε βιομηχανίες σπάνιων μεταλλευμάτων. Παράλληλα, η αυξανόμενη ζήτηση για μέταλλα σπάνιας γης υψηλής καθαρότητας και η ανάπτυξη της επιστήμης της ατομικής ενέργειας ενόησαν την ανάπτυξη της μεθόδου εκχύλισης με διαλύτη.



Σχήμα 21 «Διαχωρισμός στοιχείων σπάνιων γαιών» (Molycorp, 2012)

Στην Κίνα, η μελέτη της θεωρίας της εκχύλισης, τα πυριτικά πολυμερή του νέου εκχυλιστή και η διαδικασία διαχωρισμού της εκχύλισης σπάνιων γαιών έχουν φτάσει σε πολύ υψηλό επίπεδο. Έτσι, παρουσιάζοντας αυτά τα πλεονεκτήματα η εν λόγω μέθοδος έχει εξελιχθεί στην βασική μέθοδο διαχωρισμού αξιόλογων ποσοτήτων REEs.

### **3.5 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ/ΕΞΑΓΝΙΣΜΟΥ**

Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή στοιχείων σπάνιων γαιών είναι τα χλωρίδια και τα οξείδια τους τα οποία έχουν προκύψει από τις παραπάνω διαδικασίες. Παρακάτω περιγράφονται δυο μέθοδοι για τον εξαγνισμό των πρώτων υλών σε καθαρά στοιχεία σπάνιων γαιών.

#### **3.5.1 : ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΛΙΩΜΕΝΟΥ ΑΛΑΤΟΣ**

Οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν κυρίως αυτή την διαδικασία για την μαζική παραγωγή μετάλλων σπάνιων που περιλαμβάνει δύο μεθόδους: την ηλεκτρόλυση οξειδίου και την ηλεκτρόλυση χλωριδίου. Η ηλεκτρόλυση με χλωρίδιο είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την παραγωγή μετάλλων και ιδιαίτερα κραμάτων, αφού τα παραγόμενα προϊόντα επεξεργάζονται εύκολα και με χαμηλό κόστος.

Γενικά, οι ελαφριές σπάνιες γαίες εξάγονται από λιωμένο άλας ηλεκτρόλυσης σε χλωρίδια ή οξείδια. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος μειονεκτεί στο ότι εκπέμπει ρύπους στο περιβάλλον μέσω της απελευθέρωσης χλωρίου στην ατμόσφαιρα.

#### **3.5.2 : ΜΕΙΩΣΗ ΚΕΝΟΥ**

Η ηλεκτρόλυση συνήθως χρησιμοποιείται για την παρασκευή γενικών βιομηχανικών μετάλλων σπάνιων γαιών, κραμάτων και LREEs, εάν πρέπει όμως να παρασκευαστεί κάποιο μέταλλο υψηλής καθαρότητας ή HREEs, η μείωση κενού θα είναι η διαδικασία που θα επιλεγεί. Κατά την διαδικασία αυτή πραγματοποιούνται μεταλλοθερμικές διαδικασίες υπό αδρανές αέριο σε συνθήκες κενού και με θερμοκρασία περίπου στους 1000°C. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική για την παραγωγή των περισσότερων REEs με εξαίρεση το υτέρβιο, το σαμάριο, το θούλιο και το ευρώπιο, που παράγονται με την μέθοδο της μειωμένης απόσταξης.

### **3.6 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ**

Στο ορυχείο Bayan Obo στην Κίνα βρίσκονται τα μεγαλύτερα αποθέματα ελαφριών σπάνιων γαιών στον κόσμο αφού εκτιμάται ότι υπάρχουν περίπου 48 εκατομμύρια τόνοι με την μορφή μπαστναζίτη. Η ποσότητα του μπαστναζίτη αρχικά θερμαίνεται για να απομακρυνθούν το φθόριο και το διοξείδιο του άνθρακα που περιέχονται στο όρυγμα και στην συνέχεια με

υδρομεταλλουργικές διαδικασίες και με την χρήση αρχικά υδροχλωρικού οξέος και έπειτα υδροξειδίου του νατρίου (αμμώνιο) παράγονται υδροξειδία, τα όποια χλωριώνονται και σχηματίζουν χλωρίδια σπάνιων γαιών. Τέλος, με μια διαδικασία αποκρυστάλλωσης τα χλωρίδια χωρίζονται σε ατομικές σπάνιες γαίες.

Στην Αυστραλία το κύριο ορυκτό για σπάνιες γαίες είναι ο μοναζίτης, ο οποίος ωστόσο σχετίζεται με την ραδιενέργεια λόγω της ύπαρξης θορίου. Η διαδικασία ανάκτησης σπάνιων γαιών περιλαμβάνει την συγκέντρωση μοναζίτη χρησιμοποιώντας αρχικά υγρές και έπειτα ξηρές τεχνικές. Η υγρή συγκέντρωση διαχωρίζει τα βαρέα ορυκτά από τυχόν πρόσμικτα, ενώ η ξηρή συγκέντρωση γίνεται για να διαχωρίζεται ο μοναζίτης από τα άλλα βαρέα ορυκτά. Οι σπάνιες γαίες αποσυντίθενται από τον μοναζίτη σε υψηλή θερμοκρασία με συγκεντρωμένο θειικό οξύ.

Συγκεκριμένα, σε μια αλκαλική διάλυση, το πέτρωμα του μοναζίτη αντιδρά με υδροξειδίου του νατρίου και στην συνέχεια αποσυντίθεται για να παραχθούν REOs. Στην συνέχεια τα οξειδία πλένονται χρησιμοποιώντας υδροχλωρικό οξύ και διαχωρίζονται σε ελαφριές και βαρέες σπάνιες γαίες.

Η συνεισφορά των οξειδίων, των μεταλλευμάτων και των κραμάτων σπάνιων γαιών είναι ιδιαίτερα σημαντική στην σημερινή κοινωνία. Τα προϊόντα αυτά βρίσκουν εφαρμογές στην πράσινη ενέργεια, στον καθαρισμό υδάτων, σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα, σε μηχανήματα στον τομέα της ιατρικής και γενικά σχεδόν σε όλες τις ηλεκτρονικές συσκευές που διατίθενται στην αγορά.

Ωστόσο, η εξόρυξη και οι διαδικασίες για το ραφινάρισμα των σπάνιων γαιών έχουν μεγάλες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Απορρίμματα και ρύποι από αυτές τις διαδικασίες καταλήγουν στον αέρα και στον υδάτινο ορίζοντα προκαλώντας ποίκιλα περιβαλλοντικά προβλήματα (ραδιονουκλεΐδια, φθόριο, οξέα, διοξείδιο του θείου, σκόνη και ενίοτε ουράνιο).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

### 4.1 : ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ REs ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Τα μέταλλα σπάνιων γαιών αποτελούν μια ομάδα 17 χημικών στοιχείων με μοναδικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο φάσμα συσκευών και τεχνολογιών της σύγχρονης εποχής. Αυτές οι βιταμίνες της τεχνολογίας μπορούν να αξιοποιηθούν ως βασικά και λειτουργικά υλικά σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε καταλύτες, υαλικά, κεραμικά και φωτισμό είτε ως μεμονωμένα στοιχεία είτε ως κράματα μετάλλων ενώ παράλληλα αποτελούν βασικά και αναπόσπαστα υλικά των μόνιμων μαγνητών νεοδυμίου και των επαναφορτιζόμενων μπαταριών νικελίου.

Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση για REs έχει αυξηθεί ραγδαία, ιδιαίτερα στις αυτοκινητοβιομηχανίες και στους κλάδους της ιατρικής και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι σπάνιες γαίες μπορούν να εφαρμοστούν αυτούσιες ή να αντικαταστήσουν ορισμένα μέταλλα για να μειώσουν τον όγκο και το βάρος συσκευών ενώ παράλληλα μέσω των ιδιοτήτων τους να προσδώσουν μεγαλύτερη ταχύτητα και κυρίως μεγαλύτερη απόδοση, διαδραματίζοντας με αυτόν τον τρόπο σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη νέων προϊόντων από τις βιομηχανίες.

Αρχικά αξίζει να σημειωθεί ότι τα εναλλακτικά συστήματα ενέργειας, όπως η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, οι κυψέλες καυσίμων, τα φωτοβολταϊκά, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες καθώς και οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, βασίζονται όλα σε σπάνιες γαίες. Ακόμη, οι REs χρησιμοποιούνται ως φωσφόροι σε οθόνες υπολογιστών, κινητών και σε συστήματα φωτισμού. Η ζήτηση τέτοιων οθόνων είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να χρειάζονται μεγάλες ποσότητες ευρωπίου και τέρβιου.

Παράλληλα, οι νέες τεχνολογίες πράσινης ενέργειας απαιτούν επίσης μεγάλες ποσότητες σπάνιων γαιών και ιδιαίτερα νεοδυμίου, δυσπρόσιου, πρασεοδύμιου και σαμάριου που χρησιμοποιούνται στους μόνιμους μαγνήτες. Οι μόνιμοι μαγνήτες εφαρμόζονται σε ανεμογεννήτριες, σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα και στην αμυντική βιομηχανία σε συστήματα πυραύλων (Haque et al., 2014). Συνάμα, ορισμένες σπάνιες γαίες, όπως το έρβιο, χρησιμοποιούνται σε δίκτυα οπτικών ινών για εξασφάλιση υψηλής ταχύτητας στα δίκτυα επικοινωνίας, ενώ ακόμη



Άλλος ένας σημαντικός τομέας που βρίσκουν εφαρμογή αυτά τα μέταλλα είναι τα φωτοβολταϊκά όπου χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της ηλιακής ενέργειας.

Επιπρόσθετα, το έρβιο, το ύτριο και το όλμιο έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν φωτόνια χαμηλής ενέργειας σε φωτόνια υψηλότερης ενέργειας αυξάνοντας το μήκος κύματος, ενώ το θούλιο, τέρβιο και υττέρβιο κάνουν την αντίστροφη διαδικασία. Μερικές άλλες συνήθειες χρήσεις των ελαφριών σπάνιων γαιών (La, Ce) περιλαμβάνουν τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, τους λαμπτήρες τόξου άνθρακα, τους αναπτήρες και τα γυαλιστικά μέσα. Σύμφωνα με το USGS τα κρισιμότερα μέταλλα σπάνιων γαιών που βρίσκουν ποικίλες εφαρμογές και δεν μπορούν να υποκατασταθούν είναι το δυσπρόσιο, το νεοδύμιο, το ευρώπιο, το τέρβιο και το ύτριο.

## Rare Earth – Key Applications



Σχήμα 22 «Διάφορες εφαρμογές των REEs»

( [http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare\\_earth/application.shtml](http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare_earth/application.shtml) )

Επιπρόσθετα οι REs χρησιμοποιούνται σε καταλύτες πυρόλυσης ρευστών και καταλυτικούς μετατροπείς στις βιομηχανίες πετρελαίου και αυτοκινήτων ενώ είναι ιδιαίτερα σημαντικές για πολλές αμυντικές τεχνολογίες, όπως είναι τα πυρομαχικά με καθοδήγηση ακριβείας, τα λέιζερ στόχευσης, τα συστήματα επικοινωνιών, οι κινητήρες αεροσκαφών, τα συστήματα ραντάρ, ο οπτικός εξοπλισμός και τα σόναρ.





Σχήμα 22 «Εφαρμογές μετάλλων σπάνιων γαιών»

[https://aperopia.fr/wp-content/uploads/2017/09/RARE\\_EARTHS\\_USAGES-768x576.jpg](https://aperopia.fr/wp-content/uploads/2017/09/RARE_EARTHS_USAGES-768x576.jpg)

Τα μέταλλα και τα κράματα σπάνιων γαιών βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές καθημερινές συσκευές που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο, όπως οι υπολογιστές, τα DVD, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, τα κινητά τηλέφωνα και ο φωτισμός φθορισμού. Τα τελευταία χρόνια η ζήτηση για συσκευές και προϊόντα που εμπεριέχουν μέταλλα REs έχει αυξηθεί κατακόρυφα (King, 2015). Αυτό οφείλεται στους σύγχρονους ρυθμούς ζωής, όπου ο κάθε άνθρωπος πρέπει να έχει μια κινητή συσκευή ή ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή για επικοινωνία ή και εργασία.

Οι σπάνιες γαίες έχουν κομβικό ρόλο στην κατασκευή και την διάθεση των κινητών τηλεφώνων, άλλωστε όπως φαίνεται στο σχήμα 24 βρίσκονται στις οθόνες, στα μικρόφωνα, στις μπαταρίες και σε διάφορα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος.



Σχήμα 23 «Οι σπάνιες γαίες στα κινητά τηλέφωνα»  
[https://aperopia.fr/wp-content/uploads/2017/09/earths\\_iphone\\_630-768x507.jpg](https://aperopia.fr/wp-content/uploads/2017/09/earths_iphone_630-768x507.jpg)

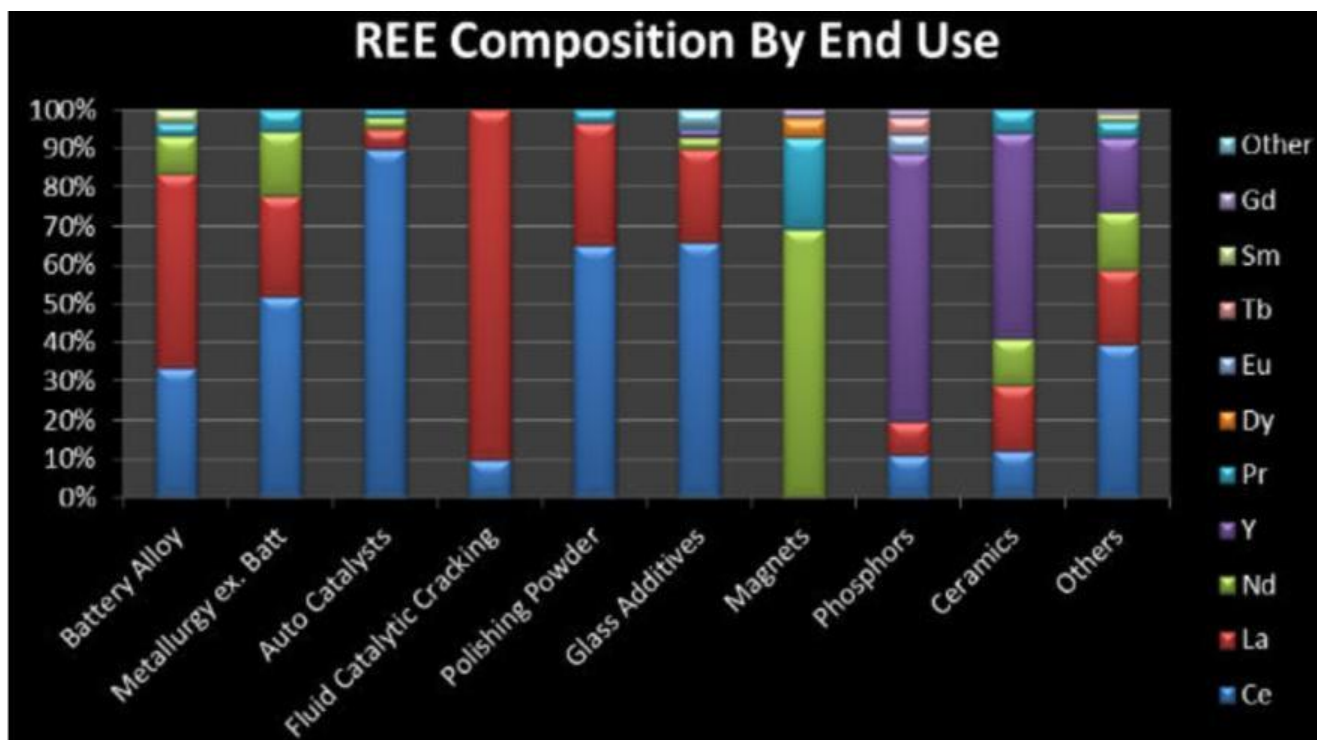
Παράλληλα, πολλές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε αρκετές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τα κινητά, οι φωτογραφικές κάμερες και τα λάπτοπ, κατασκευάζονται από οξειδία ή στοιχεία σπάνιων γαιών.

Επιπρόσθετα, το μεγαλύτερο ποσοστό των REEs που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες αξιοποιείται στους κινητήρες υβριδικών και ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η ανάγκη για ενεργειακή ανεξαρτησία, η κλιματική αλλαγή καθώς και μερικά άλλα ζητήματα έχουν οδηγήσει στην αύξηση των πωλήσεων ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων (King, 2015). Παράλληλα, η ζήτηση για μπαταρίες κατασκευασμένες με σπάνιες γαίες έχει αυξηθεί κατακόρυφα καθώς αυτά τα οχήματα απαιτούν αξιόλογες ποσότητες ενώσεων REs. Επιπρόσθετα, οι REs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φώσφοροι σε οθόνες ηλεκτρονικών συσκευών, στιλβωτικές ενώσεις και καταλύτες για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Όλα αυτά τα προϊόντα αναμένεται να παρουσιάσουν αυξανόμενη ζήτηση.

Ακόμη, αξίζει να τονιστεί ότι οι ερευνητές αναζητούν άλλες ουσίες και μέταλλα που να μπορούν να υποκαταστήσουν ορισμένα στοιχεία σπάνιας γαίας σε κάποιες από τις πιο σημαντικές

εφαρμογές τους. Ωστόσο σύμφωνα με τις πρώτες ενδείξεις, αυτά τα υποκατάστατα μπορούν να αντικαταστήσουν ελάχιστες REs ενώ είναι συνήθως πολύ δαπανηρά και ελάχιστα αποτελεσματικά.

Τέλος, στο σχήμα 25 μπορεί να διακρίνει κανείς τα ποσοστά του κάθε στοιχείου σπάνιας γης στις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μεγάλα ποσοστά εμφανίζουν το λανθάνιο, το δημήτριο, το νεοδύμιο και το ύτριο ενώ σε μικρότερα ποσοστά βρίσκονται μέταλλα όπως το γαδολίνιο, το σαμάριο και το ευρώπιο.



Σχήμα 24 «Σύσταση REEs σε διάφορες εφαρμογές»

([http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare\\_earth/application.shtm](http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare_earth/application.shtm))

## 4.2 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΜΟΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ REs

Οι σπάνιες γαίες αποτελούν μια ομάδα μετάλλων που είναι απαραίτητες για τις περισσότερες βιομηχανίες παγκοσμίως, καθώς κάθε στοιχείο, μεμονωμένα ή σε συνδυασμό, χρησιμοποιείται για την παραγωγή νέων προϊόντων και συσκευών. Στην ακόλουθη ενότητα γίνεται αναφορά σε όλες τις εφαρμογές που βρίσκει το κάθε ένα μέταλλο σπάνιας γης ξεχωριστά στις σύγχρονες τεχνολογίες και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

- **Λανθάνιο (La)**

Το λανθάνιο εξορύσσεται κυρίως από πετρώματα μπαστναζίτη και μοναζίτη, βρίσκεται σε σχετικά μεγάλο απόθεμα κι αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέταλλο αφού βρίσκει ποικίλες εφαρμογές στις σύγχρονες τεχνολογίες. Χρησιμοποιείται ιδιαίτερα ως καταλύτης στην διύλιση πετρελαίου και στην παραγωγή καυσίμων αυτοκινήτων και αεροπλάνων, ενώ παράλληλα βρίσκει εφαρμογές σε μπαταρίες και κυψέλες καυσίμων υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων.

Ακόμα, πολλές εταιρίες οπτικών χρησιμοποιούν το λανθάνιο για τον σχεδιασμό οπτικών φακών λόγω της ιδιότητας του λανθανίου να τροποποιεί την δομή των κρυστάλλων και τον δείκτη διάθλασης (Hurst, 2010). Για αυτό τον λόγο εφαρμόζεται σε φωτοβολταϊκά και οπτικές ίνες βελτιώνοντας τις ιδιότητες του γυαλιού. Επιπλέον, αποτελεί συστατικό των λαμπτήρων άνθρακα, αναπτήρων, των γυαλιών νυκτερινής όρασης και των έγχρωμων τηλεοράσεων.

Στην ιατρική το λανθάνιο μπορεί να αξιοποιηθεί σε συσκευές λέιζερ που έχουν την δυνατότητα να μειώσουν την δόση ακτινοβολίας σε ασθενείς καθώς και στις ακτίνες X. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας ως κράμα με σπόγγους υδρογόνου. Αυτά τα κράματα έχουν την ικανότητα να καταναλώνουν ως και 400 φορές τον όγκο τους σε αέριο υδρογόνου και η διαδικασία μάλιστα είναι αναστρέψιμη.

- **Δημήτριο (Ce)**

Το δημήτριο αποτελεί το πιο άφθονο μέταλλο σπάνιων γαιών και βρίσκεται ως επί το πλείστον σε ορυκτά μοναζίτη, μπαστναζίτη και αλλανίτη. Αυτό το μέταλλο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την κατασκευή συστημάτων προστασίας του περιβάλλοντος και ελέγχου της ρύπανσης. Συγκεκριμένα, για την αντιμετώπιση και την μείωση των εκπομπών καυσαερίων από οχήματα και βιομηχανίες χρησιμοποιούνται καταλυτικοί μετατροπείς που βασίζονται σε ενώσεις και οξείδια δημητρίου. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα πρόσθετο καυσίμου όπου φιλτράρονται οι ρύποι και μέσω αυτού επιτυγχάνεται η πληρέστερη καύση των καυσίμων για περισσότερη ενεργειακή απόδοση.

Ακόμη, χρησιμοποιείται ως καταλύτης στην διύλιση πετρελαίου και σε μεταλλουργικές και πυρηνικές εφαρμογές ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται μαζί με άλλες σπάνιες γαίες στον φωτισμό και στους προβολείς κινηματογράφων. Ως οξείδιο βρίσκει εφαρμογές σε γυαλιά,

καθρέπτες και οθόνες τηλεοράσεων ενώ ως κράμα χρησιμοποιείται σε στρατιωτικές τεχνολογίες χάρη στη μη διαβρωτική επίστρωση του.

- **Πρασεοδύμιο (Pr)**

Το πρασεοδύμιο εξορύσσεται από πετρώματα μαστιναζίτη και μοναζίτη, παρουσιάζει αξιόλογο απόθεμα κι αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέταλλο για τις νέες τεχνολογίες. Σήμερα, οι περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες (NdFeB, Neodymium-Iron-Boron) στους κινητήρες και στα ηλεκτρικά συστήματα των οχημάτων τους, τα οποία εμπεριέχουν, κατά ένα μεγάλο ποσοστό, πρασεοδύμιο (Hurst, 2010). Το πρασεοδύμιο βρίσκει εφαρμογή και ως κράμα με μαγνήσιο, σε κινητήρες αεροσκαφών προσδίδοντας υψηλή αντοχή ενώ αποτελεί το σημαντικότερο μέταλλο για τον φωτισμό τόξου άνθρακα που χρησιμοποιείται στους κινηματογράφους.

Παράλληλα, χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε καλώδια οπτικών ινών για την ενίσχυση του σήματος ενώ μαζί με το νεοδύμιο, χρησιμοποιείται για να φιλτράρει ορισμένα μήκη κύματος φωτός. Ως εκ τούτου, βρίσκει συγκεκριμένες χρήσεις σε φωτογραφικά φίλτρα, φακούς σήματος αεροδρομίου και γυαλιά. Ακόμη, χρησιμοποιείται και ως χρωστική ουσία αφού τα άλατα πρασεοδύμιου έχουν την ιδιότητα να δώσουν χρώμα, συνήθως κίτρινο, σε γυαλιά, σμάλτα και κεραμικά. Τέλος, εφαρμόζεται ως καταλύτης σε κινητήρες εσωτερικής καύσης για τον έλεγχο της ρύπανσης.

- **Νεοδύμιο (Nd)**

Το νεοδύμιο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των σπάνιων γαιών διότι βρίσκει ποικίλες εφαρμογές σε σχεδόν όλες τις νέες τεχνολογίες και δεν μπορεί να αντικατασταθεί από κάποιο άλλο μέταλλο ή κράμα μετάλλων. Η πιο σημαντική του εφαρμογή εντοπίζεται στους μόνιμους μαγνήτες NdFeB όπου αποτελεί και κύριο συστατικό. Οι υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα, οι φορητές συσκευές αναπαραγωγής CD και τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα ήχου δεν θα υπήρχαν στην παρούσα μορφή τους αν δεν υπήρχαν οι μαγνήτες νεοδυμίου.

Οι μόνιμοι μαγνήτες NdFeB χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο αριθμό κινητήρων και μηχανικών συστημάτων, μεγιστοποιώντας την ισχύ των παραπάνω τεχνολογιών μειώνοντας παράλληλα το κόστος, ενώ είναι τόσο ισχυροί που εφαρμόζονται ακόμη σε συστήματα αντί μπλοκαρίσματος φρένων και αερόσακων. Παράλληλα, βρίσκουν εφαρμογή σε ιατρικά

μηχανήματα, αφού οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται στους μαγνητικούς τομογράφους και ως λέιζερ για χειρουργικές επεμβάσεις.

Ποικίλες χρήσεις εμφανίζουν και τα οξειδία νεοδυμίου αφού μπορούν να προστεθούν σε γυαλιά CRT, αντί θαμπωτικά γυαλιά αυτοκινήτων και καθρέπτες για να βελτιώσουν την φωτεινότητα, απορροφώντας κύματα φωτός (Hurst, 2010). Επίσης, τα οξειδία εμφανίζουν ένα κυανό χρώμα και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διάφορων χρωστικών σε γυαλιά και κεραμικά, ενώ μερικές ενώσεις νεοδυμίου συμβάλλουν στη σταθεροποίηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων σε κεραμικούς πυκνωτές.

Συνάμα, το νεοδύμιο χρησιμοποιείται σε πολλά λέιζερ λόγω της ιδιότητας του να απορροφά και να εκπέμπει διάφορα μήλη κύματος, ενώ χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιπτώσεις και ως καταλύτης στην διύλιση πετρελαίου.

- **Προμήθιο (Pm)**

Το προμήθιο είναι ένα ραδιενεργό στοιχείο που ανήκει στις σπάνιες γαίες, κατασκευάζεται σε εργαστήρια και βρίσκεται σε πάρα πολύ μικρές ποσότητες στον φλοιό της γης. Χρησιμοποιείται σε πυρηνικές μπαταρίες συλλαμβάνοντας φως με φωτοκύτταρα που θα το μετατρέψουν σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η διάρκεια ζωής μια τέτοιας μπαταρίας είναι περίπου 5 χρόνια. Επίσης, το προμήθιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε φορητές πηγές ακτίνων X ενώ χρησιμεύει κι ως πηγή θερμότητας για την παροχή βοηθητικής ισχύος για διαστημικούς ανιχνευτές και δορυφόρους.

- **Σαμάριο (Sm)**

Το σαμάριο αποτελεί ένα ακόμη στοιχείο σπάνιων γαιών που εντοπίζεται σε πετρώματα μοναζίτη και μαστναζίτη. Αυτό το μέταλλο έχει ιδιότητες φασματικής απορρόφησης, καθιστώντας το χρήσιμο για το φιλτράρισμα γυαλιών. Επίσης, συνδυάζεται πολύ συχνά με το κοβάλτιο για την δημιουργία μόνιμων μαγνητών που έχουν πολύ υψηλή αντίσταση στον απομαγνητισμό.

Ακόμα, χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε στρατιωτικές και αεροδιαστημικές τεχνολογίες λόγω της ικανότητάς του να αντέχει σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 240°C (Hurst, 2010). Για παράδειγμα, το σαμάριο ως μόνιμος μαγνήτης σαμάριου-κοβαλτίου εφαρμόζεται σε κινητήρες

μαχητικών αεροπλάνων και χρησιμοποιείται στα ελικόπτερα για να ελαττώσει τον ήχο του έλικα.

Αυτοί οι μόνιμοι μαγνήτες αποτελούν μέρος των ηλεκτρονικών συστημάτων του αεροσκάφους καθώς και των πτερυγίων και του πηδάλιου ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται σε συστήματα ραντάρ και σε συστήματα πυραύλων. Το σαμάριο επίσης χρησιμοποιείται για την απορρόφηση νετρονίων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, ενώ τα οξείδια του εφαρμόζονται σε γυαλιά για την απορρόφηση υπέρυθρων ακτινοβολιών.

- **Ευρώπιο (Eu)**

Το ευρώπιο αποτελεί ένα στοιχείο των σπάνιων γαιών που παρουσιάζει εξαιρετικές ιδιότητες εκπομπής φωτονίων, μάλιστα έχει την ικανότητα να απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία και να μεταβάλλει τα επίπεδα ενέργειας για να δημιουργήσει μια φωτεινή και ορατή εκπομπή. Αυτή η εκπομπή δημιουργεί τους κόκκινους φωσφόρους που χρησιμοποιούνται σε έγχρωμες τηλεοράσεις και οθόνες υπολογιστών παγκοσμίως.

Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε λαμπτήρες φθορισμού, που μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια κατά 75% σε σύγκριση με λαμπτήρες πυρακτώσεως, ενώ παράλληλα πλαστικά με βάση το ευρώπιο έχουν χρησιμοποιηθεί ως υλικά για λείζερ. Στον τομέα της ιατρικής, κατά την διάρκεια έρευνας ιστών σε κάποιο όργανο το ευρώπιο χρησιμοποιείται για την επισήμανση σύνθετων βιοχημικών παραγόντων. Τέλος, το ευρώπιο μαζί με το προμήθιο αποτελούν πολύ αντιδραστικά στοιχεία και για αυτό εξετάζεται η χρήση τους σε πυρηνικούς αντιδραστήρες.

- **Γαδολίνιο (Gd)**

Το γαδολίνιο είναι ένα στοιχείο σπάνιας γαίας με μοναδική μαγνητική συμπεριφορά και για αυτό χρησιμοποιείται σε μαγνητο-οπτικές τεχνολογίες εγγραφής και χειρισμό δεδομένων υπολογιστή. Παράδειγμα των παραπάνω εφαρμογών αποτελούν τα συστήματα μαγνητικής τομογραφίας (MRI) που χρησιμοποιούν υλικά που περιέχουν γαδολίνιο για την ενίσχυση των εικόνων που δημιουργούνται.

Το γαδολίνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεμονωμένο στοιχείο για την ανίχνευση διαρροών ακτινοβολίας από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας ενώ ως κράμα με άλλα μέταλλα (χρώμιο, σίδηρος) βελτιώνει την εργασιμότητα και την αντοχή σε οξείδωση και υψηλές

θερμοκρασίες. Οι ενώσεις γαδολινίου χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή φωσφορικών για έγχρωμες τηλεοράσεις.

- **Τέρβιο (Tb)**

Το τέρβιο αποτελεί ένα ακόμη στοιχείο των σπάνιων γαιών ανήκει στην ομάδα των HREEs και εξορύσσεται από ορυκτά κερίτη και γαδολινίτη. Το τέρβιο χρησιμοποιείται σε μικρές συγκεντρώσεις στους μόνιμους μαγνήτες υψηλής αντοχής καθώς και σε ενεργειακά αποδοτικούς λαμπτήρες φθορισμού.

Ακόμα, σε συνδυασμό με το διοξείδιο του ζirkονίου, το τέρβιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σταθεροποιητής κρυστάλλων σε κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ χρησιμοποιείται επίσης σε μεταλλικά κράματα που παρέχουν μεταλλικές μεμβράνες για μαγνητο-οπτική καταγραφή δεδομένων.

- **Δυσπρόσιο (Dy)**

Το δυσπρόσιο θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα μέταλλα σπάνιων γαιών διότι βρίσκει πολλές εφαρμογές σε μόνιμους μαγνήτες NdFeB που χρησιμοποιούνται από απλά αυτοκίνητα μέχρι και υψηλές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Βρίσκεται σε σχετικά μικρό απόθεμα και εντοπίζεται σε μεγαλύτερες ποσότητες σε ορυκτά πετρώματα ξενότιμου. Το δυσπρόσιο έχει την ιδιότητα να αυξάνει την εργασιμότητα των μαγνητών και για αυτό χρησιμοποιείται σε νέες τεχνολογίες, όπως στις ανεμογεννήτριες και στις μπαταρίες και κινητήρες υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων, προσδίδοντας υψηλή απόδοση.

Το δυσπρόσιο είναι απαραίτητο για την τεχνολογία, αφού καθιστά τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα μικρότερα και ταχύτερα ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή υλικών λέιζερ. Το μέταλλο αυτό έχει υψηλές οξειδωτικές ιδιότητες, ενώ είναι δύσκολο να βρεθεί άλλο μέταλλο με παρόμοιες ιδιότητες έτσι ώστε να το αντικαταστήσει.

- **Όλμιο (Ho)**

Το όλμιο είναι ένα εξαιρετικά σπάνιο και ακριβό στοιχείο σπάνιων γαιών το οποίο βρίσκεται σε πολύ μικρές ποσότητες σε πετρώματα μοναζίτη και ξενότιμου. Ως εκ τούτου, έχει λίγες εμπορικές χρήσεις, χρησιμοποιείται κυρίως σε λέιζερ και ως χρωστική ουσία για τον χρωματισμό γυαλιών και κεραμικών. Ωστόσο, διαθέτει ορισμένες ασυνήθιστες μαγνητικές ιδιότητες και ενδεχομένως θα μπορούσε να αξιοποιηθεί μελλοντικά στον τομέα της ενέργειας.



- **Έρβιο (Er)**

Το έρβιο αποτελεί ένα στοιχείο σπάνιας γαίας με αξιοσημείωτες οπτικές ιδιότητες που το καθιστούν απαραίτητο για την ενίσχυση της μετάδοσης δεδομένων μέσω οπτικών ινών μεγάλης εμβέλειας. Ακόμη, χρησιμοποιείται σε γυαλιά ηλίου και διακοσμητικά κρύσταλλα προσδίδοντας ροζ και κόκκινο χρώμα ενώ βρίσκει εφαρμογές σε ιατρικά και οδοντιατρικά συστήματα λόγω της ιδιότητας να παρέχει ενέργεια χωρίς την συσσώρευση θερμότητας στον ανθρώπινο ιστό.

Το έρβιο βρίσκει επίσης εφαρμογές στον πυρηνικό τομέα ενώ χρησιμοποιείται ως κράμα σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα για να βελτιώσει ή να μεταβάλει ορισμένες ιδιότητες τους. Για παράδειγμα, η προσθήκη έρβιου στο βανάδιο μειώνει τη σκληρότητα και βελτιώνει την εργασιμότητα του.

- **Θούλιο (Tm)**

Το θούλιο αποτελεί το πιο σπάνιο στοιχείο σπάνιας γαίας μετά το προμήθιο, είναι αρκετά ακριβό εξαιτίας των μικρών αποθεμάτων του και για αυτό έχει λίγες πρακτικές εφαρμογές. Παρουσιάζει παρόμοιες χημικές ιδιότητες με το ύτριο και χρησιμοποιείται κυρίως σε ευαίσθητους φώσφορους για τη μείωση της έκθεσης σε ακτίνες X. Η χρήση του περιορίζεται λοιπόν σε μηχανήματα ακτίνων X και σε λείζερ.

- **Υττέρβιο (Yb)**

Το υττέρβιο ανήκει στις ομάδα των HREEs και εντοπίζεται κυρίως σε πετρώματα μοναζίτη σε μικρές συγκεντρώσεις. Παρουσιάζει πολλές κοινές χημικές ιδιότητες με το ύτριο και χρησιμοποιείται σε υπέρυθρα λείζερ και ως κράμα με χάλυβα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε αισθητήρες τάσεων για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδάφους που προκαλούνται, για παράδειγμα, από σεισμό ή από πυρηνικές εκρήξεις (Hurst, 2010). Το υττέρβιο έχει την ιδιότητα να αυξάνει την ηλεκτρική του αντίσταση κατά μια τάξη μεγέθους όταν υπόκειται σε υψηλές τάσεις ενώ βελτιώνει την αντοχή και μερικές ακόμη μηχανικές ιδιότητες ορισμένων μετάλλων.

- **Λουτήτιο (Lu)**

Το λουτήτιο αποτελεί το τελευταίο στοιχείο των λανθανίδων και μαζί με το θούλιο είναι τα χημικά στοιχεία με το μικρότερο απόθεμα, αξιοποιείται κυρίως ως οξειδίο υψηλής καθαρότητας

και για αυτό εξάγεται με την μέθοδο ανταλλαγής ιόντων (Hurst, 2010). Σήμερα, χρησιμοποιείται σε καταλύτες στην διύλιση πετρελαίου ενώ με την προσθήκη δημητρίου χρησιμοποιείται σε αξονικούς τομογράφους. Ακόμα, βρίσκει εφαρμογή σε γυαλιά υψηλού δείκτη διάθλασης και σε λαμπτήρες LED.

- **Σκάνδιο (Sc)**

Το σκάνδιο αποτελεί μαζί με το ύτριο τα μόνα στοιχεία των σπάνιων γαιών που δεν ανήκουν στις λανθανίδες. Υπάρχουν δύο βασικές εφαρμογές για το σκάνδιο. Η πρώτη εφαρμογή έχει να κάνει με την χρησιμοποίηση του σκάνδιου στον φωτισμό (λάμπες μεγάλης έντασης φωτός εκκένωσης), τα λέιζερ και τα ηλεκτρονικά είδη λόγω των ιδιοτήτων ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάζει. Η δεύτερη του χρήση γίνεται σε συνδυασμό με το αλουμίνιο, όπου χρησιμοποιείται ως κράμα αλουμινίου-σκανδίου για την παραγωγή υλικών υψηλής απόδοσης στον κλάδο της αεροναυπηγικής και στη βιομηχανία αθλητικών ειδών.

Προς το παρόν δεν υπάρχουν υποκατάστατα για το σκάνδιο στις εφαρμογές του σε λέιζερ και στον τομέα της αεροναυπηγικής. Ωστόσο, στη βιομηχανία αθλητικών εξοπλισμών τα κράματα σκανδίου-αλουμινίου φαίνεται πως μπορούν να αντικατασταθούν από κράματα τιτανίου-αλουμινίου και ανθρακονήματα.

- **Ύτριο (Y)**

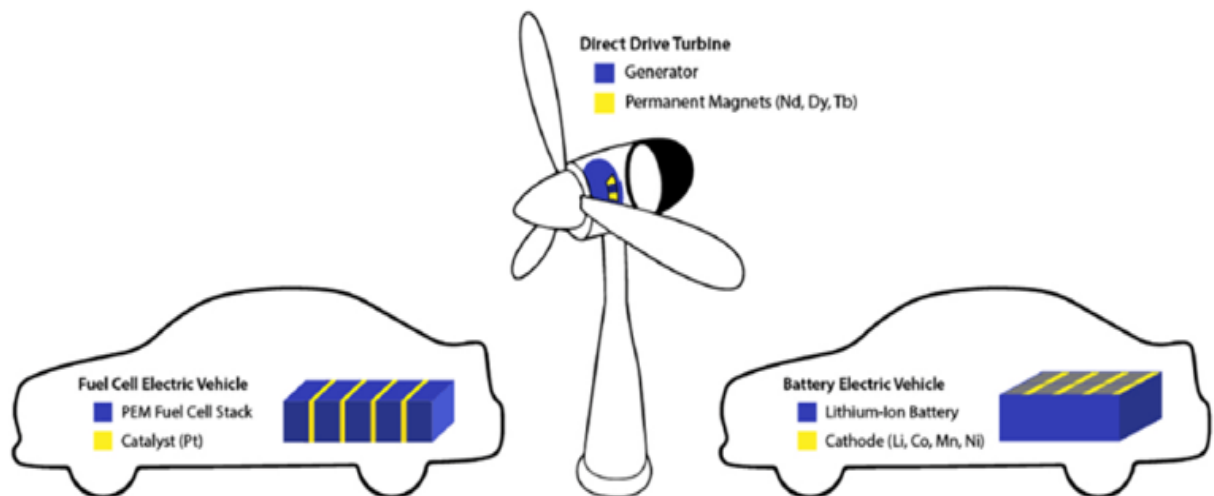
Το ύτριο, όπως και το σκάνδιο, εμφανίζουν παρόμοια χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά με τις λανθανίδες και για αυτό συγκαταλέγονται στις σπάνιες γαίες. Το ύτριο αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέταλλο αφού σχεδόν κάθε όχημα περιέχει υλικά που βελτιώνουν την απόδοση καυσίμων του κινητήρα και έχουν βάση αυτό το μέταλλο (Hurst, 2010). Μερικές ακόμη σημαντικές χρήσεις του υτρίου είναι στις συσκευές επικοινωνίας με μικροκύματα και στις μπαταρίες λιθίου με την μορφή μεταλλικού κράματος.

Το ύτριο εφαρμόζεται σε κρυστάλλους λέιζερ προσδίδοντας φασματικά χαρακτηριστικά για συστήματα επικοινωνίας υψηλής απόδοσης. Το ραδιενεργό ισότοπο του υτρίου επίσης είναι απαραίτητο για τις ακτινοβολίες σε ασθενείς με καρκινικούς όγκους και για οφθαλμικές επεμβάσεις. Επιπλέον, χρησιμοποιείται στις συσκευές κινητής τηλεφωνίας, σε λάμπες LED, σε οθόνες υπολογιστών και προσδίδει το κόκκινο χρώμα στις τηλεοράσεις, ενώ παράλληλα,

σχεδόν όλα τα αυτοκίνητα έχουν αισθητήρες οξυγόνου που αποτελούνται από κεραμικά υλικά με βάση το ύτριο.

### **4.3 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΠΡΑΣΙΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Οι τεχνολογίες πράσινης ενέργειας αποτελούν τον κύριο παράγοντα για την εξασφάλιση ενέργειας με το μικρότερο δυνατόν οικολογικό αποτύπωμα ενώ κρίνονται απαραίτητες για ένα βιώσιμο μέλλον. Δυστυχώς, αυτές οι τεχνολογίες βασίζονται σε υλικά που θεωρούνται κρίσιμα λόγω του μικρού αποθέματος και της υψηλής σημασίας τους για την τεχνολογία λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ο λόγος που τα κρίσιμα μέταλλα εμφανίζουν συχνά απότομη αύξηση στις τιμές τους. Σε αυτό το πλαίσιο, η μεταβλητότητα των τιμών δυσχαιρένει την εγκαθίδρυση των νέων τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά, εις βάρος των υφιστάμενων διότι είναι πολύ δύσκολο να τις ανταγωνιστούν οικονομικά.



Σχήμα 25 «Εφαρμογές REs σε πράσινες τεχνολογίες» (Grandell, 2016)

Μολοταύτα, η κλιματική αλλαγή και τα ζητήματα ενεργειακής ασφάλειας έχουν στρέψει τις κυβερνήσεις και την επιστημονική κοινότητα προς την εγκατάσταση κι αξιοποίηση των τεχνολογιών που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια καθώς και τα αποθέματα σπάνιων γαιών αναμένονται να καθορίσουν το κόστος και την απόδοση των νέων τεχνολογιών.

Οι νέες τεχνολογίες που μελλοντικά θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στην μείωση των εκπομπών ρύπων περιλαμβάνουν τα ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα, τις ανεμογεννήτριες, τα ηλιακά πάνελ, τις κυψέλες καυσίμων, τις μπαταρίες και τους ενεργειακά αποδοτικούς φωτισμούς.

#### **4.3.1 : ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ**

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στις ανεμογεννήτριες με και χωρίς προσανατολισμό άμεσης κίνησης (Leader, 2019). Οι επαγωγικές γεννήτριες έχουν υψηλή ταχύτητα περιστροφής και έτσι η ταχύτητα είναι αναπόφευκτη, όμως αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη ανάγκη για συντήρηση και αντίστοιχα σε μεγαλύτερα κόστη (Grandell, 2016). Οι μόνιμοι μαγνήτες που βασίζονται σε κράματα νεοδυμίου ή σαμαρίου παράγουν πολύ υψηλά μαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα όλα τα είδη γεννητριών που χρησιμοποιούν αυτούς τους μαγνήτες να παράγουν υψηλή ροπή. Επομένως, οι γεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν με χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και είναι κατάλληλες για ανεμογεννήτριες με και χωρίς προσανατολισμό.

Οι στρόβιλοι με προσανατολισμό συνήθως περιέχουν ελάχιστα ή μηδαμινά στοιχεία σπάνιας γης και λειτουργούν με υψηλότερες ταχύτητες σε μικρότερους στρόβιλους (<5 MW). Από την άλλη πλευρά, οι στρόβιλοι άμεσης κίνησης χωρίς προσανατολισμό λειτουργούν καλύτερα σε χαμηλές ταχύτητες και έχουν το πλεονεκτήματα της καλύτερης συνολικής απόδοσης, ενώ παράλληλα έχουν μικρότερο βάρος και λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης.

Σύμφωνα με έρευνες, το 2015 περίπου το 23% του παγκόσμιου εγκατεστημένου όγκου ανεμογεννητριών βασίστηκε σε γεννήτριες που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες NdFeB, που εμπεριέχουν στοιχεία σπάνιων γαιών. Το υπόλοιπο ποσοστό βασίστηκε σε ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες που χρησιμοποιούν χαλκό και χάλυβα για τη λειτουργικότητά τους, με κανένα από τα δυο μέταλλα να θεωρείται κρίσιμο υλικό.

Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν την ικανότητα να παρέχουν πολύ μεγάλη μαγνητική ισχύ σε πολύ μικρά μεγέθη και για αυτό χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα συσκευών και τεχνολογιών. Μάλιστα, αποτελούνται κατά κύριο λόγο από κράματα νεοδυμίου και δυσπρόσιου (NdFeB) και σε αντίθεση με τους ηλεκτρικούς μαγνήτες, παράγουν τα δικά τους μαγνητικά πεδία. Το ποσοστό του νεοδυμίου στους μόνιμους μαγνήτες κυμαίνεται μεταξύ 28 και 31% ενώ άλλα στοιχεία σπάνιων

γαιών όπως είναι το δυσπρόσιο, το πρασεοδύμιο και το τέρβιο έχουν εξίσου σημαντικές συγκεντρώσεις. Η ανάγκη για REEs είναι 160-200 kg/MW σε ανεμογεννήτριες χωρίς προσανατολισμό και 30 kg/MW για ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής και προσανατολισμό.



Σχήμα 27 «Ανεμογεννήτριες»

<https://www.pyli-apokalypseis.com/greece?start=1080>

Στο προσεχές μέλλον είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν μέταλλα με υψηλή υπεραγωγιμότητα, όπως για παράδειγμα ένα κράμα από ύτριο, βάριο και χαλκό με μικρές ποσότητες λανθανίου και δημητρίου για μεγαλύτερη απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας και εκτιμώμενη ανάγκη για REEs στα 2 kg/MW.

Τα κρίσιμα μέταλλα που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε αυτές τις τουρμπίνες άμεσης κίνησης είναι το νικέλιο, το μολυβδαίνιο, το νεοδύμιο, το δυσπρόσιο και το πρασεοδύμιο, (Leader, 2019). Τα δυο πρώτα μέταλλα βρίσκονται στους στροβίλους ως κράματα χάλυβα και επομένως δεν περιλαμβάνονται στη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι οι περισσότερες πράσινες τεχνολογίες απαιτούν τεράστιες ποσότητες REs, με χαρακτηριστικό

παράδειγμα να αποτελούν οι μεγάλοι στρόβιλοι που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες αφού απαιτούν περίπου δύο τόνους μόνιμων μαγνητών σπάνιας γης.

Μερικοί ερευνητές (Pavel et al., 2014) θεωρούν ότι οι συγκεντρώσεις των REs στους μόνιμους μαγνήτες θα μπορούσαν να μειωθούν. Για παράδειγμα, εκτιμάται ότι μελλοντικά οι απαιτήσεις σε νεοδύμιο και σε πρασεοδύμιο θα μπορούσαν να ελαττωθούν από το 29% και 32% αντίστοιχα, στο 25% και για τα δυο μέταλλα, ενώ η συγκέντρωση του δυσπρόσιου από 3-6% σε λιγότερο από 1% μέχρι το 2025.

Συνάμα, υπάρχει η δυνατότητα να αντικατασταθούν μικρές ποσότητες νεοδυμίου και πρασεοδύμιου στους μόνιμους μαγνήτες NdFeB για μείωση του κόστους και της διάβρωσης. Ωστόσο, σύμφωνα με τα υπάρχοντα επιστημονικά δεδομένα, το πρασεοδύμιο μπορεί να αντικατασταθεί εν μέρει μόνο από το νεοδύμιο. Η άμεση αντικατάσταση REs από άλλα μέταλλα στους μόνιμους μαγνήτες δεν φαίνεται προς το παρόν εφικτή, αν και καταβάλλονται ήδη προσπάθειες για την εύρεση νέων συνθέσεων μαγνητών ή χρήση άλλων υλικών που δεν βασίζονται στις σπάνιες γαίες.

Το νεοδύμιο, το πρασεοδύμιο και το δυσπρόσιο ανήκουν στην ομάδα των σπάνιων γαιών και θεωρούνται κρίσιμα μέταλλα κυρίως λόγω της σχεδόν αποκλειστικής τους παραγωγής στην Κίνα, όπου το 2017 παράχθηκε περίπου το 81% των REs. Η κρισιμότητα αυτών των στοιχείων προσδιορίζεται επίσης από το μικρό απόθεμα τους στον φλοιό της γης καθώς και από το μικρό ποσοστό ανακύκλωσης και ανάκτησης τους από χρησιμοποιημένες τεχνολογίες και συσκευές.

Σύμφωνα με τη USGS, μέχρι το 2025 η κυριότερη εφαρμογή των σπάνιων γαιών στις νέες τεχνολογίες, με βάση την απαιτούμενη ποσότητα σε REEs, αναμένεται να είναι ο κλάδος των μόνιμων μαγνητών.

#### **4.3.2 : ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ**

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ηλιακή και αιολική ενέργεια είναι υψίστης σημασίας και επομένως η ανάγκη για τεχνολογίες αποθήκευσης είναι προφανής. Το υδρογόνο που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, φαντάζει ως η ιδανική επιλογή αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης και καίγεται ξανά σε κυψέλες καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κυψέλες καυσίμων έχουν πολλές μορφές, συνήθως ταξινομούνται με βάση τον τύπο του ηλεκτρολύτη, καθώς αυτός καθορίζει πολλούς άλλους παράγοντες, όπως τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, τον τύπο του καταλύτη, το καύσιμο και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Παράλληλα, αποτελούν μια νέα τεχνολογία ανανεωσίμων πηγών ενέργειας που συμβάλλει θετικά στην μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αφού έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν το καύσιμο απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καύση και να είναι ενεργειακά αποδοτικές.

Οι κυψέλες καυσίμου PEM είναι ιδανικές για όλους τους τύπους οχημάτων καθώς παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, ξεκινούν γρήγορα και λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με άλλους τύπους καυσίμων. Το καθαρό υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο για οχήματα FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles), και το μόνο που εκπέμπεται από τον σωλήνα εξαγωγής είναι νερό. Οι κυψέλες PEM στηρίζονται σε καταλύτες από πλατίνα, το οποίο αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα λόγω του υψηλού κόστους της πλατίνας και του μικρού αποθέματος. Πολλοί ερευνητές ψάχνουν νέες μεθόδους που θα μπορέσουν να μειώσουν το κόστος, μια τέτοια προοπτική μπορεί να δώσει ο νανοσωλήνας άνθρακα.

Οι κυψέλες καυσίμων ανταλλαγής πρωτονίων χρησιμοποιούν πλατίνα και δημήτριο ως καταλύτες λόγω της υψηλής καταλυτικής τους δραστηριότητας, αντοχής και σταθερότητας. Αυτές οι ιδιότητες τις καθιστούν ιδανικές για καταλυτικούς μετατροπείς βενζινοκίνητων οχημάτων, χημικών και διύλισης πετρελαίου.

Ωστόσο, είναι αναγκαίο να υπάρξουν οι κατάλληλες υποδομές για το υδρογόνο εάν τελικά τα οχήματα FCEV διεισδύσουν στην αγορά σε μεγαλύτερη κλίμακα, αφού οι υποδομές βρίσκονται σε ελάχιστες χώρες παγκοσμίως και η παραγωγή FCEVs είναι πολύ μικρή.

### **4.3.3 : ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ**

Ένας ακόμη πολύ μεγάλος κλάδος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ιδιαίτερα τα μέταλλα των σπάνιων γαιών είναι τα φωτοβολταϊκά και η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Στην σημερινή αγορά υπάρχουν τέσσερις μεγάλες κατηγορίες φωτοβολταϊκών οι οποίες χρησιμοποιούν REs, πρόκειται για τα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου, τα ηλιακά κύτταρα με βαφή, τα



φωτοβολταϊκά πάνελ λεπτής μεμβράνης και το σύστημα καθρεπτών με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια CSP (Concentrated Solar Power).

Σήμερα, τα ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό στην παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών επειδή ανήκουν στην πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών και συνεπώς η διάθεσή τους στην αγορά έγινε συντομότερα από τις υπόλοιπες κατηγορίες. Στην κατηγορία των κυττάρων κρυσταλλικού πυριτίου διακρίνονται τρεις τύποι, τα μονοκρυσταλλικά (mc-Si), τα πολυκρυσταλλικά (pc-Si) και αυτά με κορδέλα σιλικόνης. Η αποτελεσματικότητα του εκάστοτε κυττάρου εξαρτάται από τον τύπο του, αλλά συνήθως δεν ξεπερνά το 25%.



Σχήμα 28 «Φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου»

<https://www.pyli-apokalypseis.com/greece?start=1080>

Τα φωτοκύτταρα κατασκευάζονται με πυρίτιο και είναι συνδεδεμένα ηλεκτρικά μεταξύ τους με μεταλλικές λωρίδες που αποτελούνται από κράμα σπάνιων γαιών με άργυρο, που έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Υπάρχουν ορισμένες τεχνολογικές προσεγγίσεις για τη μείωση της εξάρτησης του αργύρου και την αύξηση της συγκέντρωσης σε σπάνιες γαίες, όμως επί του παρόντος, τα φωτοβολταϊκά βασίζονται κατά ένα μεγάλο βαθμό στον άργυρο.



Μια ακόμη κατηγορία φωτοβολταϊκών αποτελούν τα ηλιακά κύτταρα με βαφή, που ανήκουν στην τρίτη γενιά φωτοβολταϊκών και δεν έχουν βγει ακόμη στην αγορά. Ουσιαστικά, πρόκειται για οργανικά ηλιακά κύτταρα που η αποδοτικότητα των κυττάρων κυμαίνεται στο 8-12% και η διαδικασία κατασκευής τους έχει σχετικά μικρό κόστος. Το φωτοδραστικό υλικό, δηλαδή η βαφή που χρησιμοποιείται μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά. Ωστόσο μια ένωση με βάση το ρουθίνιο και το ευρώπιο δίνει την καλύτερη απόδοση των κυττάρων. Η προστατευτική επικάλυψη των ηλιακών κυττάρων γίνεται με άργυρο και ως καταλύτης χρησιμοποιείται το λανθάνιο και η πλατίνα.

Παράλληλα, στην αγορά υπάρχουν ηλιακά πάνελ που έχουν φωτοκύτταρα με λεπτές μεμβράνες. Αυτά αποτελούν φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς και περιλαμβάνουν διάφορες τεχνολογίες ανάλογα με το ημιαγωγό υλικό. Τα φωτοκύτταρα αποτελούνται από ένα ή περισσότερα στρώματα φωτοδραστικής ουσίας, τα οποία αν και είναι πολύ λεπτά είναι ιδιαίτερα αποδοτικά, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ανάγκη σε υλικά.

Το CSP αποτελεί ένα σύστημα καθρεπτών ή φακών που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία στην συνέχεια θερμαίνει ένα απορροφητικό υγρό, που μπορεί να είναι νερό, λιωμένο άλας ή συνθετικό λάδι. Έπειτα, με την χρήση συμβατικής τεχνολογίας η θερμότητα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και αξιοποιείται με τον κατάλληλο τρόπο.

Ο άργυρος αποτελεί το σημαντικότερο υλικό των φωτοβολταϊκών αφού προσδίδει υψηλή οπτική ανακλαστικότητα στην επιφάνεια των καθρεπτών. Κάθε καθρέπτης έχει σταθερή περιεκτικότητα σε άργυρο ( $1\text{g}/\text{m}^2$ ), όμως επειδή η ηλεκτρική έξοδος ποικίλει ανάλογα με τον τύπο των φωτοβολταϊκών, η απαίτηση σε άργυρο είναι διαφορετική για την εκάστοτε περίπτωση.

#### **4.4 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ**

Σήμερα οι σπάνιες γαίες είναι απαραίτητες και έχουν κομβικό ρόλο στις αυτοκινητοβιομηχανίες αφού πάνω από 700 μέρη του οχήματος έχουν τουλάχιστον 1 από τα 17 REEs. Τα περισσότερα χρησιμοποιούνται στους μόνιμους μαγνήτες που βρίσκονται στα φρένα, στις πόρτες και στα παράθυρα κυρίως με την μορφή νεοδυμίου, δυσπρόσιου, πρασεοδύμιου. Ακόμα οι μπαταρίες NiMH που περιέχουν λανθάνιο και δημήτριο χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στα υβριδικά οχήματα ενώ οι καταλυτικοί μετατροπείς εξάτμισης αυτοκινήτων ή απλώς καταλύτες

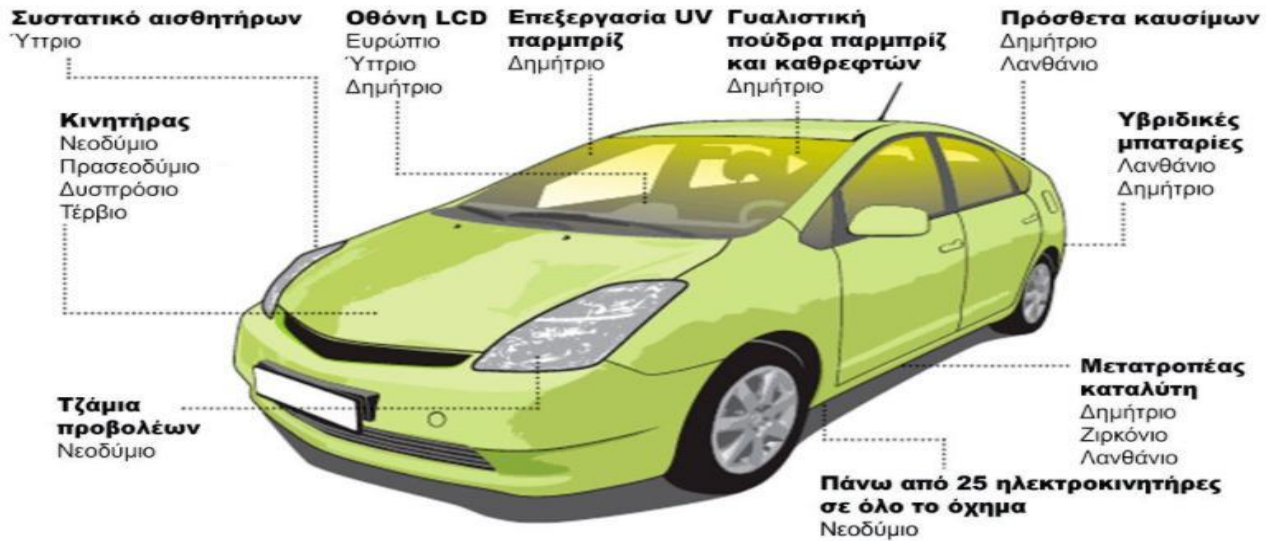
έχουν μεγάλες ποσότητες δημητρίου. Παράλληλα, οι φθοριούχες σκόνες που χρησιμοποιούνται στον εξοπλισμό φώτων του οχήματος περιέχουν ευρώπιο και ύτριο.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ταξινομούνται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, στα υβριδικά αυτοκίνητα HEV (Hybrid Electric Vehicles) και στα πλήρη ηλεκτρικά EV (Electric Vehicles). Τα τελευταία διαθέτουν μόνο ηλεκτρικό κινητήρα ενώ τα υβριδικά μπορούν να λειτουργήσουν είτε αποκλειστικά με ηλεκτρικό κινητήρα ή με συμβατικό κινητήρα καύσης. Η μπαταρία έχει την δυνατότητα να αποθηκεύσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας η οποία συλλαμβάνεται με το σύστημα πέδησης. Μια ακόμη κατηγορία, αποτελούν τα υβριδικά οχήματα με σύστημα plug in (Plug in Hybrid Electric Vehicles), όπου οι μπαταρίες μπορούν να φορτιστούν στο ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ τα τελευταία χρόνια εμφανίστηκαν στην αγορά ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμων (Fuel Cell Electric Vehicles) που έχουν δεξαμενή υδρογόνου ως πηγή ενέργειας.

Τα υβριδικά αυτοκίνητα έχουν μεγάλη απαίτηση σε δημήτριο και λανθάνιο γιατί αυτά αποτελούν βασικά υλικά των NiMH μπαταριών που χρησιμοποιούνται για την βελτίωση του χώρου αποθήκευσης υδρογόνου. Εκτός από τις μπαταρίες, το δημήτριο χρησιμοποιείται στους καταλύτες εξάτμισης των HEVs και PHEVs. Το δημήτριο μπορεί να βελτιώσει την χωρητικότητα αποθήκευσης οξυγόνου και να μειώσει τις εκπομπές ρύπων σε σύγκριση με άλλους καταλύτες. Τα HEVs και PHEVs μπορούν να παράγουν ενέργεια καίγοντας καύσιμο αντιθέτως με τα EVs και FCEVs που δεν παράγουν την ενέργεια τους μέσω καύσης.

Είναι αξιοσημείωτο ότι και οι τέσσερις παραπάνω τύποι οχημάτων χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες NdFeB στους κινητήρες οπότε οι απαιτήσεις σε νεοδύμιο και δυσπρόσιο είναι μεγάλες και αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση του κόστους αυτών των δυο στοιχείων. Οι απαιτούμενες ποσότητες εκτιμάται ότι κυμαίνονται από 78-315 χιλιάδες τόνους ενώ σύμφωνα με στοιχεία από την USGS η ετήσια απαίτηση σε REEs εκτιμάται στους 112 χιλιάδες τόνους και η συνολική παραγωγή από το 2018 έως το 2030 υπολογίζεται να είναι 1.5 εκατομμύρια τόνοι.

Στο σχήμα 29 διακρίνονται οι διάφορες εφαρμογές που βρίσκουν οι σπάνιες γαίες στα οχήματα, ωστόσο οι σημαντικότερες εφαρμογές των REs στην αυτοκινητοβιομηχανία συναντώνται στην χρήση μόνιμων μαγνητών στους ηλεκτρικούς κινητήρες και στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου.



Σχήμα 29 «Εφαρμογές REEs στα αυτοκίνητα»

[https://aperopia.fr/wp-content/uploads/2017/09/RARE\\_EARTHS\\_USAGES-768x576.jpg](https://aperopia.fr/wp-content/uploads/2017/09/RARE_EARTHS_USAGES-768x576.jpg)

Κύριο χαρακτηριστικό των ηλεκτροκινητήρων αποτελεί το μικρό τους βάρος και η συμπαγή τους μορφή. Οι εν λόγω κινητήρες βασίζονται σε μόνιμους μαγνήτες νεοδυμίου (NdFeB) που παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα ισχύος (Grandell, 2016). Οι μόνιμοι μαγνήτες εκτός από νεοδύμιο, εμπεριέχουν αξιόλογες ποσότητες δυσπρόσιου, το οποίο προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή σε θερμότητα, και μικρότερες αλλά όχι αμελητέες ποσότητες σε πρασεοδύμιο, τέρβιο και γάλλιο. Στον πίνακα 8 διακρίνονται οι απαιτήσεις σε REs για μεγέθη κινητήρα άνω και κάτω των 50 kW.

REEs	< 50 kW g	>50 kW g
Nd	150	360
Pr	50	120
Dy	90	210
Tb	9	21
Ga	0.435	1

Πίνακας 8 «Απαιτήσεις σε REEs για διάφορα μεγέθη κινητήρα»

Πηγή δεδομένων : (Grandell, 2016).

Παράλληλα, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα χαρακτηρίζονται από ειδική ενέργεια (Wh/kg) και ειδική ισχύ (W/kg) (Grandell, 2016). Για τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (Battery Electric Vehicles) το κυριότερο χαρακτηριστικό είναι η ειδική ενέργεια και

για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται μπαταρίες με ιόντα λιθίου (Li-ion). Αντιθέτως, στα HEV χρησιμοποιούνται υβριδικές μπαταρίες νικελίου (NiMH) επειδή το σημαντικότερο χαρακτηριστικό τους είναι η συνεχής φόρτιση – αποφόρτιση και η ικανότητα τους να απελευθερώνουν ενέργεια.

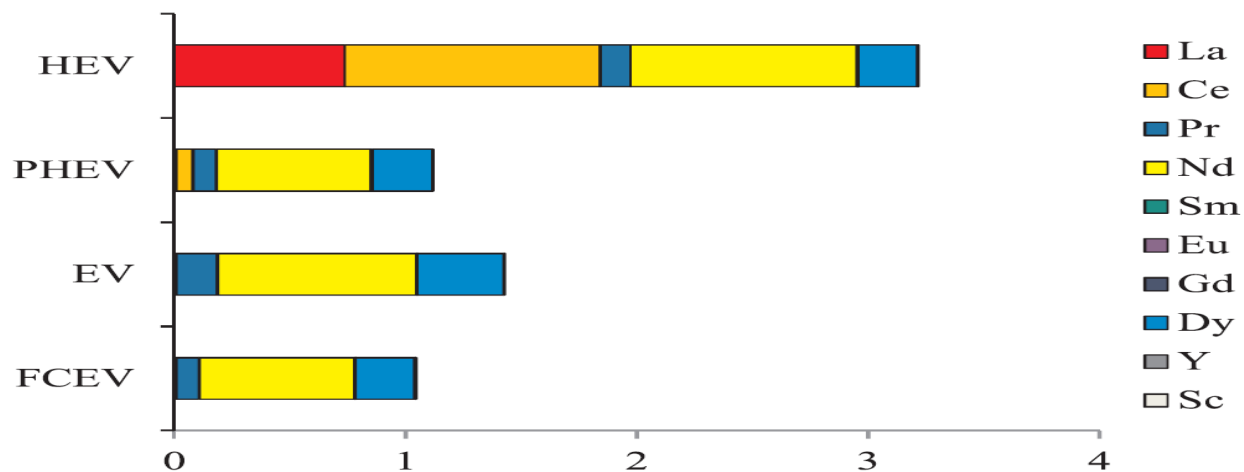
Η ειδική ενέργεια που απαιτείται για μπαταρίες NiMH είναι σχετικά χαμηλή, 40 Wh/kg αλλά αντισταθμίζεται από υψηλή ειδική ισχύ άνω των 1000 kW/kg (Rade, 2001). Η μπαταρία νικελίου περιέχει εκτός από νικέλιο, σημαντικές ποσότητες σπάνιων γαιών και κυρίως νεοδυμίου, λανθανίου και δημητρίου. Σύμφωνα, με πρόσφατες έρευνες (Grandell, 2016), η απαιτούμενη ποσότητα για REs σε αυτές τις μπαταρίες υπολογίζεται στα 1,2 kg/kWh ενώ μελλοντικά η συγκέντρωσή τους εκτιμάται ότι θα ελαττωθεί στα 0,85 kg/kWh. Στον ακόλουθο πίνακα αναφέρονται οι τύποι των ηλεκτρικών οχημάτων, η κατηγορία του κινητήρα, οι μπαταρίες και η πηγή ενέργειας τους.

ΟΧΗΜΑ	ΤΥΠΟΣ	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΜΠΑΤΑΡΙΑ
HEV	Hybrid vehicle	Ηλεκτρικός και κάυσης	Υγρό καύσιμο	NiMH
PHEV	Plug in hybrid vehicle	Ηλεκτρικός και κάυσης	Υγρό καύσιμο και ηλεκτρικό δίκτυο	NiMH
BEV	Battery electric vehicle	Ηλεκτρικός	Ηλεκτρικό δίκτυο	Li-ion
FCEV	Fuel cell electric vehicle	Ηλεκτρικός	Υδρογόνο και κυψέλες καυσίμων	Li-ion

Πίνακας 9 «Τύποι οχημάτων, μπαταρία και πηγή ενέργειας»

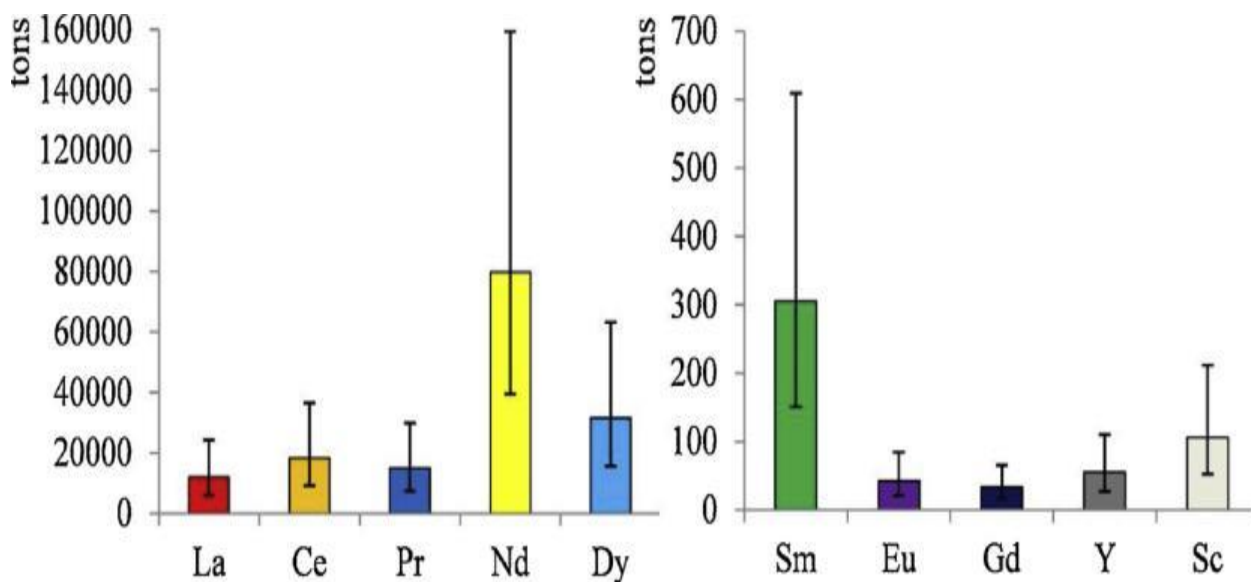
Πηγή δεδομένων : (Grandell, 2016)

Οι σπάνιες γαίες, λοιπόν, εντοπίζονται σε μεγαλύτερα ποσοστά στους μόνιμους μαγνήτες και στις μπαταρίες σε όλους τους τύπους των ηλεκτρικών οχημάτων. Στο σχήμα 30 εύκολα διακρίνεται ότι στα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες λανθανίου, δημητρίου και νεοδυμίου, ενώ στα υπόλοιπα είδη οχημάτων παρατηρούνται από μικρές έως μηδαμινές ποσότητες των Ce και La. Το Nd έχει σημαντική ποσότητα σε όλες τις κατηγορίες ενώ ακολουθούν το δυσπρόσιο και το πρασεδύμιο.



Σχήμα 30 «Οι σπάνιες γαίες σε διάφορους τύπους οχημάτων» (Xiang-Yang, 2019)

Εξάλλου, σύμφωνα με το σχήμα 31 παρατηρείται ότι πέντε μέταλλα σπάνιων γαιών έχουν μεγαλύτερη ζήτηση και εφαρμογή στα αυτοκίνητα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αυτά είναι κατά φθίνουσα σειρά το νεοδύμιο, το δυσπρόσιο, το δημήτριο, το πρασεοδύμιο και το λανθάνιο. Η μεγαλύτερη ποσότητα του δημητρίου και του λανθανίου προορίζεται για τα HEVs λόγω της χρήσης επαναφορτιζόμενων μπαταριών NiMH. Από την άλλη το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο χρησιμοποιούνται σε ποσοστό άνω του 50% των συνολικών αναγκών, λόγω της εφαρμογής τους στους μόνιμους μαγνήτες που βρίσκονται στους κινητήρες των οχημάτων.



Σχήμα 26 «Συνολική απαίτηση οχημάτων σε REEs» (Xiang-Yang, 2019)

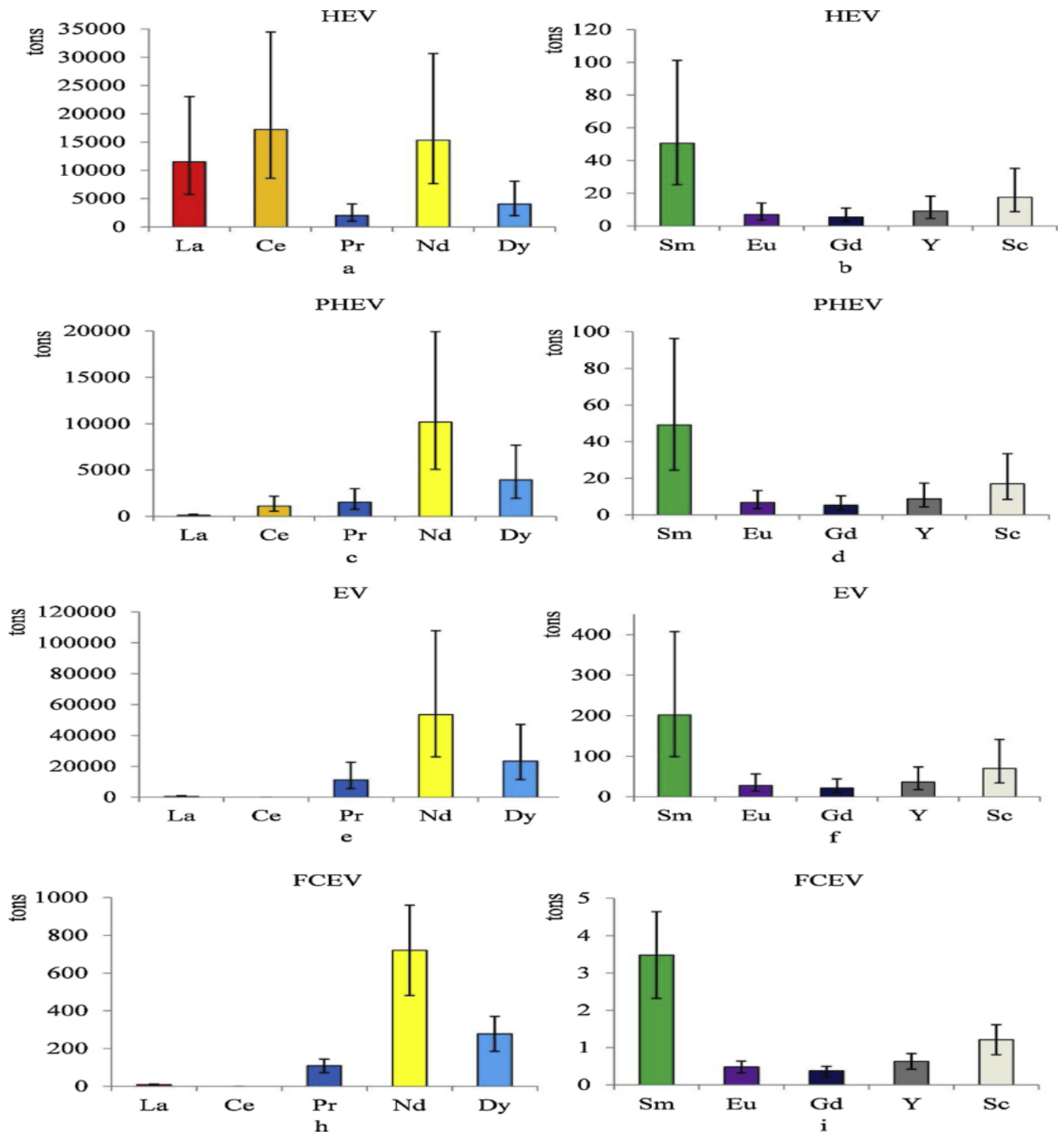
Αυτά τα πέντε μέταλλα καλύπτουν το 99% των παγκόσμιων αναγκών σε REEs, ενώ δεν πρέπει να παραλειφτεί η προσφορά του σαμάριου, του σκάνδιου, του ύττριου, του ευρώπιου και του γαδολινίου που αν και καλύπτουν μόνο το 1% των αναγκών είναι απαραίτητα γιατί δεν μπορούν να αντικατασταθούν από κάποιο άλλο μέταλλο. Το σαμάριο χρησιμοποιείται σε μαγνητικά υλικά, το ύττριο και το ευρώπιο σε φωσφόρους, το σκάνδιο και το γαδολίνιο ως πρόσθετα σε κράματα και γυαλιά.

Στο σχήμα 32 γίνεται μια εκτίμηση για τις απαιτήσεις διάφορων τύπων ηλεκτρικών οχημάτων σε μέταλλα σπάνιων γαιών. Τα HEVs παρουσιάζουν μεγάλες απαιτήσεις σε νεοδύμιο λόγω των μόνιμων μαγνητών αλλά και μεγάλη ζήτηση σε λανθάνιο και δημήτριο λόγω των μπαταριών NiMH. Από την άλλη τα PHEVs εμφανίζουν ελαφρώς μικρότερες απαιτήσεις για νεοδύμιο και σχεδόν μηδαμινές για λανθάνιο. Τέλος, τα EVs χρειάζονται πολύ μεγάλες ποσότητες σε νεοδύμιο, δυσπρόσιο και πρασεοδύμιο, σε αντίθεση με τα FCEVs που έχουν μικρές απαιτήσεις σε REEs.

Οι απαιτήσεις σε REEs των HEVs κυμαίνονται από 25-100 χιλιάδες τόνους, με κύρια στοιχεία το λανθάνιο, το δημήτριο, το πρασεοδύμιο, το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο. Όσον αφορά τα PHEVs αυτά κυμαίνονται σε ποσότητες σχεδόν υποτριπλάσιες των HEVs 8-33 χιλιάδες και έχουν μεγάλη απαίτηση σε νεοδύμιο και μηδαμινή σε λανθάνιο.

Η ποσότητα των REs που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε EVs κυμαίνεται από 44-179 χιλιάδες τόνους ενώ τέλος για τα FCEVs αναμένεται μικρή παραγωγή με αποτέλεσμα η απαιτούμενη ποσότητα των REEs να είναι η μικρότερη συγκρίνοντας την με τις υπόλοιπες. Παρατηρείται και πάλι μεγαλύτερη απαίτηση σε νεοδύμιο σε σχέση με το πρασεοδύμιο και το δυσπρόσιο, ενώ απουσιάζουν και πάλι το λανθάνιο και το δημήτριο.

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι λόγω του μικρού αποθέματος ορισμένων μετάλλων REs γίνονται προσπάθειες για να μειωθεί ή ακόμα και να αντικατασταθεί η συγκέντρωση REEs στα αυτοκίνητα. Η μείωση συσσώρευσης των υλικών και η αλλαγή συστατικών μπορούν να μειώσουν την χρήση των REEs στα ηλεκτροκίνητα οχήματα.

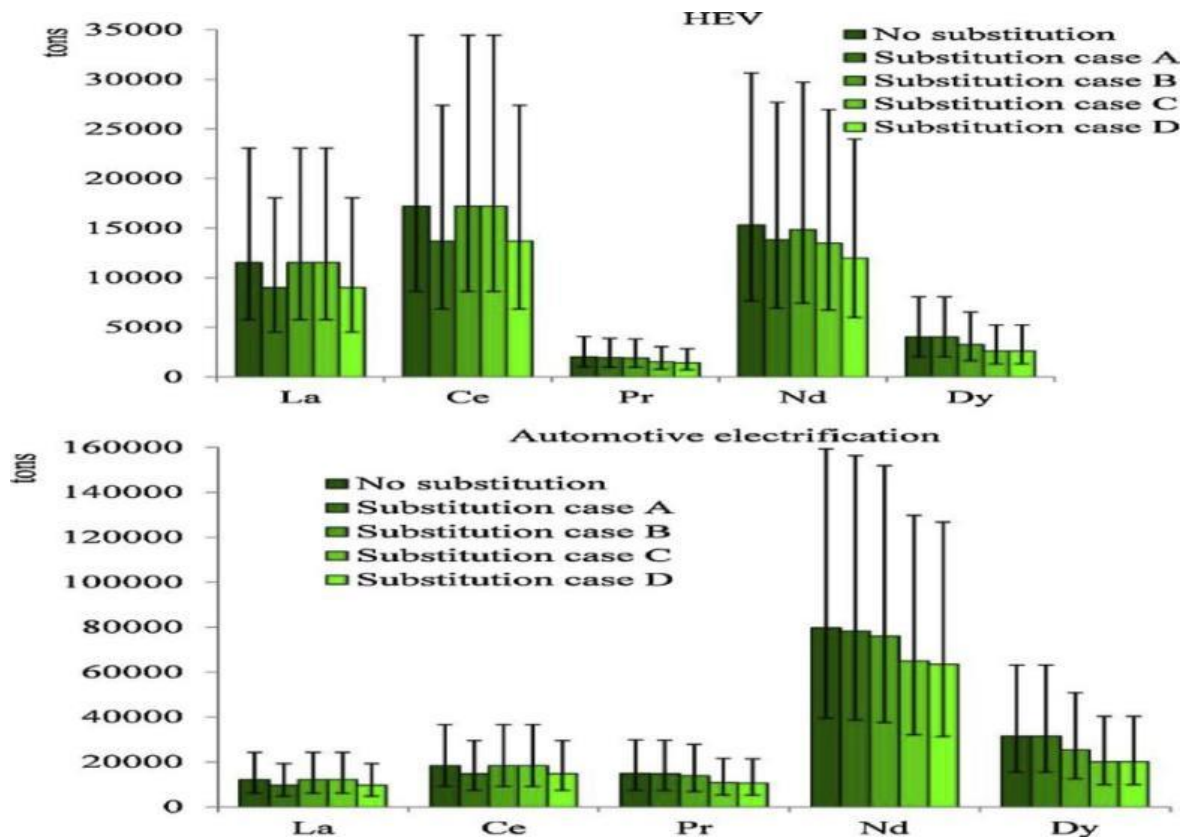


Σχήμα 32 «Πιθανή απαίτηση σε REEs σε διαφορετικούς τύπους οχημάτων» (Xiang-Yang, 2019)

Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να γίνει παραπάνω έρευνα πάνω στα υλικά που εμφανίζουν παρόμοιες ιδιότητες με τις σπάνιες γαίες έτσι ώστε να μειωθεί η συσσώρευση των υλικών. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις μιας ομάδας επιστημόνων, ενθαρρυντικά είναι τα νέα για την αντικατάσταση των μπαταριών νικελίου με μπαταρίες λιθίου, ενώ όσον αφορά τους μαγνήτες

νεοδυμίου, δεν έχει βρεθεί ακόμα κάποιο υποκατάστατο έτσι ώστε να αντικαταστήσει τα REEs που εμπεριέχονται σε αυτούς.

Υπό αυτό το πρίσμα, εξετάζονται τέσσερα σενάρια με σκοπό να γίνει μια εκτίμηση για την μελλοντική παραγωγή αυτοκινήτων (Xiang-Yang, 2019). Το πρώτο σενάριο εκτιμά ότι θα χρησιμοποιηθούν μπαταρίες NiMH στα υβριδικά αυτοκίνητα μέχρι το 2025 και από το 2026 έως το 2030, μπαταρίες λιθίου. Το δεύτερο σενάριο εξετάζει την μείωση της συσσώρευσης των υλικών στους μαγνήτες των κινητήρων οδήγησης που θα έχει ως συνέπεια να μειωθούν οι ποσότητες των REEs (Nd, Pr, Dy) σε ένα ποσοστό ανάμεσα στο 67-88% του υφιστάμενου. Το τρίτο σενάριο εξετάζει και αυτό να μειωθεί η συγκέντρωση REEs στους μόνιμους μαγνήτες αλλά σε ένα ποσοστό κοντά στο 60% ενώ το τέταρτο σενάριο αποτελεί τον συνδυασμό των σεναρίων 1 και 3, δηλαδή την κλιμακούμενη αντικατάσταση του τύπου των μπαταριών στους ηλεκτροκινητήρες των οχημάτων και τη μείωση της ποσότητας των REEs στους μαγνήτες νεοδυμίου. Τέλος, υπάρχει ακόμα και το ενδεχόμενο να μη γίνει καμιά αντικατάσταση των REEs σε μπαταρίες και μαγνήτες, με τις όποιες συνέπειες έχει αυτή η ενέργεια.



Σχήμα 33 «Εκτιμώμενες ποσότητες REEs σε διαφορετικά σενάρια» (Xiang-Yang, 2019)



Στο σχήμα 33 φαίνεται πως θα κυμανθούν οι ποσότητες των REEs αν εφαρμοστούν οι μέθοδοι που αναλύθηκαν παραπάνω. Διαχωρίζονται τα υβριδικά με τα υπόλοιπα οχήματα γιατί μόνα αυτά χρησιμοποιούν μπαταρίες NiMH, επομένως η αλλαγή σε μπαταρίες λιθίου θα επηρεάσει αισθητά τις ποσότητες του δημητρίου και του λανθανίου. Τα HEVs θα επηρεαστούν περισσότερο από την αλλαγή των μπαταριών NiMH με μπαταρίες λιθίου γιατί χρησιμοποιούν ήδη μπαταρίες NiMH που εμπεριέχουν REEs (Ce, La).

Στην πρώτη περίπτωση, αλλαγή μπαταριών νικελίου με λιθίου, προβλέπεται να μειωθεί η χρήση REEs κατά 15%. Στο σενάριο 2 και 3, προβλέπεται μείωση 3% και 8 % αντίστοιχα, ενώ όσον αφορά την τελευταία περίπτωση θα υπάρξει μείωση της τάξης του 23%. Αυτές οι αλλαγές αναμένεται να επηρεάσουν επίσης και την ζήτηση σε HEVs, η οποία προβλέπεται να μειωθεί κατά 5%. Για τις περιπτώσεις 2 και 3 εκτιμάται μείωση 7% και 19% αντίστοιχα ενώ στην περίπτωση 4 , αλλαγή μπαταριών και κινητήρων, η ζήτηση σε REEs θα μειωθεί 24%.

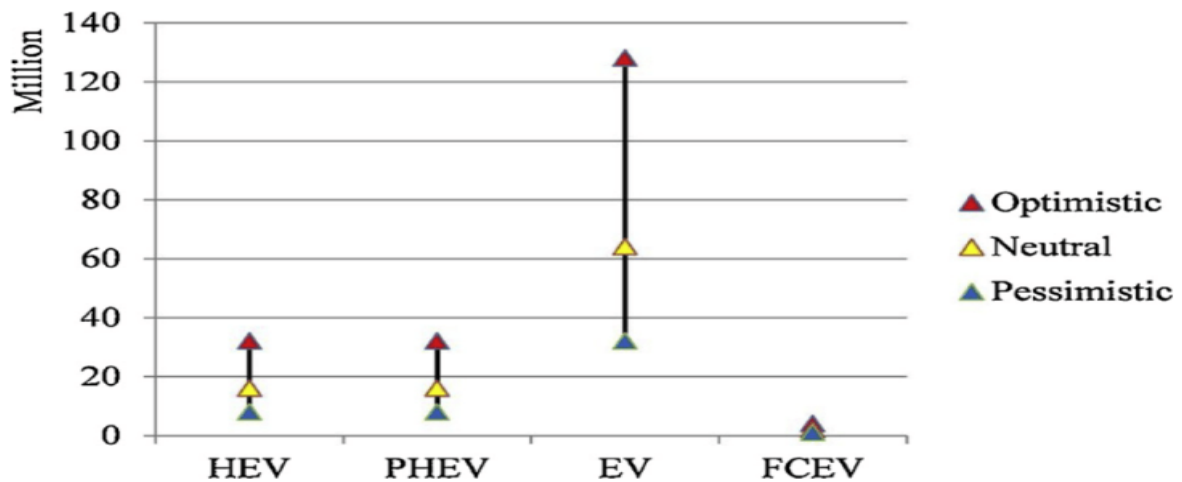
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε σε εγχωρία στοιχεία που δόθηκαν από την κινέζικη αυτοκινητοβιομηχανία (Xiang-Yang, 2019). Ωστόσο, αυτή η μελέτη είναι μια εκτίμηση, οπότε μπορεί να υπάρξουν αρκετές αβεβαιότητες ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι ένας σημαντικός παράγοντας που δεν έχει μελετηθεί σε αυτό το μοντέλο είναι η ανακύκλωση REEs. Αυτό θα οδηγούσε στην αύξηση των αποθεμάτων των REEs και στην μείωση των εξορύξεων που αφήνουν ένα δυσάρεστο αποτύπωμα στο περιβάλλον. Όμως, οι προσπάθειες ανακύκλωσης που είχαν γίνει έως και το 2015 παρουσίασαν πολύ μικρό ποσοστό ανάκτησης REEs , ίσο με περίπου 1%.

#### **4.4.1 ΑΥΞΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ**

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας αναμένεται να υπάρξουν αυξήσεις στην παραγωγή οχημάτων που αφήνουν μικρό αποτύπωμα στο περιβάλλον. Τα οχήματα που πρόκειται να κυριαρχήσουν στην παγκόσμια αγορά είναι τα ηλεκτρικά διότι εκπέμπουν λιγότερους ρύπους και είναι συμβατά με τις νέες τεχνολογίες.

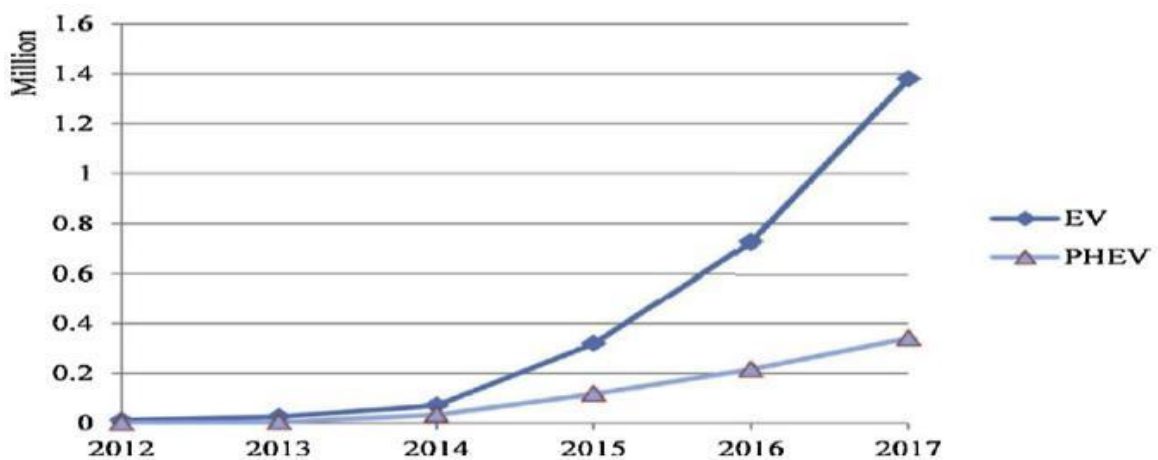
Στο σχήμα 34 δίνεται μια εκτίμηση για τον αριθμό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά κατηγορία κατά το έτος 2030. Σύμφωνα με το διάγραμμα, υπολογίζεται ότι το 2030 θα υπάρχουν περίπου 80εκ EVs ενώ σημαντικός θα είναι και ο αριθμός των HEVs και των PHEVs. Αντιθέτως, τα FCEVs προβλέπεται να έχουν μικρή παραγωγή, εξαιτίας της έλλειψης δομών και

εγκαταστάσεων υδρογόνου. Η αναλογία των EVs σε σχέση με τα PHEVs σήμερα είναι 4/1 και με βάση αυτό υπολογίζεται η μελλοντική παραγωγή, ενώ παρόμοια αύξηση με τα PHEVs θα παρουσιάσουν τα HEVs.



Σχήμα 34 «Εκτιμώμενος αριθμός διάφορων τύπων οχημάτων το 2030» (Xiang-Yang, 2019)

Το 2016 η Κίνα παρήγαγε 110 χιλιάδες HEVs και σχεδόν τα διπλάσια PHEVs. Με βάση το μοντέλο που δημιουργήθηκε υπολογίζεται ότι το 2030 η παραγωγή της Κινάς σε HEVs θα είναι 16εκ οχήματα. Η παραπάνω μελέτη εκτιμά ότι οι πωλήσεις αυτοκινήτων HEV και PHEV θα έχουν αυξηθεί κατά 5εκ το 2020, ενώ άλλοι μελετητές υπολογίζουν αύξηση κατά 7.5εκ οχήματα συνολικά.

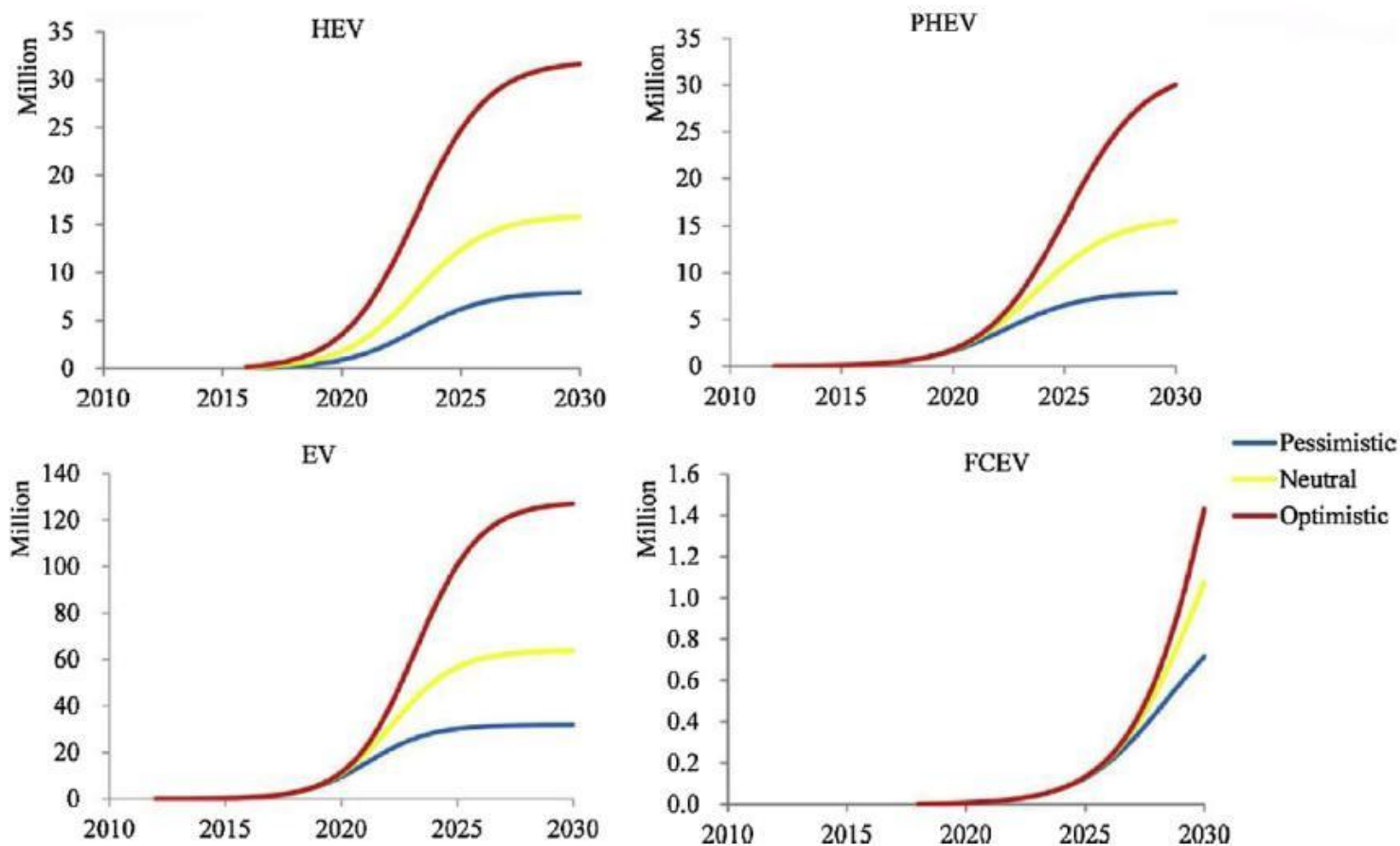


Σχήμα 27 «Ετήσιες πωλήσεις PHEVs και EVs» (Xiang-Yang, 2019)

Οι ερευνητές εκτιμούν ότι το 2030 η Κίνα θα έχει 350εκ οχήματα εκ των οποίων τα 90εκ θα είναι ηλεκτροκίνητα ενώ σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι ο παγκόσμιος οργανισμός ενέργειας έχει βάλει ως στόχο το 60% των οχημάτων το 2030 να χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα. Οι ετήσιες πωλήσεις σύμφωνα με το MIT για τα PHEVs και EVs φαίνονται στο σχήμα 35.

Στα σχήμα 36 αναπαρίσταται η αύξηση των νέων οχημάτων με την πάροδο του χρόνου. Το μοντέλο εκτίμησης παραγωγής οχημάτων λαμβάνει 3 διαφορετικά σενάρια. Παρατηρούμε ότι τα EVs θα έχουν την μεγαλύτερη παραγωγή ενώ τα FCEVs την μικρότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα οχήματα.

Η αύξηση που παρουσιάζεται στα EVs είναι πολύ υψηλή, αφού εκτιμάται ότι το 2030 η παραγωγή θα φτάσει τα 30-130εκ οχήματα. Έπονται τα HEVs και PHEVs με εκτιμήσεις από 8-30 εκ ενώ ο συνολικός αριθμός των FCEVs υπολογίζεται γύρω στο 1εκ.



Σχήμα 28 «Ετήσια παραγωγή διάφορων τύπων οχημάτων» (Xiang-Yang, 2019)

Η αγορά δείχνει ότι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλεκτροκινήτων οχημάτων θα βελτιωθεί ενώ παράλληλα θα μειωθεί το κόστος. Αυτές οι αλλαγές θα οδηγήσουν στην ραγδαία αύξηση της παραγωγής HEVs και EVs από το 2025. Ωστόσο, ένα ακόμα στοιχείο που πρέπει να απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα είναι ότι λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των ηλεκτροκινήτων οχημάτων πρέπει να κατασκευαστούν οι κατάλληλες υποδομές για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες αυτών των οχημάτων, όπως σημεία φόρτισης και υγρών καυσίμων.

Συνάμα, τα FCEVs παρουσιάζουν μικρούς αριθμούς γιατί βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό και εργαστηριακό στάδιο. Όσο η τεχνολογία βελτιώνεται και η πληροφορία για την καλύτερη απόδοση της μηχανής ανανεώνεται τόσο το κόστος κατασκευής θα μειώνεται. Σύμφωνα με την μελέτη και την συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας, εκτιμάται ότι τα PHEVs και FCEVs θα αυξηθούν μετά το 2030.

## **4.5 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΥΣ ΤΟΜΕΙΣ**

Οι σπάνιες γαίες βρίσκουν ακόμη περισσότερες εφαρμογές σε μερικούς ακόμα σημαντικούς κλάδους της οικονομίας. Οι μοναδικές τους ιδιότητες τις καθιστούν χρήσιμες για την γεωργία, ωφέλιμες για την ιατρική και απαραίτητες για τις αμυντικές τεχνολογίες. Ορισμένα μέταλλα σπάνιων γαιών μπορούν να αξιοποιηθούν σε λιπάσματα για την βελτίωση των παραγόμενων προϊόντων, να χρησιμοποιηθούν στον ιατρικό εξοπλισμό για την διάγνωση και αντιμετώπιση κάποιων ασθενειών και να αποτελέσουν βασικό γρανάζι των στρατιωτικών τεχνολογιών.

### **4.5.1 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ REEs ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ**

Οι σπάνιες γαίες βρίσκουν πολλές εφαρμογές στον τεχνολογικό τομέα, μπορούν μάλιστα να χρησιμοποιηθούν ακόμα και στην γεωργία. Οι REEs χρησιμοποιούνται σε λιπάσματα για να βελτιωθεί με αυτόν τον τρόπο η παραγωγή και η ανάπτυξη των καλλιεργειών αλλά και για να αυξηθεί η συγκέντρωση REEs στο έδαφος (Tyler, 2004). Γενικά, τα ανόργανα φωσφορικά λιπάσματα περιέχουν μακροθρεπτικά συστατικά (Ca, Mg, N και P), μικροθρεπτικά συστατικά (Fe, Si) αλλά και REEs. Στην Κίνα, τα λιπάσματα που περιέχουν σπάνιες γαίες εφαρμόζονται σε μεγάλη κλίμακα για την βελτίωση της απόδοσης και της ποιότητας των φυτών και των καλλιεργειών.

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, οι συγκεντρώσεις των REs στα λιπάσματα είναι αρκετά χαμηλές. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις τους εξαρτώνται από τα καλλιεργούμενα είδη, τις συνθήκες καλλιέργειας και την περιεκτικότητα του εδάφους σε σπάνιες γαίες (Fu et al., 2001). Για παράδειγμα, βρέθηκαν πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις REEs σε κόκκους ρυζιού σε σύγκριση με το καλαμπόκι, αποδεικνύοντας ότι ορισμένα είδη έχουν μεγαλύτερη ικανότητα συσσώρευσης σπάνιων γαιών.

Παρόλα αυτά, πρέπει να τονιστεί ότι η ανεξέλεγκτη εφαρμογή των REEs στην γεωργία μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα, αφού οι σπάνιες γαίες μπορούν πολύ εύκολα να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα μέσω της κατανάλωσης και να έχουν επιβλαβή αποτελέσματα για την ανθρώπινη υγεία (Valagam, 2018). Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι τα δημητριακά παρουσιάζουν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις σε REEs και ότι δεν υπάρχει σημαντική συσσώρευση σε REEs στα λιπάσματα, έτσι προϊόντα από δημητριακά, όπως το σιτάρι και το αλεύρι θεωρούνται ασφαλή. Ωστόσο, οι χώρες με μεγάλα αποθέματα σε σπάνιες γαίες και όπου τα λιπάσματα με βάση τα φωσφορικά άλατα (εξορύσσονται από εναποθέσεις μοναζιτών) εφαρμόζονται σε μεγάλη κλίμακα, ενδέχεται να έχουν μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την αυξημένη συμβολή των REEs.

#### **4.5.2 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ REEs ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ**

Ο σύγχρονος ιατρικός εξοπλισμός απαιτεί αξιόλογες ποσότητες σπάνιων γαιών. Οι μοναδικές ιδιότητες τους, όπως η εκπομπή ακτινοβολίας και ο μαγνητισμός, τις καθιστούν αναγκαίες για τα ιατρικά μηχανήματα αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές και διαφορετικές θεραπευτικές και διαγνωστικές εφαρμογές στη σύγχρονη ιατρική.

Ορισμένες μελέτες (Wakabayashi et al., 2016) επιβεβαίωσαν την αντιβακτηριδιακή και την αντιμυκητιακή δράση των σπάνιων γαιών η οποία είναι συγκρίσιμη με τα ιόντα του χαλκού, έτσι αυτά τα μέταλλα έχουν αρχίσει ήδη να βρίσκουν ποικίλες φαρμακευτικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, το γαδολίνιο χρησιμοποιείται σε μαγνητικούς τομογράφους (MRI), ωστόσο έρευνες έδειξαν ότι το συγκεκριμένο μέταλλο προσβάλλει τους νευρικούς ιστούς των ανθρώπων και είναι επιβλαβής για τους ασθενείς (McDonald et al., 2015; Gulani et al., 2017).

Κάποια στοιχεία σπάνιας γης έχουν την ικανότητα να αναστέλλουν τον σχηματισμό και την ανάπτυξη μυκητιακών σπορίων και για αυτό χρησιμοποιούνται ως νηματωδοκτόνα (φυτοφάρμακα) επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο μεγάλο αριθμό οργανισμών (Zhang et al., 2000). Ακόμη, όταν αναλύθηκαν τα φαρμακευτικά δείγματα για ανόργανες ακαθαρσίες, βρέθηκαν να περιέχουν σημαντικές ποσότητες ελαφρών σπάνιων γαιών (Valagam, 2018). Ωστόσο, οι επιπτώσεις της συγκέντρωσης REEs στα φαρμακευτικά προϊόντα δεν είναι σαφείς προς το παρόν, αντιθέτως η αντιοξειδωτική τους επίδραση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την θεραπεία πολλών ασθενειών.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι νέες ιατρικές εφαρμογές και τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η νανοτεχνολογία, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη χρήση των REEs στον τομέα της ιατρικής μελλοντικά.

### **4.5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΜΥΝΤΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

Τα στοιχεία της σπάνιας γης παίζουν μεγάλο και ουσιαστικό ρόλο στην στρατιωτικό τομέα κάθε χώρας. Οι REEs εμπεριέχονται σε σημαντικό βαθμό στις περισσότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν οι ένοπλες δυνάμεις, όπως είναι τα γυαλιά νυχτερινής όρασης, τα όπλα υψηλής τεχνολογίας, ο εξοπλισμός επικοινωνίας, τα GPS, οι μπαταρίες των οχημάτων, τα συστήματα ραντάρ, τα σόναρ και μερικές ακόμα ηλεκτρονικές κι αμυντικές συσκευές. Επιπλέον, τα μέταλλα σπάνιας γης είναι βασικά συστατικά για την κατασκευή πολύ σκληρών κραμάτων που χρησιμοποιούνται σε θωρακισμένα οχήματα και σε εκτοξευόμενα βλήματα που καταστρέφονται κατά την πρόσκρουση.

<b>ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ REES</b>		
Λανθάνιο	La	Γυαλιά νυχτερινής όρασης
Νεοδύμιο	Nd	Λέιζερ και συστήματα επικοινωνίας
Ευρώπιο	Eu	Φώσφοροι σε λάμπες και οθόνες
Έρβιο	Er	Ενισχυτές μετάδοσης δεδομένων στις οπτικές ίνες
Σαμάριο	Sm	Μόνιμους μαγνήτες που είναι σταθεροί σε υψηλές θερμοκρασίες
Σαμάριο	Sm	Όπλα υψηλής ακριβείας

Πίνακας 10 «Χρήσεις REEs στη στρατιωτική βιομηχανία»

Πηγή δεδομένων : (King, 2015)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μερικά μέταλλα μπορούν να αντικαταστήσουν τις σπάνιες γαίες σε ορισμένες εφαρμογές τους. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και στις στρατιωτικές

εφαρμογές, όμως συνήθως, αυτά τα υποκατάστατα δεν είναι τόσο αποτελεσματικά και μειώνουν αισθητά τη στρατιωτική υπεροχή. Αρκετές αμυντικές χρήσεις των REEs συνοψίζονται στον συνοδευτικό πίνακα 10.

#### **4.5.4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΛΑΜΠΕΣ LED ΚΑΙ ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ**

Στην σημερινή αγορά, οι λάμπες LED και οι λαμπτήρες φθορισμού αποτελούν τις αποδοτικότερες ενεργειακά συσκευές φωτισμού. Στους λαμπτήρες φθορισμού ένα άτομο απορροφά ένα φωτόνιο και το εκπέμπει ξανά καθώς το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτονίου εξαρτάται από το άτομο που το εκπέμπει. Έτσι, μεταβάλλοντας τα στοιχεία παράγεται φως με διαφορετικά μήκη κύματος και ως εκ τούτου διαφορετικά χρώματα.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να προσδώσουν αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα μέταλλα σπάνιων γαιών και ειδικότερα οι βαρέες σπάνιες γαίες όπως το έρβιο, το ευρώπιο, το ύτριο και το δυσπρόσιο. Ο φώσφορος που χρησιμοποιείται σε λάμπες LED και λάμπες φθορισμού περιέχει πολλά στοιχεία REs, αλλά σε μεγαλύτερη ποσότητα βρίσκονται το ύτριο και το δημήτριο.



Σχήμα 29 «Λάμπα LED βασισμένη σε REEs»

<https://www.lightinthebox.com/gr>

Στους γραμμικούς λαμπτήρες φθορισμού, που τοποθετούνται σε γραφεία και δημόσια κτίρια, χρησιμοποιείται ένα φωσφορικό άλας με υψηλή περιεκτικότητα σε λανθάνιο, το οποίο περιέχει τα ίδια μέταλλα REs με εξαίρεση, ότι τα κύρια στοιχεία είναι το λανθάνιο και το ύτριο. Οι λάμπες LED περιλαμβάνουν έναν ημιαγωγό εκπομπής φωτός μέσω του οποίου και με τη βοήθεια των φωσφύρων το μονοχρωματικό φως μετατρέπεται σε λευκό.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ**

Η ανάγκη για νέες τεχνολογίες στην σημερινή κοινωνία έχει οδηγήσει στην αύξηση της παραγωγής οξειδίων και κραμάτων σπάνιων γαιών παγκοσμίως. Ωστόσο, οι διαδικασίες εξόρυξης, διαχωρισμού και επεξεργασίας των σπάνιων γαιών ελλοχεύουν ποικίλους κινδύνους για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Σε αυτήν την ενότητα, γίνεται εκτενής αναφορά στους κινδύνους και τα προβλήματα υγείας που αντιμετωπίζουν άνθρωποι που ζουν κοντά σε ορυχεία όπου εξάγονται REEs. Παράλληλα όμως, αναλύονται σε βάθος όλες οι αιτίες, που είναι υπεύθυνες για την εκπομπή ρύπων και κατ' επέκταση απειλούν άμεσα το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

### **5.1 : ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Οι σπάνιες γαίες για να διατεθούν στην αγορά πρέπει πρώτα να εξορυχτούν και να διαχωριστούν και έπειτα να επεξεργαστούν με την κατάλληλη διαδικασία. Η μη τήρηση μέτρων και της προβλεπόμενης διαδικασίας μπορεί όχι μόνο να οδηγήσει σε οικονομικές απώλειες αλλά κυρίως να προκαλέσει ποικίλους περιβαλλοντικούς κινδύνους.

Οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που ελλοχεύουν με την παραγωγή στοιχείων σπάνιων γαιών είναι πολυάριθμοι. Καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου των εξορυκτικών διεργασιών είναι πολύ δύσκολο, αν όχι απίθανο, να εξορυχτούν και να ανακτηθούν σπάνιες γαίες χωρίς να υπάρξουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η εξαγωγή στοιχείων σπάνιων γαιών ξεκινά με την εξόρυξη, ακολουθείται από τις διαδικασίες βελτιστοποίησης (ραφινάρισματος) και ολοκληρώνεται με την διάθεση των απόβλητων.

#### **5.1.1 : ΕΞΟΡΥΞΗ**

Η εξόρυξη είναι μια φυσική διαδικασία που ακολουθείται για την αφαίρεση ορυκτών που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες από το υπέδαφος και είναι συνήθως επιβλαβής για το περιβάλλον. Η πλειονότητα των στοιχείων σπάνιων γαιών εξορύσσονται μέσω της εκσκαφής ανοιχτού λάκκου, που περιλαμβάνει την εκσκαφή του εδάφους με βαρύ βιομηχανικό εξοπλισμό και μηχανήματα. Η επέμβαση αυτή στην επιφάνεια της γης μπορεί να διαταράξει τα ακμάζοντα οικοσυστήματα στην περιοχή της εξόρυξης.



Επίσης, κύρια πηγή ρύπων αποτελούν τα ορυχεία όπου πέρα από την παραγωγή στοιχείων σπάνιων γαιών εκπέμπονται ρύποι όπως ραδιονουκλεΐδια, σκόνη και ποσότητες άλλων επιβλαβών μετάλλων. Κάθε ένας από αυτούς τους ρύπους δραπετεύει από τα ορυχεία με διαφορετικούς τρόπους, εισέρχεται στην ατμόσφαιρα και στους υδροφόρους ορίζοντες και έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον.

### **5.1.2 : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΞΕΥΓΕΝΙΣΜΟΥ (ΡΑΦΙΝΑΡΙΣΜΑ) (REFINING)**

Ο στόχος της εξόρυξης είναι να καταλήξουμε σε ένα καθαρό και αξιοποιήσιμο προϊόν που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιονδήποτε τρόπο χρειαστεί. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι τα ορυκτά που εξορύσσονται από τα ορυχεία δεν βρίσκονται σε καθαρή μορφή αλλά υποβάλλονται σε διάφορες διαδικασίες βελτιστοποίησης. Αυτές οι διαδικασίες ευθύνονται για την απελευθέρωση διάφορων υποπροϊόντων μετάλλων στο περιβάλλον δημιουργώντας, εν τέλει, επιπρόσθετα περιβαλλοντικά ζητήματα.

Τα μέταλλα αυτά μπορούν με πολύ εύκολο τρόπο να εισέλθουν στον αέρα, στο νερό ή ακόμα και στο έδαφος και να μολύνουν ένα περιβάλλον, ενώ είναι αρκετά δύσκολο να αφαιρεθούν. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα, να αλλοιώνεται ένα οικοσύστημα και οι οργανισμοί που βρίσκονται σε αυτό να έρθουν αντιμέτωποι με καταστροφικές συνθήκες.

### **5.1.3 : ΑΠΟΒΛΗΤΑ**

Τα υποπροϊόντα της εξόρυξης στοιχείων σπάνιων γαιών είναι συνήθως απόβλητα που είναι υπεύθυνα για περαιτέρω απειλές στο περιβάλλον. Γενικά, τα απόβλητα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες : α) στα απορρίμματα και β) στα αποθέματα πετρωμάτων. Τα πρώτα είναι περισσότερα ανησυχητικά διότι περιέχουν μικρά και λεπτά σωματίδια που μπορούν να διαρρεύσουν στον υδροφόρο ορίζοντα που περιβάλλει ένα ορυχείο και να απορροφηθούν από το έδαφος.

Το κύριο μέλημα που απασχολεί τους επιστήμονες είναι η μόλυνση του νερού, ανεξάρτητα από το αν η μόλυνση προέρχεται από αποθέματα πετρωμάτων ή απορριμμάτων. Έρευνες έχουν δείξει ότι το νερό μπορεί να μολυνθεί με την καθίζηση πετρωμάτων, με την αποστράγγιση οξέων καθώς και με την εναπόθεση μετάλλων. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι εφόσον το νερό μολυνθεί

ακολουθείται μια δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία για τον καθαρισμό του ενώ είναι σχεδόν αδύνατο να αποκατασταθεί πλήρως η αρχική του ποιότητα.

## **5.2 : ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΞΟΡΥΞΗΣ**

Η εξόρυξη ανοιχτού λάκκου, όπου το υλικό ανασκάπτεται και συγκεντρώνεται κατευθείαν από ανοιχτό λάκκο αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο εξόρυξης πετρωμάτων σπάνιας γης και έχει υιοθετηθεί σε παγκόσμια κλίμακα. Αυτός ο τρόπος εξόρυξης είναι ιδιαίτερα επιζήμιος για το περιβάλλον, επειδή οι ζητούμενες σπάνιες γαίες είναι διαθέσιμες σε μικρές συγκεντρώσεις στα διάφορα ορυκτά, γεγονός που αυξάνει την ποσότητα μεταλλεύματος που απαιτείται για την εξόρυξη.

Επιπλέον, όταν τα εν λόγω ορυκτά συνθλίβονται, πιθανόν να απελευθερώσουν ραδιενεργά στοιχεία (θόριο, ουράνιο), σκωρία και ποσότητες άλλων μετάλλων. Κατά την διάρκεια του διαχωρισμού, οι εναπομείναντες πολτοί των ορυκτών μπορούν να διαρρεύσουν στο περιβάλλον ως απορρίμματα, τοξικά και ραδιενεργά στοιχεία και να εισχωρήσουν στο υπέδαφος και στον υδροφόρο ορίζοντα αν δεν περιοριστούν. Με αυτόν τον τρόπο, το νερό συγκεντρώνει επιβλαβείς ποσότητες ορυκτών και βαρέων μετάλλων και καθίσταται μολυσματικό και απαγορευτικό προς οποιαδήποτε χρήση.

Η εξόρυξη διαλύματος ή αλλιώς εξόρυξη με επί τόπου έκπλυση (ISL, In Situ Leaching) έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πιο ασφαλής και πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σχέση με τη συμβατική εξόρυξη, καθώς το σώμα του μεταλλεύματος διαλύεται και στη συνέχεια αντλείται, αφήνοντας ελάχιστη επιφανειακή διαταραχή και μηδαμινά απορρίμματα ή απόβλητα πετρώματα (World Nuclear Association, 2012). Επίσης, ένα ακόμη όφελος αυτής της μεθόδου είναι η μικρή κατανάλωση νερού κατά την εξόρυξη καθώς και το γεγονός ότι δεν υπάρχει σκόνη μεταλλεύματος ή άμεση έκθεση του μεταλλεύματος στο περιβάλλον.

Ωστόσο, τα ισχυρά οξέα που χρησιμοποιούνται, κατά αυτήν την μέθοδο εξόρυξης, για τη διάλυση του σώματος μεταλλεύματος συχνά διαλύουν τα μέταλλα στα ορυκτά. Τα υγρά που απομένουν μετά τη διαδικασία έκπλυσης συνήθως περιέχουν αυξημένες συγκεντρώσεις μετάλλων και ραδιενεργών ισοτόπων, θέτοντας σημαντικό κίνδυνο για τις κοντινές πηγές υπόγειων και

επιφανειακών υδάτων Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι το χαμηλό pH των λυμάτων της εξόρυξης ISL μπορεί να οδηγήσει σε οξίνιση του περιβάλλοντος χώρου.

Ένα ακόμη περιβαλλοντικό πρόβλημα που οφείλεται στη εξόρυξη ορυκτών είναι η άμεση επέμβαση του άνθρωπου σε ένα ήδη υπάρχον οικοσύστημα. Η έκταση της ζημιάς που προκαλείται είναι πολύ μεγαλύτερη από την περιοχή εξόρυξης και έχει ως συνέπεια την καταστροφή και διάβρωση του εδάφους, τον θάνατο της χλωρίδας και της πανίδας του οικοσυστήματος και την απελευθέρωση ρύπων στην ατμόσφαιρα.

### **5.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΥΛΙΣΗΣ (REFINING)**

Με το πέρας της εξόρυξης, τα πετρώματα σπάνιων γαιών οδηγούνται στα διυλιστήρια όπου γίνεται η επεξεργασία των ορυκτών και η παραγωγή οξειδίων ή καθαρών στοιχείων σπάνιων γαιών. Τα διυλιστήρια παράγουν ένα μεγάλο μέρος των αποβλήτων, το οποίο πρέπει να περιοριστεί προκειμένου να αποφευχθεί επιπρόσθετη ρύπανση στο περιβάλλον.

Οι διεργασίες διύλισης είναι εξίσου επιβλαβείς για το περιβάλλον με τις διεργασίες εξόρυξης. Κατά την διύλιση χρησιμοποιούνται ισχυρά οξέα και βάσεις για να διαχωριστούν τα επιθυμητά μέταλλα από τα απόβλητα και τις προσμίξεις για να παραχθεί το επιθυμητό τελικό προϊόν. Επιπλέον, απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού για αυτό το στάδιο επεξεργασίας, γεγονός που δημιουργεί σημαντικό πρόβλημα για τα οικοσυστήματα που περιβάλλουν ένα διυλιστήριο. Η διαχείριση των αποβλήτων είναι ακόμη ένα θέμα καίριας σημασίας, διότι η διαφυγή προσμίξεων μπορεί να διαφοροποιήσει το pH κοντινών οικοσυστημάτων και να έχει καταστρεπτικές συνέπειες στην πανίδα και την χλωρίδα των γύρω περιοχών, και ενδεχομένως να επιδράσει στην γεωργία και στην κτηνοτροφία.

Τα ορυκτά των σπάνιων γαιών εμπεριέχουν ποικίλα μέταλλα, όπως το αρσενικό, το κάδμιο, ο μόλυβδος, το βάριο, το κοβάλτιο και το μαγγάνιο (Paul & Campbell, 2011). Αυτά όταν βρίσκονται συγκεντρωμένα σε μεγάλες ποσότητες αποτελούν μια ομάδα επιβλαβών μετάλλων για το περιβάλλον. Τα μέταλλα μπορούν να βρεθούν στον αέρα, το νερό και το έδαφος και να αντιδράσουν με διάφορες ενώσεις στο περιβάλλον και κατά αυτόν τον τρόπο μπορούν να παραμείνουν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε ένα οικοσύστημα και να συγκεντρωθούν σε επικίνδυνα επίπεδα. Η μορφή στην οποία βρίσκονται τα μέταλλα σκιαγραφεί τη σοβαρότητα των

τοξικολογικών επιδράσεων στους οργανισμούς, καθώς η μοριακή κατάσταση ενός μετάλλου καθορίζει το πόσο εύκολα μπορεί να απορροφηθεί.

Κατά την εξόρυξη πετρωμάτων σπάνιων γαιών εντοπίζονται βαρέα μέταλλα, τα οποία όταν βρίσκονται σε μικρές ποσότητες είναι απαραίτητα για την επιβίωση πολλών οργανισμών, αλλά όταν συγκεντρώνονται σε υψηλές ποσότητες είναι τοξικά και έχουν αρνητικές επιπτώσεις. Συνάμα, μέσω της εξόρυξης και της επεξεργασίας REEs, εκπέμπονται επικίνδυνα υποπροϊόντα στον αέρα που ενδέχεται να περιλαμβάνουν ραδιενεργά σωματίδια και σκόνη με βαρέα μέταλλα. Ειδικότερα, μέσω της διύλισης εκπέμπεται στον αέρα διοξείδιο του θείου, το οποίο συμβάλλει στο φαινόμενο της όξινης βροχής, διοξείδιο του άνθρακα που συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αλλά και υδροχλώριο το οποίο γίνεται ισχυρό οξύ όταν εκτίθεται στο νερό.

Τα τρία πιο επικίνδυνα βαρέα μέταλλα στο περιβάλλον είναι ο μόλυβδος, το κάδμιο και ο υδράργυρος, ωστόσο όλα τα μέταλλα μπορούν να είναι πραγματικά επικίνδυνα σε υψηλές συγκεντρώσεις. Στον άνθρωπο, πολλά βαρέα μέταλλα είναι καρκινογόνα, ορισμένα μπορούν να προκαλέσουν γενετικές ανωμαλίες, ενώ άλλα, όπως το αρσενικό είναι τοξικά, προσβάλλοντας ζωτικά όργανα.

## **5.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

Ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την εξόρυξη και τον εξευγενισμό των REEs είναι το ζήτημα της διαχείρισης αποβλήτων. Το πρόβλημα μεγεθύνεται όταν τα ορυχεία αγνοούν τους νόμους και τα μέτρα που έχουν οριστεί σχετικά με τον ορθό τρόπο διάθεσης των αποβλήτων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην ρύπανση του περιβάλλοντος και την μόλυνση των υδάτων και του εδάφους από ραδιενεργά υλικά και παραπροϊόντα της εξόρυξης. Συνεπώς, θα επηρεαστούν άμεσα τα κοντινά οικοσυστήματα ενώ περισσότερο ανησυχητική είναι η πιθανότητα να διαρρεύσουν τα λύματα και τα απόβλητα στον υδροφόρο ορίζοντα καθώς με αυτόν τον τρόπο θα μεγαλώσει η ακτίνα μόλυνσης.

Τα απόβλητα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατατάσσονται σε δύο διαφορετικούς τύπους, τα απορρίμματα και τα αποθέματα πετρωμάτων. Τα απορρίμματα έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες ρύπανσης επειδή αποτελούνται από μικρά και λεπτά σωματίδια και ενίοτε περιέχουν λύματα και

χημικές ενώσεις. Αντιθέτως, τα αποθέματα πετρωμάτων αποτελούνται από χονδροειδή σωματίδια, τα οποία δεν απορροφώνται τόσο εύκολα στο νερό και στο έδαφος.

Τα απορρίμματα τοποθετούνται συνήθως σε περιοχές κατακράτησης που εκτίθενται σε κατακρημνίσεις και απορροή νερού (φράγματα), με αποτέλεσμα να επιτρέπεται στις τοξικές ουσίες να διαρρεύσουν σε πλησίον οικοσύστημα. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι οι περιοχές κατακράτησης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες και να σχεδιάζονται με τρόπο τέτοιο έτσι ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος υπερχείλισης σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων καθώς και να μην υπάρξει κατάρρευση φράγματος, πράγμα που θα είχε καταστροφικές συνέπειες στο περιβάλλον (Schuler et al., 2011). Αν και η ακριβής σύνθεση των απορριμμάτων δεν είναι σταθερή, τα απορρίμματα χαρακτηρίζονται ως τοξικά διότι περιέχουν βαρέα μέταλλα, οξέα, φθοριούχα, σουλφίδια και ραδιενεργά υλικά. Τέλος, όσον αφορά τα αποθέματα πετρωμάτων, παρατηρούνται παρόμοια προβλήματα ενώ είναι κατασκευασμένα από τα ίδια υλικά, αλλά σε χονδροειδή ορυκτή μορφή.

Το κύριο μέλημα για την επιλογή του καλύτερου τρόπου διαχείρισης των αποβλήτων είναι η πρόληψη της ρύπανσης των υδάτων. Η καθίζηση και η αποστράγγιση οξέος αποτελούν αυτήν την στιγμή τους δυο κύριους τρόπους που μπορούν να μολύνουν το νερό, ενώ μπορούν να εμφανιστούν μεμονωμένα ή και να δράσουν ταυτόχρονα.

#### **5.4.1 : ΚΑΘΙΖΗΣΗ**

Η καθίζηση είναι μια διαδικασία με την οποία, προστίθενται στρώματα ιζημάτων στους υδάτινους φορείς. Αυτό γίνεται μέσω της απορροής από περιοχές κατακράτησης ή της διάβρωσης αποβλήτων και έχει ως συνέπεια να αλλάξει η διαδρομή και το σχήμα των υδάτινων ρευμάτων και τα νερά να γίνουν πιο ρηχά προκαλώντας κίνδυνο για πλημμύρες στις γύρω περιοχές.

#### **5.4.2 : ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΟΞΕΟΣ**

Η αποστράγγιση οξέος συμβαίνει όταν το θειικό οξύ παράγεται με οξυγόνωση των ανόργανων ουσιών που φέρουν θειούχα ορυκτά. Το όξινο νερό που μπορεί να προέλθει από εκτεθειμένα απόβλητα επιταχύνει την διάλυση των θειούχων ορυκτών εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερο αριθμό μετάλλων και οξέων στο περιβάλλον. Η αποστράγγιση οξέος είναι μια

διαδικασία επιβλαβής για το περιβάλλον και ιδιαίτερα για τους υδρόβιους οργανισμούς που δεν μπορούν να ζήσουν όταν μεταβάλλεται το pH του νερού.

## **5.5 : ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ**

Οι ρύποι που εκπέμπονται κατά την εξόρυξη και την διαδικασία παραγωγής σπάνιων γαιών μπορούν να εισχωρήσουν στο υπέδαφος, να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα ή να διαφύγουν στους υδροφόρους ορίζοντες. Πράγματι, οι τρέχουσες τεχνικές εξόρυξης και επεξεργασίας των πετρωμάτων καθιστούν μη αποτρεπτή την απελευθέρωση ρύπων στο περιβάλλον. Αυτό οφείλεται σε μια πληθώρα αιτιών.

Όσον αφορά τους ρύπους που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα σημαντικό ρόλο παίζει η απουσία φίλτρων καυσαερίων κατά την επεξεργασία των σπάνιων γαιών. Τα ραδιονουκλεΐδια που περιλαμβάνουν ποσότητες θορίου και ουρανίου, τα βαρέα μέταλλα, το διοξείδιο του θείου και το μονοξείδιο του άνθρακα αποτελούν τους κύριους ατμοσφαιρικούς ρύπους που πλήττουν το περιβάλλον και προκαλούν ποικίλα προβλήματα υγείας στον άνθρωπο και στους υπόλοιπους οργανισμούς. Επίσης, η σκόνη που βρίσκεται στα απορρίμματα και στις αποθέσεις πετρωμάτων μπορεί να μεταφερθεί με τον άνεμο στους γύρω οικισμούς και να συμβάλει και αυτή στην όξυνση του προβλήματος.

Παράλληλα, ο υδροφόρος ορίζοντας πλήττεται σημαντικά από τους ρύπους που διοχετεύονται σε αυτόν. Συγκεκριμένα, τα ραδιονουκλεΐδια και βαρέα μέταλλα μπορούν να καταλήξουν ως απορρίμματα στο νερό ενώ η χρήση οξέων κατά τις διαδικασίες επεξεργασίας των πετρωμάτων αυξάνει την ποσότητα των ρύπων. Σε αυτό συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό η ελάχιστη ή μηδαμινή επεξεργασία των λυμάτων που καταλήγουν στους υδροφόρους ορίζοντες, η διαρροή σωλήνων στις εγκαταστάσεις και τα εκτεθειμένα σε νερό αποθέματα πετρωμάτων και απορριμμάτων.

Τέλος, το υπέδαφος αποτελεί έναν ακόμη παραλήπτη των απορριμμάτων των εργασιών εξόρυξης και επεξεργασίας των σπάνιων γαιών. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει υπερφόρτωση απορριμμάτων στο φράγμα επιχώματος όπου αποθηκεύονται τα υποπροϊόντα των εξορυκτικών εργασιών μετά το διαχωρισμό του μεταλλεύματος. Το συγκεκριμένο φράγμα πρέπει είναι

συμπαγές, στεγανό και να αντέχει τα σεισμικά φορτία έτσι ώστε να μην υπάρξει κατάρρευση της κατασκευής και διαρροή των απορριμμάτων.

Ακολούθως, παραθέτονται και σχολιάζονται οι ρύποι που εκπέμπονται από τις διαδικασίες παραγωγής των σπάνιων γαιών και ευθύνονται για την όξυνση των περιβαλλοντικών κινδύνων.

### **5.5.1 : ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΕΪΔΙΑ**

Τα ραδιονουκλεΐδια είναι μια μορφή ρύπου που σχετίζεται με μεταλλεύματα στοιχείων σπάνιων γαιών, πρόκειται ουσιαστικά για τα ραδιενεργά στοιχεία θόριο κι ουράνιο και τα μη σταθερά υποπροϊόντα τους. Πολλά από τα ορυκτά που φέρουν REEs, όπως ο μοναζίτης και το ξενότιμο, περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισοτόπων που μπορούν να συσσωρευτούν στα απορρίμματα των ορυχείων. Τα ραδιονουκλεΐδια απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα με την μορφή σκόνης είτε από την εξόρυξη ή από αποθέματα πετρωμάτων που δεν έχουν περιοριστεί και μεταφέρονται μέσω του αέρα σε κοντινά οικοσυστήματα.

Τα ραδιενεργά στοιχεία μπορεί επίσης να διαρρεύσουν στο έδαφος και σε κοντινές πηγές νερού μέσω των απορριμμάτων που δεν έχουν αποθηκευθεί με ασφάλεια (Paul & Campbell, 2011). Τα ραδιονουκλεΐδια μπορούν να συσσωρευτούν στους φυτικούς οργανισμούς και μέσω της τροφής να βρεθούν στα υψηλότερα επίπεδα της τροφικής αλυσίδας και να προκαλέσουν σημαντικά αναπνευστικά και όχι μόνο, προβλήματα στα ζώα και στον άνθρωπο.

Η ραδιενεργή μόλυνση αποτελεί την μεγαλύτερη απειλή για το περιβάλλον αφού είναι πολύ δύσκολο να περιοριστεί. Για αυτόν τον λόγο, η Κίνα απαγόρευσε το 2011 την εξόρυξη ορυκτών μοναζίτη ενώ παράλληλα οι Ηνωμένες Πολιτείες επέβαλαν αυστηρούς κανονισμούς για την εξαγωγή αυτών των πετρωμάτων με σκοπό την μείωση των ραδιενεργών ρύπων (Schuler et al., 2011). Ωστόσο μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα, η υψηλή ζήτηση για σπάνιες γαίες ώθησε την κυβέρνηση της Κίνας να αναθεωρήσει και να επιτρέψει ξανά την εξόρυξη πετρωμάτων μοναζίτη με αυστηρότερους όμως νόμους και κανονισμούς.

Τα υποπροϊόντα των ραδιενεργών στοιχείων αποτελούν την πιο επικίνδυνη πτυχή αυτού του μολυσματικού παράγοντα, επειδή η ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της ραδιενεργής αποσύνθεσης μπορεί να προκαλέσει καρκίνο, μεταξύ άλλων, σε ανθρώπους και ζώα.

### **5.5.2 : ΣΚΩΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΑ**

Κατά την διαδικασία της εξόρυξης διαλύονται ποικίλα πετρώματα και υλικά, με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται σκόνη στην ατμόσφαιρα που μπορεί να περιέχει βαρέα μέταλλα που σχετίζονται με διάφορα προβλήματα υγείας (Paul & Campbell, 2011). Αυτά τα μέταλλα, όπως για παράδειγμα ο αμίαντος, μπορούν να απορροφηθούν με την μορφή σκόνης στον πνευμονικό ιστό του ανθρώπου μέσω της εισπνοής, προκαλώντας προβλήματα όπως πνευμονοκονίαση και πυριτίαση, κοινώς γνωστά ως «μαύρος πνεύμονας».

Ο αριθμός των εργαζομένων στα ορυχεία έχει μειωθεί αισθητά εξαιτίας των αναπνευστικών προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι τελευταίοι. Ωστόσο, το πρόβλημα διογκώνεται ακόμη περισσότερο, όταν ληφθεί υπόψη και ο αριθμός των κατοίκων των γύρω περιοχών που αντιμετωπίζουν αναπνευστικά προβλήματα, εξαιτίας της απελευθέρωσης ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Ένα άλλο παράδειγμα δημιουργίας επιβλαβούς σκόνης είναι η σκόνη που συνοδεύει τα καυσαέρια και αποτελεί υποπροϊόν της εξόρυξης φθορίου (Schuler et al., 2011). Σύμφωνα με την CSRE (Chinese Society of Rare Earths), με κάθε παραγόμενο τόνο REE, το περιβάλλον επιβαρύνεται με περίπου 9 κιλά φθόριο και 12 κιλά βαρέων μετάλλων που περιέχονται στην σκόνη καυσαερίων και στα απόβλητα.

### **5.5.3 : ΟΞΕΙΔΙΑ ΑΝΘΡΑΚΑ**

Η ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία των ορυχείων σπάνιων γαιών λαμβάνεται από ορυκτά καύσιμα. Κατά την διαδικασία της εξόρυξης και του ραφινάρισματος των REs εκπέμπονται στο περιβάλλον μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Για την καταπολέμηση αυτών των ρύπων, ορισμένες χώρες έχουν θεσπίσει νομοθεσία όπου οριοθετούν το επιτρεπόμενο ποσοστό των εκπομπών, ωστόσο πολλές αναπτυσσόμενες και μη ανεπτυγμένες χώρες δεν διαθέτουν νομοθεσία και περιορισμούς στις εκπομπές οξειδίων του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η συγκέντρωση υψηλών ποσοστών μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου ενώ συμβάλλει στην όξινη βροχή.



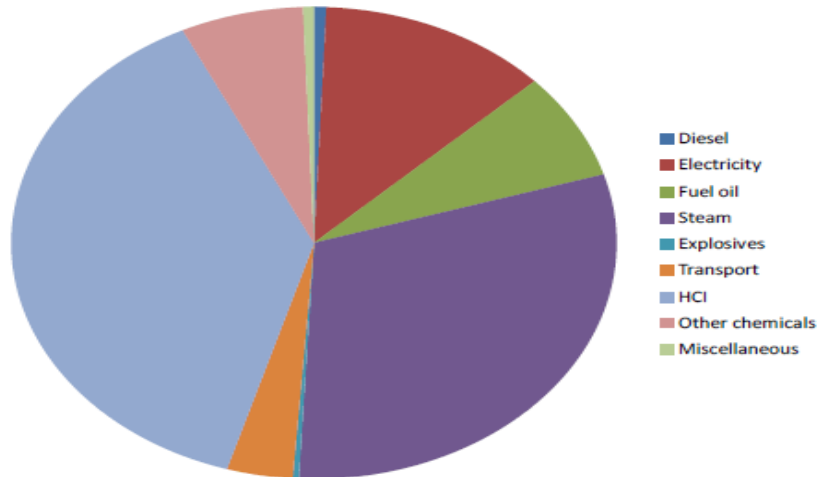
#### **5.5.4 : ΛΥΜΑΤΑ**

Οι περισσότερες σύγχρονες τεχνικές εξόρυξης έχουν υψηλές απαιτήσεις νερού για την εξαγωγή και επεξεργασία των ορυκτών και διάθεση αποβλήτων. Τα λύματα από αυτές τις διεργασίες μπορούν να μολύνουν τις πηγές νερού που βρίσκονται σε μικρή ακτίνα από την περιοχή εξόρυξης και να αλλοιώσουν τις συγκεντρώσεις πόσιμου νερού στην περιοχή που περιβάλλει το ορυχείο (Molycorp, 2012). Ορισμένα ορυχεία, όπως το ορυχείο Mountain Pass στη νότια Καλιφόρνια, έχουν εφαρμόσει τεχνολογίες ανακύκλωσης λυμάτων, με αποτέλεσμα να μειωθούν σημαντικά οι ποσότητες νερού και υγρών αποβλήτων.

#### **5.6 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ REEs ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ**

Ένα από τα μεγαλύτερα οικολογικά προβλήματα στον πλανήτη μας αποτελεί η επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Είναι γνωστό ότι το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια διαδικασία κατά την οποία η ατμόσφαιρα ενός πλανήτη συγκρατεί θερμότητα συμβάλλοντας στην αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειάς του. Ωστόσο, είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα που ευθύνεται για την αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου συμβάλλοντας στην περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι πολυάριθμες και ιδιαίτερα σημαντικές, περιλαμβάνουν την οξίνιση των ωκεανών, την αύξηση της στάθμης της θάλασσας και ακραία καιρικά φαινόμενα.

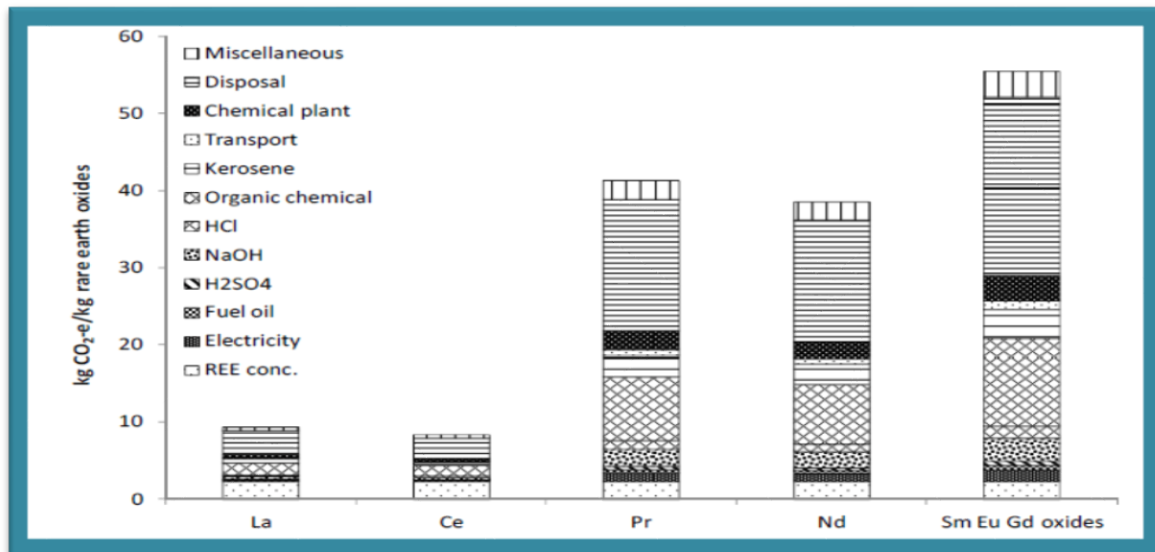
Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά στην συνεισφορά των στοιχείων σπάνιων γαιών στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Στο ακόλουθο σχήμα, διακρίνονται όλες οι ενέργειες που λαμβάνουν μέρος κατά την παραγωγική διαδικασία και η συμβολή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με το σχήμα 38, την μεγαλύτερη συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει το υδροχλωρικό οξύ ενώ έπεται η χρήση ατμομηχανών, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και τα καύσιμα.



Σχήμα 38 «Κατανομή των επιπτώσεων για την παραγωγή REs»

<https://www.extremetech.com/extreme/194010-rare-earth-elements-are-this-century-s-crude-oil>

Οι περισσότεροι ρύποι εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από οξείδια βαρέων σπάνιων γαιών όπως το σαμάριο, το ευρώπιο και το γαδολίνιο, ενώ αξιοσημείωτη είναι και η συνεισφορά του νεοδύμιου και το πρασεοδύμιου. Αυτό συμβαίνει επειδή για την παραγωγή αυτών των οξειδίων είναι απαραίτητη η χρήση ισχυρότερων οξέων και χημικών ενώ παράλληλα εκπέμπονται περισσότερα καύσιμα και απορρίμματα στο περιβάλλον. Στο ακόλουθο διάγραμμα διακρίνεται η συνεισφορά των οξειδίων του κάθε στοιχείου σπάνιων γαιών στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.



Σχήμα 39 «Αποτύπωμα οξειδίων REs στο φαινόμενο του θερμοκηπίου» (Haque et al., 2014)

Αντιθέτως, οι ελαφριές σπάνιες γαίες έχουν μικρότερη συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από τον επόμενο πίνακα όπου φαίνεται το αποτύπωμα του κάθε οξειδίου στο περιβάλλον.

Το ίχνος που αφήνουν τα REOs του λανθανίου και δημητρίου είναι παρόμοια ή και μικρότερα σε σύγκριση με άλλα μέταλλα (Haque et al., 2014). Ωστόσο, η συνεισφορά των οξειδίων των μεσαίων και βαρέων REEs στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι αξιοσημείωτη. Αυτό που προκαλεί μεγάλη ανησυχία είναι το αποτύπωμα που αφήνουν αν διαρρεύσουν στο νερό, αφού είναι πολύ μεγαλύτερο από σχεδόν όλα τα μέταλλα. Για παράδειγμα, το αποτύπωμα των οξειδίων τιτανίου είναι 0,11 kL/kg ενώ των βαρέων σπάνιων γαιών υπολογίζεται κοντά στο 1,75 kL/kg.

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

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

Πίνακας 11 «Περιβαλλοντικό αποτύπωμα REOs» (Haque et al., 2014)

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν η ανεξέλεγκτη εξόρυξη και επεξεργασία σπάνιων γαιών μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντικά προβλήματα όπως η οξίνιση, ο ευτροφισμός, η παραγωγή μεγάλου όγκου στερεών απόβλητων και η πιθανότητα διαρροής ραδιενεργών στοιχείων. Για αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη να ληφθούν μέτρα τόσο σε τοπικό όσο και παγκόσμιο επίπεδο.

## **5.7 : ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΕΠΙΒΛΑΒΩΝ ΟΡΥΧΕΙΩΝ**

### **5.7.1 : MOUNTAIN PASS, ΗΠΑ**

Το ορυχείο Mountain Pass στην Καλιφόρνια αποτέλεσε το μεγαλύτερο ορυχείο παραγωγής σπάνιων γαιών από το 1965 μέχρι και το 1990, πριν την κυριαρχία της Κίνας στην παραγωγή και το εμπόριο σπάνιων γαιών. Συγκεκριμένα, αποτελεί μια μονάδα όπου πέρα από την εξόρυξη μπορεί

να γίνει η παραγωγή, η επεξεργασία και ο εξευγενισμός των οξειδίων ή μετάλλων σπάνιων γαιών, τα οποία μπορούν μετέπειτα να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες τεχνολογίες.

Το Mountain Pass έχει σχεδιαστεί ως μια μονάδα μηδενικής εκκένωσης, που περιλαμβάνει μια εγκατάσταση ξήρανσης απορριμμάτων επιτρέποντας την ανακύκλωση σχεδόν όλου του νερού που χρησιμοποιείται στις διαδικασίες άλεσης και επίπλευσης, καθώς και μια εγκατάσταση χλωρίου-αλκαλίων όπου οι χημικές ενώσεις χρησιμοποιούνται ως αντιδραστήρια για τον διαχωρισμό και την επεξεργασία σπάνιων γαιών.



Σχήμα 40 «Αεροφωτογραφία ορυχείου Mountain Pass» (mpmaterials.com)

Ωστόσο, το 2002 η εταιρία Molycorp που διαχειρίζεται το ορυχείο Mountain Pass ήρθε αντιμέτωπη με ένα μεγάλο περιβαλλοντικό ζήτημα, όταν ο αγωγός που μετέφερε τα απόβλητα σε δεξαμενές έσπασε, και είχε ως αποτέλεσμα ραδιενεργά και τοξικά απόβλητα να χυθούν και να διαρρεύσουν στην περιοχή. Αυτή η διαρροή σε συνδυασμό με διάφορους οικονομικούς παράγοντες οδήγησε στο κλείσιμο του ορυχείου και στην πλήρη αναθεώρηση των περιβαλλοντικών πρακτικών του. Ωστόσο, η ζημία προς το περιβάλλον είχε ήδη γίνει και τα οικοσυστήματα και οι πηγές νερού πλησίον του ορυχείου μολύνθηκαν. Σήμερα, το Mountain Pass βρίσκεται ξανά σε λειτουργία έχοντας μεριμνήσει για τους περιβαλλοντικούς κινδύνους, όμως η παραγωγή κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

### **5.7.2 : KVANEFJELD, ΓΡΟΙΛΑΝΔΙΑ**

Το Kvanefjeld στη Γροιλανδία είναι μια περιοχή με πλούσια ορυκτά που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες ενώ εκτιμάται από τους ερευνητές ότι διαθέτει το τρίτο μεγαλύτερο απόθεμα σπάνιων γαιών στον κόσμο και το έκτο μεγαλύτερο απόθεμα σε ουράνιο. Η εταιρία Greenland Minerals and Energy Ltd, με έδρα την Αυστραλία, σκόπευε να ανοίξει ένα ορυχείο στην περιοχή το 2013. Ωστόσο, το σχέδιο διάθεσης απορριμμάτων αφορούσε την αποθήκευση τους στη λίμνη Taseq. Τα ραδιονουκλεΐδια, τα βαρέα μέταλλα και το φθόριο θα εισέρχονταν στην λίμνη μέσω των απορριμμάτων, μολύνοντας όχι μόνο την λίμνη, αλλά και τα υπόγεια ρεύματα τους ποταμούς που εκβάλλουν στον ωκεανό (Schuler et al, 2011). Η έλλειψη περιβαλλοντικών κανονισμών από την Δανία, την χώρα που υπάγεται η Γροιλανδία, επιτρέπει στην Greenland Minerals να προχωρήσει τα σχέδια για το ορυχείο παρά τις επιβλαβείς επιπτώσεις που θα έχει στο περιβάλλον και στις γύρω περιοχές, με τα υπάρχοντα σχέδια διάθεσης απορριμμάτων. Το 2015 η εταιρία αιτήθηκε άδεια εξόρυξης για ορυχείο ανοιχτού λάκκου στην κυβέρνηση της Γροιλανδίας, ωστόσο η αίτηση απορρίφθηκε εξαιτίας της μη τήρησης μέτρων για τον περιορισμό των ρύπων.

### **5.7.3 : ΒΑΟΤΟΥ, ΚΙΝΑ**

Ένα ακόμη μείζον θέμα που αμαυρώνει την εξόρυξη σπάνιων γαιών είναι το εξωφρενικά μεγάλο ποσοστό παράνομων εξορύξεων στην λαϊκή δημοκρατία της Κίνας. Οι επιστήμονες εκτιμούν ότι η ετήσια παράνομη εξόρυξη REs από μη πιστοποιημένα ορυχεία στην Κίνα κυμαίνεται περίπου στους 20 χιλιάδες τόνους. Ακόμη, θεωρείται απίθανο κάποιο από τα παράνομα ορυχεία να έχει περιβαλλοντικές διασφαλίσεις, με αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη εκπομπή ρύπων και απορριμμάτων. Τα απόβλητα των ορυχείων και η σκόνη προκαλούν μολύνσεις, επιδρούν αρνητικά στην υγεία των εργαζομένων και των κατοίκων των γύρω περιοχών και καταστρέφουν το περιβάλλον και τα οικοσυστήματα. Συγκεκριμένα, στην βόρεια Κίνα εντοπίστηκαν ραδιενεργά απορρίμματα να έχουν διαρρεύσει σε υπόγεια ρεύματα προς τον Κίτρινο ποταμό που αποτελεί πηγή νερού για πάνω από 150 εκατομμύρια κατοίκους ενώ στην επαρχία Γκουανγκντόνγκ έχουν σημειωθεί μεγάλες ζημιές σε χωράφια και υδροβιότοπους από τα ισχυρά οξέα και άλλες απορροές από κοντινά ορυχεία σπάνιων γαιών. Ακόμη, ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί το γεγονός ότι ολόκληρα χωριά μεταξύ της πόλης Baotou και του Κίτρινου ποταμού, στην εσωτερική Μογγολία, έχουν εκκενωθεί και οι κάτοικοι έχουν εγκατασταθεί σε άλλες περιοχές μετά από αναφορές για



υψηλά ποσοστά καρκίνου και άλλα προβλήματα υγείας που σχετίζονται με ορυχεία και διυλιστήρια σπάνιων γαιών στην περιοχή.



Σχήμα 41 «Εγκαταλελειμμένη πισίνα κατακράτησης τοξικών λυμάτων στην Κίνα»

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

## **5.8 : ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΕΧΟΥΣΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

Οι σύγχρονες μορφές εξόρυξης έχουν αποδειχτεί ότι επιφέρουν ποίκιλα περιβαλλοντικά προβλήματα, για αυτό κρίνεται σκόπιμο να ληφθούν μέτρα από τις κυβερνήσεις και από τους παγκόσμιους οργανισμούς για την αποκατάσταση των περιβαλλοντικών ζητημάτων. Ειδικά, το τελικό κόστος για το περιβάλλον, τις κοινότητες και τον άνθρωπο θα ήταν καταστροφικό.

Έρευνες στην Κίνα έδειξαν ότι για κάθε τόνο παραγόμενων REEs απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα 9.600-12.000 m<sup>3</sup> τοξικών αερίων που εμπεριέχουν οξείδια άνθρακα, θείου και υδροφορικό οξύ. Παράλληλα, όσον αφορά τα λύματα εκτιμάται ότι περίπου 75 m<sup>3</sup> όξινων λυμάτων και σχεδόν ένας τόνος ραδιενεργών αποβλήτων αποθέτονται σε κοντινές δεξαμενές (Paul & Campbell, 2011). Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Ανάλυσης Παγκόσμιας Ασφάλειας (IAGS) η Κίνα παρήγαγε πάνω από 130.000 μετρικούς τόνους REEs το 2008, οπότε συνδυάζοντας αυτόν τον αριθμό με την παραπάνω έρευνα για την παραγωγή αποβλήτων εκτιμάται ότι η παραγωγή αποδίδει ετησίως πολύ μεγάλες ποσότητες αποβλήτων περίπου 1,2 δισεκατομμύρια - 1,6 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> αποβλήτων και 9,8 εκατομμύρια m<sup>3</sup> όξινων λυμάτων.

Παράλληλα, κατά τις διεργασίες εξευγενισμού των REs παράγονται πολλά επιβλαβή υποπροϊόντα τα οποία με κάποιο τρόπο πρέπει να διοχετευτούν και να μην διαρρεύσουν στο περιβάλλον. Στην Κίνα πολλές εγκαταστάσεις επεξεργασίας REs παράγουν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων ωστόσο δεν διαθέτουν επαρκή και σύγχρονα συστήματα επεξεργασίας. Πρόκειται κυρίως για μικρά, παράνομα ορυχεία και διυλιστήρια που δεν λαμβάνουν καθόλου μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος.

Οι κυβερνήσεις και οι παγκόσμιοι οργανισμοί θα πρέπει να επιβάλλουν αυστηρότερη νομοθεσία και μέτρα έτσι ώστε να περιοριστεί το οικολογικό αποτύπωμα. Επίσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη διαφορετικές και καινοτόμες ιδέες για την διάθεση του τεράστιου όγκου αποβλήτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί η εταιρία Molycorp η όποια προσέφυγε σε μια πιο ακριβή αλλά λιγότερο μολυσματική μέθοδο για την εναπόθεση των απορριμμάτων.

Η Molycorp χρησιμοποίησε πυκνωτικά πάστας για να αυξήσει το ποσοστό στερεού υλικού στον πολτό με αποτέλεσμα να ανακυκλώνεται περισσότερο νερό που συνεπάγεται με λιγότερα παραγόμενα λύματα (Molycorp, 2012). Το λειτουργικό κόστος αυτής της μεθόδου είναι σαφώς υψηλότερο από αυτό της δεξαμενής απορριμμάτων, ωστόσο ο περιορισμός των περιβαλλοντικών κινδύνων και η αυξημένη ανακύκλωση του νερού θα μετριάσουν τελικά το πρόσθετο κόστος.

Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα «ξηράς στοιβαξης» όπου τα απορρίμματα μπορούν να αφυδατωθούν, αφαιρώντας υγρά από το στερεό υλικό χρησιμοποιώντας φίλτρα κενού ή πίεσης. Τα ξηρά απορρίμματα μπορούν μετά να στοιβαχτούν και να μετακινηθούν ανάλογα τις ανάγκες. Ακόμα, εξετάζεται η αποθήκευση των απορριμμάτων στο υπέδαφος, όπου τα απορρίμματα αναμειγνύονται με απόβλητα και τσιμέντο και χρησιμοποιούνται ως μάζες για την συμπλήρωση υπόγειων κενών.

Με την πάροδο των χρόνων και με την εισαγωγή νέων καινοτόμων ιδεών στην εξόρυξη, διύλιση και απόθεση των αποβλήτων, ο στόχος είναι να μειωθεί το κόστος των περιβαλλοντικών ζημιών, να υπάρξει ανακύκλωση και να ευαισθητοποιηθούν οι κυβερνήσεις ώστε να επιβάλλουν μέτρα ενάντια στις μη πιστοποιημένες εξορυκτικές πρακτικές.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ**

### **ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ**

Σήμερα, η ανάγκη για μείωση των εκπομπών ρύπων κρίνεται επιτακτική. Ωστόσο, ο περιορισμός των επιβλαβών εκπομπών θα επιτευχθεί μόνο με την νομοθέτηση μέτρων που θα απαγορεύουν στις βιομηχανίες την παραγωγή μετάλλων και άλλων προϊόντων όταν δεν τηρούνται τα περιβαλλοντικά μέτρα. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι αναγκαίο να βρεθούν καινοτόμες ιδέες και λύσεις για την εξαγωγή μετάλλων σπάνιων γαιών χωρίς να προκληθεί εκτεταμένη ζημία στο περιβάλλον. Λύσεις σε αυτό το μείζον θέμα θα μπορούσαν να είναι η ανακύκλωση των σπάνιων γαιών, η εισαγωγή καινοτόμων και οικολογικών μεθόδων εξόρυξης και διύλισης, η ελάττωση της ποσότητας REEs στις τεχνολογίες ή η αντικατάστασή τους με άλλα μέταλλα αλλά κυρίως η καταστολή της παράνομης εξόρυξης και η θέσπιση αυστηρότερης νομοθεσίας με γνώμονα την οικολογική συνείδηση.

Η ορθή αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εξόρυξης και επεξεργασίας σπάνιων γαιών θα επιτευχθεί μόνο αν εφαρμοστούν κάποιες ή όλες από τις παραπάνω ενέργειες. Παράλληλα, πρέπει να καταβληθούν προσπάθειες στην έρευνα και την ανάπτυξη προϊόντων που βασίζονται λιγότερο σε μέταλλα σπάνιων γαιών ενώ θα ήταν ωφέλιμο να ανοίξουν διάλογοι επικοινωνίας με την κυβέρνηση της Κίνας σχετικά με τον εκσυγχρονισμό των μεθόδων εξόρυξης και την θέσπιση νέων μέτρων που αφορούν την εξόρυξη σπάνιων γαιών, στο πλαίσιο των προτύπων για την προστασία του περιβάλλοντος. Μόνο τότε το κόστος εξυγίανσης και συντήρησης του περιβάλλοντος θα εξισορροπήσει το κόστος λειτουργίας των ορυχείων.

#### **6.1 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ**

Η αγορά και το εμπόριο σπάνιων γαιών έχουν αυξηθεί κατακόρυφα τα τελευταία χρόνια διότι όλο και περισσότερες σύγχρονες τεχνολογίες χρησιμοποιούν αυτές τις «βιταμίνες της βιομηχανίας». Σταδιακά, οι εφαρμογές τους γίνονται πιο διαδεδομένες, και συνεπώς αυξάνεται η κατανάλωση τεχνολογιών που χρησιμοποιούν REs αλλά ταυτόχρονα σημειώνεται μείωση των παγκόσμιων αποθεμάτων. Επομένως, η ανάγκη για ανάκτηση REEs είναι μεγαλύτερη από ποτέ, σε αυτό το σημείο έρχεται η ανακύκλωση.



### **6.1.1 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΙ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**

Η ανακύκλωση REEs θα μπορούσε να μειώσει το υψηλό κόστος τους αλλά και να παρέχει την δυνατότητα σε χώρες με φτωχούς πόρους να καλύψουν τις ανάγκες τους, αντιμετωπίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη μικρή προμήθεια των σπάνιων γαιών. Εξάλλου, η ανακύκλωση REEs θα μπορούσε να προσφέρει έναν οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο ανάπτυξης σπάνιων γαιών σε παγκόσμια κλίμακα. Σήμερα, η ανακύκλωση μετάλλων σπάνιας γης βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο καθώς οι ανακυκλωμένες πρώτες ύλες από χρησιμοποιημένες συσκευές και προϊόντα είναι περιορισμένες. Ωστόσο, πολλοί επιστήμονες αισιοδοξούν ότι η ανακύκλωση σπάνιων γαιών είναι πιο οικονομική και εύκολα επιτεύξιμη σε σύγκριση με την αναζήτηση κι εκμετάλλευση νέων ορυκτών αποθεμάτων σπάνιων γαιών.

Σύμφωνα με τον οργανισμό προστασίας του περιβάλλοντος, το 2009, μόνο το ένα τέταρτο των ηλεκτρονικών συσκευών που είχε σταματήσει η χρήση τους συλλέχθηκε για ανακύκλωση. Συγκεκριμένα, για ανακύκλωση συγκεντρώθηκε μόλις το 34% των σταθερών υπολογιστών και λάπτοπ, το 20% των τηλεοράσεων, το 10% των κινητών τηλεφώνων καθώς και το 4% των λαμπτήρων φθορισμού. Αυτές οι ηλεκτρονικές συσκευές αποτελούν μερικές από τις πλέον διαθέσιμες πηγές ανακυκλωμένων υλικών, επομένως οι καταναλωτές θα έπρεπε να ανακυκλώνουν τα προϊόντα με μεγαλύτερο ρυθμό (Haque et al., 2014). Παράλληλα, με την βελτίωση της τεχνολογίας, αναμένεται να συλλεχθούν ολοένα και περισσότερες πρώτες ύλες υψηλής τεχνολογίας, όπως απόβλητα από μαγνήτες νεοδύμιου και οθόνες LCD, που περιλαμβάνουν βαρέες σπάνιες γαίες, κι έπειτα να ανακυκλωθούν για την εξαγωγή REEs. Οι νέες εξελίξεις στην τεχνολογία ανακύκλωσης έχουν καταστήσει πιο εφικτή την εξαγωγή σπάνιων γαιών από αυτά τα υλικά με αποτέλεσμα να ανακτώνται όλο και μεγαλύτερες ποσότητες σπάνιων γαιών.

Η ανακύκλωση των σπάνιων γαιών βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο αλλά είναι επιτακτική λόγω της υψηλής ζήτησης και της δυσκολίας εξόρυξης και επεξεργασίας των σπάνιων γαιών. Επιπλέον, συμβάλλει στην μείωση των ρύπων και μειώνει την εξάρτηση των βιομηχανιών για REs από την Κίνα, ενώ δεν πρέπει να παραληφθεί ότι οι REs που θα ανακτηθούν δεν θα χρειαστούν να επεξεργαστούν για απομάκρυνση ραδιενεργών στοιχείων.

Η ανάκτηση σπάνιων γαιών μπορεί να γίνει μέσω της ανακύκλωσης απορριμμάτων της παραγωγικής διαδικασίας και υλικών όπως οι μαγνήτες, οι μπαταρίες, οι λαμπτήρες και οι

εξαντλημένοι καταλύτες. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι ο διαχωρισμός των σπάνιων γαιών από τα υλικά απαιτεί εκτεταμένες φυσικές και χημικές επεξεργασίες και έχει υψηλή ενεργειακή απαίτηση (Haque et al, 2014). Παράλληλα, στα βιομηχανικά απορρίμματα ενδέχεται να εμπεριέχονται θραύσματα κατά την παραγωγή μαγνητών, που μπορούν να συλλεχθούν, να επεξεργαστούν και κατόπιν να προσφέρουν μη αμελητέες ποσότητες σπάνιων γαιών. Στην περίπτωση μαγνητών θα αποδώσουν σημαντικές ποσότητες νεοδύμιου και δυσπρόσιου.

Οι χρησιμοποιημένες συσκευές παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία στην ανακύκλωση REEs εξαιτίας του διασκορπισμού των γαιών σε προϊόντα όπου είναι δύσκολος ο διαχωρισμός τους (σκληροί δίσκοι, συμπίεστες, ηλεκτρονικές οθόνες). Για τον λόγο αυτόν, πρέπει να αναπτυχθούν ακριβείς κι αποτελεσματικές φυσικές και χημικές μέθοδοι διαχωρισμού.

Ο φυσικός διαχωρισμός απαιτεί την αποσυναρμολόγηση των υλικών. Στο πλαίσιο αυτής της πρωτοβουλίας, η ιαπωνική εταιρία Hitachi ερευνά φιλικές προς το περιβάλλον διεργασίες για να διαχωρίσει κρίσιμα μέταλλα από προϊόντα και διεργασίες για να εξαγάγει τις σπάνιες γαίες από συγκεκριμένα κράματα σε μικρές ηλεκτρονικές συσκευές με οικονομικά αποδοτικό τρόπο (Schuler et al., 2011). Στην εταιρία έχουν ήδη αναπτύξει νέα μηχανήματα που κατορθώνουν την αποσυναρμολόγηση 100 μονάδων ανά ώρα για το διαχωρισμό και τη συλλογή REE, κυρίως Nd και Dy από σκληρούς δίσκους.

Τα μέταλλα σπάνιων γαιών παρουσιάζουν χημικές ομοιότητες με αποτέλεσμα ο διαχωρισμός και ο εξευγενισμός μεμονωμένων REE να είναι δύσκολος να επιτευχθεί (Valaram, 2018). Οι χημικές μέθοδοι διαχωρισμού περιλαμβάνουν υδρομεταλλουργική & πυρομεταλλουργική προσέγγιση. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται για την ανακύκλωση μετάλλων από ηλεκτρονικά θραύσματα, ωστόσο οι σπάνιες γαίες χάνονται επειδή γίνονται σκωρία λόγω της ύπαρξης οξυγόνου, με αποτέλεσμα οι υδρομεταλλουργικές διαδικασίες να χρησιμοποιούνται για να καθαριστούν οι γαίες από την σκωρία. Πολύτιμες σπάνιες γαίες μπορούν επιπρόσθετα να ανακτηθούν πλένοντας Ni-MH μπαταρίες με θειικό οξύ. Όσον αφορά τους εξαντλημένους καταλύτες δεν έχει επιλεχθεί ακόμη κάποια εφικτή και οικονομική μέθοδος για την ανακύκλωση των σπάνιων γαιών που εμπεριέχουν.

Η Ιαπωνία αποτελεί μια από τις ελάχιστες χώρες που επενδύει κονδύλια στην έρευνα για την ανακύκλωση προϊόντων και ηλεκτρονικών συσκευών, με σκοπό να ανακτήσει κρίσιμα μέταλλα

και σπάνιες γαίες και να μειώσει την εξάρτησή της από τις εισαγωγές REs από άλλα κράτη. Κάθε χρόνο οι απαιτήσεις της Ιαπωνίας σε σπάνιες γαίες είναι περίπου 600 τόνοι, ωστόσο μέσω της ανακύκλωσης η χώρα του ανατέλλοντος ηλίου επιδιώκει να μειώσει την ετήσια ζήτηση για δυσπρόσιο κατά 200 τόνους και τη ζήτηση για νεοδύμιο κατά 1.000 τόνους σε δύο χρόνια. Όλα αυτά τα στοιχεία προβάλλουν την Ιαπωνία σαν ένα καλό μοντέλο που μπορούν να μιμηθούν οι κυβερνήσεις και οι οργανισμοί άλλων χωρών για να ενθαρρύνουν την έρευνα ανακύκλωσης για στρατηγικά υλικά (Clenfield, 2010). Πολλές χώρες θα επωφεληθούν από το παράδειγμα της Ιαπωνίας για ανάπτυξη βελτιωμένων μηχανημάτων ανακύκλωσης και ενθάρρυνση των κατασκευαστών να εγκαταστήσουν εγκαταστάσεις ανακύκλωσης για στρατηγικά ορυκτά.

Τα Ηνωμένα Έθνη, σε συνεργασία με μεμονωμένες χώρες, πρέπει να ακολουθήσουν το παράδειγμα εταιριών, όπως η Hitachi, και να χρηματοδοτήσουν την έρευνα εντός των χωρών για την ανάπτυξη τεχνολογιών που ανακτούν αποτελεσματικά σπάνιες γαίες και άλλα κρίσιμα μέταλλα από χρησιμοποιημένες συσκευές, παλιές τεχνολογίες και απόβλητα (Look, 2009). Οι δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την ανακύκλωση οφείλονται στον υπερβολικά μεγάλο αριθμό χρησιμοποιημένων υλικών που χάνεται μέσω των απορριμμάτων των καταναλωτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλά προϊόντα που εμπεριέχουν REEs είναι καινούργια στην αγορά και η ενδεχόμενη ανακύκλωσή τους θα γίνει μετά από ενδεχομένως δυο δεκαετίες. Επίσης, ο Haque (Haque et al, 2014.) επισημάνει την δυνατότητα αλλαγής κάποιων REEs με άλλα μέταλλα που βρίσκονται σε μεγαλύτερο απόθεμα ή την αντικατάσταση των προϊόντων με άλλα που δεν εμπεριέχουν αυτά τα στοιχεία. Ωστόσο, επειδή οι REs βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά μοντέλα πράσινης ενέργειας είναι δύσκολη προς το παρόν η όποια αντικατάστασή τους.

### **6.1.2 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ**

Η πλειονότητα των ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιούνται στην σημερινή αγορά εμπεριέχει ποσότητες στρατηγικών στοιχείων, όπως οι σπάνιες γαίες. Ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τα κινητά τηλέφωνα περιέχουν μικρές ποσότητες REs και η ανακύκλωσή τους με την σύγχρονη τεχνολογία δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα. Συνεπώς, απορρίπτονται, σπαταλώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο σημαντικούς πόρους που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον.

Στους χώρους απόθεσης αποβλήτων βρίσκονται πολλά προϊόντα και συσκευές που περιέχουν αξιόλογες ποσότητες σπανίων γαιών. Οι χώροι υγειονομικής ταφής δεν θα έπρεπε να

θεωρούνται αποκλειστικά ως αίτιο τοπικής ρύπανσης, αλλά να αντιμετωπιστούν ως ανεκμετάλλευτοι πόροι για πολλά στρατηγικά μέταλλα (Kennedy, 2012). Τα απόβλητα συχνά περιέχουν σημαντικά ανακυκλώσιμα υλικά τα οποία αν ανακτηθούν από τους χώρους υγειονομικής ταφής και επεξεργαστούν ορθά θα αποτελέσουν μια νέα πηγή σπάνιων γαιών.

Έρευνες έχουν δείξει ότι περίπου 40 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι ηλεκτρονικών αποβλήτων διατίθενται ετησίως σε χώρους υγειονομικής ταφής. Αυτά τα απόβλητα παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις σε μέταλλα σπάνιων γαιών και μπορούν σε θεωρητικό επίπεδο να καλύψουν ένα μέρος της ζήτησης σε REs. Ωστόσο, μόνο το 12,5% των ηλεκτρονικών αποβλήτων ανακυκλώνεται σήμερα για όλα τα μέταλλα, παρόλο που αυτά τα απόβλητα περιέχουν σημαντικές συγκεντρώσεις REEs και άλλων πολύτιμων μετάλλων (Sprecher et al., 2014). Σήμερα, η ανακύκλωση και η ανάκτηση REEs αποτελεί μια πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία, διότι οι σπάνιες γαίες βρίσκονται σε μικρές ποσότητες σε προϊόντα ενώ χρησιμοποιούνται συνήθως με τη μορφή κραμάτων, καθιστώντας δύσκολη την απομόνωση και ανάκτηση ενός στοιχείου σε καθαρή μορφή.

Εντούτοις, πολλά κοινά προϊόντα περιέχουν σημαντικές ανακυκλώσιμες συγκεντρώσεις στρατηγικών στοιχείων και είναι ωφέλιμο να ανακυκλωθούν. Οι μπαταρίες αυτοκινήτων, οι λάμπες φθορισμού, οι σκληροί δίσκοι υπολογιστών, οι καταλυτικοί μετατροπείς και πράσινες τεχνολογίες, όπως τα ηλιακά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες, αποτελούν όλα ανακυκλώσιμα προϊόντα από τα οποία μπορούν να ανακτηθούν μεγάλες ποσότητες σπάνιων γαιών.

### **6.1.2.1 : ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ**

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Ni-MH από τις οποίες ανακτώνται κυρίως λανθάνιο και δημήτριο και δευτερευόντως νεοδύμιο, αποτελούν μια από τις καλύτερες πηγές σπάνιων γαιών λόγω της απλής διαδικασίας διαχωρισμού τους. Η εταιρία Honda ερευνά νέες τεχνολογίες για την ανακύκλωση εξαρτημάτων υβριδικών οχημάτων που περιέχουν μεγάλες ποσότητες REs (Wray, 2012). Η εταιρία σε συνεργασία με την Japan Metals & Chemicals, ανέπτυξε μια μέθοδο για την ανάκτηση σχεδόν του 80% των σπάνιων γαιών από τις μπαταρίες Ni-MH με την ίδια καθαρότητα με εκείνη που εξήχθη από τα ορυχεία.

Η πιο σύγχρονη μορφή ανακύκλωσης μπαταριών είναι μια υδρομεταλλουργική διαδικασία για την ανάκτηση REEs από τη σκωρία της πυρομεταλλουργικής επεξεργασίας χρησιμοποιημένων

μπαταριών Ni-MH μέσω έκπλυσης με θειικό οξύ που αναπτύχθηκε από ερευνητές στη Γερμανία. Αυτή η διαδικασία μάλιστα παρουσιάζει ποσοστό ανάκτησης 95% (Schuler et al, 2011). Ωστόσο, επειδή η παραπάνω διαδικασία βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο και τα αποτελέσματα της δεν είναι τελείως επισφαλής, θα ήταν ωφέλιμο να διεξαχθούν περισσότερες έρευνες από εταιρείες, οι οποίες να χρηματοδοτούνται από την εκάστοτε κυβέρνηση.

#### **6.1.2.2 : ΛΑΜΠΕΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ**

Τα φώτα φθορισμού αποτελούν ιδανικά παραδείγματα συσκευών ή προϊόντων για ανακύκλωση. Ένα σημαντικό ποσοστό των λαμπτήρων φθορισμού αποτελείται από φωσφόρους και στοιχεία σπάνιων γαιών όπως το ευρώπιο, το ύτριο, το τέρβιο, το δημήτριο και το λανθάνιο (Schuler et al, 2011). Οι REEs που χρησιμοποιούνται σε φωσφόρους και σε λάμπες φθορισμού αντιπροσωπεύουν το 30% της οικονομικής αξίας των REEs παγκοσμίως. Επομένως, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι είναι επιτακτική η ανάγκη ανακύκλωσης αυτών των προϊόντων.

#### **6.1.2.3 : ΣΚΛΗΡΟΙ ΔΙΣΚΟΙ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ**

Σημαντικές ποσότητες σπάνιων γαιών εντοπίζονται τόσο σε σκληρούς δίσκους όσο και σε συμπίεστες, οι οποίοι εμπεριέχουν μόνιμους μαγνήτες NdFeB. Οι σπάνιες γαίες που εντοπίζονται σε αυτά είναι κυρίως νεοδύμιο και δυσπρόσιο με περίπου 5,9 g Nd και 2,1 g Dy να υπάρχουν ανά σκληρό δίσκο (Schuler et al, 2011). Ακόμη, η τεχνολογική μέθοδος που ακολουθεί η εταιρία Hitachi δίνει την δυνατότητα να αποσυναρμολογούνται 100 μονάδες σκληρού δίσκου ανά ώρα με αποτέλεσμα η ανάκτηση REEs να είναι πιο λειτουργική. Επίσης, τα μηχανήματα της εταιρίας Hitachi μπορούν να είναι εξίσου αποδοτικά και στην ανάκτηση REEs από συμπίεστες. Οι τελευταίοι είναι εξίσου πολύτιμοι διότι το 25% των μαγνητών που εντοπίζονται στους συμπίεστες αποτελείται από μέταλλα σπάνιων γαιών.

#### **6.1.2.4 : ΚΑΤΑΛΥΤΕΣ**

Οι καταλύτες αποτελούν πηγές για κρίσιμα μέταλλα, όπως στοιχεία σπάνιων γαιών επειδή συλλέγονται σε πολύ μεγάλο βαθμό (Schuler et al, 2011). Οι REEs αποτελούν μόνο το 2% των καταλυτών, πράγμα που σημαίνει ότι αντιπροσωπεύουν 12.000 τόνους ανακυκλώσιμων REEs.

Ωστόσο, σήμερα δεν γίνεται η ανακύκλωση τους εξαιτίας του μικρού ποσοστού REEs που εντοπίζεται στους καταλύτες.

#### **6.1.2.5 : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Στρατηγικά μέταλλα υψηλής τεχνολογίας όπως το λίθιο, το κοβάλτιο και ειδικά οι REEs είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη αποτελεσματικών και οικολογικών τεχνολογιών, όπως ηλεκτρικά ή υβριδικά αυτοκίνητα που απαιτούν λίθιο και νεοδύμιο και ανεμογεννήτριες που απαιτούν σημαντικές ποσότητες νεοδύμιου και δυσπρόσιου.

Οι τεχνολογίες πράσινης ενέργειας έχουν διεισδύσει πλέον στην σύγχρονη οικονομία καθώς έχουν πολλαπλά οφέλη για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Σε αυτές τις τεχνολογίες διοχετεύονται μεγάλες ποσότητες σπάνιων γαιών, οι οποίες μελλοντικά μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν κατάλληλα. Με την υπάρχουσα τεχνολογία η ανακύκλωση φωτοβολταϊκών είναι πολύ ακριβή και αναποτελεσματική διαδικασία. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πειραματικό επίπεδο περιλαμβάνουν σύνθλιψη και διαχωρισμό των μετάλλων που μπορούν να εξοικονομήσουν έως και 90% του γυαλιού και 95% των μετάλλων.

Ωστόσο, επειδή τα φωτοβολταϊκά έχουν εμφανιστεί στην αγορά τα τελευταία χρόνια και η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου τα 20 χρόνια, πολλά χρησιμοποιημένα ηλιακά πάνελ θα είναι διαθέσιμα για ανακύκλωση στο εγγύς μέλλον. Εκείνη την χρονική περίοδο, θα έχουν αναπτυχθεί οι κατάλληλες μέθοδοι και θα μπορέσει να γίνει η ανάκτηση σπάνιων γαιών και άλλων μετάλλων με οικονομικά βιώσιμο τρόπο. Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και στην ανακύκλωση των ανεμογεννητριών. Έρευνες έχουν δείξει ότι είναι εφικτό να ανακτηθούν περίπου 350 κιλά REs, κυρίως Nd και Dy, από μια ανεμογεννήτρια 1,5 MW.

Συμπερασματικά, οι τεχνολογίες πράσινης ενέργειας αποτελούν τις μεγαλύτερες πηγές σπάνιων γαιών σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες, αφού απαιτούν μεγάλες ποσότητες REs για να λειτουργήσουν και να αξιοποιηθούν ορθά. Εντούτοις, η ανακύκλωση τους και η ανάκτηση κρίσιμων μετάλλων από αυτές δεν είναι εφικτή προς το παρόν διότι οι εν λόγω τεχνολογίες εισήλθαν πρόσφατα στην αγορά και δεν έχουν αποσυρθεί ακόμη. Οι επιστήμονες οφείλουν να αναπτύξουν μεθόδους ανακύκλωσης έτσι ώστε όταν υπάρξει ανάγκη να ανακτήσουν μια τεράστια ποσότητα REs.

### **6.1.3 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ REEs ΑΠΟ ELVs**

Είναι γεγονός ότι μεγάλος αριθμός οχημάτων που έχουν αποσυρθεί και δεν χρησιμοποιούνται πλέον διοχετεύεται σε χωματερές και παραμένει αναξιοποίητος. Όμως, για τους επιστήμονες αυτά τα οχήματα αποτελούν τον μεγαλύτερο προμηθευτή μετάλλων και σπάνιων γαιών αυτήν την χρονική περίοδο.

Με την χρήση πυρομεταλλουργικών ή υδρομεταλλουργικών διαδικασιών είναι πλέον εφικτό να ανακτηθούν κάποια μέταλλα από μηχανές ή οχήματα που έχει σταματήσει η λειτουργία τους (End of Life Vehicles). Για παράδειγμα είναι εφικτό από τις μπαταρίες Ni-MH, μέσω πυρομεταλλουργικών διαδικασιών και χρησιμοποιώντας μεταλλουργική σκωρία, να λάβουμε ξανά νικέλιο και κοβάλτιο απομονώνοντας τα REEs ως οξείδια στην σκωρία, που έπειτα σε υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να διαχωριστούν. Αντίστοιχο αποτέλεσμα μπορούμε να λάβουμε και με υδρομεταλλουργικές διαδικασίες, όπου με την χρήση κάποιων χημικών γίνεται πλύση της μπαταρίας και στην συνέχεια απομονώνονται και διαχωρίζονται οι REEs. Σύμφωνα με τους επιστήμονες, η αποτελεσματικότητα της πρώτης μεθόδου αγγίζει το 70% ενώ της δεύτερης κυμαίνεται από 70-99% ανάλογα με την διαλυτότητα των χημικών ενώσεων.

Παρόμοια, αξιόλογες ποσότητες σπάνιων γαιών μπορούν να ληφθούν από μόνιμους μαγνήτες NdFeB μέσω των κατάλληλων μεταλλουργικών εργασιών. Κατά την πυρομεταλλουργική διαδικασία το 65% των REEs στους μαγνήτες διαλύονται σε λιωμένο μαγνήσιο και μετά διαχωρίζονται με απόσταξη του μαγνησίου υπό κενό, ενώ με την υδρομεταλλουργική διαδικασία οι θερμοί μαγνήτες διαλύονται σε θειικό και υδροχλωρικό οξύ, διαχωρίζοντας με αυτόν τον τρόπο το 60-99% των REEs. Διάφορες εταιρίες στην Ιαπωνία χρησιμοποιούν ήδη κάποιες από αυτές τις διαδικασίες και ορισμένες έχουν ως αποτέλεσμα επιτυχής διαχωρισμού των REEs στο 80%.

Στον πίνακα 12 διακρίνουμε τις τεχνολογίες ανάκτησης σπάνιων γαιών από μπαταρίες νικελίου και μόνιμους μαγνήτες νεοδυμίου που χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακή κλίμακα καθώς και σε κάποιες μεγάλες βιομηχανίες. Σύμφωνα με τον Tang (Tang et al., 2013) το ποσοστό συλλογής στοιχείων σπάνιων γαιών από μπαταρίες Ni-MH, μέσω πυρομεταλλουργικών διαδικασιών, κυμαίνεται στο 71.4% ενώ ο βαθμός διαχωρισμού οξειδίων είναι σχεδόν ο απόλυτος. Παράλληλα, άλλοι επιστήμονες αναφέρουν στις έρευνες τους ότι μέσω υδρομεταλλουργικών



διαδικασιών είναι εφικτό να ανακτηθεί πάνω από το 80% των σπάνιων γαιών που εμπεριέχονται σε μπαταρίες Ni-MH.

References	Object	Technology type	Efficiency	Note
Binnemans et al. [5]	NiMH batteries, NdFeB magnets	–	–	A review paper which summarized the status quo of REEs recycling from ELVs including lab-scale and industry-scale process
Tang et al. [18]	NiMH batteries	Pyrometallurgical process	REEs collection rate: 71.4 % (oxide phase)	Lab-scale
Tang et al. [40]	NiMH batteries	Pyrometallurgical process	Separation rate: 99 % (oxide phase)	Lab-scale
Morrice et al. [41]	NiMH batteries	Pyrometallurgical process	–	Lab-scale
Pitrelli et al. [15]	NiMH batteries	Hydrometallurgical process	Recovery rate: about 80 %	Lab-scale
Li et al. [17]	NiMH batteries	Hydrometallurgical process	Over all recovery rate: about 98 %	Lab-scale
Innocenzi and Vegliò [20]	NiMH batteries	Hydrometallurgical process	Dissolution rate: 99 %	Lab-scale
Okamoto [42]	NdFeB magnets	Pyrometallurgical process	Dissolution rate: up to 65 %	Lab-scale
Voßenkaul et al. [44]	NdFeB magnets scrap	Hydrometallurgical process	REEs yield: up to 60 % (86 % purity)	Lab-scale
Koyama et al. [43]	NdFeB magnets	Hydrometallurgical process	Dissolution rate: 80 %	Lab-scale
Honda Motor Co., Ltd. [27]	NiMH batteries	Unknown process	Recovery rate: over 80 %	Industry-scale
Hitachi, Ltd. [45]	NdFeB magnets	A four-step preprocessing process	–	Industry-scale

Πίνακας 12 «Τεχνολογίες ανάκτησης REEs» (Xu et al., 2016)

Συνάμα, όσον αφορά τους μόνιμους μαγνήτες τα ποσοστά ανάκτησης REEs είναι ελαφρώς μειωμένα σε σύγκριση με τις μπαταρίες νικελίου. Μάλιστα, όπως αναφέρει ο Okamoto η απόδοση REEs μέσω πυρομεταλλουργικών διεργασιών φτάνει έως 65% ενώ σύμφωνα με τον Koyama (Koyama et al. , 2013) η αντίστοιχη απόδοση μέσω υδρομεταλλουργικών διαδικασιών κυμαίνεται στο 80%.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η υιοθέτηση ορισμένων μεταλλουργικών διεργασιών σε βιομηχανική κλίμακα από μεγάλες εταιρίες με σκοπό την ανάκτηση οξειδίων ή στοιχείων σπάνιων γαιών. Συγκεκριμένα, η εταιρία Hitachi έχει εστιάσει στην ανακύκλωση REEs από μόνιμους μαγνήτες NdFeB, χωρίς να έχει δημοσιεύσει στοιχεία με τα ποσοστά ανάκτησης σπάνιων γαιών, ενώ παράλληλα η εταιρία Honda Motor έχει ήδη προχωρήσει στην ανακύκλωση



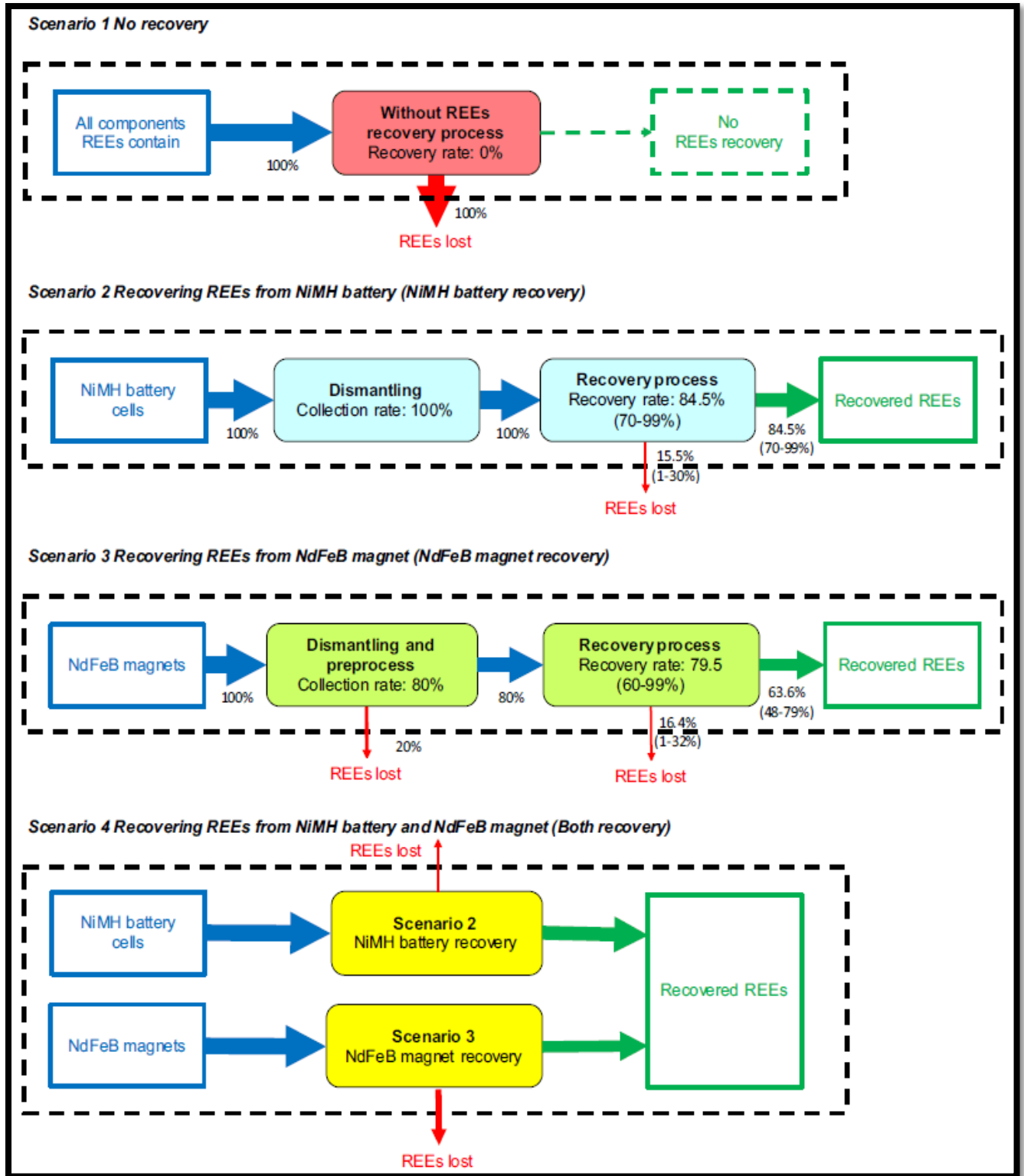
επαναφορτιζόμενων μπαταριών Ni-MH. Η αυτοκινητοβιομηχανία μέσω ηλεκτρόλυσης λιωμένου άλατος συγκεντρώνει τα στοιχεία σπάνιων γαιών που εξάγονται από τις μπαταρίες σε οξείδια, ανακτώντας περίπου το 80% των REEs. Στην συνέχεια οι REEs παρέχονται σε κατασκευαστές μπαταριών, οι οποίοι τις χρησιμοποιούν ως ηλεκτρόδια σε μπαταρίες υβριδικών οχημάτων.

Παράλληλα, δύο ακόμη μεγάλες εταιρείες έχουν προχωρήσει στην ανακύκλωση και ανάκτηση σπάνιων γαιών. Πρόκειται για την Mitsubishi Electric, η οποία ανακυκλώνει συμπιεστές κλιματισμού για την ανάκτηση HREEs και την Veolia Environmental Services που σκοπεύει να ανακυκλώσει χρησιμοποιημένες ηλεκτρονικές συσκευές που βρίσκονται σε χώρους απόθεσης αποβλήτων.

Οι σπάνιες γαίες βρίσκονται σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές και νέες τεχνολογίες, και η ανακύκλωση τους θα απέδιδε αξιόλογες ποσότητες για τις ανάγκες της βιομηχανίας σε REEs.. Σύμφωνα με μια ομάδα ερευνητών (Xu et al., 2016), πρέπει να εξεταστούν τέσσερα σενάρια για την ανάκτηση REEs από μηχανές οχημάτων που έχει σταματήσει η χρήση και η λειτουργία τους, έτσι ώστε να δοθεί μια εκτίμηση για την συνολική ποσότητα REEs που μπορεί να ανακτηθεί μέσω της ανακύκλωσης μπαταριών Ni-MH και μόνιμων μαγνητών NdFeB μελλοντικά.

Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει την περίπτωση να μην γίνουν προσπάθειες συλλογής και ανάκτησης των στοιχείων σπάνιων γαιών, ενώ στο δεύτερο και τρίτο σενάριο εξετάζεται η ανακύκλωση REEs από μπαταρίες νικελίου και μόνιμους μαγνήτες αντίστοιχα. Τέλος, ως τέταρτο σενάριο λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση συνδυασμού του σεναρίου δυο και τρία, δηλαδή η ανακύκλωση τόσο των μπαταριών NiMH όσο και των μαγνητών NdFeB.

Όσον αφορά το πρώτο σενάριο, λαμβάνεται υπόψη ότι καμία από τις προτάσεις για αξιοποίηση των ELVs δεν θα καρποφορήσει μέχρι το 2030 και δεν θα έχουν ανακτηθεί REEs από τις μπαταρίες και τους μαγνήτες οχημάτων. Αντιθέτως, στο δεύτερο σενάριο, η συλλογή μπαταριών από ELVs φαντάζει ως μια σχετικά απλή διαδικασία αφού αποτελούν ένα ξεχωριστό κομμάτι του οχήματος και μπορούν να συλλεχθούν με ευκολία. Ωστόσο, οι μεταλλουργικές διαδικασίες που λαμβάνουν μέρος για τον διαχωρισμό των REEs έχουν ποσοστό επιτυχίας που κυμαίνεται περίπου στο 84.5% όπως φαίνεται στο σχήμα 42.



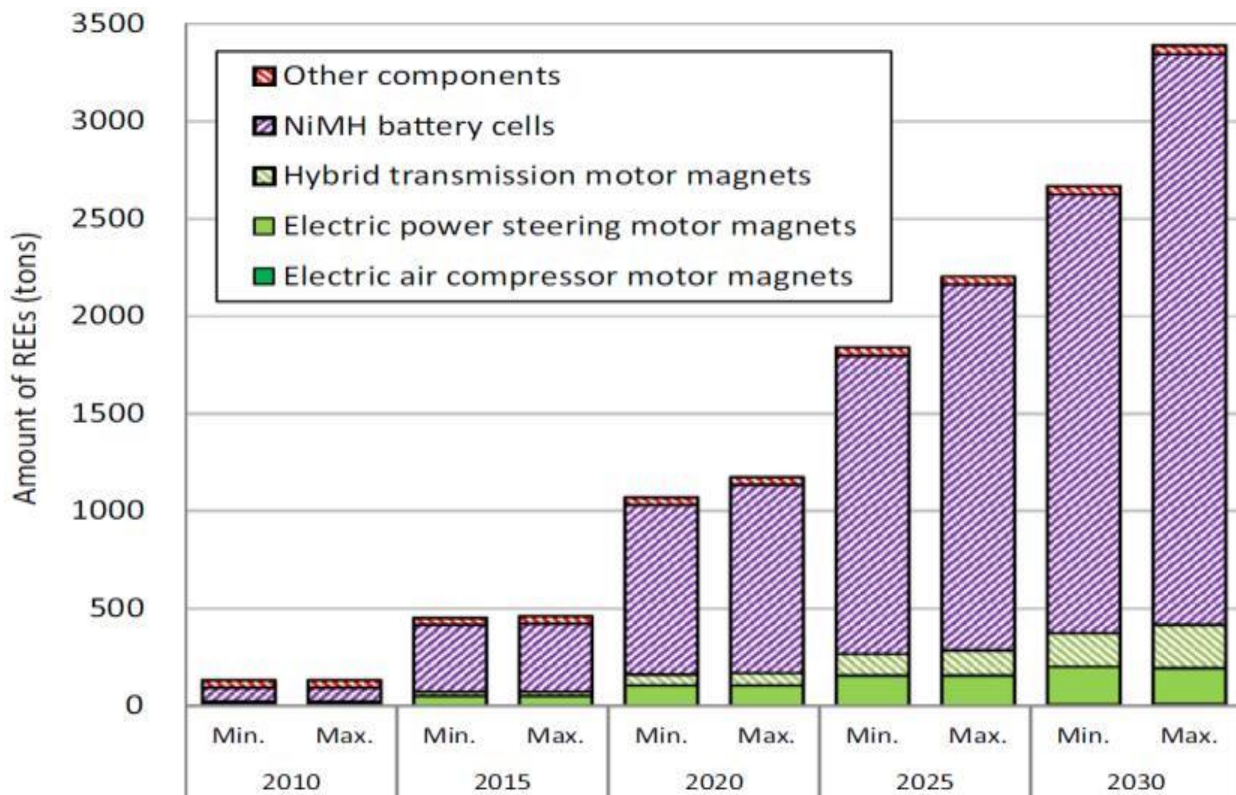
Σχήμα 42 «Σενάρια ανάκτησης REEs» (Xu et al., 2016)

Στο τρίτο σενάριο παρατηρείται μικρότερο ποσοστό επιτυχής ανάκτησης σπάνιων γαιών συγκριτικά με το δεύτερο σενάριο. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μαγνήτες είναι δύσκολο να απομακρυνθούν από το όχημα αφού είναι συγκρατημένοι με ισχυρά μαγνητικά πεδία. Οπότε χρειάζεται μια επιπλέον διαδικασία. Αρχικά αφαιρούνται οι κινητήρες από τα οχήματα και μετά περνούν από μηχανές κοπής για να ανακτηθούν οι μαγνήτες νεοδυμίου, μετά αποσυναρμολογούνται και απομαγνητίζονται με κάποιου είδους δόνηση και εν τέλει διαχωρίζονται και συλλέγονται. Το ποσοστό επιτυχίας της μεθόδου σύμφωνα με το σχήμα 42 εκτιμάται στο 64%.

Το τέταρτο και τελευταίο σενάριο περιλαμβάνει την περίπτωση ανάκτησης REs τόσο από μπαταρίες όσο και από μαγνήτες. Αποτελεί το βέλτιστο σενάριο και δίνει τις μεγαλύτερες ποσότητες REs από τα υπόλοιπα εξεταζόμενα σενάρια, παρά τις όποιες απώλειες παρουσιάζει.

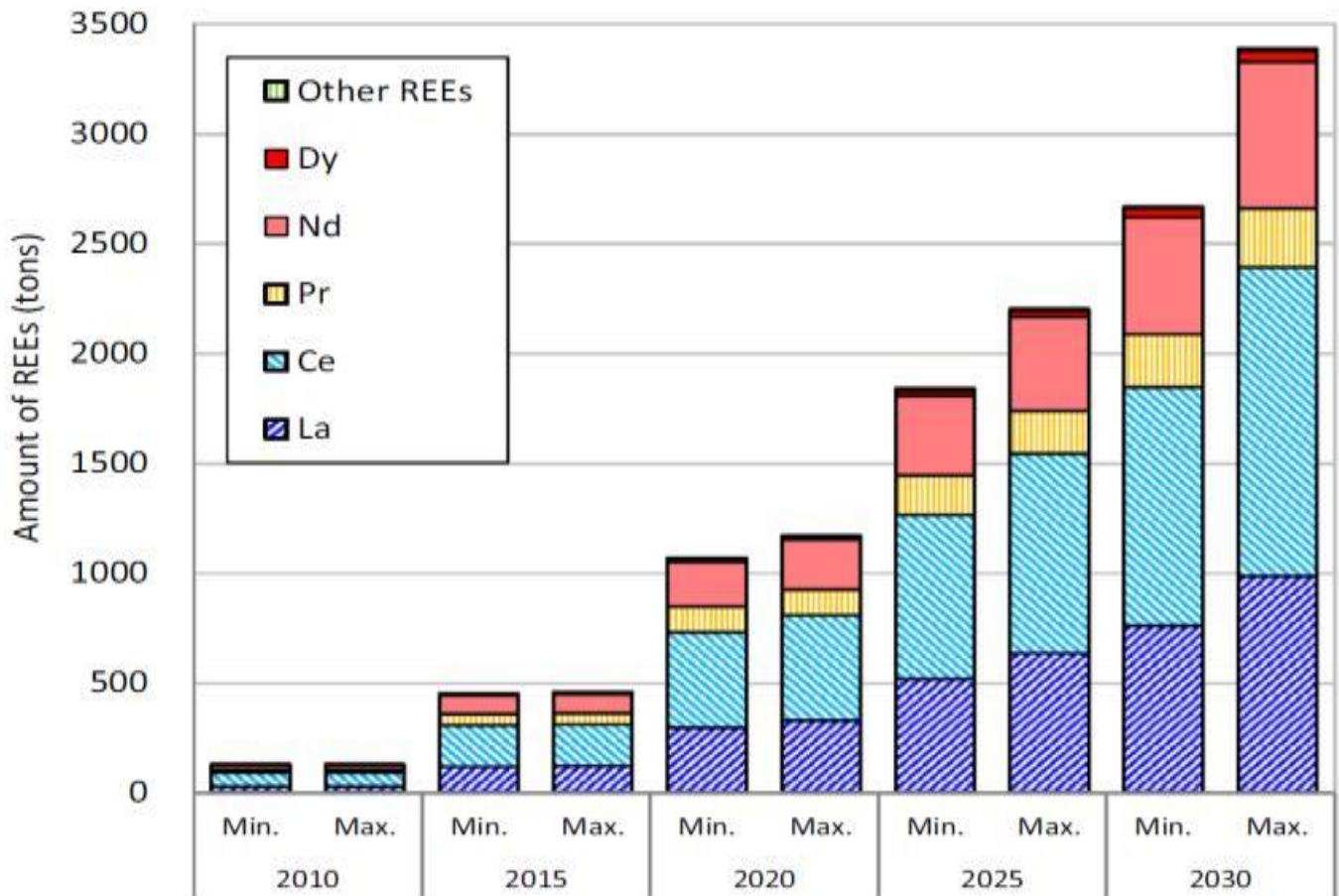
Σύμφωνα με την παραπάνω έρευνα η ποσότητα των REEs που περιέχονται στα ELVs θα αυξηθεί ραγδαία από 130 τόνους, που ήταν το 2010, στους 3400 τόνους το 2030. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με την μείωση των παγκόσμιων αποθεμάτων κάνει επιτακτική την ανάγκη ανακύκλωσης μπαταριών νικελίου και μόνιμων μαγνητών. Μάλιστα, οι μπαταρίες Ni-MH θα είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο ποσοστό σπάνιων γαιών που ανακτώνται, αφού η συλλογή τους είναι ευκολότερη και δεν έχουν σημαντικές απώλειες. Αντιθέτως, οι μόνιμοι μαγνήτες που συναντώνται ως υβριδικοί μαγνήτες στον κινητήρα μετάδοσης, μαγνήτες σε ηλεκτροκίνητο σύστημα οδήγησης ή μαγνήτες σε ηλεκτρικό αεροσυμπιεστή είναι δύσκολο να συλλεχθούν και να αποσυναρμολογηθούν. Για αυτό τον λόγο, οι απώλειες REEs είναι μεγαλύτερες και ως συνέπεια το ποσοστό ανάκτησης μικρότερο.

Στο σχήμα 43 διακρίνεται εύκολα ότι οι ποσότητες των σπάνιων γαιών που βρίσκονται σε ELVs αυξάνονται εκθετικά με τον χρόνο, ενώ όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μπαταρίες NiMH θα προσδώσουν μεγαλύτερες ποσότητες σε REs σε σύγκριση με τους μαγνήτες NdFeB. Εκτιμάται δε ότι το 2030 οι REs στα ELVs θα φτάσουν τους 3400 τόνους εκ των οποίων οι 2700 τόνοι μπορούν να ανακτηθούν από μπαταρίες και μαγνήτες. Συγκεκριμένα, εξετάζονται δυο περιπτώσεις, η πρώτη έχει να κάνει με την αξιοσημείωτη αύξηση της παραγωγής βαρέων οχημάτων που εμπεριέχουν REs και αναφέρεται ως «max», ενώ στην δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι η παραγωγή βαρέων οχημάτων παραμένει σταθερή «min».



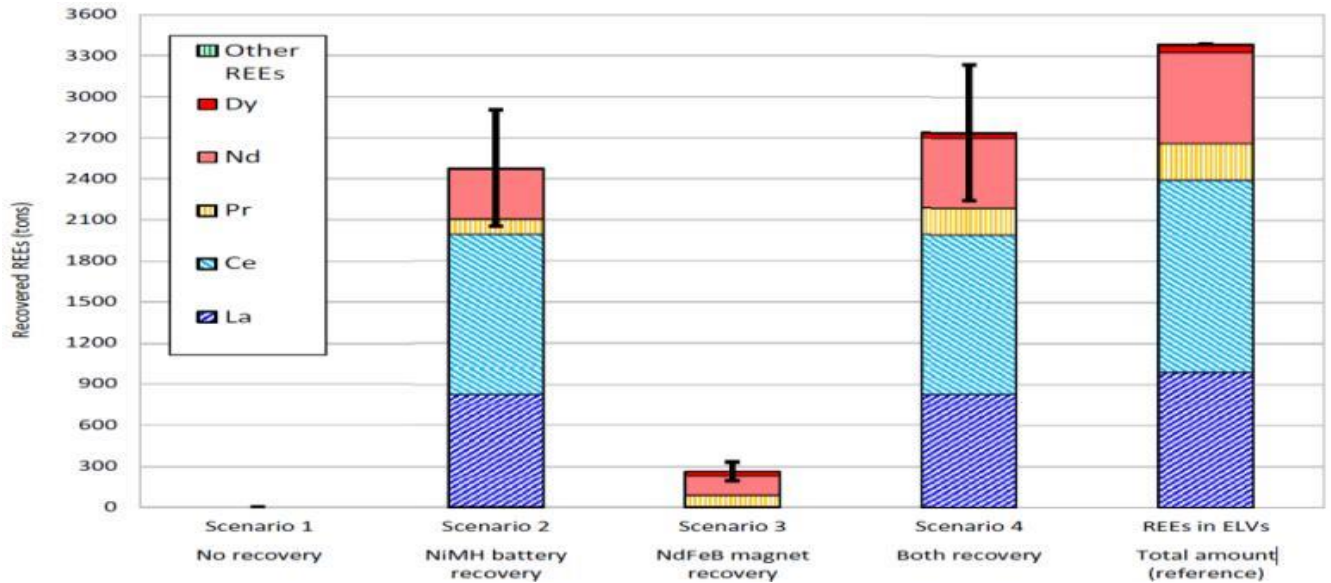
Σχήμα 43 «Εκτιμώμενες ποσότητες REEs από μπαταρίες και μόνιμους μαγνήτες» (Xu et al., 2016)

Επίσης, όπως παρατηρείται στο σχήμα 44, το δημήτριο, το λανθάνιο καταλαμβάνουν τα υψηλότερα ποσοστά (41% και 29% αντίστοιχα) σε στοιχεία σπάνιων γαιών και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εμπεριέχονται στις μπαταρίες Ni-MH. Αντιθέτως, η δυσκολία που εντοπίζεται στην ανάκτηση REEs από μόνιμους μαγνήτες, αντικατοπτρίζεται στα ποσοστά νεοδυμίου, πρασεοδύμιου και ιδιαίτερα δυσπρώσιου στο ακόλουθο σχήμα. Επιπλέον, αν και το συνολικό ποσοστό ανακτώμενων REEs από μαγνήτες φαντάζει μικρό, η συνολική ποσότητα των στοιχείων που μπορεί να ανακτηθεί είναι μεγάλη. Το 2030 εκτιμάται ότι μέσω της ανακύκλωσης θα έχουν συλλεχθεί περίπου 670 τόνοι Nd και 50 τόνοι Dy.



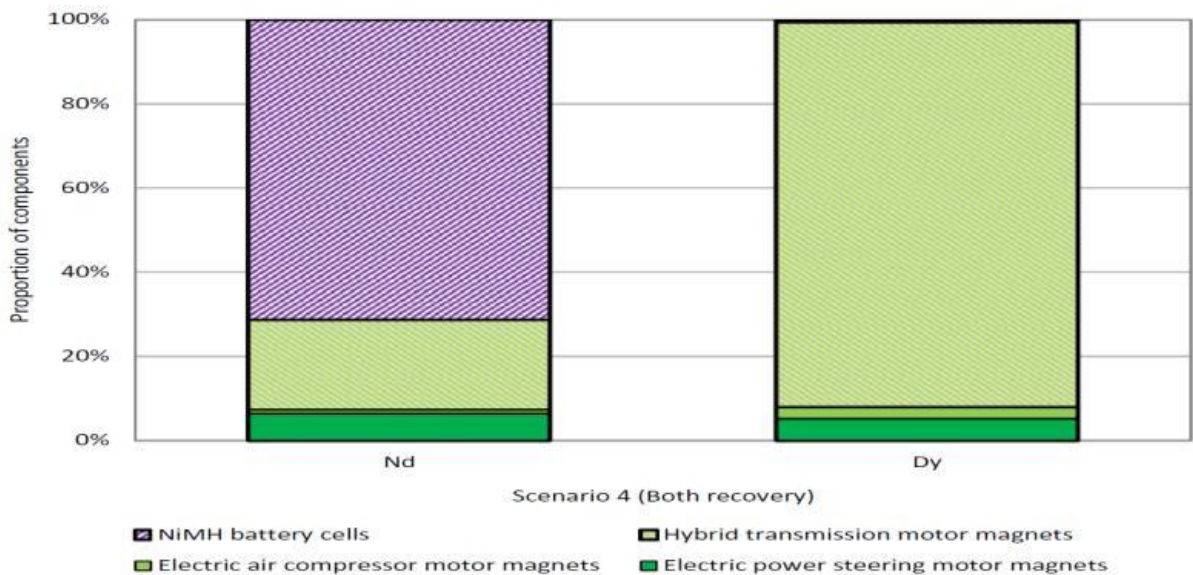
Σχήμα 44 «Ανακτώμενες ποσότητες στοιχείων σπάνιων γαιών» (Xu et al., 2016)

Παράλληλα, στο σχήμα 45 παρουσιάζονται οι ποσότητες των στοιχείων που θα έχουν ανακτηθεί το 2030 ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο. Στο πρώτο σενάριο, δηλαδή χωρίς την ανακύκλωση, μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό ότι θα αποδοθεί μηδενική ποσότητα REEs. Σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο λαμβάνονται υψηλές ποσότητες σε δημήτριο και λανθάνιο, που αποτελούν τα κυριότερα συστατικά των μπαταριών Ni-MH, ενώ παρατηρούνται σημαντικές ποσότητες σε νεοδύμιο και πρασεοδύμιο. Στην περίπτωση ανάκτησης σπάνιων γαιών μόνο από μόνιμους μαγνήτες λαμβάνεται πρασεοδύμιο, νεοδύμιο και δυσπρόσιο αλλά σε χαμηλότερες ποσότητες σε σχέση με τις μπαταρίες. Τέλος, ο συνδυασμός των δυο σεναρίων δίνει τις μεγαλύτερες ποσότητες σε REEs και αποτελεί το καλύτερο σενάριο.



Σχήμα 45 «Ποσότητες REEs ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο» (G.Xu et al., 2016)

Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό Nd λαμβάνεται από τις μπαταρίες Ni-MH, ενώ το Dy ανακτάται εξολοκλήρου από μαγνήτες. Τα ποσοστά συνεισφοράς υβριδικών μαγνητών στην παροχή Nd και Dy είναι 21% και 91% αντίστοιχα ενώ όπως διακρίνεται στο σχήμα 46 σημαντικό ποσοστό συλλέγεται από μαγνήτες που βρίσκονται σε ηλεκτρικά τιμόνια.



Σχήμα 46 «Ποσοστά Nd και Dy που ανακτώνται από μαγνήτες και μπαταρίες» (G.Xu et al., 2016)

Σήμερα, ο ρυθμός εγκατάστασης ηλεκτρικών τιμονιών είναι ραγδαίος και αυξάνεται με τον χρόνο με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε Nd και Dy. Παράλληλα έρευνες έχουν



δείξει ότι είναι εφικτό να μειωθεί η ποσότητα Nd στις μπαταρίες και να χρησιμοποιηθούν άλλα μέταλλα στην θέση του, ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο για τους μόνιμους μαγνήτες NdFeB, προδίδοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ανάγκη για Nd και Dy. Αυτά τα δυο μέταλλα επειδή λαμβάνονται σε μικρές ποσότητες από τις διαδικασίες ανακύκλωσης, έχουν σχετικά μικρό απόθεμα και δεν μπορούν να αντικατασταθούν παρουσιάζουν υψηλότερη αξία σε σχέση με άλλα REEs.

Εκτιμάται βέβαια ότι το 2030 οι ανάγκες σε Dy και Nd για την παράγωγή νέων προϊόντων θα είναι περίπου 130 τόνοι για το Dy και σχεδόν η δεκαπλάσια ποσότητα για το Nd. Μέσω της ανακύκλωσης ELVs μπορεί να καλυφθούν σχεδόν οι μισές ανάγκες σε Nd και περίπου το 23% των αναγκών Dy, για αυτό θα ήταν ωφέλιμο να ξεκινήσει άμεσα η ανακύκλωση τους, ανεξαιρέτου κόστους.

Συμπερασματικά, με την πάροδο των χρόνων τα προϊόντα που θα περιέχουν στοιχεία ή κράματα σπάνιων γαιών θα αυξάνονται με εκθετικό ρυθμό, με αποτέλεσμα η ζήτηση για REEs να είναι μεγάλη. Τα κοιτάσματα ορισμένων μετάλλων δεν επαρκούν για την κάλυψη των παγκόσμιων αναγκών και για αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη να ανακτηθούν στοιχεία σπάνιων γαιών μέσω της ανακύκλωσης. Πολλές βιομηχανίες έχουν επικεντρωθεί στην αναζήτηση νέων ορυχείων για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης σε REs, όμως η ανακύκλωση σπάνιων γαιών συνεχίζει με αργό αλλά σταθερό ρυθμό να κερδίζει έδαφος, δεδομένου του υψηλού κόστους εξόρυξης και επεξεργασίας των REs. Σήμερα, η ανακύκλωση, αν και βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, ενδεχομένως να αποτελεί την βέλτιστη λύση αφού το οικολογικό αποτύπωμα είναι μικρό και τα στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν ξανά σε νέες τεχνολογίες.

## **6.2 : ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ REs**

Ορισμένα πανεπιστημιακά ιδρύματα έχουν ήδη προτείνει ενδεχόμενες λύσεις για την αντιμετώπιση των εκπεμπόμενων ρύπων των μεθόδων επεξεργασίας των σπάνιων γαιών. Το πανεπιστήμιο του Χάρβαρντ για παράδειγμα έχει παρουσιάσει μια καινοτόμο μέθοδο για τον διαχωρισμό στοιχείων σπάνιων γαιών από λοιπά μέταλλα, χρησιμοποιώντας ελαφρώς όξινα διαλύματα κατά τις διεργασίες διύλισης. Παράλληλα, ερευνητές στο πανεπιστήμιο Purdue έχουν ανακαλύψει μια οικολογική και χαμηλού κόστους τεχνολογία που αφαιρεί τις σπάνιες γαίες από τις στάχτες άνθρακα που πρέπει να ανακυκλωθεί. Είναι πλέον γνωστό ότι υπάρχει ξεκάθαρη ανάγκη

για νέες τεχνολογίες και μεθόδους διαχωρισμού που διευκολύνουν την διαδικασία ανακύκλωσης και μειώνουν το κόστος σε βιομηχανική κλίμακα.

### **6.2.1 : ΦΙΛΤΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ**

Οι τρέχουσες μέθοδοι διαχωρισμού πετρωμάτων σπάνιων γαιών περιλαμβάνουν πολλά βήματα και αρκετά επικίνδυνα χημικά. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι τα φίλτρα βακτηριδίων μπορούν να απορροφήσουν τοξικά στοιχεία και ενώσεις από λύματα και μέσω αυτών να φιλτραριστούν τα μέταλλα σπάνιας γης από τις μονάδες αποστράγγισης ορυχείων. Η βιολογική έκπλυση με τη βοήθεια βακτηρίων οδήγησαν σε μεγαλύτερο ρυθμό ανάκτησης και προσρόφησης ιόντων μετάλλων κατά τη διαδικασία ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή REs από μαγνήτες (Kuroda & Ueda, 2010). Αυτή η νέα μέθοδος διαχωρισμού εμφανίζει μεγάλη αποτελεσματικότητα, καθώς ο διαχωρισμός των μετάλλων γίνεται σε μικρό χρόνο.

Ερευνητές του πανεπιστημίου του Harvard, (Bonificio & Clarke, 2016) απομόνωσαν ένα βακτήριο από θαλάσσια φύκια σε ένα φίλτρο ανάλυσης και πέρασαν ένα διάλυμα μικτών σπάνιων γαιών. Τα βακτήρια απορρόφησαν όλα τα στοιχεία καθώς περνούσαν. Ακολούθως, για να επιτευχθεί η συλλογή στοιχείων σπάνιων γαιών μέσω του φίλτρου γίνονται αρκετές δοκιμές διαλυμάτων διάφορων τιμών pH έτσι ώστε να προκύψει με κάθε διαδοχικό πλύσιμο pH η ζητούμενη σπάνια γαία. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι οι ελαφρύτερες λανθανίδες, όπως το ευρώπιο και το πρασεοδύμιο, αποσπώνται με πλύσεις υψηλότερου pH, ενώ οι βαρύτερες σπάνιες γαίες, όπως το έρβιο, το θούλιο και το υτέρβιο, συλλέγονται με πλύση χαμηλότερου pH.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι για τον διαχωρισμό μόνο των βαρέων σπάνιων γαιών, υπάρχει η δυνατότητα να μπλοκάρουν οι υποδοχείς των βακτηρίων που απορροφούν τις ελαφρύτερες σπάνιες γαίες και να χρησιμοποιηθεί μόνο χαμηλό pH. Ακόμη, ανακάλυψαν ότι είναι δυνατόν να συγκεντρωθεί ένα διάλυμα ίσων συγκεντρώσεων κάθε RE σχεδόν στο 50% των τριών βαρύτερων σπάνιων γαιών σε μόλις δύο περάσματα, ξεπερνώντας τις υπάρχουσες βιομηχανικές πρακτικές.

### **6.2.2 : ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ**

Μια ομάδα ερευνητών του πανεπιστημίου Purdue αναζητά νέες, αποδοτικές και φτηνές τεχνολογίες για την εξαγωγή σπάνιων γαιών από την τέφρα άνθρακα. Η τέφρα άνθρακα είναι



πλούσια σε μέταλλα σπάνιων γαιών και για αυτό η ανακύκλωση της με οικολογικό τρόπο, θα μπορούσε να αποτελέσει μια σημαντική πηγή στοιχείων σπάνιας γης. Παράλληλα, ο διαχωρισμός των στοιχείων σπάνιων γαιών είναι αρκετά απαιτητικός και δύσκολος καθώς τα στοιχεία παρουσιάζουν παρόμοιες φυσικές και χημικές ιδιότητες, έχουν παρεμφερές μέγεθος και ίδιο ιοντικό φορτίο. Οι τρέχουσες τεχνολογίες διαχωρισμού παράγουν μεγάλες ποσότητες χημικών αποβλήτων, τα οποία είναι πρακτικά δύσκολο να ανακυκλωθούν.

Η επιστήμονας Wang του πανεπιστημίου Purdue ανέπτυξε νέες τεχνικές διαχωρισμού με βάση την χρωματογραφία που θα μπορούσαν να διαχωρίσουν στοιχεία σπάνιων γαιών πρώτα από πρόσθετα και προσμίξεις και στη συνέχεια μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μόνο μερικές μονάδες χρωματογραφίας (Wang, 2017). Οι διαδικασίες περιλαμβάνουν μεθόδους έκλουσης (διαδικασία εξαγωγής ενός υλικού από το άλλο με πλύσιμο με διαλύτη) ή μεθόδους χρωματογραφίας χρησιμοποιώντας ανθεκτικά, φτηνά και απορροφητικά οξείδια τιτανίου.

Σύμφωνα με την Wang, αυτές οι νέες διεργασίες μπορούν να διαχωρίσουν αποτελεσματικά τις σπάνιες γαίες με καθαρότητα στοιχείων άνω του 95% ενώ παράλληλα η χρήση απορροφητικών οξειδίων τιτανίου είναι αυτό που καθιστά αυτή την καινοτομία μοναδική αφού είναι ισχυρά και οικονομικά, καθιστώντας τις διαδικασίες αποδοτικές και προσιτές. Επιπλέον, τα υποπροϊόντα της διαδικασίας περιλαμβάνουν οξείδια πυριτίου, οξείδια αργιλίου και άλλα μεταλλικά οξείδια εμπορικής αξίας, καθιστώντας τη συνολική διαδικασία οικονομική και κερδοφόρα.

Στις ΗΠΑ εκτιμάται ότι έχουν συσσωρευτεί πάνω από 1,5 δισεκατομμύρια τόνοι τέφρας άνθρακα, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή REE για δεκαετίες, αφού η τέφρα άνθρακα είναι πλούσια σε στοιχεία σπάνιων γαιών. Η νέα μέθοδος θα μπορούσε να προσφέρει τρόπους χρήσης της τέφρας άνθρακα που όχι μόνο ικανοποιούν τις ανάγκες σε REEs στις ΗΠΑ, αλλά είναι ευεργετική για το περιβάλλον και θα μπορούσε να δημιουργήσει θέσεις εργασίας στον τομέα υψηλής τεχνολογίας.

Οι δυνατότητες αυτής της τεχνολογίας έχουν ελεγχθεί προς το παρόν μόνο σε εργαστηριακή κλίμακα ωστόσο υπάρχει ακόμη έρευνα που πρέπει να ολοκληρωθεί για την επίδειξη αυτών των νέων τεχνολογιών σε μεγαλύτερες κλίμακες. Τα πρώτα δείγματα είναι θετικά και

εικάζεται ότι αυτή η νέα μέθοδος είναι η πιο απλή, αποτελεσματική και οικονομική λύση για την παραγωγή REEs.

### **6.3 : ΘΕΣΠΙΣΗ ΝΕΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΦΥΠΝΙΣΗ ΚΙΝΑΣ**

Στην σημερινή κοινωνία, η θέσπιση μέτρων για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών ρύπων αποτελεί χρέος και ευθύνη όλων των κυβερνήσεων παγκοσμίως. Ωστόσο, καμία προσπάθεια δεν θα τελεσφορήσει αν η Κίνα που αποτελεί την κυρίαρχη δύναμη στην παραγωγή σπάνιων γαιών, ελέγχοντας άνω του 80% της παραγωγής, δεν λάβει καίρια μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου.

Η κινέζικη κυβέρνηση αγνοούσε το πρόβλημα για πάνω από δυο δεκαετίες, όμως σήμερα εντείνει τις προσπάθειές της για τον περιορισμό της παράνομης εξόρυξης και εξαγωγής σπάνιων γαιών, δημιουργώντας ένα σύστημα που πιστοποιεί την προέλευση των προμηθειών των πολυπόθητων υλικών, που χρησιμοποιούνται σε προηγμένα ηλεκτρονικά είδη, στην άμυνα και σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σύμφωνα X. Guobin, το νέο σύστημα εντοπισμού θα χρησιμοποιεί ειδικά τιμολόγια σπάνιων γαιών και άλλες πληροφορίες, όπως δεδομένα εξαγωγής, για την καταστολή των παράνομων εξορύξεων.

Η Κίνα προσπαθεί να εμποδίσει την παράνομη εξόρυξη και εξαγωγές σπάνιων γαιών εδώ και χρόνια. Ωστόσο, το λαθρεμπόριο, η καταστροφή του περιβάλλοντος και οι επικίνδυνες βιοτεχνικές εξορυκτικές πρακτικές παραμένουν ανεξέλεγκτες. Σύμφωνα με ορισμένες εκτιμήσεις, οι εξαγωγές από παράνομη εξόρυξη μέσω δικτύων στο Βιετνάμ και το Χονγκ Κονγκ ανέρχονται σε 40.000 τόνους. Το 2014, η κυβέρνηση αποφάσισε να συγκεντρωθεί όλη η βιομηχανία των σπάνιων γαιών σε έξι μεγάλους οργανισμούς. Η κίνηση, που στοχεύει όχι μόνο στον έλεγχο της παράνομης εξόρυξης και της ρύπανσης, αλλά και στον εκσυγχρονισμό των τεχνικών και της τεχνολογίας της Κίνας (Jamasmie, 2016). Συγκεκριμένα, οι εταιρείες πλέον υποχρεούνται να αναβαθμίσουν τον εξοπλισμό τους με πιο σύγχρονες και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες ενώ παράλληλα οι διαδικασίες εξόρυξης μετάλλων θα γίνονται χρησιμοποιώντας πιο βιώσιμες πρακτικές.

Επίσης, με την θέσπιση αυστηρότερων κανονισμών η Κίνα επιδιώκει να αντισταθμίσει τις ζημιές που έχουν δημιουργηθεί από τις μεταλλευτικές εταιρείες Αυτό θα επιτευχθεί με την επιβολή νέων περιβαλλοντικών μέτρων, που περιλαμβάνουν οικολογικούς και πιστοποιημένους μεθόδους

εξαγωγής και είναι σύμφωνοι με παγκόσμια περιβαλλοντικά πρότυπα. Συνάμα, εξετάζεται και η επιβολή νέων φόρων που βασίζονται στην πραγματική αξία των ορυκτών, και όχι στον όγκο τους, όπως συμβαίνει σήμερα (Jamasmie, 2016). Σύμφωνα με την Ένωση Βιομηχανίας Σπάνιων Γη της Κίνας, περίπου το 80% των παραγωγών σπάνιων γαιών της χώρας λειτουργούν επί του παρόντος με απώλεια και πολλά ορυχεία αναμένεται να κλείσουν



Σχήμα 47 «Εργασίες εκσκαφής REs στην επαρχία Sichuan της Κίνας» (Shutterstock.com)

Οι παραπάνω ενέργειες θα μπορούσαν να λειτουργήσουν και ως μέτρο πρόληψης για τυχόν πρόσθετα περιβαλλοντικά ζητήματα, ωστόσο κρίνεται αναγκαίο οι υπάρχουσες ζημιές να αποκατασταθούν. Η Κίνα, πλέον, έχει αρχίσει και λαμβάνει μέτρα για την επίλυση των προβλημάτων που προέκυψαν από την ανεξέλεγκτη εξόρυξη σπάνιων γαιών εδώ και δεκαετίες. Αυτές οι προσπάθειες αποκατάστασης περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως η άντληση ρύπων από τα υπόγεια ύδατα και η άντληση γλυκού νερού για να αραιώσουν οι συγκεντρώσεις τοξικών λυμάτων στις περιοχές όπου έχουν διαρρεύσει τοξικά απόβλητα.

Η διαδικασία εξαγωγής REEs από ορυκτά πετρώματα χρησιμοποιώντας παραδοσιακές πρακτικές έχει οδηγήσει σε τεράστια οικολογική ζημία την κινέζικη ύπαιθρο. Με αργό αλλά σταθερό ρυθμό, η κινέζικη κυβέρνηση λαμβάνει μέτρα για να σταματήσει και ακόμη να αντιστρέψει μέρος των ζημιών, αλλά η διαδικασία είναι αργή και δαπανηρή αφού οι νέες και βιώσιμες πρακτικές έχουν υψηλό κόστος. Ωστόσο, η Κίνα φαίνεται να αντιμετωπίζει το πρόβλημα

με μεγαλύτερη σοβαρότητα και για αυτό συνεχίζει τις προσπάθειές της, παρά το ενδεχόμενο αύξησης του κόστους των προϊόντων που κατασκευάζονται από σπάνιες γαίες.

Πάνω σε αυτό το πλαίσιο οι κυβερνήσεις όλων των κρατών οφείλουν να θεσπίσουν νόμους όπου θα ζητούν από τις βιομηχανίες να ανακυκλώνουν οι ίδιες τα προϊόντα τους ή να μισθώσουν κέντρα ανακύκλωσης για να τα ανακυκλώσουν (Schuler et al., 2011). Η παροχή κινήτρων, όπως είναι η μείωση των φορολογικών συντελεστών, θα μπορούσε να έχει οφέλη τόσο για τους κατασκευαστές όσο και για το ίδιο το περιβάλλον.

Η χρήση οικολογικών μορφών τεχνολογίας κατά την επεξεργασία REs και η ανακύκλωση προϊόντων θα μειώσει τις εκπομπές ρύπων και θα μειώσει την ζήτηση REs από τις χώρες παραγωγής, με αποτέλεσμα οι χώρες να έχουν μια νέα πηγή στρατηγικών στοιχείων. Αυτό θα κάνει τις ίδιες τις βιομηχανίες να είναι αυτόνομες και να μην εξαρτώνται από τις εισαγωγές REEs, έτσι η ζήτηση σε ηλεκτρονικές συσκευές θα μπορεί να ικανοποιηθεί και οι πωλήσεις των προϊόντων θα αυξηθούν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, τα μέταλλα σπάνιων γαιών αποτελούν βασικό γρανάτζι των σύγχρονων βιομηχανιών και είναι αναγκαία για την παραγωγή τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ηλεκτρονικών συσκευών υψηλών απαιτήσεων και προδιαγραφών. Οι μοναδικές τους ιδιότητες τα καθιστούν απαραίτητα για τους μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι εφαρμόζονται στην αμυντική βιομηχανία, στις ανεμογεννήτριες και στους κινητήρες ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων, ενώ παράλληλα η καταλυτική τους δράση και η υψηλή αντοχή στην θερμότητα αυξάνουν το φάσμα των εφαρμογών τους. Οι σπάνιες γαίες μπορούν να εφαρμοστούν μεμονωμένα ή σε κράματα με άλλα μέταλλα για να μειώσουν τον όγκο και το βάρος συσκευών καθώς και να προσδώσουν μεγαλύτερη απόδοση στις τεχνολογίες. Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αφού οι σπάνιες γαίες συνδέονται άμεσα με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μπορούν να συμβάλλουν στις προσπάθειες περιορισμού του φαινομένου του θερμοκηπίου και στην μείωση των ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Η ζήτηση σε προϊόντα που περιέχουν αυτά τα μοναδικά μέταλλα αυξάνεται ραγδαία, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το παγκόσμιο απόθεμα και αυξάνοντας τις τιμές των REEs. Μια λύση σε αυτό το ζήτημα θα μπορούσε να δώσει η ανακύκλωση υλικών και συσκευών που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες. Η ανακύκλωση των REEs θα μπορούσε να αποδώσει σημαντικές ποσότητες μετάλλων για να χρησιμοποιηθούν εκ νέου σε νέες τεχνολογίες, μειώνοντας την εξάρτηση των βιομηχανιών από τις εισαγωγές REEs από τις χώρες παραγωγής και κυρίως από την Κίνα που αυτήν την στιγμή αποτελεί μονοπώλιο στην αγορά και το εμπόριο σπάνιων γαιών.

Η Κίνα παρουσιάζει τα μεγαλύτερα αποθέματα σε μέταλλα σπάνιας γης ενώ επί του παρόντος διαθέτει τα περισσότερα ορυχεία που εξορύσσουν και επεξεργάζονται ορυκτά πετρώματα μαστιχάζιτη και μοναζίτη, που είναι πλούσια σε REEs. Ωστόσο, αυτές οι διαδικασίες, όταν δεν είναι ελεγχόμενες και δεν ακολουθούν τα παγκόσμια πρότυπα και κανονισμούς, μπορούν να είναι αρκετά επιβλαβείς για το περιβάλλον. Κατά την εξόρυξη απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα σημαντικές ποσότητες οξειδίων του άνθρακα και του θείου καθώς και ραδιονουκλεΐδια, ενώ κατά την επεξεργασία τους, τα λύματα και οι αντιδραστικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό των στοιχείων και μπορούν να δραπέτευσουν στον υδροφόρο ορίζοντα και να μολύνουν τα ύδατα.

Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται σκόπιμο να θεσπιστούν νέα αυστηρότερα περιβαλλοντικά μέτρα και να βρεθούν νέοι μέθοδοι επεξεργασίας με μικρότερο περιβαλλοντικό κόστος. Όμως, πρέπει να τονιστεί ότι καμιά προσπάθεια δεν θα τελεσφορήσει αν δεν ανακτηθούν υλικά μέσω της ανακύκλωσης. Οι μπαταρίες, οι λάμπες φθορισμού, οι σκληροί δίσκοι υπολογιστών, τα κινητά τηλέφωνα και οι κινητήρες των οχημάτων διαθέτουν αξιόλογες ποσότητες REs τα οποία αν ανακυκλωθούν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές.

Σήμερα, η ανακύκλωση σπάνιων γαιών συνοδεύεται από μικρό ποσοστό επιτυχίας, ωστόσο τα πρώτα δείγματα από πειράματα που γίνονται σε εργαστηριακή κλίμακα είναι θετικά. Είναι αναγκαίο λοιπόν, να επενδυθούν κονδύλια στην έρευνα και στην ανάπτυξη οικολογικών μορφών ανακύκλωσης. Ακόμη, θα ήταν ωφέλιμο να αναπτυχθεί ένα επιχειρηματικό μοντέλο, όπου θα δίνεται κίνητρο στον καταναλωτή να επιστρέψει ο ίδιος χρησιμοποιημένες συσκευές ή οχήματα στα καταστήματα έτσι ώστε εκείνες να ανακυκλωθούν και να ανακτηθούν σημαντικές ποσότητες REs. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την παροχή ενός μικρού ποσού πίσω στον καταναλωτή ή έκπτωση στην αγορά κάποιας νέας συσκευής ή οχήματος. Από την άλλη, οι βιομηχανίες θα μπορούσαν να επωμιστούν το κόστος της ανακύκλωσης των ίδιων τους των προϊόντων αν υπήρχε μείωση των φόρων που διαθέτουν στις εκάστοτε κυβερνήσεις.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των σύγχρονων τεχνολογιών απαιτούνται μεγάλες ποσότητες μετάλλων, τα οποία για να συλλεχθούν και να χρησιμοποιηθούν στην καθαρή τους μορφή θα επιφέρουν μεγάλο περιβαλλοντικό κόστος. Ωστόσο, τα οφέλη που θα παρέχουν αυτές οι τεχνολογίες, όταν εγκατασταθούν και τεθούν σε λειτουργία, θα αντισταθμίσουν το οικολογικό αποτύπωμα που δημιουργήθηκε κατά την διαδικασία παραγωγής τους ενώ παράλληλα θα συμβάλλουν ενεργά στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Βλάχου Νικολέτα (2016). Η πολιτική οικονομία της ενεργειακής ασφάλειας της Κίνας: οι επενδύσεις της στην Ασία και οι σπάνιες γαίες.

Λυμπεροπούλου Θεόπιστη, (2016). Προσδιορισμός και ανάκτηση σπανίων γαιών από βωξίτες και ερυθρά ίλυ.

Τσίντζου Μαρία (2017). Προσρόφηση σπανίων γαιών σε ενεργά υλικά.

### **ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Ahn Nak-Kyoon, Shim Hyun-Woo, Kim Dae-Weon, Swain Basudev (2020). Valorization of waste NiMH battery through recovery of critical rare earth metal: A simple recycling process for the circular economy.

Ali Saleem (2014). Social and Environmental Impact of the Rare Earth Industries.

Arshi Praneet, Vahidi Ehsan and Zhao Fu (2016). Behind the scenes of clean energy – the environmental footprint of rare earth products.

Balaram V. (2018). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact.

Bonificio William and Clarke David (2016). Rare-Earth Separation Using Bacteria.

Bulatovic Srdjan (2010). Flotation of REO Minerals, Handbook of Flotation Reagents Chemistry Theory and Practice.

Elwert Tobias, Goldmann Daniel, Römer Felix, Buchert Matthias, Merz Cornelia, Schueler Doris and Sutter Juergen (2016). Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles.

Fernandez Viviana (2017). Rare-earth elements market: A historical and financial perspective

Ge Jianping, Wang Xibo, Guan Qing, Li Weiheng, Zhu He, Yao Min (2016). World rare earths trade network: Patterns, relations and role characteristics.

Ge Jianping, Lei Yalin (2018). Resource tax on rare earths in China: Policy evolution and market responses.

Grandell Leena, Lehtila Antti, Kivinen Mari, Koljonen Tiina, Kihlman Susanna, Laur Laura (2016). Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies.

Haque Nawshad, Hughes Anthony, Lim Seng, and Vernon Chris (2014). Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact.

Hou Wenyu, Liu Huifang, Wang Hui, Wu Fengyang (2017). Structure and patterns of the international rare earths trade: A complex network analysis.

Hurst Cindy (2010). China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn?

Innocenzi Valentina, Ippolito Nicolo Maria, De Michelis Ida, Prisciandaro Marina, Medici Franco, Veglio Francesco (2017). A review of the processes and lab-scale techniques for the treatment of spent rechargeable NiMH batteries.

Jamaludin Husna, Lahiri-Dutt Kuntala (2017). Could Lynas make a difference in the global political economy of Rare Earth Elements in future?

Korkmaz Kivanc, Alemrajabi Mahmood, Rasmuson Åke, Forsberg Kerstin (2019). Separation of valuable elements from NiMH battery leach liquor via antisolvent precipitation.

Langkau Sabine and Erdmann Martin (2016). Environmental impacts of the future supply of rare earths for magnet applications.

Leader Alexandra , Gaustad Gabrielle , Babbitt Callie (2019). The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies.

Levkowitz Lee (2010). China's Rare Earths Industry and its Role in the International Market.

Migaszewski Zdzisław, Gałuszka Agnieszka, and Migaszewski Andrzej (2014). "The study of rare earth elements in farmer's well waters of the Podwiśniówka acid mine drainage area (southcentral Poland)" , Environmental Monitoring and Assessment.



Ouyang Liuzhang, Huang Jianling, Wang Hui, Liu Jiangwen, Zhu Min (2017). Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles.

Vikström Hanna (2020). Risk or opportunity? The extractive industries' response to critical metals in renewable energy technologies, 1980-2014.

Wang Xibo, Ge Jianping, Li Jiashuo, Han Aiping (2017). Market impacts of environmental regulations on the production of rare earths: A computable general equilibrium analysis for China.

### **ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ**

[aperopia.fr](http://aperopia.fr)

[earth.org](http://earth.org)

[geology.com](http://geology.com)

[huffingtonpost.com](http://huffingtonpost.com)

[metalpedia.asianmetal.com](http://metalpedia.asianmetal.com)

[molycrop.com](http://molycrop.com)

[orykta.gr](http://orykta.gr)

[web.mit.edu](http://web.mit.edu)