



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μέθοδοι επεξεργασίας “κρίσιμων”  
μεταλλευμάτων για εφαρμογές της  
“πράσινης” οικονομίας (ηλιακά κελιά,  
ανεμογεννήτριες, συσσωρευτές)

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

1																	2
H																	He
Hydrogen																	Helium
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Lithium	Beryllium											Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen	Fluorine	Neon
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
Sodium	Magnesium											Aluminum	Silicon	Phosphorus	Sulfur	Chlorine	Argon
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Potassium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium	Bromine	Krypton
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdenum	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silver	Cadmium	Indium	Tin	Antimony	Tellurium	Iodine	Xenon
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	Lanthanide series	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Cesium	Barium		Hafnium	Tantalum	Tungsten	Rhenium	Osmium	Iridium	Platinum	Gold	Mercury	Thallium	Lead	Bismuth	Polonium	Astatine	Radon
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra	Actinide series	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
Francium	Radium		Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Boronium	Hassium	Moscovium	Darmstadtium	Roentgenium	Copernicium	Ununtrium	Flerovium	Ununpentium	Livermorium	Ununseptium	Ununoctium
% of metal's global primary production obtained as companion 																	

Όνοματεπώνυμο σπουδαστή: Νικόλαος Ψώρας

Επιβλέπων Καθηγητής: κ. Κωνσταντίνος Τσακαλάκης





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μέθοδοι επεξεργασίας “κρίσιμων”  
μεταλλευμάτων για εφαρμογές της  
“πράσινης” οικονομίας (ηλιακά κελιά,  
ανεμογεννήτριες, συσσωρευτές)

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όνοματεπώνυμο σπουδαστή: Νικόλαος Ψώρας

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Τσακαλάκης

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ...../...../.....

Κωνσταντίνος Τσακαλάκης, Καθηγητής

Δημήτρης Δαμίγος, Καθηγητής

Άνθιμος Ξενίδης, Καθηγητής





## Περίληψη

Τα κρίσιμα μέταλλα αποτελούν ζωτικής σημασίας υλικά για την αιφόρο ανάπτυξη παγκοσμίως. Η κρισιμότητά τους έγκειται στο γεγονός ότι δεν είναι δυνατόν ο σαφής υπολογισμός των αποθεμάτων τους στον φλοιό της γης, καθώς η απόλησή τους γίνεται ως υποπροϊόντα κατά την εξόρυξη και παραγωγή ενός κύριου μετάλλου, όπως ο Χαλκός, το Νικέλιο κ.α. Επειδή, λοιπόν, οι ποσότητες παραγωγής τους είναι άγνωστες και όχι εύκολα προσδιορίσιμες, καθίσταται επιτακτική ανάγκη η δημιουργία νέων τεχνολογιών ανακύκλωσης, ώστε, αφενώς να καλυφθεί ένα μέρος της ζήτησης και αφετέρου να ενισχυθεί η κυκλική οικονομία. Αυτό θα βοηθήσει σημαντικά στην αγορά των κρίσιμων μετάλλων, καθώς υπάρχουν πολλοί γεωπολιτικοί και οικονομικοί λόγοι που επηρεάζουν σημαντικά την προσφορά τους. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό, καθώς τα περισσότερα κρίσιμα μέταλλα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που προωθούν την πράσινη οικονομία και την βιώσιμη ανάπτυξη, όπως στις μπαταρίες και στα φωτοβολταϊκά πάνελς. Οι τεχνολογίες αυτές ανθίζουν σημαντικά τα τελευταία χρόνια στα περισσότερα κράτη του κόσμου, ώστε να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε όλον τον πλανήτη. Πιο συγκεκριμένα, στις μπαταρίες, η προσθήκη Κοβαλτίου αυξάνει την χωρητικότητά τους, στα ηλιακά κελιά, η προσθήκη Ινδίου και Τελλούριου αυξάνει την απορροφητική ικανότητα ηλιακής ενέργειας, και στις ανεμογεννήτριες, η προσθήκη Νεοδύμιου στον συσσωρευτή ενέργειας βελτιώνει την ικανότητα μετατροπής της κινητικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Για τον λόγο αυτό, αναλύονται περαιτέρω το Κοβάλτιο και το Ίνδιο, τα οποία είναι από τα πιο σημαντικά κρίσιμα μέταλλα για αυτές τις εφαρμογές, αλλά και για άλλες. Το Κοβάλτιο είναι συνοδό μέταλλο της εξόρυξης Νικελίου και Χαλκού, και χρησιμοποιείται κυρίως στις μπαταρίες. Εμφανίζεται σε υδροθερμικά, μαγματικά και λατεριτικά κοιτάσματα, με τα περισσότερα αποθέματα να απαντώνται στην Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, η οποία είναι και ο μεγαλύτερος παραγωγός. Η ζήτηση για Κοβάλτιο έχει αυξηθεί πολύ τα τελευταία χρόνια και προβλέπεται να αυξηθεί ακόμα περισσότερο στο άμεσο μέλλον. Το Ίνδιο είναι συνοδό μέταλλο της εξόρυξης Χαλκού και Ψευδαργύρου, και χρησιμοποιείται κυρίως στις οθόνες LED και στα ηλιακά πάνελς. Εμφανίζεται κυρίως σε ηφαιστειακά και ιζηματογενή κοιτάσματα, με τα περισσότερα αποθέματα να απαντώνται στην Κίνα, η οποία είναι και ο μεγαλύτερος παραγωγός. Όπως για το Κοβάλτιο, έτσι και για το Ίνδιο η ζήτηση έχει αυξηθεί πολύ τα τελευταία χρόνια, καθώς οι πολύτιμες ιδιότητές του βρίσκουν όλο και περισσότερο εφαρμογή σε νέες τεχνολογίες. Η κρισιμότητα - σημαντικότητα των παραπάνω, θα δώσει το έναυσμα σε κράτη και εταιρείες να υλοποιήσουν στόχους κυκλικής οικονομίας στο άμεσο μέλλον, με γνώμονα την αιφόρο ανάπτυξη.

## **Abstract**

Critical metals are vital for sustainable development worldwide. Their criticality lies in the fact that it is not possible to clearly estimate their reserves in the earth's crust, as their extraction is done as by-products during the mining of a major metal, such as Copper, Nickel, etc. As the quantities produced are unknown and unpredictable, it is therefore imperative to create new recycling technologies in order, on the one hand, to meet part of the demand and, on the other hand, to strengthen the circular economy. This will greatly help the market for critical metals, as there are many geopolitical and economic reasons that have a significant impact on their supply. This is important as most critical metals are used in applications that promote the green economy and sustainable development, such as batteries, photovoltaic panels and accumulators. These technologies have been booming significantly in recent years in most countries of the world to reduce greenhouse gas emissions across the globe. More specifically, in batteries, the addition of Cobalt increases their capacity; in solar cells, the addition of Indium and Tellurium increases the solar energy absorption capacity; and in wind turbines, the addition of Neodymium to the energy accumulator improves the ability to convert kinetic energy into electricity. For this reason, cobalt and Indium, which are among the most important critical metals for these applications and others, are discussed further. Cobalt is a by-product of nickel and copper mining, and is used mainly in batteries. It occurs in hydrothermal, ore and lateritic deposits, with most reserves occurring in the Democratic Republic of Congo, which is the largest producer. Demand for cobalt has increased greatly in recent years and is projected to increase even more in the near future. Indium is a by-product of copper and zinc mining, and is mainly used in LED screens and solar panels. It occurs mainly in volcanic and sedimentary deposits, with most reserves occurring in China, which is the largest producer. As with cobalt, demand for Indium has increased greatly in recent years as its valuable properties are increasingly being applied to new technologies. The critical importance of the above will trigger states and companies to implement circular economy goals in the near future, with a view to sustainable development.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract.....	vi
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Γενικά στοιχεία.....	1
2. Κρίσιμα μέταλλα: μια περίπλοκη εφοδιαστική αλυσίδα.....	7
2.1. Γενικά.....	7
2.2. Σκέψεις για την προσφορά και την ζήτηση.....	14
2.3. Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση μετάλλων.....	18
2.4. Το πρότυπο της κρισιμότητας.....	21
3. Η εξορυκτική βιομηχανία και η προμήθεια κρίσιμων μετάλλων.....	28
3.1. Αγορά.....	28
3.2. Φυσικοί περιορισμοί.....	33
3.3. Κρίσιμα ορυκτά και ο ρόλος της Κίνας.....	34
4. Ανακύκλωση των κρίσιμων μετάλλων.....	35
4.1. Γενική εικόνα.....	35
4.2. Στάδια ανακύκλωσης.....	40
4.3. Τεχνικές ανακύκλωσης.....	43
5. Κοβάλτιο (Co).....	45
5.1. Τύποι κοιτασμάτων.....	46
5.2. Εξόρυξη, επεξεργασία και εμπλουτισμός.....	49
5.3. Παγκόσμια παραγωγή και εμπόριο.....	53
5.4. Χρήσεις, ανακύκλωση και υποκατάστατα.....	56
5.5. Διακύμανση της τιμής και προοπτική για το μέλλον.....	59
6. Ίνδιο (In).....	65
6.1. Ορυκτολογία και κατηγορίες κοιτασμάτων.....	66
6.2. Μέθοδοι εξαγωγής, επεξεργασίας και εμπλουτισμού.....	69
6.3. Προδιαγραφές και χρήσεις.....	73
6.4. Εμπόριο και αποθέματα.....	78
6.5. Ανακύκλωση και υποκατάστατα.....	82
6.6. Διακύμανση της τιμής και προοπτική για το μέλλον.....	85

7. Συμπεράσματα.....	88
Βιβλιογραφία.....	91

## **Λίστα σχημάτων, πινάκων και εικόνων**

**Πίνακας 1.1:** Λίστα με τα κυριότερα μέταλλα

**Πίνακας 2.1:** Παραπροϊόντα μέταλλα

**Σχήμα 1.1:** Κρίσιμα μέταλλα και εφαρμογές τους στην αειφόρο ανάπτυξη

**Σχήμα 1.2:** Χρήση κρίσιμων μετάλλων σε φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες ανά τον κόσμο

**Σχήμα 1.3:** Κατηγορίες αποθεμάτων

**Σχήμα 2.1:** Στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας

**Σχήμα 2.2:** Συμμετοχή των κύριων παγκόσμιων προμηθευτών CRM στην ευρωπαϊκή ζήτηση

**Σχήμα 2.3:** Παραγωγή πρωτογενών CRMs στην ΕΕ σε τόνους

**Σχήμα 2.4:** Προσδιορισμός κρίσιμων μετάλλων

**Σχήμα 2.5:** Διαγράμματα στατικού χρόνου ζωής Cu και Ni

**Σχήμα 2.6:** Τρέχουσα συμβολή της ανακύκλωσης στην κάλυψη της ζήτησης CRM στην ΕΕ

**Σχήμα 2.7:** Σχέση ζήτησης και χρόνου με την συνδρομή της ανακύκλωσης

**Σχήμα 2.8:** Ο πίνακας κρισιμότητας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής

**Σχήμα 2.9:** Ορυκτά ως συνάρτηση της συγκέντρωσης της παραγωγής και της υποκατάστασης

**Σχήμα 2.10:** Οικονομική σημασία το 2030

**Σχήμα 3.1:** Οι μεγαλύτερες εταιρείες εξόρυξης στον κόσμο με βάση την κεφαλαιοποίηση της αγοράς

**Σχήμα 4.1:** Βιώσιμη χρήση των μετάλλων κατά μήκος του κύκλου ζωής των προϊόντων

**Σχήμα 5.1:** Διάγραμμα Ροής Co

**Σχήμα 5.2:** Διαγραμμα Ροής Co

**Σχήμα 5.3:** Co Flowsheet με α) τήξη flash smelting και μετατροπής θειούχου μεταλλεύματος νικελίου και β) όξινης εκχύλισης υψηλής πίεσης λατεριτικού μεταλλεύματος

**Σχήμα 5.4:** Η κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής μετάλλου κοβαλτίου το 2019 ανά χώρα

**Σχήμα 5.5:** Παγκόσμια παραγωγή ορυχείων κοβαλτίου από το 1950 έως το 2019

**Σχήμα 5.6:** Οι κυριότερες χώρες εξαγωγής μεταλλευμάτων και συμπυκνωμάτων κοβαλτίου και εξευγενισμένου μετάλλου το 2018

**Σχήμα 5.7:** Η μέση τριμηνιαία τιμή του κοβαλτίου

**Σχήμα 5.8:** Διακύμανση της τιμής του Κοβαλτίου στο χρηματιστήριο (LME) τα τελευταία 10 χρόνια

**Σχήμα 5.9:** Πρόβλεψη κατανάλωσης κοβαλτίου

**Σχήμα 5.10:** Προοπτικές τιμών κοβαλτίου

**Εικόνα 5.1:** Γενικευμένο διάγραμμα μίας μπαταρίας

**Σχήμα 6.1:** Διάγραμμα ροής δευτερογενούς παραγωγής ινδίου από συμπυκνώματα Zn

**Σχήμα 6.2:** Διάγραμμα ροής Ινδίου από μεταλλεύματα Zn στο κοιτάσμα Kidd Creek

**Σχήμα 6.3:** Γενικευμένο διάγραμμα που δείχνει τη δομή ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

**Σχήμα 6.4:** Φωτοβολταϊκές παραγωγικές δυνατότητες από το 2016 έως το 2022

**Σχήμα 6.5:** Διακύμανση της τιμής του Ινδίου από το 1936 έως το 2011

**Σχήμα 6.6:** Η διακύμανση της τιμής του Ινδίου από το 2017 έως σήμερα

**Εικόνα 6.1:** Παρουσίαση φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Γενικά στοιχεία

Τα ορυκτά είναι απαραίτητα για την οικονομική ανάπτυξη και τη διατήρηση και βελτίωση του επιπέδου διαβίωσης των ανθρώπων. Για όλες τις ορυκτές ύλες παρατηρείται ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης. Αυτό κρίνεται σαν ένα αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού της γης, της ανόδου του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων των υπανάπτυκτων χωρών, της καταναλωτικής μανίας που χαρακτηρίζει κοινωνίες των αναπτυσσόμενων χωρών και της τεχνολογικής εξέλιξης.

Από υπολογισμούς των Ηνωμένων Εθνών κατά το διάστημα 2010-2040 ο πληθυσμός της γης θα αυξηθεί κατά 14%, από 6,9 σε 9,0 δισεκατομμύρια. Το ίδιο χρονικό διάστημα το μέσο κατά κεφαλήν εισόδημα εκτιμάται ότι θα αυξηθεί από US\$ 10.000 σε 26.000, δηλαδή θα σημειώσει αύξηση κατά 160%. Είναι αξιοσημείωτο ότι η σχέση αύξησης της ζήτησης των επιμέρους ορυκτών υλών δεν είναι ίδια για όλο τον κόσμο. Σε οικονομικά υπανάπτυκτες περιοχές η ζήτηση για μέταλλα που είναι απαραίτητα για τη βελτίωση των υποδομών, όπως ο σίδηρος και ο χαλκός που είναι αναγκαία σε κατασκευές και επέκταση χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, είναι πολύ μεγαλύτερη από ό,τι για μέταλλα που έχουν μεγάλη κατανάλωση σε πλούσιες κοινωνίες (π.χ. διοξείδιο τιτανίου για χρωστικές, βορικά άλατα για παραγωγή υάλινων αντικειμένων, χρυσός για κοσμήματα, πολύτιμοι λίθοι).

Με την πάροδο των αιώνων και την εξέλιξη της υψηλής τεχνολογίας δημιουργούνται ανάγκες για εντατική χρήση ορισμένων στοιχείων σε νέες εφαρμογές. Αυτό είναι αποτέλεσμα κυρίως της ραγδαίας αύξησης της παγκόσμιας κατανάλωσης φθηνών ηλεκτρονικών συσκευών (π.χ. κινητά τηλέφωνα, tablets, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, σύγχρονα ιατρικά διαγνωστικά μηχανήματα, συστήματα ηλεκτρονικής πλοήγησης), της παραγωγής καθαρής ενέργειας (παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές, την προστασία του περιβάλλοντος (π.χ. υβριδικά αυτοκίνητα, καταλύτες) και τις εξελίξεις στο χώρο των στρατιωτικών τεχνολογιών. Έτσι ο χάρτης της παγκόσμιας παραγωγής και ζήτησης ορυκτών έχει αλλάξει, αφού ορισμένες χώρες φαίνεται να είναι κοιτασματολογικά ευνοημένες και να διαθέτουν μεγάλα κοιτάσματα ορυκτών, από τα οποία παράγονται αυτά τα στοιχεία σε βαθμό που να εξελίσσονται σε μονοπώλια. Αυτό είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για τη βιομηχανία παραγωγής των τελικών προϊόντων, αφού η τροφοδοσία της με τα απαραίτητα ορυκτά και μέταλλα μπορεί να εξαρτάται από την ποσότητα και τις τιμές που ο μονοπωλιακός χαρακτήρας παραγωγής και εμπορίας δημιουργεί.

Τα ορυκτά και μέταλλα, τα οποία κρίνεται ότι είναι απαραίτητα για τις παραπάνω εφαρμογές και δεν διατίθενται στην αγορά από πολλούς παραγωγούς σε όση ποσότητα είναι αναγκαία, ονομάζονται «κρίσιμα». Τα ορυκτά και μέταλλα αυτής της κατηγορίας δεν εμφανίζουν όλα τον ίδιο βαθμό «κρисиμότητας», αφού αυτό είναι συνάρτηση γεωλογικών παραγόντων, εξέλιξης της τεχνολογίας παραγωγής και χρήσης, περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή και κατανάλωση, την ανακάλυψη υποκατάστατων κλπ. Επίσης η «κρисиμότητα» δεν είναι ίδια για όλα τα ορυκτά και μέταλλα και για όλους τους χρήστες. Σαν παράδειγμα να αναφερθεί ότι για τη βιομηχανία παραγωγής υβριδικών αυτοκινήτων ο χρυσός δεν είναι κρίσιμο μέταλλο, ενώ το νεοδύμιο είναι.

Αρκετές χώρες έχουν εκτιμήσει τις ανάγκες της βιομηχανίας τους σε σχέση με την παραγωγή τελικών προϊόντων και την εξασφάλιση των πρώτων υλών και έχουν συντάξει καταλόγους ορυκτών και μετάλλων με βάση τον βαθμό κρισιμότητάς τους. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αξιολόγησε 54 ορυκτά και μέταλλα ως προς την κρισιμότητά τους για την Ευρώπη. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι 27 από τα 54 που εξετάστηκαν ως υποψήφια είναι κρίσιμα.

Πίνακας 1.1: Λίστα με τα κυριότερα κρίσιμα μέταλλα (JRC science)

Critical raw materials			
Antimony	Fluorspar	LREEs	Phosphorus
Baryte	Gallium	Magnesium	Scandium
Beryllium	Germanium	Natural graphite	Silicon metal
Bismuth	Hafnium	Natural rubber	Tantalum
Borate	Helium	Niobium	Tungsten
Cobalt	HREEs	PGMs	Vanadium
Coking coal	Indium	Phosphate rock	

Οι πρώτες ύλες, ιδίως τα μέταλλα, είναι πολύ σημαντικές για τη βιώσιμη λειτουργία, καθώς είναι απαραίτητες για τα προϊόντα υψηλής τεχνολογίας, όπως οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι μπαταρίες, οι καταλύτες, τα καλώδια οπτικών ινών, τα συνθετικά καύσιμα κ.λπ. Η ευρωπαϊκή βιομηχανία χρειάζεται επαρκή πρόσβαση σε ορισμένες ορυκτές πρώτες ύλες για την εύρυθμη λειτουργία της οικονομίας της ΕΕ. Ωστόσο, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές από τρίτες χώρες στρατηγικά σημαντικών μετάλλων, τα οποία θεωρούνται κρίσιμα λόγω της οικονομικής τους αξίας, των υψηλών κινδύνων εφοδιασμού που επηρεάζονται από τις στρεβλώσεις της αγοράς και της συνεχούς μείωσης της διαθεσιμότητάς τους. Μια ομάδα εμπειρογνομόνων υπό την αιγίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής δημοσίευσε το 2010 έναν κατάλογο 14 μεταλλικών πρώτων υλών που θεωρούνται "κρίσιμες" για τη μελλοντική βιώσιμη ανάπτυξη της ΕΕ: αντιμόνιο, βηρύλλιο, κοβάλτιο, φθόριο, γάλλιο, γερμάνιο, γραφίτης, ίνδιο, μαγνήσιο, νιόβιο, μέταλλα της ομάδας του λευκόχρυσου, σπάνιες γαίες, ταντάλιο και βολφράμιο. Λόγω των χαμηλών συγκεντρώσεών τους στον φλοιό της γης, τα κρίσιμα μέταλλα παράγονται ως υποπροϊόντα άλλων μετάλλων που εξορύσσονται. Τα τελευταία χρόνια τα ζητήματα που αφορούν την πολιτική της ΕΕ για τη διασφάλιση του εφοδιασμού με πρώτες ύλες μέσω της βελτίωσης της αποδοτικότητας των πόρων και της ανακύκλωσης, βρίσκονται ψηλά στην πολιτική ατζέντα. Τον Νοέμβριο του 2008 εγκρίθηκε και δημοσιεύθηκε από την ΕΕ η νέα ευρωπαϊκή πολιτική με τίτλο: "Η πρωτοβουλία για τις πρώτες ύλες για την κάλυψη κρίσιμων αναγκών για την ανάπτυξη και την απασχόληση στην Ευρώπη". Η πρωτοβουλία αυτή αναφέρεται στην ανάγκη της ΕΕ να ακολουθήσει μια ολοκληρωμένη πολιτική για την εξασφάλιση της πρόσβασης σε ορυκτές πρώτες ύλες, προκειμένου να ενισχυθεί η ανταγωνιστικότητα για την ανάπτυξη και την απασχόληση. Η ΕΕ διαθέτει πολλά μεταλλευτικά ορυκτά κοιτάσματα, παρόλο που η εξερεύνηση και

η εξόρυξή τους αντιμετωπίζουν αυξημένο ανταγωνισμό για διάφορες χρήσεις γης και ένα ιδιαίτερα προστατευόμενο περιβάλλον, καθώς και αρκετούς περιορισμούς στην πρόσβαση στα κοιτάσματα αυτά.

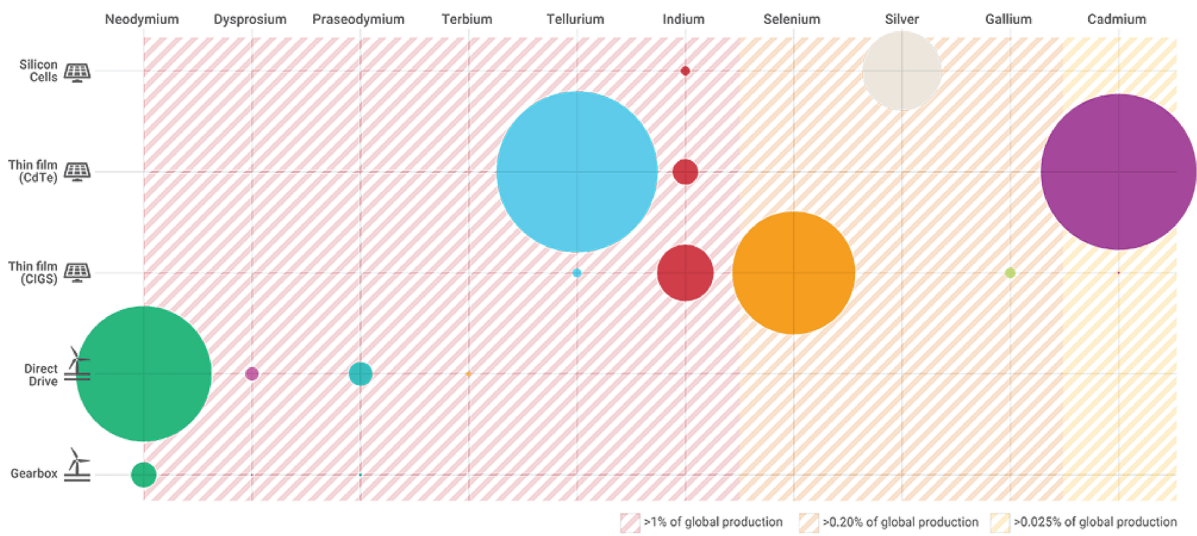
Αυτήν την στιγμή τα παγκόσμια αποθέματα σε κρίσιμα μέταλλα δεν επαρκούν για τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες και τις νέες εφαρμογές της τεχνολογίας. Μέσα σε αυτές είναι οι μπαταρίες, τα φωτοβολταϊκά πάνελς και οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες αποτελούν τις σημαντικότερες εφαρμογές των κρίσιμων μετάλλων, καθώς χωρίς αυτά τα μέταλλα δεν μπορούν να κατασκευαστούν. Για αυτές λοιπόν τις εφαρμογές καταναλώνεται το συντριπτικό μερίδιο της παραγωγής τους. Βλέποντας την συνολική παγκόσμια εικόνα και με βάση την Συμφωνία του Παρισιού, για ένα πιο πράσινο μέλλον με τον περιορισμό του άνθρακα, η παγκόσμια παραγωγή των περισσότερων κρίσιμων μετάλλων θα χρειαστεί να αυξηθεί τουλάχιστον 12 φορές περισσότερο. Οπότε, η παγκόσμια μεταβολή της ενεργειακής κατάστασης απαιτεί ραγδαίο και απότομο μετασχηματισμό στις καινούργιες ανανεώσιμες τεχνολογίες, με γνώμονα πάντα την συμφωνία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Το τελευταίο βέβαια θα δημιουργήσει γεωπολιτικές διαφορές, καθώς οι χώρες που παράγουν τα περισσότερα κρίσιμα μέταλλα είναι πολύ λίγες, ενώ οι χώρες που έχουν τον απαραίτητο εξοπλισμό και την τεχνογνωσία για την ανακύκλωσή τους είναι ακόμα λιγότερες. Επομένως, η δύναμη της ενέργειας θα μεταφερθεί από τους υδρογονάνθρακες στην κυριαρχία των κρίσιμων μετάλλων.

Ένα δεύτερο πολύ σημαντικό ζήτημα, είναι ο πολύ αργός ρυθμός με τον οποίο γίνεται η παραγωγή των κρίσιμων μετάλλων. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα ορυχείο εκμετάλλευσης κρίσιμων μετάλλων χρειάζεται 10 με 20 χρόνια για να αρχίσει την παραγωγή. Το τελευταίο μάλιστα, όπως είναι φανερό, χρειάζεται και τεράστια επενδυτικά κεφάλαια, και σε συνδυασμό με την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση παγκοσμίως, δυσχεραίνεται ακόμα περισσότερο τόσο η αύξηση της παραγωγής, όσο και η δημιουργία καινούργιων εκμεταλλεύσεων.

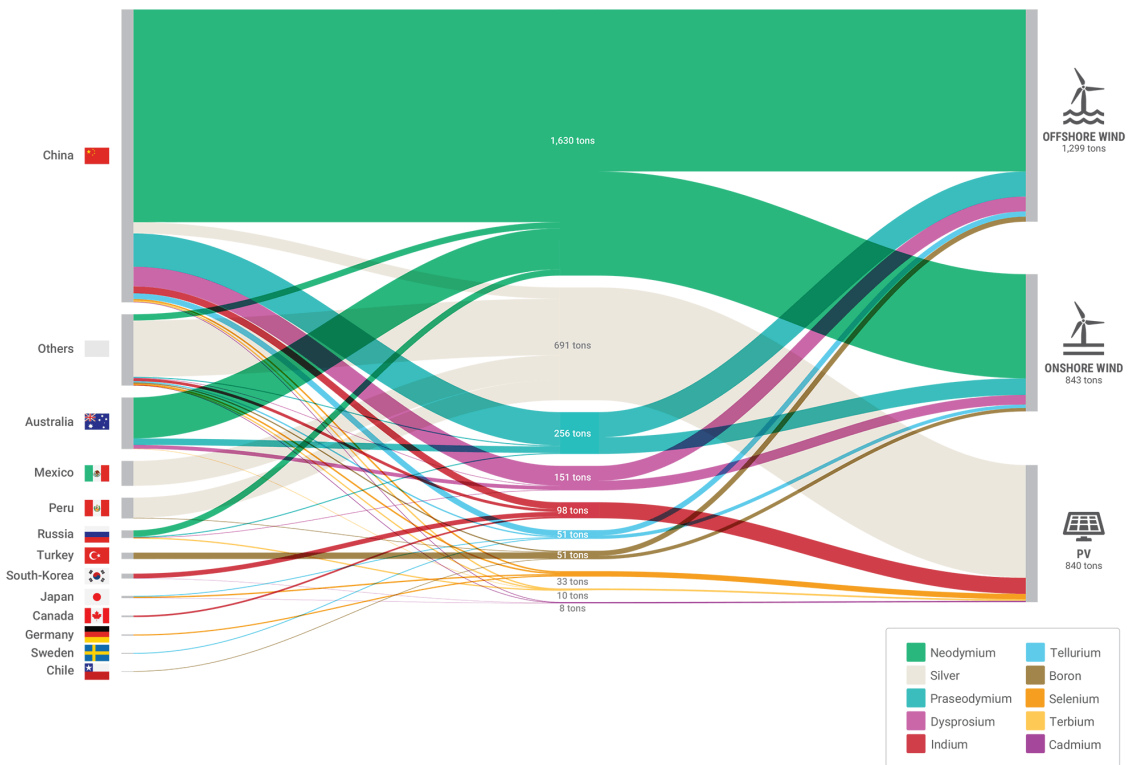
Για να εξασφαλισθεί η επαρκής παροχή κρίσιμων μετάλλων πρέπει να εφαρμοστεί μία αυστηρή πολιτική παγκοσμίως, η οποία να περιέχει στρατηγικές κυκλικής οικονομίας, ώστε να μειωθεί η ανάγκη από κρίσιμα μέταλλα. Οπότε για να αποφευχθεί μία μελλοντική ανεπάρκεια κρίσιμων μετάλλων θα πρέπει είτε να υπάρξει μείωση της χρησιμοποίησής τους, μέσω αντικατάστασής τους με εναλλακτικά υλικά, είτε να υπάρξει αύξηση της ανακύκλωσής τους, είτε να δημιουργηθούν περισσότερες εκμεταλλεύσεις όπως για παράδειγμα στην Ευρώπη, η οποία προμηθεύεται κρίσιμα μέταλλα εξ ολοκλήρου εκτός από τα σύνορά της.

Για να επιτευχθεί αυτή η ενεργειακή μεταβολή στην ταχύτητα που απαιτείται για να εκπληρωθούν οι στόχοι της κλιματικής αλλαγής, θα πρέπει να απαντηθούν κάποια ερωτήματα, όπως πού μπορούμε να τοποθετήσουμε τις ανεμογεννήτριες και τα ηλιακά πάνελς, αν έχουμε επαρκή αριθμό εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού για να τα εγκαταστήσει και να τα συντηρήσει και από πού θα βρεθεί η χρηματοδότηση για την υλοποίηση του έργου. Ωστόσο το πιο καίριο ερώτημα είναι το πώς θα προμηθευτούμε τα απαραίτητα υλικά που χρειάζονται για την απαιτούμενη χωρητικότητα ανανεώσιμων ενεργειών. Ολόκληρος ο κόσμος εξαρτάται από μία συγκεκριμένη ομάδα σπάνιων γαιών και από μία άλλη ομάδα μετάλλων, τα οποία είναι απαραίτητα για την θεμελίωση, παραγωγή και αποθήκευση σχεδόν όλων των ανανεώσιμων τεχνολογιών. Για παράδειγμα, το Νεοδύμιο στις ανεμογεννήτριες, το Τελλούριο στα ηλιακά πάνελς και η Πλατίνα στους καταλύτες.





Σχήμα 1.1: Κρίσιμα μέταλλα και εφαρμογές τους στην αιφόρο ανάπτυξη (metabolic)



Σχήμα 1.2: Χρήση κρίσιμων μετάλλων σε φωτοβολταικά και ανεμογεννήτριες ανά τον κόσμο (metabolic)

Το Σχήμα 1.2 (metabolic) δείχνει την προέλευση των μετάλλων που χρειάζονται για να επιτευχθούν οι στόχοι της ενεργειακής μεταβολής έως το 2030. Η αριστερή πλευρά του διαγράμματος δείχνει την προέλευση των μετάλλων, η οποία είναι βασισμένη στην σημερινή παγκόσμια εικόνα της παραγωγής τους. Η δεξιά πλευρά αντιπροσωπεύει την αθροιστική ζήτηση μετάλλων (σε τόννους) για εφαρμογές σε ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά έως το 2030. Με βάση το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι όλη η Ευρώπη εξαρτάται άμεσα από το εξωτερικό και κυρίως από την Κίνα για τον εφοδιασμό κρίσιμων μετάλλων. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό, όχι μόνο για την Ευρώπη, αλλά και για την παραγωγή κρίσιμων μετάλλων, καθώς πρέπει να μοιραστεί η παραγωγή και η διάθεση κρίσιμων μετάλλων ανά τον κόσμο. Ακόμη, η Κίνα δεν είναι μόνο ο “μεγαλομέτοχος” στα κρίσιμα μέταλλα, καθώς είναι επίσης η χώρα με τα περισσότερα εργοστάσια επεξεργασίας και ανακύκλωσής τους. Τέλος, παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι παίκτες όπως η Αυστραλία και η Τουρκία είναι και αυτές σημαντικές χώρες εξόρυξης κρίσιμων μετάλλων, ιδιαίτερα όσον αφορά το Νεοδύμιο και το Βόριο αντίστοιχα.

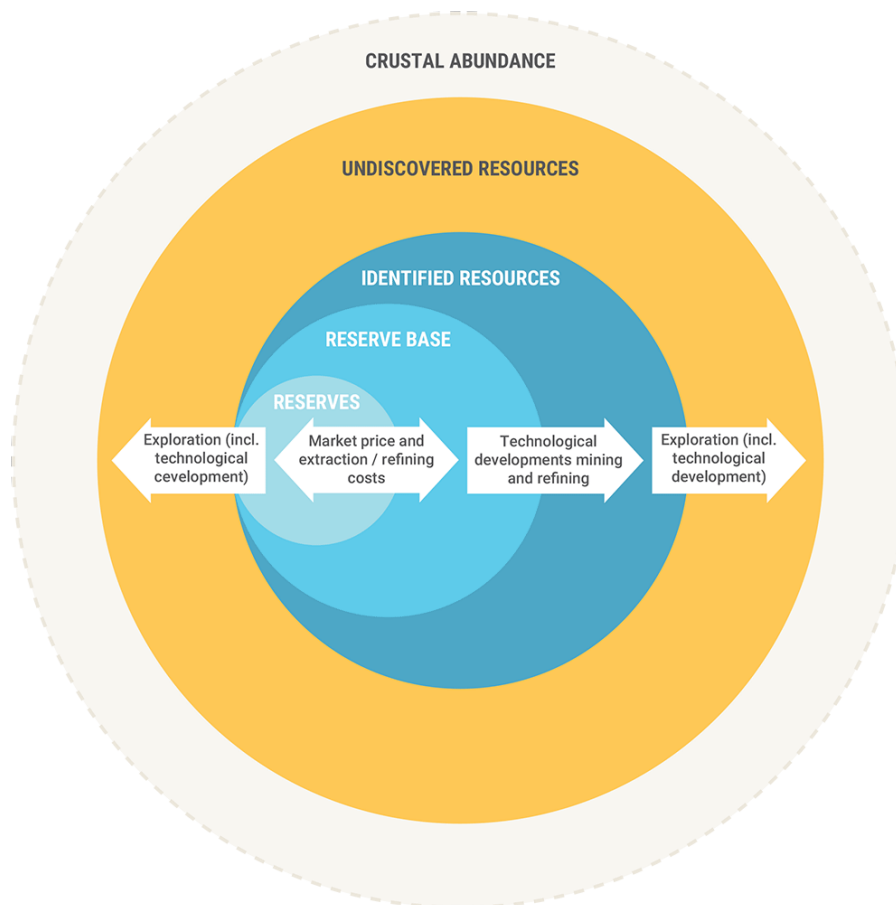
Η μετάβαση της ενεργειακής κατάστασης και της κυκλικής οικονομίας έχουν άμεση αλληλεξάρτηση. Η συνεργασία των δύο είναι απαραίτητη για ένα βιώσιμο και ευοίωνο μέλλον, αφενώς γιατί η σωστή χρησιμοποίηση των αποθεμάτων θα καλύψει επαρκώς την ζήτηση της ενεργειακής μεταβολής και αφετέρου η ενεργειακή μεταβολή θα “σεβαστεί” τα υλικά αυτά, μέσω της ανακύκλωσής τους.

Η Συμφωνία του Παρισιού, μεταξύ άλλων, αναφέρει σε γενικές γραμμές ως βασικό σενάριο την παραγωγή 49 TWh ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που προέρχονται από την υπεράκτια εκμετάλλευση του αέρα με την βοήθεια των ανεμογεννητριών. Με άλλα λόγια, αυτό συνεπάγεται συνολικό αριθμό περίπου 1.460 ανεμογεννητριών, ισχύος 8 MW η καθεμία. Επιπλέον, υπάρχει στόχος παραγωγής 35 TWh ρεύματος στην ηπειρωτική χώρα (στεριά), με τον συνδυασμό ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάνελς.

Οι πιο νέες τεχνολογίες είναι πιο αποδοτικές και πιο φθηνές σε σχέση με τις παλαιότερες, καθώς οι επιστήμονες και οι μηχανικοί προσπαθούν να κάνουν περισσότερες έρευνες και δοκιμές, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται όλο και περισσότερο στις ιδιότητες των κρίσιμων μετάλλων. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο παραδείγματα:

- Λεπτό φιλμ καδμίου με τελλούριου στα κελιά φωτοβολταϊκών πάνελς δίνουν την καλύτερη απόδοση όσον αφορά τους ρύπους CO<sub>2</sub> και και την ενεργειακή απόδοση. Από την άλλη, ο συνδυασμός αυτός απαιτεί μεγάλες ποσότητες Κάδμιου και Τελλούριου για την κατασκευή του, και να σημειωθεί ότι το Τελλούριο είναι από τα πιο σπάνια μεταλλοειδή.
- Για τις ανεμογεννήτριες χρειάζονται μόνιμοι μαγνήτες, οι οποίοι έχουν βασικά στοιχεία στην δομή τους το Νεοδύμιο και το Δυσπρόσιο. Αυτό τους καθιστά πιο ακριβούς στην κατασκευή τους, αλλά κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους είναι πιο οικονομικοί και πιο αποδοτικοί.

Μία από τις πιο συνηθισμένες ερωτήσεις που αφορούν τα ορυκτά είναι: “Πόσα μας έχουν απομείνει;” ή “Πόσα έχουν μείνει στον φλοιό της Γης;”. Μολονότι αυτές οι ερωτήσεις μπορούν να απαντηθούν, στην πραγματικότητα είναι άσχετες και ανούσιες, καθώς το ζητούμενο ερώτημα και το πιο σωστό είναι: “Πόσο μέταλλο μπορούμε να εξακολουθήσουμε να εξορύσσουμε από την Γη;”. Ο Αμερικάνος γεωλόγος Brian Skinner σημείωσε ότι σχεδόν όλα τα μέταλλα που είναι διαθέσιμα στον φλοιό της Γης είναι ενσωματωμένα σε κοινά πετρώματα, όπως ο γρανίτης. Η εμπορική εξόρυξη στοχεύει σε μεταλλικά στρώματα, τα οποία δημιουργούνται και συγκεντρώνονται μέσω γεωλογικών διεργασιών. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πρώτη περίπτωση, χρειάζονται τεράστια ποσά ενέργειας για την απόληψη μετάλλων από γρανίτη, καθώς επίσης υπάρχουν και περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως υπερβολική χρήση νερού. Παρότι, λοιπόν, τα αποθέματα μετάλλων τα οποία είναι ενσωματωμένα στα κοινά πετρώματα αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή, η απόληψή τους δεν είναι βιώσιμη, ούτε οικονομικά ούτε περιβαλλοντικά.



Σχήμα 1.3: Κατηγορίες αποθεμάτων (metabolic)

Το παραπάνω διάγραμμα μας δείχνει τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε, σε γενικές γραμμές, τα αποθέματα των μεταλλευμάτων σε 5 διαφορετικές κατηγορίες:

1. **Κοίτασμα (reserves)** είναι το μέταλλευμα που είναι γνωστό ότι μπορεί να εκμεταλλευθεί, με βάση τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στην οικονομία και στην αγορά.
2. **Εμφάνιση (reserves base)** είναι το μέταλλευμα το οποίο μπορεί να εξορυχθεί, αλλά δεν εξορύσσεται, καθώς δεν έχει οικονομική αξία με βάση τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στην οικονομία και στην αγορά.
3. **Τα αναγνωρισμένα αποθέματα (identified resource)** είναι η ποσότητα μεταλλεύματος που γνωρίζουμε ότι υπάρχει συγκεντρωμένη στο σύνολο του φλοιού της Γης.
4. **Τα άγνωστα αποθέματα (undiscovered resource)** τα οποία πιθανότατα υπάρχουν, αλλά δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμα.
5. **Η παρουσία ή ύπαρξη στον φλοιό της γης (crustal abundance)** η οποία εκφράζει το σύνολο της ποσότητας του κάθε μετάλλου στην όσο το δυνατόν χαμηλότερη συγκέντρωση.

## 2. Κρίσιμα Μέταλλα: μία περίπλοκη εφοδιαστική αλυσίδα

### 2.1. Γενικά

Η διαθεσιμότητα και οι εφαρμογές των κρίσιμων μετάλλων συνοδεύονται από πολλές και μεγάλες αβεβαιότητες. Υπάρχουν πολλά πράγματα που δεν είναι γνωστά ή είναι δύσκολο να προβλεφθούν για την εξέλιξη της προσφοράς και της ζήτησης στο μέλλον, για τα συγκεκριμένα μέταλλα. Αυτή η αβεβαιότητα εκδηλώνεται σε διαφορετικά στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας, τα οποία είναι η παραγωγή, η διαθεσιμότητα, οι εφαρμογές και η ανακύκλωση.



Σχήμα 2.1: Στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας (metabolic)

Τα αποθέματα των κρίσιμων μετάλλων δεν είναι πάντα έγκυρα, αλλά αντιθέτως εξαρτώνται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι και η εξάρτηση από άλλα μέταλλα. Πιο συγκεκριμένα, ένας αριθμός κρίσιμων μετάλλων μπορεί να εξορυχθεί μόνο ως παραπροϊόν ενός πιο κοινού - συνηθισμένου μετάλλου, καθώς χωρίς αυτά, η παραγωγή μερικών κρίσιμων μετάλλων θα ήταν οικονομικά ασύμφορη, λόγω της μικρής περιεκτικότητας που εμφανίζονται. Για παράδειγμα, το Τελλούριο και το Ίνδιο είναι τα παραπροϊόντα της επεξεργασίας του Χαλκού και του Ψευδαργύρου. Ένας ακόμη ανασταλτικός παράγοντας είναι και ο χρόνος που χρειάζεται ένα ορυχείο κρίσιμων μετάλλων να ανοίξει. Συνήθως ο χρόνος αυτός κυμαίνεται από 10 έως 20 χρόνια και περιλαμβάνει κυρίως τις προπαρασκευαστικές εργασίες και έρευνες, την κατασκευή των απαραίτητων λειτουργικών μονάδων και των μονάδων επεξεργασίας. Επομένως, αν η ζήτηση για κρίσιμα μέταλλα αυξηθεί ραγδαία στο άμεσο μέλλον, οι παραγόμενες ποσότητες δεν θα επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών της αγοράς.

Ακολουθεί ο προβληματισμός που μπορεί να δημιουργηθεί γύρω από την διαθεσιμότητα των αποθεμάτων ενός ή περισσότερων κρίσιμων μετάλλων. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί παράγοντες που την επηρεάζουν άμεσα. Ο πρώτος και σημαντικότερος είναι η χωρική προστασία, δηλαδή οι χώρες παραγωγοί, που είναι οι κυρίαρχοι παίκτες στον κλάδο των κρίσιμων μετάλλων, περιορίζουν τις εξαγωγές με σκοπό να προσελκύσουν περισσότερες επενδύσεις στην χώρα τους. Μία από αυτές τις επενδύσεις είναι και η κατασκευή εργοστασίων επεξεργασίας μετάλλων, ώστε τα μέταλλα να διατεθούν ως προϊόντα σε εμπορεύσιμη μορφή, μέσω μεθόδων προπαρασκευής και εμπλουτισμού.

Οι περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί περιορισμοί μπορούν επίσης να επηρεάσουν ή ακόμα και να απαγορεύσουν την παραγωγή - διαθεσιμότητα των μετάλλων, καθώς οι εξορυκτικές δραστηριότητες ενδέχεται να έχουν πολλές επιπτώσεις. Οπότε, λόγω των νόμων και των κανονισμών που αφορούν το περιβάλλον και την υγεία, το κόστος επένδυσης αυξάνει σημαντικά και σε πολλές περιπτώσεις το έργο δεν υλοποιείται καν.

Ο τρίτος και τελευταίος παράγοντας που επηρεάζει την διαθεσιμότητα είναι η “υπευθυνότητα” των εταιρειών που παράγουν τα κρίσιμα μέταλλα. Πιο συγκεκριμένα, οι συνθήκες εργασίας θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καλύτερες, τόσο για την υγεία τους, όσο και για τα ανθρώπινα δικαιώματά τους.

Η ζήτηση για σχεδόν όλα τα κρίσιμα μέταλλα αυξάνεται συνεχώς, καθώς αυξάνεται η ανάγκη για εφαρμογές που περιλαμβάνουν αυτά τα μέταλλα. Αυτή η ανάπτυξη συμβαίνει κυρίως στους κλάδους των ηλεκτρονικών συσκευών (τόσο για ιδιωτική όσο και για δημόσια ανάγκη), στον κλάδο του στρατού (για κατασκευή όπλων και συστημάτων) και για εφαρμογές στην ανανεώσιμη ενέργεια. Η αβεβαιότητα που δημιουργείται εδώ, αφορά τις εφαρμογές των κρίσιμων μετάλλων και την δυσκολία αντακατάστασης αυτών των μετάλλων από τα προηγούμενα, καθώς και την ταχύτητα με την οποία χρειάζεται να γίνει η μετατόπιση της παγκόσμιας ενεργειακής πολιτικής. Εξαιτίας, λοιπόν, της περίπλοκης τεχνολογίας των καινούργιων εφαρμογών, η έρευνα που πρέπει να διεξαχθεί για την σωστή αντικατάσταση των προϋπάρχοντων μετάλλων με τα κρίσιμα είναι κοστοβόρα και χρονοβόρα.

Η ανακύκλωση των κρίσιμων μετάλλων φαίνεται να είναι μία καλή και βιώσιμη λύση για να ενισχύσει ή να συμπληρώσει την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση. Παρ'όλα αυτά, υπάρχουν ορισμένες δυσκολίες στην διεκπεραίωση αυτής της διαδικασίας, καθώς τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα αποτελούνται από πολλά διαφορετικά κράματα, ώστε να αποκτήσουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει κατά πολύ την προσπάθεια διαχωρισμού και ανάκτησης του κάθε μετάλλου. Για παράδειγμα, κατά την ανακύκλωση ενός smart κινητού τηλεφώνου, ανακτώνται περίπου 8 από τα 25 κρίσιμα μέταλλα που υπάρχουν σε αυτό, ενώ τα υπόλοιπα "χάνονται" στην διάρκεια της διεργασίας.

Η εφαρμογή των κρίσιμων μετάλλων και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι αλληλοεξαρτώμενες έννοιες. Η προσθήκη ενός ή περισσότερων κρίσιμων μετάλλων στην παραγωγή ενός κράματος αλλάζει σημαντικά την απόδοση και την σύστασή του, ώστε σε συγκεκριμένες περιπτώσεις να καταναλώνεται σημαντικά λιγότερη ενέργεια, τόσο στην δημιουργία, όσο και στην χρήση ενός τελικού προϊόντος. Για παράδειγμα, η προσθήκη Νεοδύμιου και Δυσπρόσιου σε μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στους ρότορες μιας ανεμογεννήτριας, δημιουργεί μόνιμο μαγνητικό πεδίο χωρίς την βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης, η προσθήκη Νιόβιου σε χάλυβα, ενισχύει την σκληρότητά του, όπως και η χρήση Ίνδιου, Γάλλιου και Σελήνιου απαιτείται για την δημιουργία των LED φώτων.

Οι πρώτες ύλες αποτελούν σήμερα και στο μέλλον τη βάση της οικονομίας της ΕΕ, εξασφαλίζουν θέσεις εργασίας και ανταγωνιστικότητα και είναι απαραίτητες για τη διατήρηση και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Οι μη ενεργειακές πρώτες ύλες συνδέονται με όλες τις βιομηχανίες σε όλα τα στάδια της αλυσίδας εφοδιασμού. Είναι επίσης θεμελιώδεις και επί του παρόντος αναντικατάστατες στην προώθηση της αλλαγής, για παράδειγμα, μέσω των ψηφιακών τεχνολογιών, των ενεργειακών τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα (π.χ. ηλιακά πάνελ, ανεμογεννήτριες, ενεργειακά αποδοτικός φωτισμός), της βιώσιμης μετακίνησης (π.χ. ηλεκτρικά οχήματα).

Αν και όλες οι πρώτες ύλες είναι σημαντικές, ορισμένες από αυτές προκαλούν μεγαλύτερη ανησυχία από άλλες όσον αφορά την ασφαλή και βιώσιμη προμήθεια. Οι κρίσιμες πρώτες ύλες προσδιορίζονται στην ΕΕ ως προς δύο κύριες διαστάσεις: 1) οικονομική σημασία και 2) κίνδυνος διακοπής του εφοδιασμού. Μια πρώτη ύλη ορίζεται ως κρίσιμη εάν και οι δύο διαστάσεις υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο όριο. Ο δείκτης κινδύνου εφοδιασμού στην αξιολόγηση κρισιμότητας της ΕΕ βασίζεται στη συγκέντρωση του πρωτογενούς εφοδιασμού από χώρες και στο

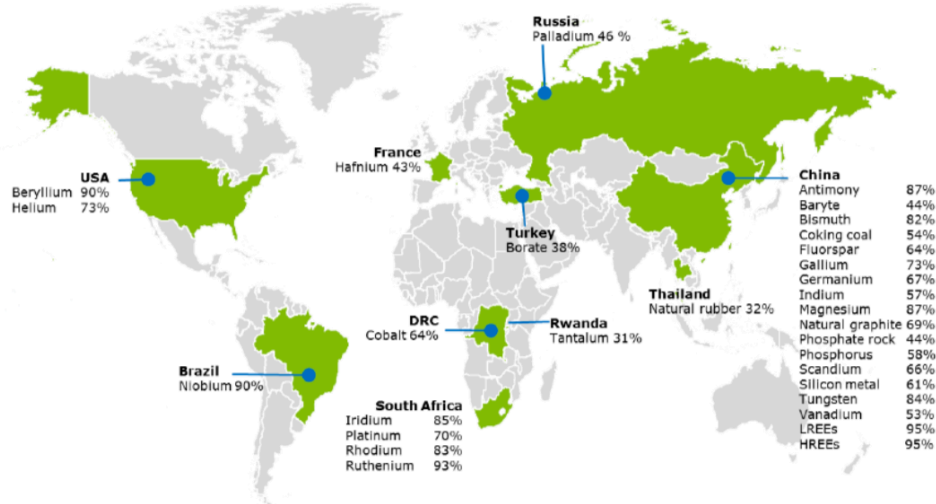
επίπεδο διακυβέρνησής τους. Η παραγωγή CRM (ανακύκλωση) και η υποκατάσταση θεωρούνται φίλτρα μείωσης του κινδύνου. Η οικονομική σημασία συσχετίζεται με το μερίδιο της ζήτησης σε έναν οικονομικό τομέα, την ακαθάριστη προστιθέμενη αξία του και τον βαθμό υποκατάστασης του υλικού.

Η αλυσίδα αξίας των CRM δεν καλύπτεται πλήρως και ομοιογενώς από την ευρωπαϊκή βιομηχανία και υπάρχει έντονη ανισορροπία μεταξύ των αρχικών σταδίων (εξόρυξη/συλλογή) και των μεταγενέστερων σταδίων (παραγωγή και χρήση). Λαμβάνοντας υπόψη την πολύ περιορισμένη προσφορά CRM από δευτερογενείς πηγές, η ανάγκη πρόσβασης σε πρωτογενείς πηγές, συμπεριλαμβανομένων των μεταλλευμάτων, των συμπυκνωμάτων και των επεξεργασμένων ή εξευγενισμένων υλικών, είναι τεράστια και ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία πλούτου - και ακόμη και την επιβίωση - των ευρωπαϊκών βιομηχανιών και των σχετικών θέσεων εργασίας και οικονομικών οφελών. Η πλειονότητα αυτών των πρωτογενών πρώτων υλών παράγεται και προέρχεται από μη ευρωπαϊκές χώρες. Αν και η Κίνα είναι ο κύριος παγκόσμιος προμηθευτής CRM, η ανάλυση επισημαίνει άλλες χώρες που αποτελούν σημαντικούς παγκόσμιους προμηθευτές συγκεκριμένων CRM, όπως οι ΗΠΑ (βηρύλλιο και ήλιο), η Ρωσία (παλλάδιο) και η Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό (κοβάλτιο).

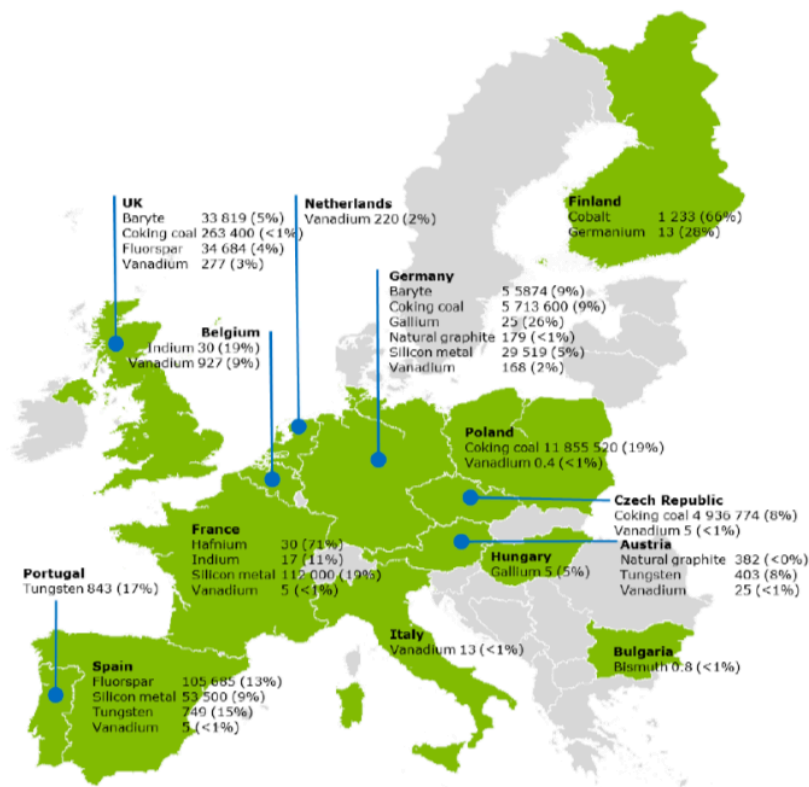
Πολλά CRMs στερούνται τα προηγούμενα στάδια της αλυσίδας αξίας στην ΕΕ: αντιμόνιο, βηρύλλιο, βορικά άλατα, μαγνήσιο, νιόβιο, PGMs, φώσφορος, σπάνιες γαίες, σκάνδιο, ταντάλιο και βανάδιο. Αυτό οφείλεται είτε στην απουσία των εν λόγω υλικών στο ευρωπαϊκό έδαφος είτε σε οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την εξερεύνηση (για την ανακάλυψη και τον χαρακτηρισμό κοιτασμάτων, την εκτίμηση πόρων και αποθεμάτων) ή την εξόρυξη (κλείσιμο υφιστάμενων ορυχείων, απροθυμία για το άνοιγμα νέων ορυχείων κ.λπ.).

Προκειμένου να τροφοδοτήσει τις βιομηχανίες και τις αγορές της, η ΕΕ δεν έχει σήμερα άλλη επιλογή για την πρόσβαση σε αυτά τα CRM παρά να εισάγει τα μεταλλεύματα και τα συμπυκνώματά τους ή τα “εξευγενισμένα” υλικά από άλλες χώρες.

Το Hafnium (Hf) είναι το μόνο CRM για το οποίο ένα κράτος μέλος της ΕΕ (Γαλλία) είναι ο κύριος παγκόσμιος παραγωγός. Για το hafnium και το ίνδιο, τα κράτη μέλη παράγουν αρκετά πρωτογενή υλικά ώστε να αποφεύγονται σημαντικές εισαγωγές από άλλες χώρες εκτός ΕΕ.



Σχήμα 2.2: Συμμετοχή των κύριων παγκόσμιων προμηθευτών CRM στην ευρωπαϊκή ζήτηση (JRC science, Recovery)

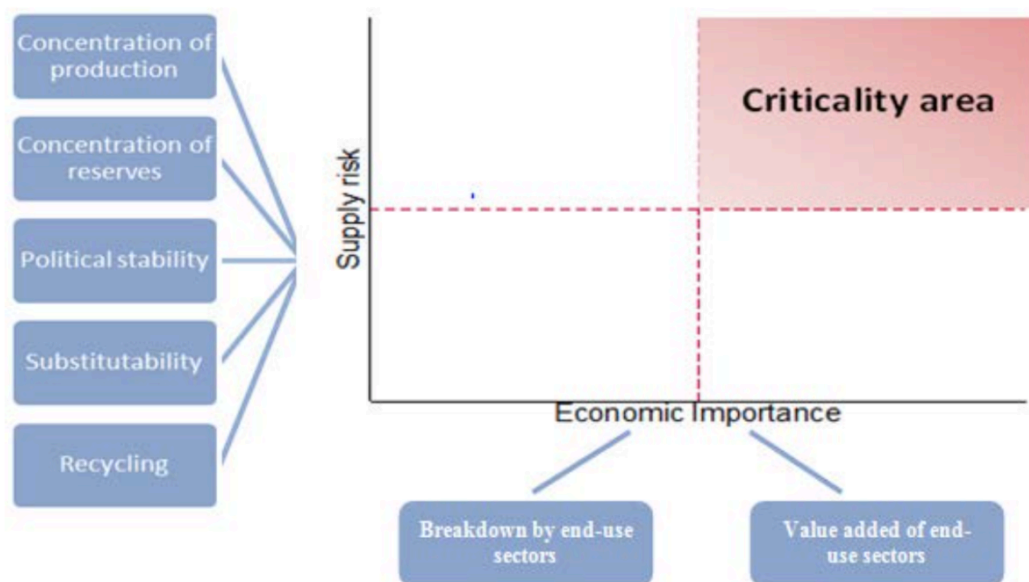


Σχήμα 2.3: Παραγωγή πρωτογενών CRMs στην ΕΕ σε τόνους (JRC science, Recovery)



Η χρήση ορυκτών και μετάλλων είναι μεγαλύτερη από ποτέ άλλοτε. Από το 1900 η παραγωγή πολλών μετάλλων στα ορυχεία έχει αυξηθεί κατά μία, δύο ή και τρεις τάξεις μεγέθους. Για ορισμένα μέταλλα, ιδίως εκείνα που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας, ο ρυθμός χρήσης αυξήθηκε ιδιαίτερα έντονα τις τελευταίες δεκαετίες, με περισσότερο από το 80% της συνολικής παγκόσμιας συσσωρευτικής παραγωγής των μετάλλων της ομάδας της πλατίνας (PGM), του ινδίου, του γαλλίου και των σπάνιων γαιών (REE) να έχει πραγματοποιηθεί από το 1980. Επίσης, γίνεται χρήση μεγαλύτερης ποικιλίας μετάλλων από ποτέ άλλοτε. Για παράδειγμα, τα κράματα και οι επιστρώσεις πτερυγίων στροβίλων χρησιμοποιούν περισσότερα από δώδεκα μέταλλα και τα τεχνολογικά προϊόντα υψηλού επιπέδου, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην ιατρική, ενσωματώνουν περισσότερα από 70 μέταλλα. Στην αναζήτηση βελτιωμένων επιδόσεων, τα μικροτσιπ χρειάζονται σήμερα περίπου 60 μέταλλα, ενώ στις δεκαετίες του 1980 και 1990 μόνο περίπου 20 ενσωματώνονταν συνήθως σε αυτές τις συσκευές.

Οι κύριοι λόγοι για τις αλλαγές αυτές είναι η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και η εξάπλωση της ευημερίας σε όλο τον κόσμο. Οι νέες τεχνολογίες, όπως αυτές που απαιτούνται για τη σύγχρονη επικοινωνία και την πληροφορική και για την παραγωγή καθαρής ενέργειας, απαιτούν επίσης σημαντικές ποσότητες πολλών μετάλλων. Υπό το πρίσμα αυτών των τάσεων έχει καταστεί σημαντική πρόκληση για την ανθρωπότητα να συνεχίσει να παρέχει τα ορυκτά που απαιτούνται για την κάλυψη αυτής της ζήτησης.



Σχήμα 2.4: Προσδιορισμός κρίσιμων μετάλλων (OECD critical minerals)

Γενικά, οι γνώσεις μας για τη γεωλογία και τις βιομηχανικές χρήσεις των μετάλλων που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες, όπως ο σίδηρος, το αλουμίνιο και ο χαλκός, είναι εκτεταμένες. Υπάρχει μια αρκετά καλή ιδέα για τις γεωλογικές διεργασίες που είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό οικονομικών κοιτασμάτων αυτών των μετάλλων και, κατά συνέπεια, για τον εντοπισμό των καλύτερων σημείων για την αναζήτηση πρόσθετων πόρων. Η εμπειρία πολλών δεκαετιών και αιώνων έχει διδάξει στους γεωλόγους και τους μηχανικούς εξόρυξης πώς να βρίσκουν, να εξάγουν και να επεξεργάζονται αυτά τα μέταλλα για να παρέχουν τα αγαθά και τις υπηρεσίες που χρειαζόμαστε. Ως αποτέλεσμα, ήταν δυνατό να βρεθούν νέα κοιτάσματα για να αντικαταστήσουν εκείνα που εξαντλήθηκαν και η οικονομική ανάπτυξη δεν περιορίστηκε από την έλλειψη μετάλλων.

Ωστόσο, δεν υπάρχουν αξιόπιστες εκτιμήσεις για τη συνολική ποσότητα οποιουδήποτε μετάλλου που μπορεί να είναι διαθέσιμο στον φλοιό της Γης. Διάφοροι ερευνητές έχουν υπολογίσει τις μέγιστες ποσότητες που υπάρχουν με βάση εκτιμήσεις των μέσων συγκεντρώσεων των στοιχείων του φλοιού και έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι ποσότητες που είναι δυναμικά διαθέσιμες είναι τεράστιες. Αν και οι εκτιμήσεις αυτές παρέχουν ανώτερα όρια διαθεσιμότητας, έχουν μικρή πραγματική πρακτική αξία, διότι δεν λαμβάνουν υπόψη το κόστος, οικονομικό, περιβαλλοντικό ή κοινωνικό, που θα συνεπάγεται η εξόρυξη μετάλλων από αυτές τις πηγές. Ορισμένοι ερευνητές έχουν υιοθετήσει μια διαφορετική, "από κάτω προς τα πάνω" προσέγγιση, η οποία βασίζεται σε πιθανολογικές εκτιμήσεις της προμήθειας του φλοιού συγκεκριμένων μετάλλων σε συγκεκριμένους τύπους κοιτασμάτων. Ίσως η πιο γνωστή και μεγαλύτερη μελέτη αυτού του τύπου είναι το Global Mineral Resource Assessment Project της Γεωλογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών, το οποίο αναλαμβάνεται για την εκτίμηση των μη ανακαλυφθέντων ορυκτών πόρων του κόσμου εκτός καυσίμων. Μια από τις πρώτες μελέτες που ολοκληρώθηκαν ήταν μια ποσοτική αξιολόγηση των ορυκτών πόρων χαλκού, μολυβδαινίου, χρυσού και αργύρου σε μη ανακαλυφθέντα πορφυρικά κοιτάσματα της ορεινής ζώνης των Άνδεων στη Νότια Αμερική. Η μελέτη αυτή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι μπορεί να ανακαλυφθεί τεράστια ποσότητα χαλκού σε βάθος ενός χιλιομέτρου κάτω από την επιφάνεια της γης στις Άνδεις, που ισοδυναμεί με 1,3 φορές μεγαλύτερη ποσότητα από αυτή που έχει ήδη βρεθεί σε πορφυρικά κοιτάσματα χαλκού στην περιοχή αυτή. Οι εκτιμήσεις που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ χρήσιμες, όχι μόνο για τις εταιρείες εξόρυξης αλλά και τους οικονομολόγους, τις κυβερνήσεις και τις ρυθμιστικές αρχές. Η προσέγγιση έχει επίσης πραγματική πρακτική αξία, διότι αξιολογεί τη διαθεσιμότητα πόρων ενός τύπου που είναι γνωστός και μπορεί να εξορυχθεί και να υποστεί οικονομική επεξεργασία με την τρέχουσα τεχνολογία. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα γεωλογικών δεδομένων υψηλής ποιότητας και από την καλή κατανόηση της κατηγορίας κοιτασμάτων ορυκτών στόχων. Δυστυχώς, τέτοιες γεωλογικές πληροφορίες δεν είναι γενικά διαθέσιμες και η γνώση πολλών κατηγοριών ορυκτών κοιτασμάτων που μπορεί να συμβάλουν στην παγκόσμια παραγωγή μετάλλων είναι ανεπαρκής. Κατά συνέπεια, η προσέγγιση αυτή δεν είναι πιθανό να δώσει αξιόπιστες εκτιμήσεις για την παγκόσμια διαθεσιμότητα μετάλλων στο εγγύς μέλλον. Μάλλον, η εφαρμογή της θα περιοριστεί σε έναν συγκεκριμένο τύπο κοιτάσματος σε συγκεκριμένες περιοχές. Φυσικά, αντί να έχουμε ακριβείς εκτιμήσεις για το τι μπορεί τελικά να μας είναι διαθέσιμο, αυτό που έχει πραγματικά

σημασία είναι πώς μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι έχουμε αρκετό μέταλλο για να καλύψουμε τις ανάγκες μας και ότι δεν θα εξαντληθεί στο μέλλον καθώς η ζήτηση αυξάνεται.

## 2.2. Σκέψεις για την προσφορά και την ζήτηση

Μεγάλο μέρος της πρόσφατης συζήτησης έχει επικεντρωθεί στην επάρκεια των κοιτασμάτων ορυκτών για την κάλυψη της μελλοντικής ζήτησης και όχι στα πολιτικά και οικονομικά εμπόδια. Αρκετοί συγγραφείς έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η εξάντληση των ορυκτών πόρων είναι αναπόφευκτη. Ορισμένοι έχουν κάνει κινδυνολογικές προβλέψεις που υποδηλώνουν ότι για ορισμένα ορυκτά και μέταλλα η εξάντληση μπορεί να συμβεί σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα μερικών δεκαετιών ή ακόμη και ετών. Ωστόσο, οι προβλέψεις αυτές βασίζονται σε "στατικούς χρόνους ζωής" που προκύπτουν από τους υπάρχοντες γνωστούς πόρους ή αποθέματα διαιρεμένους με την τρέχουσα ή την προβλεπόμενη μελλοντική ζήτηση. Οι προβλέψεις αυτές δεν αναγνωρίζουν ότι οι πόροι και τα αποθέματα δεν είναι ούτε γνωστά ούτε σταθερά. Τα αποθέματα είναι οικονομικές οντότητες που εξαρτώνται από την επιστημονική γνώση των ορυκτών και από την τιμή του μετάλλου ή του ορυκτού στόχου. Καθώς βελτιώνεται η επιστημονική μας γνώση, τα αποθέματα αναπληρώνονται συνεχώς μέσω νέων ανακαλύψεων, βελτιωμένης τεχνολογίας εξόρυξης και επεξεργασίας και βελτιωμένης πρόσβασης στα κοιτάσματα. Επιπλέον, οι μηχανισμοί της αγοράς συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των ελλείψεων προσφοράς για τα κύρια μέταλλα. Εάν οι τιμές αυξηθούν, τότε τα αποθέματα θα επεκταθούν για να συμπεριλάβουν χαμηλότερης ποιότητας μεταλλεύματα. Εάν οι τιμές μειωθούν, τότε θα συρρικνωθούν για να συμπεριλάβουν υψηλότερης ποιότητας υλικό. Οι υψηλές τιμές θα ενθαρρύνουν επίσης την αύξηση της υποκατάστασης, της ανακύκλωσης και της αποδοτικότητας των πόρων και, ως εκ τούτου, θα συμβάλουν στη βελτίωση της ασφάλειας του εφοδιασμού.

Η κλιμάκωση της παραγωγής, τα επίπεδα αποθεμάτων αυξήθηκαν στην πραγματικότητα με την πάροδο του χρόνου και ξεπέρασαν την παραγωγή. Για παράδειγμα, τα παγκόσμια αποθέματα χαλκού στις αρχές της δεκαετίας του 1930 αναφέρονταν σε περίπου 100 εκατομμύρια τόνους, που θεωρούνταν τότε επαρκή για περίπου 80 χρόνια. Ωστόσο, το 2010 το USGS ανέφερε αποθέματα χαλκού ύψους 540 εκατομμυρίων τόνων και το 2011 η εκτίμηση αναθεωρήθηκε και πάλι προς τα πάνω σε 630 εκατομμύρια τόνους, μια αύξηση άνω του 16% σε ένα μόνο έτος. Παρόμοιες τάσεις παρατηρούνται στα παγκόσμια επίπεδα αποθεμάτων για ορισμένα δευτερεύοντα μέταλλα. Για παράδειγμα, τα αποθέματα βολφραμίου αυξήθηκαν κατά περισσότερο από 50 % μεταξύ 2000 και 2011, ενώ τα αποθέματα σπάνιων γαιών (REE) αυξήθηκαν κατά 25 % μεταξύ 2008 και 2011. Είναι σαφές, επομένως, ότι οι εκτιμήσεις των αποθεμάτων είναι αναξιόπιστοι δείκτες της μακροπρόθεσμης διαθεσιμότητας των μετάλλων, καθώς ο προσδιορισμός τους εξαρτάται από την τρέχουσα επιστήμη, τεχνολογία και οικονομία.

Ένας τύπος έλλειψης που αναφέρεται ως "τεχνική έλλειψη" ή "διαρθρωτική έλλειψη" αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση και μπορεί να είναι δύσκολο και δαπανηρό να αντιμετωπιστεί. Η τεχνική σπανιότητα αφορά κυρίως μια σειρά σπάνιων μετάλλων που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας. Πολλά από αυτά δεν εξορύσσονται μόνο τους, αλλά αποτελούν υποπροϊόντα της εξόρυξης των μεταλλευμάτων των πιο κοινών και ευρέως χρησιμοποιούμενων μετάλλων, όπως το αλουμίνιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος και ο ψευδάργυρος. Αυτά τα υποπροϊόντα ή συνοδευτικά μέταλλα υπάρχουν ως ιχνοστοιχεία στα μεταλλεύματα των βασικών μετάλλων και, υπό ευνοϊκές οικονομικές συνθήκες, μπορούν να εξαχθούν από αυτά τα μεταλλεύματα ή από τα συμπυκνώματα και τις σκωρίες που προέρχονται από αυτά. Για παράδειγμα, το ίνδιο και το γερμάνιο είναι κυρίως παραπροϊόντα της παραγωγής ψευδαργύρου, ενώ το τελλούριο είναι κυρίως παραπροϊόν της εξόρυξης χαλκού. Ωστόσο, η χαμηλή συγκέντρωση του συνοδού μετάλλου στα μεταλλεύματα σημαίνει ότι υπάρχει μικρό οικονομικό κίνητρο για την αύξηση της παραγωγής βραχυπρόθεσμα. Για παράδειγμα, μόνο περίπου το 25-30% των 1000 τόνων ινδίου που είναι δυνητικά διαθέσιμοι παγκοσμίως κάθε χρόνο από την εξόρυξη μεταλλευμάτων ψευδαργύρου πλούσιων σε ίνδιο ανακτάται στην πραγματικότητα. Το υπόλοιπο καταλήγει στα απόβλητα επειδή δεν είναι οικονομικό να εγκατασταθεί η πρόσθετη ικανότητα απόληψης ινδίου στα εργοστάσια εμπλουτισμού ψευδαργύρου ή επειδή η αποδοτικότητα της ανάκτησης του ινδίου είναι χαμηλή. Συνεπώς, είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ικανότητα της αλυσίδας εφοδιασμού να ανταποκριθεί στην αυξημένη ζήτηση του υποπροϊόντος. Εάν το υψηλό επίπεδο ζήτησης του υποπροϊόντος αναμένεται να διατηρηθεί, για παράδειγμα λόγω μιας συγκεκριμένης καθιερωμένης τεχνολογικής απαίτησης, όπως το ίνδιο στις επίπεδες οθόνες και στις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, τότε μπορεί να γίνει μια καλή οικονομική υπόθεση για αυξημένη παραγωγή ινδίου.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, ορισμένα στοιχεία που συνήθως εξορύσσονται ως υποπροϊόντα μπορούν επίσης να εξορύσσονται από μόνο τους, εάν οι συγκεντρώσεις και ο τρόπος εμφάνισής τους το επιτρέπουν. Για παράδειγμα, το κοβάλτιο είναι γενικά υποπροϊόν της εξόρυξης χαλκού, αλλά, κατ' εξαίρεση, μπορεί να εξορύσσεται και μόνο του. Παρομοίως, τα Platinum Group Metals (PGM) είναι συνήθως υποπροϊόντα της εξόρυξης νικελίου, αλλά η μεγαλύτερη παραγωγή προέρχεται από ορυχεία μόνο PGM στη Νότια Αφρική.

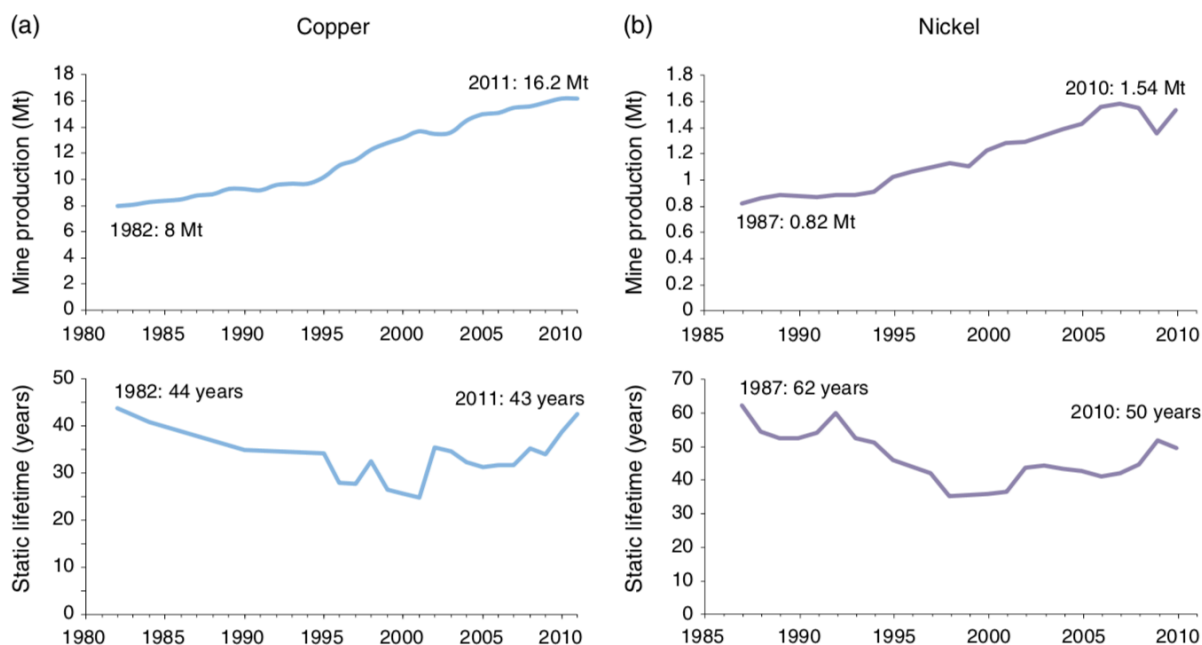
Σε ορισμένες περιπτώσεις, ομάδες μετάλλων πρέπει να παράγονται μαζί ως συνοδά στοιχεία επειδή είναι χημικά πολύ παρόμοια και δεν μπορούν εύκολα να διαχωριστούν. Τα καλύτερα παραδείγματα συζευγμένων στοιχείων είναι τα μέταλλα της ομάδας του λευκόχρυσου (PGM: ρόδιο, ρουθίνιο, παλλάδιο, όσμιο, ιρίδιο και πλατίνα) και τα στοιχεία σπάνιων γαιών (REE που περιλαμβάνουν 15 λανθανίδια, σκάνδιο και ύτριο). Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν υπάρχει κάποιο κύριο μέταλλο, αλλά συνήθως ένα ή δύο από την ομάδα καθορίζουν τα επίπεδα παραγωγής και την οικονομική βιωσιμότητα των εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Στην περίπτωση των PGM, η πλατίνα είναι συνήθως η κύρια κινητήριος δύναμη για την παραγωγή, ενώ το παλλάδιο, το ιρίδιο και το ρουθίνιο παράγονται ως υποπροϊόντα.

Η συζήτηση της πετρελαϊκής βιομηχανίας για την "κορύφωση του πετρελαίου" επεκτάθηκε και στη βιομηχανία ορυκτών που δεν είναι καύσιμα. Η έννοια της αιχμής αναπτύχθηκε από το έργο του γεωλόγου πετρελαίου Hubbert στη δεκαετία του 1950, ο οποίος προέβλεψε, με βάση την ύπαρξη ενός γνωστού "τελικά ανακτήσιμου αποθέματος", ότι η παραγωγή πετρελαίου στις ΗΠΑ θα

κορυφωνόταν περίπου το 1970 και στη συνέχεια θα εισερχόταν σε τελική πτώση. Άλλοι επέκτειναν αυτή την προσέγγιση για να προβλέψουν ότι η παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου θα κορυφωνόταν το 2000. Οι προβλέψεις αυτές αποδείχθηκαν σε μεγάλο βαθμό σωστές, αν και η παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου κορυφώθηκε μερικά χρόνια αργότερα από τις προβλέψεις. Το μοντέλο του Hubbert βασίζεται σε καμπύλες (σε σχήμα καμπάνας), με την κορύφωση της παραγωγής να εμφανίζεται όταν έχει εξορυχθεί περίπου το μισό του εξορυσσόμενου πόρου. Πιο πρόσφατα, διάφοροι συγγραφείς έχουν υποστηρίξει την "αιχμή των μετάλλων" ως εργαλείο για την κατανόηση των μελλοντικών τάσεων στην παραγωγή μετάλλων. Οι Bardi και Paganì (2007) εξέτασαν τα παγκόσμια δεδομένα παραγωγής για 57 μέταλλα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι 11 από αυτά είχαν σαφώς κορυφωθεί και αρκετά άλλα πλησίαζαν την παραγωγή αιχμής.

Οι καταγραφές των τελευταίων 200 ετών δείχνουν ότι οι τιμές των κύριων μετάλλων είναι κυκλικές, με διαλείπουσες κορυφές και κοιλίες που συνδέονται στενά με τους οικονομικούς κύκλους. Η μείωση της παραγωγής οφείλεται γενικά στην πτώση της ζήτησης και όχι στη μείωση των πόρων ή στην έλλειψη ανακάλυψης πόρων. Σε περιόδους αυξανόμενης σπανιότητας η τιμή των ορυκτών θα αυξηθεί, γεγονός που με τη σειρά του θα τείνει να ενθαρρύνει την αυξημένη υποκατάσταση και ανακύκλωση και να ενθαρρύνει τις επενδύσεις σε νέα παραγωγική ικανότητα και περισσότερη εξερεύνηση. Οι υψηλές τιμές μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη εστίαση στη βελτίωση των υφιστάμενων τεχνολογιών έρευνας και παραγωγής. Ιστορικά, η τεχνολογική καινοτομία έχει συχνά επιτύχει την ανάπτυξη νέων μεθόδων χαμηλότερου κόστους για την εύρεση και την εξόρυξη ορυκτών πρώτων υλών.

Επομένως, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η αρχή της αιχμής δεν ισχύει για τη μοντελοποίηση της εξάντλησης των ορυκτών πόρων και δεν μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστο οδηγό για τις μελλοντικές τάσεις της παραγωγής μετάλλων. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις των αποθεμάτων και των πόρων και η στατική διάρκεια ζωής των ορυκτών πρώτων υλών που υπολογίζονται από αυτές, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μελλοντικής διαθεσιμότητας των ορυκτών, καθώς είναι πολύ πιθανό να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα με δυνητικά σοβαρές επιπτώσεις στη χάραξη πολιτικής και στις επενδυτικές αποφάσεις.



Σχήμα 2.5: Διαγράμματα στατικού χρόνου ζωής Cu και Ni (OECD critical minerals)

Παρά την αυξανόμενη παγκόσμια παραγωγή μετάλλων, τα αποθέματα αναπληρώνονται συνεχώς. Αυτά τα γραφήματα δείχνουν ότι οι στατικοί χρόνοι ζωής (αριθμός των ετών που απομένουν για την παροχή ισούται με τα αποθέματα διαιρούμενα με την ετήσια παραγωγή), στην περίπτωση αυτή του (α) χαλκού και (β) νικελίου, παρατείνονται πριν από την παραγωγή (Mt, εκατομμύρια τόνοι, περιεκτικότητα σε μέταλλα).

Πίνακας 2.1: Παραπροϊόντα μέταλλα (Critical metals handbook)

Copper	Zinc	Tin	Nickel	Platinum	Aluminium	Iron	Lead
<i>Cobalt</i>	Indium	<i>Niobium</i>	<i>Cobalt</i>	Palladium	Gallium	<i>REE</i>	<i>Antimony</i>
<i>Molybdenum</i>	Germanium	<i>Tantalum</i>	<i>PGM</i>	Rhodium		<i>Niobium</i>	Bismuth
<i>PGM</i>	Cadmium	Indium	Scandium	Ruthenium		Vanadium	Thallium
Rhenium				Osmium			
Tellurium				Iridium			
Selenium							
Arsenic							

Ο Πίνακας 2.1 δείχνει μέταλλα υποπροϊόντα που προέρχονται από την παραγωγή επιλεγμένων σημαντικών βιομηχανικών μετάλλων (επάνω σειρά, έντονα γράμματα). Τα μέταλλα που εμφανίζονται με πλάγια γράμματα μπορούν επίσης να παραχθούν από τα δικά τους μεταλλεύματα. (PGM, μέταλλα της ομάδας του λευκόχρυσου- REE, στοιχεία σπάνιων γαιών).

Τα περισσότερα ορυκτά υπάρχουν σε αφθονία στον πλανήτη, αλλά η τεχνολογία επιτρέπει την εξόρυξη μόνο από τον φλοιό της Γης. Αυτό μειώνει σημαντικά τους συνολικούς ανακτήσιμους πόρους. Οι πόροι αντιπροσωπεύουν το σύνολο της φυσικής ποσότητας ενός ορυκτού. Περιλαμβάνουν, επομένως, τα ήδη ανακαλυφθέντα, τα εκτιμώμενα αποθέματα, καθώς και τους μη ανακαλυφθέντες πόρους. Τα αποθέματα νοούνται γενικά ως η αποδεδειγμένη ποσότητα ενός πόρου που μπορεί να ανακτηθεί στις σημερινές τιμές με τη σημερινή τεχνολογία και η οποία μπορεί να εξορυχθεί νόμιμα. Ωστόσο, ένα ευρέως αναγνωρισμένο πρόβλημα με τη χρήση αποθεμάτων και στατικών μέτρων διάρκειας ζωής είναι ότι μπορούν να παρακινήσουν παραπλανητικά συμπεράσματα. Τα αποθέματα καθορίζονται εξ ορισμού ενδογενώς και, επομένως, δεν είναι σταθερά. Συνεπώς, μπορούν να αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Στην πραγματικότητα, τόσο οι εκτιμήσεις των αποθεμάτων όσο και των πόρων υπόκεινται σε αναθεώρηση προς τα πάνω λόγω των ερευνών και των ανακαλύψεων. Η εξερεύνηση εξαρτάται από τα αναμενόμενα οφέλη από τις ανακαλύψεις που ποικίλλουν ανάλογα με τις μελλοντικές τιμές των ορυκτών, από την πιθανότητα εύρεσης νέων κοιτασμάτων και από το κόστος εξερεύνησης. Συνεπώς, οι υψηλές τιμές των ορυκτών υλών τονώνουν τόσο την εξερεύνηση όσο και την εξόρυξη. Οι ανακαλύψεις και η τεχνική πρόοδος στις τεχνολογίες εξόρυξης εξηγούν γιατί οι εκτιμήσεις για τα αποθέματα των περισσότερων ορυκτών αυξήθηκαν κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, παρά τη μαζική εξόρυξη.

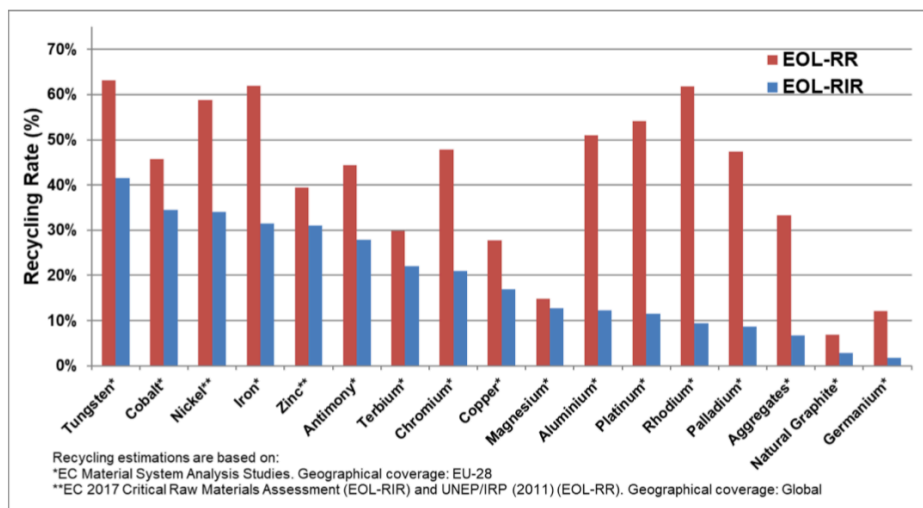
### **2.3. Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση μετάλλων**

Η ανακύκλωση αποτελεί σημαντική πηγή CRMs. Μπορεί να συμβάλει στην ασφάλεια του εφοδιασμού με πρώτες ύλες και στην πρόοδο προς μια πιο κυκλική οικονομία της ΕΕ. Ένα καλό μέτρο για την κυκλική χρήση των μετάλλων είναι η συμβολή της ανακύκλωσης στην κάλυψη της ζήτησης υλικών στην ΕΕ, για την οποία το ποσοστό εισροών ανακύκλωσης στο τέλος του κύκλου ζωής μετρά πόσο ποσοστό της συνολικής εισροής υλικών στο σύστημα παραγωγής προέρχεται από την ανακύκλωση παλαιών απορριμμάτων. Παρόλο που πολλά CRMs έχουν υψηλό δυναμικό ανακύκλωσης και παρά την ενθάρρυνση από τις κυβερνήσεις να κινηθούν προς μια κυκλική οικονομία, το End of Life - Recycle input rate (EOL-RIR) των CRMs είναι γενικά χαμηλό. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από διάφορους παράγοντες:

- i) για πολλά CRMs, οι τεχνολογίες διαλογής και ανακύκλωσης δεν είναι ακόμη διαθέσιμες σε ανταγωνιστικό κόστος
- ii) είναι αδύνατο να ανακτηθούν υλικά που διαλύονται κατά τη χρήση

- iii) η προσφορά πολλών CRMs είναι επί του παρόντος κλειδωμένη σε περιουσιακά στοιχεία μακράς διάρκειας ζωής, γεγονός που συνεπάγεται καθυστερήσεις μεταξύ της κατασκευής και της απόσυρσης και επηρεάζει έτσι άμεσα το ποσοστό εισροών ανακύκλωσης
- iv) η ζήτηση για πολλά CRMs αυξάνεται σε διάφορους τομείς και η συνεισφορά της ανακύκλωσης είναι σε μεγάλο βαθμό ανεπαρκής για να καλύψει τη ζήτηση.

Ορισμένα CRMs, όπως το βανάδιο, το βολφράμιο, το κοβάλτιο και το αντιμόνιο, έχουν υψηλό ποσοστό ανακύκλωσης. Αυτές οι καλές επιδόσεις μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι το ποσοστό συλλογής στο τέλος του κύκλου ζωής είναι υψηλό. Όταν, όμως, εξετάζεται ένα στοιχείο όπως το ίνδιο, το οποίο χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε επίπεδες οθόνες, μόνο πολύ μικρές ποσότητες ινδίου ανακυκλώνονται σήμερα λόγω της έλλειψης υποδομών και των ασταθών τιμών του μετάλλου. Ως εκ τούτου, το ποσοστό ανακύκλωσης είναι σήμερα μηδενικό. Ωστόσο, υποδειγματικές διαδικασίες ανακύκλωσης για την εξαγωγή ινδίου από πάνελ οθονών με οικονομικό τρόπο βρίσκονται επί του παρόντος στο στάδιο της έρευνας και της ανάπτυξης.



Σχήμα 2.6: Τρέχουσα συμβολή της ανακύκλωσης στην κάλυψη της ζήτησης CRM στην ΕΕ (JRC science, Recovery)

Η σύγχρονη τεχνολογία είναι σε μεγάλο βαθμό σχεδιασμένη γύρω από τη χρήση υλικών που εξάγονται από γεωλογικές πηγές. Ωστόσο, γίνεται ολοένα και πιο εμφανές ότι τα υλικά που έχουν ενσωματωθεί σε προϊόντα που δεν χρησιμοποιούνται πλέον (δευτερογενή υλικά, σκραπ) μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμο συμπλήρωμα των πρωτογενών αποθεμάτων. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση απαιτεί γενικά τα δευτερογενή υλικά να είναι συγκρίσιμα σε ποιότητα με εκείνα που παράγονται από τα πρωτογενή αποθέματα.

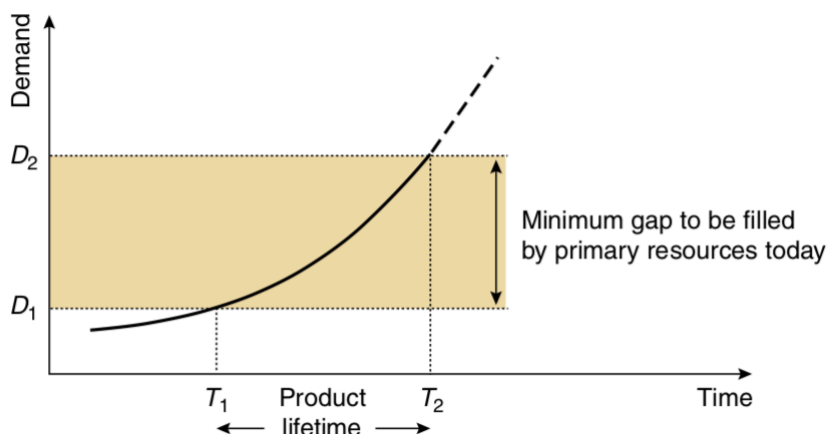
Τα πρωτογενή μέταλλα παράγονται μέσω μιας αλληλουχίας ενεργειών μετά την ανακάλυψη και την αξιολόγησή τους: εξόρυξη του μεταλλεύματος, άλεση (θραύση του πετρώματος και διαχωρισμός των ορυκτών που περιέχουν μέταλλα από τα απόβλητα), τήξη (για τη μετατροπή των οξειδίων και



των σουλφιδίων του μετάλλου σε ακάθαρμο μέταλλο) και εξευγενισμός (για τον καθαρισμό του τήγματος). Καμία από αυτές τις διεργασίες δεν είναι τέλεια, οπότε το μέταλλο χάνεται σε κάθε στάδιο. Η ακολουθία για τα δευτερογενή μέταλλα έχει ορισμένα από τα ίδια χαρακτηριστικά. Αρχίζει με τη συλλογή των απορριμμάτων, το διαχωρισμό των μετάλλων στα απορρίμματα, τη διαλογή των διαχωρισμένων μετάλλων και την τήξη ή παρόμοιες μεταλλουργικές διεργασίες για τη μετατροπή των αποτελεσμάτων των προηγούμενων διεργασιών σε μέταλλα αρκετά καθαρά για επαναχρησιμοποίηση. Όπως και στις πρωτογενείς διεργασίες, σε κάθε στάδιο χάνεται μέταλλο.

Σε έναν κόσμο αυξανόμενης χρήσης πόρων, οι δευτερογενείς προμήθειες μετάλλων θα είναι, ωστόσο, ανεπαρκείς για να καλύψουν τη συνολική ζήτηση. Ακόμη και αν όλα τα μέταλλα που ενσωματώνονται στα προϊόντα συλλέγονταν και ανακυκλώνονταν με 100% αποτελεσματικότητα στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους, θα υπήρχε αναπόφευκτα ένα έλλειμμα στην προσφορά, το οποίο θα έπρεπε να καλυφθεί μέσω της παραγωγής από πρωτογενείς πόρους.

Παρόλα αυτά, οι δευτερογενείς προμήθειες παρέχουν ένα συμπλήρωμα πόρων που απαιτεί γενικά λιγότερη ενέργεια από τα πρωτογενή μέταλλα (συχνά πολύ λιγότερη) και έχει γενικά χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μέσω των δραστηριοτήτων ανακύκλωσης, τα περισσότερα μέταλλα έχουν τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ξανά και ξανά, αλλά μόνο εάν οι σχεδιαστές των προϊόντων επιτρέπουν την ανακύκλωση με την προσεκτική επιλογή των συνδυασμών μετάλλων και τις πρακτικές συναρμολόγησης, εάν οι κυβερνήσεις και οι ιδιώτες βελτιστοποιήσουν τη συλλογή των προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής τους και εάν η τεχνολογία ανακύκλωσης είναι σε θέση να παράγει δευτερογενή υλικά των οποίων η ποιότητα είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση χωρίς υποβάθμιση. Ορισμένα στοιχεία σε συγκεκριμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται σε ιδιαίτερα διασκορπισμένη κατάσταση και δεν μπορούν να ανακτηθούν. Για παράδειγμα, το κάλιο, το φωσφορικό άλας και το άζωτο στα λιπάσματα διασκορπίζονται κατά τη χρήση, όπως και μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος και το μαγνήσιο, τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης για γεωργικούς σκοπούς. Άλλες μη ανακτήσιμες απώλειες μετάλλων περιλαμβάνουν το τιτάνιο στις χρωστικές ουσίες χρωμάτων και την πλατίνα και το ρουθίνιο που χρησιμοποιούνται σε πολύ λεπτά στρώματα σε σκληρούς δίσκους. Ένα ευρύ φάσμα άλλων μετάλλων χάνεται επίσης λόγω φθοράς και διάβρωσης κατά τη χρήση.



Σχήμα 2.7: Σχέση ζήτησης και χρόνου με την συνδρομή της ανακύκλωσης (critical metals handbook)

Το Σχήμα 2.7 δείχνει ότι, όταν η ζήτηση για ένα αγαθό αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, η ανακύκλωση από μόνη της δεν μπορεί να καλύψει την υψηλότερη ζήτηση. Στην αρχή της διάρκειας ζωής ενός προϊόντος,  $T_1$ , η ζήτηση βρίσκεται στο επίπεδο  $D_1$ . Στο τέλος της διάρκειας ζωής του,  $T_2$ , η ζήτηση έχει αυξηθεί σε  $D_2$ , αλλά η ποσότητα που θα είναι δυνητικά διαθέσιμη από την ανακύκλωση θα είναι  $D_1$ . Το κενό στην προσφορά ( $D_2 - D_1$ ) μπορεί να καλυφθεί μόνο από πρωτογενείς πόρους.

## 2.4. Το πρότυπο της κρισιμότητας

Χωρίς τη συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας για την εξερεύνηση, την επεξεργασία και την εξόρυξη ορυκτών δεν θα επωφελούμασταν από τα φτηνά και αξιόπιστα προϊόντα που κυμαίνονται από αεροπλάνα και αυτοκίνητα, μέχρι υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και μια πληθώρα άλλων φορητών προσωπικών ηλεκτρονικών προϊόντων. Για παράδειγμα, καθώς η τεχνολογία έχει προοδεύσει, νέες αγορές για μέταλλα, τα οποία προηγουμένως χρησιμοποιούνταν ελάχιστα, έχουν προκύψει ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, έχουν επεκταθεί σημαντικά ως απάντηση στις ανάγκες της κοινωνίας. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι λεγόμενες "πράσινες" τεχνολογίες, ιδίως καθώς οι μεγάλες παγκόσμιες οικονομίες προσπαθούν να μετατοπιστούν από τα ενεργειακά συστήματα που βασίζονται στον άνθρακα.

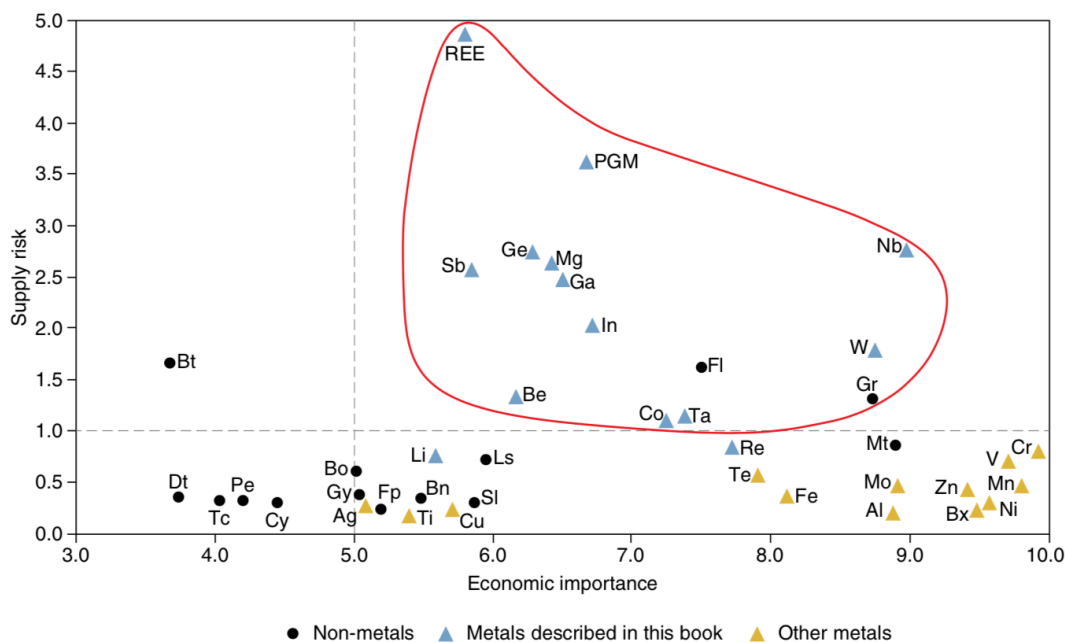
Τα πρώτα χρόνια που εμφανίστηκε ο χαρακτηρισμός “κρίσιμα” εφαρμόστηκε στα μέταλλα, και ιδιαίτερα στην πιθανότητα ορισμένα μέταλλα να σπανίσουν αρκετά ώστε να πάψουν να είναι συνήθως διαθέσιμα στην τεχνολογία. Υπήρξαν αρκετές περιπτώσεις τις τελευταίες δεκαετίες όπου ο πόλεμος, οι τεχνολογικές αλλαγές ή οι γεωπολιτικές αποφάσεις οδήγησαν σε προσωρινή έλλειψη. Η πρώτη πολυπλοκότητα που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι η κρισιμότητα είναι θέμα βαθμού και όχι κατάστασης. Η κρισιμότητα δεν είναι η θέση ενός διακόπτη, έτσι ώστε ένα μέταλλο να είναι είτε κρίσιμο είτε μη κρίσιμο, αλλά μάλλον μια θέση σε ένα καντράν όπου οποιαδήποτε θέση πάνω από ένα ορισμένο επίπεδο θα μπορούσε αυθαίρετα να οριστεί ως η διαχωριστική γραμμή μεταξύ κρίσιμης και μη κρίσιμης κατάστασης. Αυτό αντανακλά το γεγονός ότι η σπανιότητα μπορεί να είναι συνέπεια γεωλογικών παραγόντων, οικονομικών παραγόντων, τεχνολογικής εξέλιξης, δυνατοτήτων υποκατάστασης, περιβαλλοντικών επιπτώσεων και πολλών άλλων. Αυτή η πολυπλοκότητα έχει γεννήσει μια ποικιλία αναλυτικών προσεγγίσεων και μια ποικιλία αποτελεσμάτων.

Είναι επίσης σημαντικό να επισημανθεί ότι η κρισιμότητα δεν είναι μια ιδιότητα της οποίας ο προσδιορισμός είναι ταυτόσημος για όλους τους δυνητικούς χρήστες. Για μια εταιρεία της οποίας η δραστηριότητα είναι η κατασκευή ηλεκτρικών καλωδίων, ο χαλκός είναι απαραίτητος. Για έναν κατασκευαστή εκλεκτών κοσμημάτων, ο χρυσός είναι απαραίτητος. Ωστόσο, η επιχείρηση του κατασκευαστή καλωδίων δεν χρησιμοποιεί χρυσό, ούτε ο χαλκός του κοσμηματοπώλη (δηλ. για τους εν λόγω χρήστες, ούτε ο χρυσός ούτε ο χαλκός μπορεί να θεωρηθεί κρίσιμο μέταλλο). Συνοψίζοντας, ο βαθμός κρισιμότητας ενός μετάλλου σχετίζεται με τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του ίδιου του μετάλλου, με διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την προσφορά και τη ζήτηση και με τους ίδιους τους ερωτώντες.

Στην βιομηχανία ορυκτών πόρων η εξεύρεση ταχέων λύσεων είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω του υψηλού κόστους και του μεγάλου χρόνου παράδοσης που απαιτείται για τη διάθεση νέων αποθεμάτων ορυκτών πόρων. Οι μελέτες κρισιμότητας που διεξήχθησαν στις ΗΠΑ και την ΕΕ στις δεκαετίες του 1970 και 1980 υιοθέτησαν βασικά παρόμοιες προσεγγίσεις με αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον εντοπισμό κρίσιμων πρώτων υλών. Παρ' όλα αυτά, τα κρίσιμα ορυκτά που προσδιορίστηκαν σε αυτές τις παλαιότερες αξιολογήσεις διαφέρουν από εκείνα που σήμερα χαρακτηρίζονται ως κρίσιμα, τονίζοντας έτσι ότι οι μελέτες αυτές παρέχουν μόνο ένα "στιγμιότυπο" ενός δυναμικού συστήματος και έχουν μικρή προγνωστική αξία. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι οι λύσεις που προτάθηκαν τότε είναι παρόμοιες με τις σημερινές. Τότε, όπως και τώρα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, αν και η γεωλογική έλλειψη ήταν εξαιρετικά απίθανη, οι κύριοι κίνδυνοι εφοδιασμού ήταν η εξάρτηση από τις εισαγωγές, η συγκέντρωση της παραγωγής σε μικρό αριθμό πολιτικά ασταθών χωρών και ο αυξημένος “εθνικισμός” των πόρων σε διάφορες μορφές, καθώς οι κυβερνήσεις των χωρών παραγωγής προσπαθούν να αποκομίσουν μεγαλύτερα οφέλη από την εκμετάλλευση των εγχώριων πόρων. Τα μέτρα που προτείνονται για την ανακούφιση των μελλοντικών ελλείψεων εφοδιασμού περιλαμβάνουν τη δημιουργία αποθεμάτων πρώτων υλών, τη σύναψη μακροπρόθεσμων συμβολαίων εφοδιασμού και την εκμετάλλευση των εγχώριων πόρων.

Η πρώτη πρόσφατη προσπάθεια να οριστεί η κρισιμότητα των μετάλλων και να προταθούν μετρήσεις που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγησή της ήταν αυτή μιας

επιτροπής του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας των ΗΠΑ (2008). Η επιτροπή πρότεινε ότι η κρισιμότητα είναι μια μεταβλητή με δύο παραμέτρους, όπου η μία παράμετρος είναι ο κίνδυνος εφοδιασμού και η άλλη ο αντίκτυπος της διαταραχής του εφοδιασμού. Μια δεύτερη σημαντική αξιολόγηση ξεκίνησε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2009, με μια έκθεση που δημοσιεύθηκε το επόμενο έτος. Η ομάδα εργασίας της ΕΕ διατήρησε την έννοια των δύο αξόνων, με τον κίνδυνο εφοδιασμού να αποτελεί μία από τις παραμέτρους, αλλά όρισε τον δεύτερο άξονα με βάση τις πιθανές οικονομικές επιπτώσεις της διαταραχής του εφοδιασμού στην ευρωπαϊκή βιομηχανία. Ο κίνδυνος εφοδιασμού ορίστηκε περαιτέρω ως άθροισμα τριών παραμέτρων: η πολιτική σταθερότητα των χωρών παραγωγής, η δυνατότητα υποκατάστασης του υπό αξιολόγηση μετάλλου και ο βαθμός ανακύκλωσης των μετάλλων. Η αξιολόγηση περιλάμβανε επίσης τους περιβαλλοντικούς κινδύνους ως ξεχωριστή ανησυχία, και η ταξινόμηση "κρίσιμη" αποδόθηκε σε μια πρώτη ύλη εάν υπερβαίνονταν ένα ορισμένο όριο τόσο για την οικονομική σημασία όσο και για τουλάχιστον μία από τις συμπληρωματικές μετρήσεις. Στην πράξη, τα μέταλλα που κατατάχθηκαν με τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική ανησυχία είχαν ήδη χαρακτηριστεί ως κρίσιμα με βάση άλλους παράγοντες. Η ομάδα εργασίας της ΕΕ αξιολόγησε 41 μέταλλα και ορυκτά.

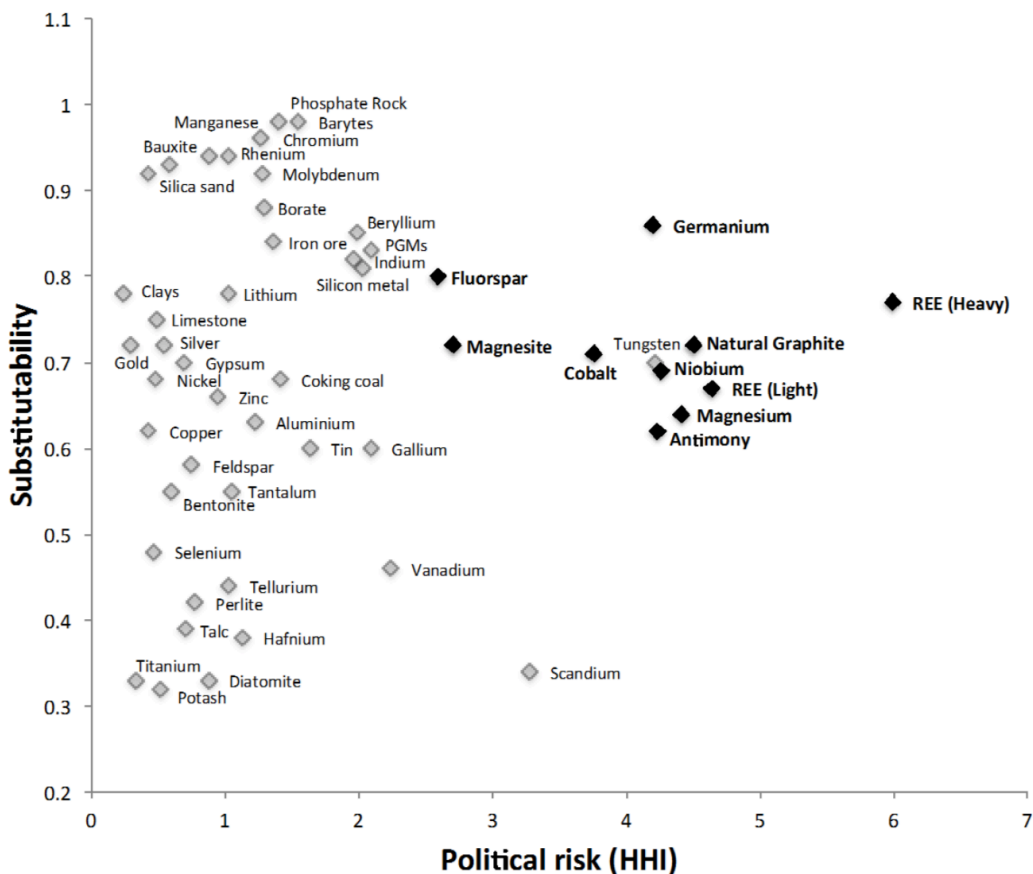


Σχήμα 2.8: Ο πίνακας κρισιμότητας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (critical metals handbook)

Πιο συγκεκριμένα, ο οριζόντιος άξονας αντικατοπτρίζει τον οικονομικό αντίκτυπο του περιορισμού του εφοδιασμού σε μια ευρεία ομάδα ευρωπαϊκών βιομηχανιών- ο κίνδυνος εφοδιασμού αποτελεί τον κάθετο άξονα. Οι 14 πρώτες ύλες που εμπίπτουν στην πάνω δεξιά ομάδα θεωρούνται κρίσιμες για την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η διαθεσιμότητα κατάλληλων δεδομένων υψηλής ποιότητας είναι ένα σοβαρό ζήτημα που μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της κρισιμότητας. Δεδομένης της εγγενούς πολυπλοκότητας και των ελλείψεων στα δεδομένα, είναι αναπόφευκτο ότι τέτοιες αξιολογήσεις κρισιμότητας δεν θα δώσουν αποτελέσματα καθολικής εφαρμογής, καθώς και ότι μπορεί να αποτύχουν να εντοπίσουν πιθανά προβλήματα. Μπορεί να υποδηλώνουν ότι ορισμένα υλικά κινδυνεύουν, ενώ στην πραγματικότητα οι δυνάμεις της αγοράς μπορούν να επιλύσουν τα προβλήματα βραχυπρόθεσμα ή μεσοπρόθεσμα. Ενδέχεται επίσης να παράγουν ψευδώς αρνητικά αποτελέσματα, με τα οποία οι προμήθειες ορισμένων υλικών χαρακτηρίζονται εσφαλμένα ως ασφαλείς. Ωστόσο, καθώς οι περιορισμοί αυτοί έχουν γίνει αντιληπτοί και ενώ το ενδιαφέρον για την κρισιμότητα παραμένει σε υψηλό επίπεδο, η μεθοδολογία βελτιώνεται συνεχώς, προσαρμόζοντάς την για συγκεκριμένους σκοπούς, σε διαφορετικά οργανωτικά επίπεδα (εταιρικά, εθνικά και παγκόσμια) και σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα.

Πιο πρόσφατα, προτάθηκε μια ολοκληρωμένη και ευέλικτη μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της κρισιμότητας των μετάλλων. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τρεις διαστάσεις: Κίνδυνος εφοδιασμού, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και “ευθραυστότητα” (αστάθεια) σε περιορισμό του εφοδιασμού. Ο κίνδυνος εφοδιασμού εκτιμάται τόσο μεσοπρόθεσμα (5-10 χρόνια) όσο και μακροπρόθεσμα (μερικές δεκαετίες). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξετάζουν τόσο θέματα τοξικότητας όσο και θέματα χρήσης ενέργειας (και συνεπώς επιπτώσεις στο κλίμα) και ενδιαφέρουν ιδιαίτερα τις κυβερνήσεις και τους μη κυβερνητικούς οργανισμούς. Η “ευθραυστοτητα” σε περιορισμούς εφοδιασμού ποικίλλει ανάλογα με το οργανωτικό επίπεδο, όπως όταν ένα συγκεκριμένο μέταλλο μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας για τα προϊόντα ή τις λειτουργίες μιας εταιρείας, αλλά να έχει μικρή ή καθόλου σημασία για μια άλλη.



Σχήμα 2.9: Ορυκτά ως συνάρτηση της συγκέντρωσης της παραγωγής και της υποκατάστασης (OECD critical minerals)

Η μελλοντική κρισιμότητα των ορυκτών εξαρτάται από μια σειρά αγνώστων. Ορισμένα από αυτά είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν, ιδίως οι μελλοντικές τεχνολογίες. Αυτό επηρεάζει τόσο τον κίνδυνο εφοδιασμού, μέσω των ανακαλύψεων και της επέκτασης των αποθεμάτων, της υποκαταστασιμότητας και των ευκαιριών ανακύκλωσης, όσο και την οικονομική σημασία, μέσω των εφαρμογών των ορυκτών σε διάφορους τομείς και της βαρύτητας των διαφόρων τομέων στο σύνολο της οικονομίας. Είναι αδύνατο να προβλεφθεί με υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης ποια ορυκτά θα είναι κρίσιμα στο μέλλον. Η ενσωμάτωση αξιόπιστης δυναμικής στην αξιολόγηση της κρισιμότητας μπορεί, ωστόσο, να δώσει μια ένδειξη των πιθανών κατευθύνσεων της αλλαγής με βάση τις τρέχουσες πληροφορίες. Ο πολιτικός κίνδυνος και η κατανομή της παραγωγής ορυκτών είναι σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν τον κίνδυνο εφοδιασμού και κατά συνέπεια το σύνολο των κρίσιμων ορυκτών. Οι μελλοντικές αλλαγές, όμως, στον πολιτικό κίνδυνο είναι δύσκολο να προβλεφθούν.



ο μελλοντικός τεχνολογικός σχεδιασμός θα πρέπει να έχει στο επίκεντρό του την εκτίμηση των επιπτώσεων στη ζήτηση μετάλλων, ιδίως για τα σπάνια μέταλλα που αποκτώνται ως υποπροϊόντα. Σε γενικές γραμμές, η συμπερίληψη προβλέψεων στην αξιολόγηση της κρισιμότητας θα αποτελέσει ένα βήμα προς τα εμπρός, διότι θα μειώσει την εξάρτηση από τη μελλοντική εγκυρότητα των δεικτών που καταρτίζονται από ιστορικά και τρέχοντα δεδομένα.

Οικονομική και πολιτική σταθερότητα: τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή ορυκτών και η συγκέντρωση των εναπομεινάντων αποθεμάτων έχουν μετατοπιστεί από την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες στις αναδυόμενες και αναπτυσσόμενες οικονομίες. Η τάση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από τις αυξανόμενες ανάγκες των αναδυόμενων οικονομιών σε ορυκτά, καθώς και από την εξάντληση των ανταγωνιστικών κοιτασμάτων πόρων στις χώρες που εκβιομηχανίστηκαν πρώτες. Ωστόσο, ορισμένες αναπτυσσόμενες οικονομίες είναι λιγότερο σταθερές πολιτικά από τις αντίστοιχες βιομηχανικές οικονομίες. Αυτή η μετατόπιση της παραγωγής σήμαινε, επομένως, ότι η πολιτική σταθερότητα των χωρών παραγωγών έχει καταστεί σημαντική παράμετρος κατά την ποσοτικοποίηση της ασφάλειας εφοδιασμού των ορυκτών.

Τρεις διαφορετικοί δείκτες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πολιτικής σταθερότητας και των περιορισμών στο εμπόριο ορυκτών:

1. World Government Indicators (WGI): Η πηγή αυτή περιλαμβάνει δείκτες για: φωνή και λογοδοσία, πολιτική σταθερότητα, κυβερνητική αποτελεσματικότητα, ποιότητα των κανονιστικών ρυθμίσεων, κράτος δικαίου και έλεγχο της διαφθοράς. Τα δεδομένα προέρχονται από την Παγκόσμια Τράπεζα.

2. International Country Risk Guide (ICRG): ο ICRG προσφέρει έναν δείκτη για την κυβερνητική σταθερότητα. Ο δείκτης αυτός βασίζεται σε εκτιμήσεις εμπειρογνομόνων τόσο για την ικανότητα της κυβέρνησης να υλοποιήσει το πρόγραμμα που έχει εξαγγείλει, όσο και για την ικανότητά της να παραμείνει στην εξουσία.

3. Ο δείκτης ανοικτής αγοράς (OMI): Ο δείκτης αυτός μετρά το άνοιγμα στο εμπόριο και αποτελείται από τις ακόλουθες επιμέρους συνιστώσες: εμπορικό άνοιγμα- εμπορική πολιτική- άνοιγμα στις άμεσες ξένες επενδύσεις και- υποδομές που ευνοούν το εμπόριο. Το Διεθνές Εμπορικό Επιμελητήριο (ICC) παρέχει τα δεδομένα.

Υπάρχουν διάφορες πιθανές αντιδράσεις στη διαπίστωση ότι ένα συγκεκριμένο υλικό είναι ή μπορεί να είναι κρίσιμο. Για τις επιχειρήσεις:

- να διερευνήσουν δυναμικά πιθανά υλικά υποκατάστασης,
- να βελτιώσουν τη χρήση των υλικών στην παραγωγή,
- επανασχεδιασμός προϊόντων για την εξάλειψη ή τη μείωση της χρήσης κρίσιμων υλικών,
- να διερευνήσουν τις δυνατότητες ανακυκλωμένων υλικών για την αντικατάσταση ή τη συμπλήρωση των προμηθειών πρωτογενών υλικών
- να εξετάσουν τη σύναψη μακροπρόθεσμων συμβάσεων ή τη δημιουργία αποθεμάτων για την εξασφάλιση προμηθειών για μελλοντικές κατασκευαστικές δραστηριότητες. (OECD)



Για τις κυβερνήσεις:

- υποστήριξη της γεωλογικής έρευνας για τον εντοπισμό νέων κοιτασμάτων ορυκτών και την καλύτερη αξιολόγηση γνωστών κοιτασμάτων,
- υποστήριξη της έρευνας για βελτιωμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης,
- να εξετάσουν εθελοντικά προγράμματα ή νομοθεσία για τη βελτίωση των ποσοστών συλλογής και της κατάλληλης επεξεργασίας των απορριπτόμενων προϊόντων που περιέχουν ανακυκλώσιμα υλικά.

Η εξασφάλιση του εφοδιασμού των κρίσιμων υλικών σε χώρες ή περιοχές περιλαμβάνει αναπόφευκτα το διεθνές εμπόριο, επειδή καμία χώρα ή περιοχή δεν διαθέτει την πλήρη παλέτα υλικών. Επειδή η χρήση των μετάλλων είναι ποικίλη, οι χώρες και οι ήπειροι του κόσμου συνδέονται με την αμοιβαία ανάγκη τους για το πλήρες φάσμα των υλικών, και αυτή η κατάσταση απαιτεί συνεχή διακρατική συνεργασία.

Η αποτελεσματικότητα της ανακύκλωσης παραμένει μια σημαντική πρόκληση για τα περισσότερα μέταλλα. Κατ' αρχήν, τα μέταλλα είναι ατελείωτα επαναχρησιμοποιήσιμα. Στην πράξη, συνήθως επαναχρησιμοποιούνται μόνο μία ή δύο φορές. Η κοινωνική δέσμευση και οι πολιτικές πρωτοβουλίες μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση αυτής της εικόνας.

Έτσι, ο χαρακτηρισμός μετάλλων ή ομάδων μετάλλων ως κρίσιμων συνεπάγεται πολιτικές επιπτώσεις για τις εταιρείες και τις κυβερνήσεις. Οι αντιδράσεις πρέπει να είναι εστιασμένες, εμπροσθοβαρείς και να επιδιώκονται με αφοσίωση, εάν πρόκειται να ελαχιστοποιηθούν ή να αποφευχθούν οι συνέπειες των περιορισμών στον εφοδιασμό κρίσιμων μετάλλων. (critical metals handbook)

## **3. Η εξορυκτική βιομηχανία και η προμήθεια κρίσιμων μετάλλων**

### **3.1. Αγορά**

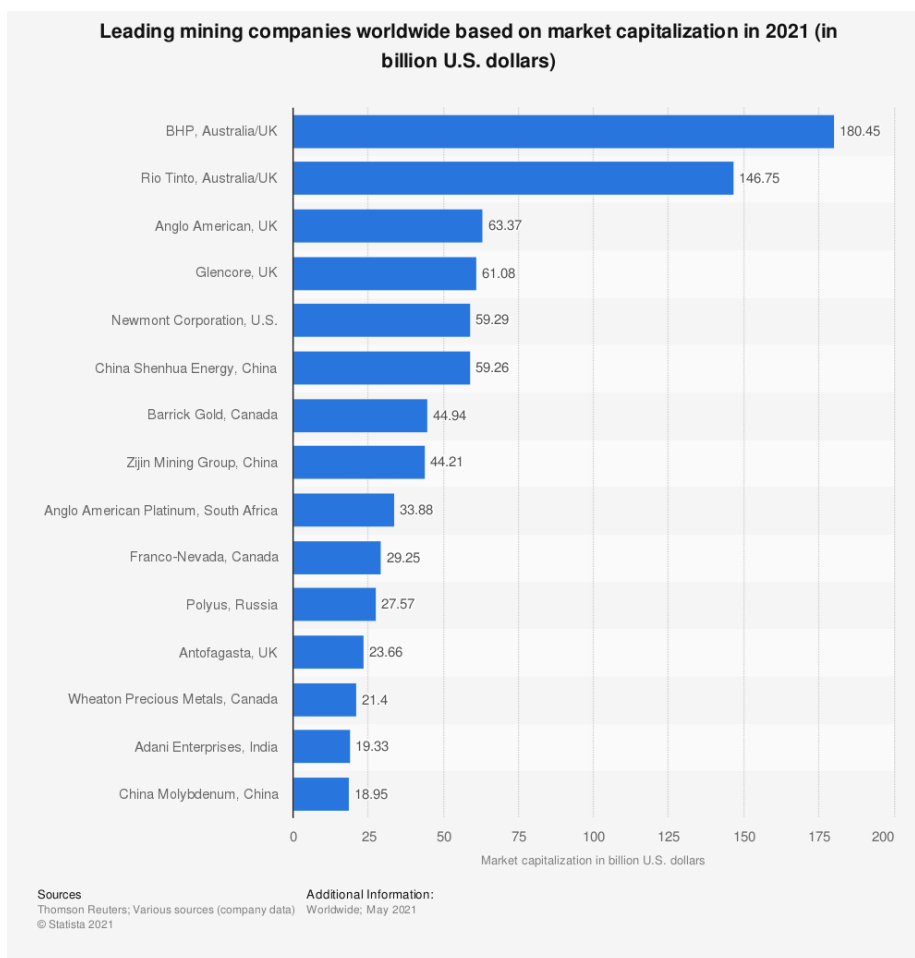
Τα ορυκτά προϊόντα αγοράζονται λόγω της χρησιμότητάς τους, η οποία αντανάκλαται στην τιμή που είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν οι καταναλωτές για αυτά. Η σωστή λειτουργία των αγορών θα πρέπει να διασφαλίζει ότι υπάρχει επαρκής προσφορά τέτοιων προϊόντων για την κάλυψη της ζήτησης των καταναλωτών. Η έλλειψη του περιζήτητου ορυκτού οδηγεί σε αύξηση των τιμών και ενθαρρύνει τις εταιρείες να επενδύσουν σε νέα παραγωγική ικανότητα. Η υπερβάλλουσα προσφορά οδηγεί σε πτώση των τιμών και περιορισμό της παραγωγής.

Ο ρόλος που διαδραματίζει η εξορυκτική βιομηχανία στην κάλυψη της ζήτησης για ορυκτά υπόκειται σε μια διπλότητα. Η οικονομική λειτουργία των μεταλλευτικών εταιρειών είναι να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της αγοράς, όπως αυτές εκφράζονται μέσω των τιμών των ορυκτών. Ως επί το πλείστον, η βιομηχανία το κάνει αυτό αρκετά αποτελεσματικά. Ο κλάδος ανέκαθεν διέθετε ισχυρή επιχειρηματική κουλτούρα και η αύξηση των τιμών των ορυκτών μπορεί συνήθως να στηριχθεί στο ότι οι εταιρείες εξόρυξης και εξερεύνησης θα παρακινήσουν τις εταιρείες να αναπτύξουν ορυχεία και να αναζητήσουν νέα κοιτάσματα ορυκτών.

Όπως και με τους καταναλωτές ορυκτών, οι παραγωγοί λειτουργούν σε εθνικό επίπεδο. Στο πλαίσιο αυτό, η εξόρυξη μπορεί να θεωρηθεί ως μέσο για την προώθηση ευρύτερων στόχων, όπως η οικονομική ανάπτυξη, η μείωση της φτώχειας ή η διεκδίκηση της εθνικής αυτοδιάθεσης. Η διεκδίκηση αυτών των στρατηγικών προτεραιοτήτων έχει ως αποτέλεσμα την πολιτικοποίηση των ορυκτών προϊόντων και καθορίζει την ικανότητα της εξορυκτικής βιομηχανίας να ανταποκρίνεται στα σήματα της αγοράς και, συνεπώς, να παρέχει τα ορυκτά που απαιτούν οι καταναλωτές.

Αν και δεν έχει την κλίμακα των βιομηχανιών πετρελαίου και φυσικού αερίου, η εξορυκτική βιομηχανία είναι, ωστόσο, μια πολύ μεγάλη βιομηχανία. Η επιχειρηματική αξία της παγκόσμιας εξορυκτικής βιομηχανίας το 2010 εκτιμάται ότι ήταν περίπου 2100 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Το Λονδίνο βρίσκεται στην καρδιά αυτής της βιομηχανίας και φιλοξενεί τα κεντρικά γραφεία αρκετών από τις μεγαλύτερες εταιρείες εξόρυξης παγκοσμίως. Τον Μάρτιο του 2013, υπήρχαν 30 εταιρείες εξόρυξης και μετάλλων στον FTSE 100 με συνδυασμένη κεφαλαιοποίηση 340 δισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ, το 12,7% της συνολικής αξίας του FTSE100. Επτά χρόνια νωρίτερα, το ποσοστό αυτό ήταν 6%.

Η δομή της παγκόσμιας εξορυκτικής βιομηχανίας σήμερα είναι προϊόν μιας μακράς και πολύπλοκης ιστορίας. Πρόκειται για μεγάλες εταιρείες, οι οποίες δραστηριοποιούνται σε πολλές γεωγραφικές περιοχές και παράγουν διάφορα ορυκτά. Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει σήμερα τις BHP Billiton, Glencore, Rio Tinto, Anglo American κλπ.



Σχήμα 3.1: Οι μεγαλύτερες εταιρείες εξόρυξης στον κόσμο με βάση την κεφαλαιοποίηση της αγοράς ([www.statista.com](http://www.statista.com))

Στο επόμενο επίπεδο κλίμακας, οι εταιρείες τείνουν να είναι περισσότερο εστιασμένες είτε σε σχέση με το εμπόρευμα είτε με τη χώρα. Η Antofagasta, για παράδειγμα, επικεντρώνεται στον χαλκό, ενώ η Barrick Gold και η AngloGold επικεντρώνονται, όπως υποδηλώνουν τα ονόματά τους, στην παραγωγή χρυσού. Οι περισσότερες από τις μεγαλύτερες μεταλλευτικές εταιρείες του κόσμου είναι δημόσιες εταιρείες, εισηγμένες σε χρηματιστήρια. Υπάρχουν, επιπλέον, μερικές μεταλλευτικές εταιρείες που είναι συγκρίσιμες ως προς την κλίμακα της παραγωγής τους σε ορυκτά με εκείνες που παρατίθενται στον πίνακα, οι οποίες ανήκουν είτε εξ ολοκλήρου είτε κατά κύριο λόγο στο κράτος. Σε αυτές περιλαμβάνονται η μεγαλύτερη παραγωγός χαλκού στον κόσμο, η Codelco, η οποία ανήκει στο κράτος της Χιλής, η China Shenhua, η Yanzhou Coal, η China Minmetals Corporation, η Chinalco, η Metallurgical Corporation of China, η China Nonferrous Metal Mining Corp. και ο όμιλος Jinchuan που ανήκουν στο κράτος της Κίνας. Αν και η παραγωγή από κρατικές επιχειρήσεις είναι σημαντική και αυξάνεται, η έκταση της κρατικής ιδιοκτησίας στην εξόρυξη

εξακολουθεί να είναι πολύ μικρότερη από ό,τι στην περίπτωση του πετρελαίου και του φυσικού αερίου.

Πέρα από τις μεγαλύτερες και μεσαίου μεγέθους μεταλλευτικές εταιρείες, υπάρχει τεράστιος αριθμός μικρότερων μεταλλευτικών επιχειρήσεων, που κυμαίνονται από εισηγμένες εταιρείες με δύο ή τρία ορυχεία μέχρι μικρές οικογενειακές επιχειρήσεις. Ορισμένες παράγουν για τις διεθνείς αγορές και άλλες μόνο για τις τοπικές αγορές. Η φύση του ορυκτού προϊόντος και η μορφή της εμφάνισής του παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των προϊόντων στα οποία επικεντρώνονται οι παραγωγοί αυτοί. Οι μικρές εταιρείες δεν προσπαθούν γενικά να ανταγωνιστούν στις αγορές ορυκτών όπου οι παραγωγοί χρειάζονται μεγάλα κεφάλαια, όπως το σιδηρομέταλλευμα. Μπορούν, ωστόσο, να δραστηριοποιηθούν σε αγορές όπου η ζήτηση είναι μικρή ή όπου τα κοιτάσματα μεταλλευμάτων μπορούν να επεξεργαστούν σε σχετικά μικρή κλίμακα, όπως τα πολύτιμα μέταλλα ή οι ημιπολύτιμοι λίθοι.

Οι άλλοι βασικοί παράγοντες στην εξίσωση του εφοδιασμού με ορυκτά είναι οι εταιρείες εξερεύνησης. Πρόκειται για το επιχειρηματικό σκέλος της επιχείρησης, όπου μικρές εταιρείες βγαίνουν για να βρουν κοιτάσματα ορυκτών με την ελπίδα είτε να μπορέσουν να τα εξορύξουν οι ίδιες είτε να τα πουλήσουν με καλό κέρδος σε μια μεγαλύτερη εταιρεία για ανάπτυξη. Δεδομένου ότι η εξερεύνηση μπορεί να δημιουργήσει τεράστια αξία για τους μετόχους, μετατρέποντας αυτό που διαφορετικά θα μπορούσε να είναι ένα αρκετά άχρηστο κομμάτι γης σε μια κερδοφόρα επιχειρηματική ευκαιρία, οι εταιρείες εξερεύνησης έχουν ισχυρή πρωτοποριακή ιδιότητα. Οι υψηλότερες ανταμοιβές συνήθως πηγαίνουν σε εκείνες με καινοτόμες ιδέες σχετικά με τη γένεση των μεταλλευμάτων ή που είναι προετοιμασμένες να ψάξουν σε απομακρυσμένα και δύσκολα μέρη.

Η εξερεύνηση είναι επίσης μια δραστηριότητα εξαιρετικά υψηλού κινδύνου και πολλές εξερευνησεις καταλήγουν σε αποτυχία και οι επενδυτές χάνουν τα χρήματά τους. Κατά συνέπεια, οι εταιρείες εξερεύνησης έχουν τα δικά τους ιδιαίτερα οικονομικά χαρακτηριστικά και τους δικούς τους ειδικούς επενδυτές. Οι τράπεζες, οι οποίες θα μπορούσαν κάλλιστα να ενδιαφερθούν να βοηθήσουν μια εταιρεία εξόρυξης με αποδεδειγμένα αποθέματα ορυκτών για τη χρηματοδότηση της κατασκευής ενός ορυχείου, δεν ενδιαφέρονται γενικά για τη χρηματοδότηση της εξερεύνησης. Συνεπώς, οι εταιρείες εξερεύνησης τείνουν να βασίζονται στη χρηματοδότηση των δραστηριοτήτων τους από μετοχές ή στην υποστήριξη μεγάλων ιδιωτών επενδυτών.

Οι μεγαλύτερες εταιρείες εξόρυξης δεν δίνουν γενικά μεγάλη σημασία στην αντιληπτή κρισιμότητα ενός ορυκτού κατά την αξιολόγηση μιας επένδυσης. Ο ρόλος τους είναι να παράγουν ορυκτά για τα οποία υπάρχει αποδεδειγμένη αγορά και να αποκομίζουν κέρδη με τον τρόπο αυτό. Ωστόσο, λόγω των αβεβαιοτήτων που συνδέονται με την πρόβλεψη των μακροχρόνιων τιμών των βασικών εμπορευμάτων, η μεταλλευτική εταιρεία θα επιδιώξει επίσης την άνεση να γνωρίζει ότι το κόστος της είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με εκείνο των άλλων εταιρειών του κλάδου.

Ως επί το πλείστον, η εξορυκτική βιομηχανία έχει ανταποκριθεί επιτυχώς στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς, και μάλιστα είναι οργανωμένη και έχει κίνητρα για να το κάνει. Η άνοδος των τιμών αποτελεί ένδειξη πραγματικής ή επικείμενης έλλειψης και οι εταιρείες ανταποκρίνονται ανάλογα, αυξάνοντας την παραγωγή από τις υφιστάμενες δραστηριότητες και ξεκινώντας έρευνες για νέους πόρους. Η άνοδος των τιμών έχει επίσης τονωτική επίδραση στις χρηματοπιστωτικές

αγορές και διευκολύνει την άντληση δανειακών και μετοχικών κεφαλαίων από τους μεταλλωρύχους και τους ερευνητές. Αντανακλώντας αυτούς τους παράγοντες, οι παγκόσμιες επενδύσεις σε μεταλλεία το 2011 εκτινάχθηκαν στα 175 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ, το υψηλότερο επίπεδο που έχει καταγραφεί ποτέ και οι επενδύσεις το 2012 πιστεύεται ότι ήταν ακόμη υψηλότερες. Για τα ορυκτά που σήμερα θεωρούνται κρίσιμα, και των οποίων η ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία τα επόμενα χρόνια, δεν υπάρχει κανένας λόγος για τον οποίο η βιομηχανία δεν θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθεί στην πρόκληση και να ανταποκριθεί στην αύξηση της ζήτησης.

Εκτός από την ενθάρρυνση της ανάπτυξης των γνωστών κοιτασμάτων υψηλής ποιότητας, οι υψηλότερες τιμές των ορυκτών έχουν ως αποτέλεσμα τη μετατροπή των οριακά οικονομικών πόρων σε εκμεταλλεύσιμα αποθέματα, και μπορούν ομοίως να μετατρέψουν τις χωματερές από προηγούμενες εκμεταλλεύσεις σε πηγές ανακτήσιμου προϊόντος. Το συνεχές ενδιαφέρον για τα ορυκτά αυτά θα τονώσει επίσης το ενδιαφέρον για επενδύσεις και βελτίωση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση των ορυκτών αυτών. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι το ορυχείο σπάνιων γαιών Mountain Pass της Molycorp Minerals στην Καλιφόρνια, το οποίο άνοιξε εκ νέου λόγω των υψηλότερων τιμών των σπάνιων γαιών, έχει αναδιαμορφωθεί πλήρως από τότε που έκλεισε το 1995 μετά από ενδελεχή επανεξέταση όλων των πτυχών της τεχνικής και περιβαλλοντικής του απόδοσης. Το νέο ορυχείο θα έχει ανάκτηση 95% έναντι 60-65% στο παλιό ορυχείο, θα χρησιμοποιεί 30% λιγότερα αντιδραστήρια και μόνο 4% του γλυκού νερού. Κατά συνέπεια, θα είναι σε θέση να παράγει στοιχεία σπάνιων γαιών με πολύ χαμηλότερο κόστος από ό,τι μπορούσε όταν λειτουργούσε προηγουμένως.

Αυτές οι επιπτώσεις των υψηλότερων τιμών αποτελούν μέρος του κανονικού μηχανισμού προσαρμογής στις αγορές ορυκτών. Πράγματι, ορισμένες από τις αλλαγές που επιφέρουν οι μεταβολές της ζήτησης που προκαλούνται από τις τιμές έχουν ευεργετικά μακροπρόθεσμα αποτελέσματα όσον αφορά την αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης των υλικών και την προώθηση της τεχνολογικής προόδου. Κανονικά, οι αγορές προσαρμόζονται βραχυπρόθεσμα μέσω της τιμολόγησης της ζήτησης που προκαλείται από τις τιμές και μακροπρόθεσμα μέσω της αύξησης της προσφοράς.

### **3.2. Φυσικοί περιορισμοί**

Ένα από τα πιο καθοριστικά χαρακτηριστικά της βιομηχανίας ορυκτών πόρων είναι ότι οι ορυκτοί πόροι εξαντλούνται μέσω της εκμετάλλευσης. Αυτό δημιουργεί την κοινή αντίληψη ότι η φυσική διαθεσιμότητα μπορεί να αποτελέσει περιορισμό για τις μελλοντικές προμήθειες ορυκτών πόρων. Στην πραγματικότητα, η φυσική διαθεσιμότητα των ορυκτών στο έδαφος, δεν αποτελεί σχεδόν ποτέ

περιορισμό στην προσφορά ορυκτών πόρων. Ενώ ορισμένα ορυκτά είναι αναπόφευκτα ευκολότερο να βρεθούν και να αναπυχθούν από άλλα, τα περισσότερα ορυκτά που εξορύσσονται εμπορικά είναι διαθέσιμα σε ποσότητες που επαρκούν για πολλά χρόνια.

Ένας απλός τρόπος για να εξετάσουμε την επάρκεια των αποθεμάτων ορυκτών είναι να διαιρέσουμε τα αναφερόμενα αποθεμάτων ενός ορυκτού με την ετήσια παραγωγή για να προκύψει ένας "δείκτης στατικής ζωής", δηλαδή μια εκτίμηση της αναμενόμενης ζωής των εναπομενόντων αποθεμάτων εκφρασμένη σε έτη. Για πολλά από τα πιο εμπορικά σημαντικά ορυκτά, όπως ο χαλκός και το νικέλιο, η διάρκεια ζωής των αποθεμάτων τείνει να κυμαίνεται μεταξύ 20 και 50 ετών. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διάρκεια ζωής αυτών των αποθεμάτων δεν έχει αλλάξει πολύ εδώ και πολλά χρόνια. Καθώς η παραγωγή έχει αυξηθεί, τα αποθέματα έχουν αυξηθεί. Επιπλέον, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι τα περισσότερα ορυκτά δεν καταστρέφονται από τη χρήση και ότι εκτός από τα αποθέματα στο έδαφος υπάρχουν σημαντικές ποσότητες υλικών που είναι διαθέσιμες για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση.

Για τα CRMs η εικόνα της διάρκειας ζωής των αποθεμάτων είναι πιο ποικίλη. Ορισμένα, όπως οι σπάνιες γαίες, το λίθιο και το ταντάλιο, έχουν αναφερθεί αποθέματα τα οποία είναι πράγματι πολύ μεγάλα σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα παραγωγής, που εκτείνονται στην περίπτωση των πρώτων δύο έως 700 ετών. Για άλλα, επειδή ανακτώνται ως παραπροϊόντα, δεν υπάρχουν αξιολογές εκτιμήσεις αποθεμάτων, οπότε δεν μπορεί να γίνει υπολογισμός της διάρκειας ζωής των αποθεμάτων.

Αν η φυσική διαθεσιμότητα των ορυκτών δεν αποτελεί σημαντικό περιορισμό για την ανταπόκριση της βιομηχανίας ορυκτών στην προσφορά, η γεωγραφική συγκέντρωση των ορυκτών πόρων μπορεί να είναι. Μια τέτοια συγκέντρωση υπάρχει στην περίπτωση των μετάλλων της ομάδας του λευκόχρυσου (PGM). Σύμφωνα με τη Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ, περίπου το 95 % των παγκόσμιων αποθεμάτων PGM βρίσκονται στη Νότια Αφρική, στο σύμπλεγμα Bushveld. Μια τέτοια συγκέντρωση αποθεμάτων δεν αποτελεί από μόνη της περιορισμό της προσφοράς, αλλά καθιστά την προσφορά πιο ευάλωτη σε περιορισμούς. Έτσι, ενώ τα αποθέματα της Νότιας Αφρικής επαρκούν για να τροφοδοτήσουν τις παγκόσμιες αγορές με PGM για πολλά χρόνια, διάφοροι παράγοντες έχουν περιορίσει την πρόσβαση στα αποθέματα. Μεγάλο μέρος των καλύτερων αποθεμάτων είναι δεσμευμένο από έναν από τους υφιστάμενους μεγάλους παραγωγούς και, ως εκ τούτου, δεν είναι διαθέσιμο σε νεοεισερχόμενους στον κλάδο.

Άλλη περίπτωση όπου η υψηλή συγκέντρωση αποθεμάτων αποτελεί δυνητικό περιορισμό είναι το κοβάλτιο στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό. Η ΛΔΚ αντιπροσωπεύει περίπου τα μισά παγκόσμια αποθέματα κοβαλτίου και περίπου το ήμισυ της παραγωγής του. Το δύσκολο επενδυτικό κλίμα στη ΛΔ Κονγκό και η απροθυμία των μεγάλων διεθνών εταιρειών να δραστηριοποιηθούν εκεί, έχει καταστήσει το θέμα αυτό επί μακρόν ανησυχητικό για τα κράτη καταναλωτές.

Ένας άλλος φυσικός περιορισμός στην ικανότητα της εξορυκτικής βιομηχανίας να ανταποκρίνεται στις ελλείψεις είναι το γεγονός ότι ορισμένα μέταλλα παράγονται κατά κανόνα ως παραπροϊόντα άλλων, οικονομικά σημαντικότερων, μετάλλων. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν μπορούν να ανακτηθούν από μόνα τους, αλλά ότι το κόστος είναι πολύ υψηλότερο, ίσως και απαγορευτικό. Έτσι, το κοβάλτιο παράγεται σε μεγάλο βαθμό ως υποπροϊόν του χαλκού και του νικελίου. Το κάδμιο, το ίνδιο και το γερμάνιο παράγονται ως υποπροϊόντα της παραγωγής ψευδαργύρου και του χαλκού.

Το γερμάνιο ανακτάται επίσης από την ιπτάμενη τέφρα του άνθρακα. Το γάλλιο παράγεται ως υποπροϊόν του βωξίτη. Το μολυβδαίνιο, το ρήνιο, το σελήνιο και το τελλούριο παράγονται ως παραπροϊόντα του χαλκού.

Το πρόβλημα για τα μέταλλα αυτά είναι ότι η προμήθειά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα οικονομικά στοιχεία παραγωγής του μετάλλου του οποίου αποτελούν παραπροϊόν. Εάν η παραγωγή του κύριου μετάλλου παύσει να είναι οικονομικά βιώσιμη, τότε θα πάψει να ανακτάται και το υποπροϊόν. Για το λόγο αυτό, η προσφορά των παραπροϊόντων τείνει να είναι αναίσθητη στις μεταβολές του επιπέδου της ζήτησης και οι τιμές των ορυκτών που ανακτώνται ως υποπροϊόντα μπορεί να παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις.

### **3.3. Κρίσιμα ορυκτά και ο ρόλος της Κίνας**

Τα συγκεκριμένα ορυκτά που αποτελούν αντικείμενο ανησυχίας για τις χώρες που καταναλώνουν ορυκτά ποικίλλουν διαχρονικά, όπως επίσης και οι χώρες που θεωρούνται αναξιόπιστες πηγές εφοδιασμού. Αυτό με τη σειρά του έχει συνέπειες για τους παραγωγούς, ο ρόλος των οποίων είναι να προσπαθούν να διασφαλίσουν την επαρκή προμήθεια των ορυκτών.

Η εξελιγμένη φύση των προϊόντων στα οποία χρησιμοποιούνται τα ορυκτά που σήμερα χαρακτηρίζονται ως κρίσιμα και η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των δεσμών μεταξύ των διαφόρων τομέων των σύγχρονων οικονομιών, καθιστά την απειλή που θα συνιστούσε η μη προμήθειά τους δυσκολότερη να εκτιμηθεί από ό,τι συνέβαινε σε παλαιότερες εποχές. Η γεωγραφική εστίαση της ανησυχίας έχει, λοιπόν, μετατοπιστεί προς την Κίνα. Αυτό προκύπτει από τα γεγονότα ότι η Κίνα είναι ένας σημαντικός παραγωγός και προμηθευτής πολλών ορυκτών υψηλής τεχνολογίας και οι δυτικοί καταναλωτές εξαρτήθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τις προμήθειες από την Κίνα κατά τη διάρκεια ετών κατά τα οποία η Κίνα προσέφερε αυτά τα ορυκτά σε σημαντικά χαμηλότερες τιμές από ό,τι ήταν διαθέσιμα από προμηθευτές αλλού. Από τα ορυκτά, που η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έκρινε ως τα πλέον κρίσιμα - αντιμόνιο, βηρύλλιο, φθοριούχος αδάμαντας, γάλλιο, γερμάνιο, γραφίτης, ίνδιο, μαγνήσιο, σπάνιες γαίες, βολφράμιο, νιόβιο, ορυκτά μέταλλα, κοβάλτιο και ταντάλιο - τουλάχιστον 10 προμηθεύεται η ΕΕ μερικώς από την Κίνα. Η ανησυχία είναι ότι η αυξανόμενη εγχώρια χρήση αυτών των ορυκτών από την Κίνα μειώνει τις προμήθειες που διατίθενται για εξαγωγές, δημιουργώντας αυξημένο ανταγωνισμό για προμήθειες μεταξύ άλλων χρηστών αυτών των ορυκτών και ασκώντας ανοδικές πιέσεις στις τιμές.

Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι, δεδομένου ότι είναι η μεγαλύτερη και ταχύτερα αναπτυσσόμενη αγορά ορυκτών στον κόσμο, η Κίνα συμερίζεται πολλές από τις ανησυχίες των ΗΠΑ και της ΕΕ σχετικά με τη διαθεσιμότητα των ορυκτών. Στην πραγματικότητα, λόγω της ανάγκης για καλή προμήθεια πρώτων υλών για την υποστήριξη της ταχείας εκβιομηχάνισης και αστικοποίησης της χώρας, και επειδή η νομιμότητα της ηγεσίας της Κίνας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητά της να διατηρεί υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης, η Κίνα λαμβάνει το θέμα

του εφοδιασμού με ορυκτά πολύ σοβαρά υπόψη. Για τα ορυκτά που μπορεί να προμηθευτεί εσωτερικά, η κινεζική κυβέρνηση έχει γενικά ενθαρρύνει την ανάπτυξη τοπικών ορυχείων.

Υπάρχει, ωστόσο, ένας μακρύς κατάλογος ορυκτών τα οποία η Κίνα δεν μπορεί να προμηθευτεί εξ ολοκλήρου από εγχώριες πηγές. Από το 2010, η Κίνα έπρεπε να εισάγει το 100 % των PGMs της, το 85 % του χαλκού και του νικελίου της και το 70 % του σιδηρομεταλλεύματός της. Για τα ορυκτά αυτά, η Κίνα αναγκάστηκε να στραφεί στις διεθνείς αγορές και οι αγορές της από αυτά και πολλά άλλα ορυκτά αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα που οδήγησε τις παγκόσμιες αγορές και τις επενδύσεις σε ορυκτά τα τελευταία χρόνια. Επιπλέον, από το 2004, οι κινεζικές εταιρείες ήταν ιδιαίτερα δραστήριες στην αναζήτηση επενδυτικών ευκαιριών για σιδηρομεταλλεύματα στο εξωτερικό, ιδίως στην Αυστραλία, αλλά έχουν επίσης επενδύσει σε άλλα μεταλλευτικά έργα, όπως αυτά για χαλκό, νικέλιο και άνθρακα.

Οι μικρότερες μεταλλευτικές επιχειρήσεις ήταν εξαιρετικά δραστήριες στην υλοποίηση έργων που στοχεύουν στα κρίσιμα μέταλλα και σε άλλα που αντιμετωπίζουν μειωμένες προμήθειες από την Κίνα. Για ορυκτά όπως το γάλλιο, το γερμάνιο και το ίνδιο, τα οποία ανακτώνται ως υποπροϊόντα και τα οποία προέρχονται από την Κίνα ως αποτέλεσμα της ταχείας ανάπτυξης της Κίνας, η εξορυκτική βιομηχανία μπορεί να κάνει ελάχιστα για να ανακουφίσει τις ελλείψεις εφοδιασμού. Γενικά, δεν θα είναι οικονομικό για τις μεταλλευτικές εταιρείες να επιδιώξουν την παραγωγή αυτών των ορυκτών από μόνοι τους, και το ζήτημα της ανταπόκρισης στον εφοδιασμό εναπόκειται μάλλον στους μεταποιητές μετάλλων εκτός Κίνας. (critical metals handbook)

## **4. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ**

### **4.1. Γενική εικόνα**

Ο κόσμος αντιμετωπίζει μεγάλες κοινωνικές προκλήσεις, όπως η κλιματική αλλαγή, ο ενεργειακός εφοδιασμός και η διαθεσιμότητα κρίσιμων πόρων. Τα μέταλλα είναι απαραίτητα για την οικονομία στο σύνολό της και για τα προϊόντα και τις τεχνολογίες που θα επιτρέψουν τη μετάβαση προς μια κοινωνία ικανή να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις. Τα τεχνολογικά μέταλλα, στα οποία περιλαμβάνονται τα κρίσιμα μέταλλα, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο πλαίσιο αυτό όχι μόνο για την Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και για όλες τις βιομηχανικές περιοχές του κόσμου. Η μετάβαση προς μια ανταγωνιστική και βιώσιμη οικονομία απαιτεί πρόσβαση σε αυτά τα μέταλλα σε επαρκείς ποσότητες και σε ανταγωνιστικό κόστος. Αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ότι, μεταξύ άλλων, ένας σημαντικός τομέας χρήσης των τεχνολογικών μετάλλων είναι η παραγωγή ενέργειας. Καθώς ειδικά η Ευρώπη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές μετάλλων και συμπυκνωμάτων και οι πρωτογενείς πόροι από ευρωπαϊκά κοιτάσματα δεν είναι διαθέσιμοι σε επαρκείς ποσότητες για



τα περισσότερα μέταλλα, η ανακύκλωση αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο σε κάθε στρατηγική για την εξασφάλιση μακροπρόθεσμου εφοδιασμού και για την ανεξαρτητοποίηση από γεωπολιτικές αντιξοότητες.

Σε αντίθεση με τις ενεργειακές πρώτες ύλες, τα μέταλλα δεν καταναλώνονται, αλλά μπορούν να διατηρηθούν σε έναν "αιώνιο" κύκλο ζωής. Η χρήση των μετάλλων, ιδίως των τεχνολογικών μετάλλων σε βιομηχανικά και καταναλωτικά προϊόντα, έχει αυξηθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Για παράδειγμα, περισσότερο από το 80% της παγκόσμιας παραγωγής μετάλλων της ομάδας της πλατίνας (PGM), των σπάνιων γαιών, του ινδίου και του γαλλίου από το 1900 και μετά, πραγματοποιήθηκε τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, και πολλά από αυτά τα μέταλλα εξακολουθούν να δεσμεύονται στην "τεχνολογική" ή "ανθρωποκεντρική" σφαίρα. Ως αποτέλεσμα, προϊόντα όπως τα αυτοκίνητα, τα ηλεκτρονικά, οι μπαταρίες και οι βιομηχανικοί καταλύτες έχουν εξελιχθεί σε έναν δυναμικό "ανανεώσιμο" μεταλλικό πόρο για το μέλλον, που συχνά αναφέρεται ως αστικό ή επίγειο ορυχείο, το οποίο δεν πρέπει να σπαταληθεί. Επιπλέον, σε σύγκριση με τα φυσικά μεταλλεύματα, οι συγκεντρώσεις μετάλλων σε πολλά προϊόντα είναι σχετικά υψηλές. Για παράδειγμα, ένα τυπικό πρωτογενές ορυχείο χρυσού αποδίδει περίπου 5 γραμμάρια χρυσού ανά τόνο (g/t) μεταλλεύματος. Στα ηλεκτρονικά απορρίμματα, ο αριθμός αυτός ανέρχεται σε 200-250 g/t για τις πλακέτες κυκλωμάτων υπολογιστών και σε 300-350 g/t για τα ακουστικά κινητών τηλεφώνων, περιεκτικότητες που είναι πολύ ασυνήθιστες στα πρωτογενή κοιτάσματα χρυσού. Ένας καταλύτης περιέχει περίπου 2000 g/t PGM στο κεραμικό τούβλο, σε σύγκριση με τις μέσες συγκεντρώσεις PGM μικρότερες από 10 g/t στα περισσότερα ορυχεία που παράγουν PGM. Λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πρωτογενούς παραγωγής πολύτιμων μετάλλων λόγω των χαμηλών συγκεντρώσεων μεταλλεύματος, των δύσκολων συνθηκών εξόρυξης και άλλων παραγόντων, η ανακύκλωση θραυσμάτων γίνεται ακόμη πιο επωφελής από την άποψη της προστασίας του περιβάλλοντος.

Η πρόκληση, ωστόσο, είναι ότι τα περισσότερα καταναλωτικά προϊόντα διανέμονται ευρέως και συχνά είναι δύσκολο να εντοπιστούν σε όλο τον πλανήτη και ότι, αν και οι συγκεντρώσεις μετάλλων είναι υψηλές, η απόλυτη περιεκτικότητα σε μέταλλα σε μια συσκευή είναι συχνά πολύ χαμηλή. Κατά συνέπεια, προκειμένου να αξιοποιηθούν οικονομικά αυτά τα αστικά ορυχεία, είναι πρώτα απαραίτητο να συγκεντρωθούν επαρκείς ποσότητες αυτών των διασκορπισμένων προϊόντων ώστε να δημιουργηθεί ένα πραγματικό επίγειο κοιτάσμα που θα πληρεί το δεύτερο βασικό κριτήριο για ένα οικονομικά βιώσιμο "σώμα μεταλλεύματος" εκτός από τη συγκέντρωσή του, δηλαδή τον επαρκή όγκο.

Τα κινητά τηλέφωνα περιέχουν πάνω από 40 διαφορετικά χημικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων βασικών μετάλλων όπως χαλκός (Cu), νικέλιο (Ni) και κασσίτερος (Sn), ειδικών μετάλλων όπως κοβάλτιο (Co), ίνδιο (In) και αντιμόνιο (Sb), και τα πολύτιμα μέταλλα άργυρος (Ag), χρυσός (Au) και παλλάδιο (Pd). Τα μέταλλα, κυρίως ο χαλκός, αποτελούν περίπου το ένα τέταρτο του βάρους ενός τέτοιου τηλεφώνου. Σε έναν τόνο κινητών τηλεφώνων (που ισοδυναμεί με περίπου 13.000 μονάδες χωρίς μπαταρίες) αυτό προσθέτει κατά μέσο όρο 3,5 κιλά Ag, 340 γραμμάρια Au, 130 γραμμάρια Pd και έως και 130 κιλά Cu. Η αξία αυτών των μετάλλων μπορεί να ξεπεράσει τα 10.000 ευρώ ανά τόνο, με περισσότερο από το 80% του συνόλου να αποδίδεται στα πολύτιμα μέταλλα. Είναι ο καθαρός αριθμός των κινητών τηλεφώνων που χρησιμοποιούνται που καθιστά αυτόν τον μεταλλικό

πόρο σημαντικό. Μόνο το 2010 πουλήθηκαν παγκοσμίως περίπου 1,6 δισεκατομμύρια μονάδες και, μέχρι το τέλος του 2010, οι συνολικές παγκόσμιες πωλήσεις είχαν φθάσει περίπου τα 10 δισεκατομμύρια μονάδες, που αντιστοιχούν περίπου σε 1,5 τηλέφωνο για κάθε άνθρωπο που ζει σήμερα στον πλανήτη.

Η χρήση των μετάλλων στα αυτοκίνητα αποτελεί ένα άλλο παράδειγμα μετάλλων που είναι δυναμικά διαθέσιμα από το "αστικό ορυχείο". Στα αυτοκίνητα, ο καταλύτης στο σύστημα εξάτμισης αντιπροσωπεύει πάνω από το 50% της παραγωγής ορυχείων μεταλλικών μετάλλων (ιδίως πλατίνα, παλλάδιο και ρόδιο) για πολλά χρόνια και η πρόσφατη διάδοση των ηλεκτρονικών στοιχείων στα οδικά οχήματα θα έχει αυξανόμενο αντίκτυπο στη ζήτηση χρυσού, αργύρου και ορισμένων κρίσιμων μετάλλων. Δεδομένης της αναμενόμενης έκρηξης της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων, θα απαιτηθούν ακόμη περισσότερα τεχνολογικά μέταλλα. Αυτά θα περιλαμβάνουν περισσότερα PGM για συστοιχίες κυψελών καυσίμου, κοβάλτιο, λίθιο και σπάνιες γαίες για μπαταρίες και ηλεκτρικούς κινητήρες, και βισμούθιο και μέταλλα ημιαγωγών, όπως αντιμόνιο, τελλούριο, γερμάνιο, για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές στις οποίες η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ευρώπη, η μεγάλη αύξηση της ζήτησης για PGM σε αυτή την εφαρμογή άρχισε στα μέσα της δεκαετίας του 1990. Ως αποτέλεσμα, με δεδομένη τη σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής των αυτοκινήτων (10-15 έτη), αυτό σημαίνει ότι περίπου 1100 τόνοι PGM εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στα ευρωπαϊκά αυτοκίνητα και έως 3000 τόνοι παγκοσμίως. Οι περισσότεροι καταλύτες αυτοκινήτων που ανακυκλώνονται σήμερα είναι από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, οπότε στο μέλλον οι δυνατότητες ανακύκλωσης PGM από τα αυτοκίνητα που κυκλοφορούν σήμερα είναι τεράστιες.

### Πλεονεκτήματα

Σήμερα υπάρχει ευρεία συναίνεση ότι η ανακύκλωση προσφέρει σημαντικά οφέλη, τόσο από περιβαλλοντική άποψη όσο και από την αύξηση της ασφάλειας εφοδιασμού με μέταλλα. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η ανακύκλωση:

- μειώνει την περιβαλλοντική επιβάρυνση που θα προέκυπτε διαφορετικά (αποτρέποντας τις εκπομπές από τα απορριπτόμενα προϊόντα και τους χώρους υγειονομικής ταφής στο έδαφος, το νερό και τον αέρα και μειώνοντας τη χρήση της γης που απαιτείται για τη φιλοξενία των απορριμμάτων),
- μετριάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξόρυξης (μειώνοντας την απαιτούμενη ποσότητα εξόρυξης και μειώνοντας έτσι τη ζήτηση ενέργειας, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τη χρήση γης και νερού και τις επιπτώσεις στη βιόσφαιρα, π.χ. στα τροπικά δάση, στις περιοχές της Αρκτικής, στους πυθμένες των ωκεανών),
- παρατείνει τη διάρκεια ζωής και διατηρεί τους πρωτογενείς γεωλογικούς πόρους (και έτσι συμβάλλει στην αγορά χρόνου για την ανάπτυξη βελτιωμένων τεχνικών εξόρυξης και επεξεργασίας που θα μπορούσαν να διευκολύνουν την εξόρυξη μετάλλων από χαμηλής ποιότητας ή βαθιά μεταλλευτικά σώματα),

- μειώνει τις γεωπολιτικές εξαρτήσεις που προκύπτουν όταν οι κρίσιμοι μεταλλικοί πόροι συγκεντρώνονται σε λίγες χώρες εξόρυξης και/ή βρίσκονται στα χέρια μικρού αριθμού εταιρειών (η ανακύκλωση επομένως δημιουργεί ουσιαστικά έναν σημαντικό τοπικό πόρο),
- συμβάλλει στην ασφάλεια εφοδιασμού των δευτερευόντων και κρίσιμων μετάλλων με τη μερική αποσύνδεση της παραγωγής τους από την πρωτογενή παραγωγή των σχετικών κύριων μετάλλων (η ισχυρή σύνδεση μεταξύ της παραγωγής μετάλλων-φορέων και των δευτερευόντων μετάλλων-παραπροϊόντων περιορίζει τον πρωτογενή εφοδιασμό σημαντικών τεχνολογικών μετάλλων),
- υποστηρίζει την ηθική προμήθεια πρώτων υλών (μέσω της βελτίωσης της διαφάνειας της αλυσίδας εφοδιασμού, διασφαλίζοντας ότι δεν χρησιμοποιούνται μέταλλα που προέρχονται από εμπόλεμες περιοχές στην Αφρική ή αλλού),
- αμβλύνει τις διακυμάνσεις των τιμών των μετάλλων βελτιώνοντας την ισορροπία μεταξύ ζήτησης και προσφοράς και περιορίζοντας την κερδοσκοπία μέσω της διεύρυνσης της βάσης προσφοράς
- δημιουργεί σημαντικό δυναμικό απασχόλησης, συμπεριλαμβανομένων θέσεων εργασίας υψηλής τεχνολογίας και υποδομών.

### Κύκλος ζωής

Η πλήρως αποτελεσματική ανακύκλωση θα μπορούσε, κατ' αρχήν, να οδηγήσει σε έναν άπειρο κύκλο χρήσης των μετάλλων. Η ποιότητα των ανακυκλωμένων μετάλλων αντιστοιχεί στην ποιότητα των πρωτογενών μετάλλων και διαπραγματεύονται αντίστοιχα σε ίδιες τιμές. Ως εκ τούτου, από τη στιγμή που τα μέταλλα ανακυκλώνονται δεν υπάρχει ανάγκη παροχής κινήτρων για τη χρήση τους. Στην πράξη, ωστόσο, κάποια ποσότητα μετάλλων χάνεται αναπόφευκτα από τον κύκλο ζωής των προϊόντων, επειδή παύουν να είναι προσβάσιμα για ανάκτηση για διάφορους λόγους.

Η βασική πρόκληση, επομένως, είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών μετάλλων. Ο κύκλος ζωής των μετάλλων ξεκινά με την εξερεύνηση και την εξόρυξη που φέρνουν τα υλικά από τη γήινη σφαίρα στην τεχνολογική σφαίρα. Στη συνέχεια, η βασική ιδέα για τη βιώσιμη χρήση των μετάλλων είναι κατ' αρχήν απλή:

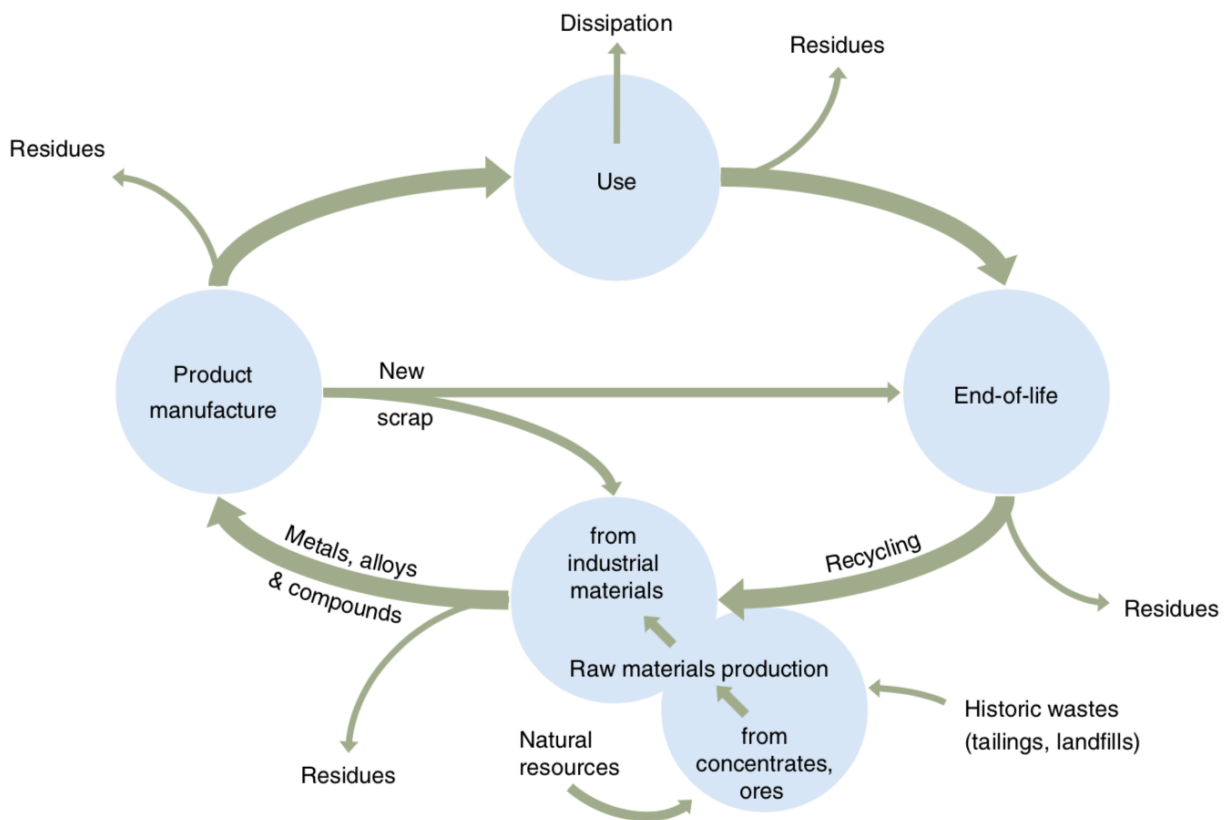
- Εξόρυξη των μετάλλων με αποτελεσματικό τρόπο από τα μεταλλεύματα.
- Χρήση όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά στην κατασκευή προϊόντων.
- Αποφυγή της διάχυσης κατά τη χρήση και στο τέλος του κύκλου ζωής τους.
- Ελαχιστοποίηση των απωλειών μετάλλων σε κατάλοιπα κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων του κύκλου ζωής. Τέτοια κατάλοιπα μπορεί να περιλαμβάνουν τα υπολείμματα και τις σκωρίες από την πρωτογενή παραγωγή, τα απορρίμματα παραγωγής από την κατασκευή, τα προϊόντα που απορρίπτονται κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους, τα μη ανακυκλωμένα ρεύματα και τις σκωρίες, τα απόβλητα και τα τελικά απόβλητα στο τέλος του κύκλου ζωής.

Όπου τα εν λόγω υπολείμματα δεν μπορούν να αποφευχθούν, πρέπει να ανακυκλώνονται με υψηλή απόδοση. Με αυτόν τον τρόπο τα μέταλλα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε υψηλό

ποσοστό σε επιτυχείς κύκλους ζωής. Αυτό σημαίνει ότι τόσο τα απορρίμματα που παράγονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής όσο και τα προϊόντα που προέρχονται από το τέλος του κύκλου ζωής τους αποτελούν νέες πηγές πρώτων υλών. Συνεπώς, είναι επιθυμητή η μείωση των μη ανακυκλωμένων υπολειμμάτων που προέρχονται από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής. Αυτό απαιτεί "έξυπνο" σχεδιασμό προϊόντων και χρήση κατάλληλων και καινοτόμων διαδικασιών σε όλη την αλυσίδα.

Μαζί, η βελτίωση της αποδοτικότητας στην πρωτογενή παραγωγή και η επανεπεξεργασία πρωτογενών αποβλήτων, όπως τα απόβλητα των ορυχείων και οι σκωρίες των χυτηρίων, αποτελούν μια μεγάλη και προσβάσιμη δυναμική πρόσθετη πηγή για τα περισσότερα μέταλλα-παραπροϊόντα, όπως το ίνδιο, το γερμάνιο, το μολυβδαίνιο, το ρήνιο και το γάλλιο. Ωστόσο, για τα περισσότερα πολύτιμα μέταλλα, όπως τα PGM, αυτές οι ανεπάρκειες στην πρωτογενή αλυσίδα εφοδιασμού έχουν ήδη ξεπεραστεί σε μεγάλο βαθμό λόγω της υψηλής τους αξίας.

Στην επεξεργασία (εμπλουτισμός), η ανακύκλωση των απορριμμάτων παραγωγής γίνεται συνήθως πιο δύσκολη όταν προχωρά η παραγωγική διαδικασία. Για παράδειγμα, ενώ η ανακύκλωση του ινδίου από την κατασκευή στόχων εκτόξευσης και των χρησιμοποιημένων στόχων ΙΤΟ είναι σχετικά απλή, η ανάκτηση του μετάλλου από τα απόβλητα του θαλάμου εκτόξευσης, από σπασμένο ή εκτός προδιαγραφών γυαλί οθόνης υγρών κρυστάλλων (LCD) ή φωτοβολταϊκές μονάδες εκτός προδιαγραφών γίνεται όλο και πιο δύσκολη. Στα πρώτα στάδια της διαδικασίας κατασκευής υπάρχει σημαντική δυνατότητα ανακύκλωσης για πολλά τεχνολογικά μέταλλα. Στην περίπτωση του ινδίου, του γερμανίου και του ρουθηνίου, αυτά έχουν υλοποιηθεί σε αυξανόμενο βαθμό τα τελευταία χρόνια, και πάλι λόγω της αύξησης των τιμών. Οι απώλειες μετάλλων που συμβαίνουν κατά τη χρήση ενός προϊόντος δεν μπορούν γενικά να ανακτηθούν λόγω της αποικοδομητικής τους φύσης. Η ανακύκλωση των προϊόντων θα είναι το κλειδί για την επίτευξη βιώσιμης χρήσης των μετάλλων. Αυτό έχει αναγνωριστεί από κυβερνητικούς φορείς που επιδιώκουν να περιορίσουν την παραγωγή αποβλήτων και να χρησιμοποιήσουν τα απόβλητα ως πόρο.



Σχήμα 4.1: Βιώσιμη χρήση των μετάλλων κατά μήκος του κύκλου ζωής των προϊόντων (critical metals handbook)

## 4.2. Στάδια Ανακύκλωσης

Σε κάθε ένα από τα κύρια στάδια εμπλέκονται διαφορετικοί ενδιαφερόμενοι και εταιρείες. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας, οι απαιτήσεις σε δεξιότητες και υποδομές και ο όγκος των επενδύσεων αυξάνονται σημαντικά κατά μήκος της αλυσίδας της διαδικασίας:

1. Συλλογή: μπορεί να οργανωθεί από εθνικά ή δημοτικά συστήματα ανάκτησης, συστήματα αρχικού κατασκευαστή εξοπλισμού, εμπορικές ή φιλανθρωπικές οργανώσεις και περιλαμβάνει εταιρείες εφοδιασμού. Η συλλογή πραγματοποιείται συνήθως σε τοπικό ή περιφερειακό επίπεδο και συνήθως συμμετέχουν μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις.
2. Αποσυναρμολόγηση και προεπεξεργασία: χρησιμοποιούνται χειροκίνητες ή/και μηχανικές διαδικασίες, συχνά σε συνδυασμό. Πραγματοποιείται σε τοπικό, περιφερειακό και

διαπεριφερειακό επίπεδο, και πάλι με τη συμμετοχή πολλών μικρομεσαίων επιχειρήσεων, αλλά και ορισμένων μεγάλων εταιρειών διαχείρισης αποβλήτων.

3. Μεταλλουργική ανάκτηση μετάλλων: περιλαμβάνει συνδυασμό πυρομεταλλουργικών (τήξη) και υδρομεταλλουργικών (χημικών) διεργασιών, ακολουθούμενη από ένα τελικό στάδιο διύλισης μετάλλων. Οι βασικοί παίκτες είναι συνήθως μεγάλες μεταλλουργικές εταιρείες, πολλές από τις οποίες δραστηριοποιούνται επίσης στην επεξεργασία πρωτογενών υλικών. Η τροφοδοσία του εργοστασίου προέρχεται από όλο τον κόσμο και η τεχνολογική εξειδίκευση και οι οικονομίες κλίμακας είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία.

Η προκύπτουσα συνολική αποδοτικότητα της ανακύκλωσης είναι το προϊόν της αποδοτικότητας κάθε σταδίου. Για παράδειγμα, η συνολική αποδοτικότητα της ανακύκλωσης χρυσού και παλλαδίου στην Ευρώπη εκτιμάται ότι είναι κάτω από 20%. Αυτό αντικατοπτρίζει τη συνδυασμένη αποτελεσματικότητα της συλλογής (30 %), της προεπεξεργασίας (60 %) και της μεταλλουργικής ανάκτησης (πάνω από 95 %).

Ενώ η ανακύκλωση των μαζικών μετάλλων λειτουργεί σχετικά καλά και περαιτέρω βελτιώσεις μπορεί να είναι δυνατές, υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί και ελλείψεις για πολλά τεχνολογικά μέταλλα, συμπεριλαμβανομένων ορισμένων που έχουν χαρακτηριστεί ως κρίσιμα. Οι κύριες ελλείψεις εμφανίζονται συνήθως στο στάδιο της συλλογής, είτε επειδή τα προϊόντα δεν συλλέγονται καθόλου, είτε εξάγονται για υποβαθμισμένη επεξεργασία μετά τη συλλογή, και στο στάδιο της προεπεξεργασίας. Αντίθετα, για πολλά, αλλά όχι για όλα τα μέταλλα, τα στάδια της μεταλλουργικής τήξης και του εξευγενισμού είναι ήδη πολύ αποτελεσματικά. Για να βελτιωθεί συνολικά η ανακύκλωση των μετάλλων είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν εξειδικευμένες, συστηματικές προσεγγίσεις κατά μήκος της αλυσίδας για συγκεκριμένα προϊόντα και συνδυασμούς μετάλλων.

### Δυσκολίες ανακύκλωσης

Οι συνδυασμοί μετάλλων στα προϊόντα συνήθως διαφέρουν από εκείνους των πρωτογενών κοιτασμάτων, γεγονός που οδηγεί σε νέες τεχνολογικές προκλήσεις για την αποτελεσματική ανάκτησή τους. Σε πολλές περιπτώσεις, πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ή "ακατάλληλοι" συνδυασμοί τεχνολογικών μετάλλων σε ορισμένα προϊόντα θα θέσουν οικονομικά και τεχνικά όρια στην ανάκτησή τους. Πολύπλοκα προϊόντα, όπως τα οχήματα και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, θέτουν ιδιαίτερες τεχνικές προκλήσεις.

Η έμφαση δίνεται στη βελτιστοποίηση του όγκου και του κόστους, ενώ η περιβαλλοντικά ορθή ανάκτηση αξίας από υλικά που υπάρχουν σε χαμηλές συγκεντρώσεις έχει καθοριστική σημασία. Είναι προφανές ότι η ανακύκλωση της τεχνολογίας και των κρίσιμων μετάλλων απαιτεί μια ριζικά διαφορετική οργάνωση της αλυσίδας ανακύκλωσης και ότι μια "προσέγγιση μαζικών υλικών" θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε σημαντικές απώλειες ιχνοστοιχείων.

Το δυναμικό ανακύκλωσης ή η ανακυκλωσιμότητα ενός προϊόντος ή υλικού εξαρτάται από διάφορους τεχνικούς, οικονομικούς, διαρθρωτικούς και οργανωτικούς παράγοντες:

1. Την εγγενή μεταλλική αξία του βασικού υλικού: αυτή εξαρτάται από την απόλυτη περιεκτικότητά του σε μέταλλο και την τιμή του μετάλλου και καθορίζει την οικονομική ελκυστικότητα της ανακύκλωσης. Θέτει ένα σημείο αναφοράς για την τεχνολογία ανακύκλωσης και το συνολικό κόστος ανακύκλωσης. Τα υλικά που περιέχουν πολύτιμα μέταλλα καθιστούν συχνά την ανακύκλωση αρκετά ελκυστική.
2. Η σύνθεση του υλικού: υπερβαίνει τη χημική σύνθεση και περιλαμβάνει φυσικά χαρακτηριστικά όπως το σχήμα, το μέγεθος και το είδος της σύνδεσης μεταξύ υλικών ή εξαρτημάτων. Επηρεάζει την επιλογή των τεχνικών μεθόδων ανάκτησης που χρησιμοποιούνται για τη διαλογή, την προεπεξεργασία και τον εξευγενισμό. Η σύνθεση του προϊόντος ή του υλικού έχει συνήθως σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος ανάκτησης καθώς και στις τεχνικά εφικτές αποδόσεις ανάκτησης.
3. Το πεδίο εφαρμογής ενός προϊόντος και ο τρόπος χρήσης του: το πρώτο αναφέρεται στον τομέα χρήσης στις καταναλωτικές ή επιχειρηματικές αγορές και το δεύτερο στα νέα ή επαναχρησιμοποιούμενα προϊόντα, στη συμπεριφορά των χρηστών, στον κίνδυνο διάσπασης, στην κινητικότητα του προϊόντος, στη χώρα χρήσης κ.λπ. Οι παράγοντες αυτοί μαζί καθορίζουν την πιθανότητα να εισέλθουν συγκεκριμένα προϊόντα και μέταλλα σε κατάλληλο κανάλι ανακύκλωσης στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Για την αποτελεσματική ανακύκλωση ενός προϊόντος, υλικού ή μετάλλου πρέπει να πληρούνται 7 βασικές προϋποθέσεις:

1. Τεχνική ανακυκλωσιμότητα του συνδυασμού υλικού ή μετάλλου.
2. Προσβασιμότητα των σχετικών συστατικών. Για παράδειγμα, ένας καταλύτης αυτοκινήτου κάτω από το δάπεδο, μια μπαταρία μολύβδου-οξέος αυτοκινήτου ή μια μητρική πλακέτα προσωπικού υπολογιστή (PC) είναι εύκολα προσβάσιμες για αποσυναρμολόγηση.
3. Οικονομική βιωσιμότητα. Οι αποσυναρμολογημένοι καταλύτες αυτοκινήτων ή οι μητρικές πλακέτες Η/Υ έχουν θετική καθαρή αξία, επομένως η ανακύκλωση είναι από μόνη της οικονομικά βιώσιμη. Αντίθετα, ένας αποσυναρμολογημένος σκληρός δίσκος Η/Υ με εξαιρετικά λεπτή επίστρωση PGM ή μια οθόνη LCD με επίστρωση οξειδίου ινδίου-κασσίτερου (ITO) έχει συνήθως αρνητική καθαρή αξία λόγω του κόστους επεξεργασίας του. Η ανάκτηση των κρίσιμων μετάλλων από τέτοια προϊόντα δεν θα ήταν επί του παρόντος οικονομικά βιώσιμη, εκτός αν πληρώνονταν εξωτερικά ή επιδοτούνταν.
4. Μηχανισμοί συλλογής που εξασφαλίζουν ότι το προϊόν είναι διαθέσιμο για ανακύκλωση. Εάν δεν υπάρχουν μηχανισμοί συλλογής, αντικείμενα όπως οι παλιοί Η/Υ ή τα κινητά τηλέφωνα μπορεί να καταλήξουν να αποθηκεύονται στα σπίτια ή να απορρίπτονται στον κάδο απορριμμάτων για υγειονομική ταφή ή δημοτική καύση. Τα μέταλλα που περιέχουν θα χάνονταν ουσιαστικά από την αλυσίδα ανακύκλωσης.
5. Είσοδος στην αλυσίδα ανακύκλωσης και παραμονή σε αυτήν μέχρι το τελικό στάδιο. Αντικείμενα όπως μητρικές πλακέτες Η/Υ, κινητά τηλέφωνα ή αυτοκίνητα που περιέχουν καταλύτες συχνά αποστέλλονται σε χώρες χωρίς την κατάλληλη υποδομή για ανακύκλωση στο

τέλος της ζωής τους. Αυτό έχει συνήθως ως αποτέλεσμα να χάνονται μέταλλα τεχνολογίας από την αλυσίδα ανακύκλωσης.

6. Βέλτιστη τεχνική και οργανωτική συγκρότηση αυτής της αλυσίδας ανακύκλωσης. Ολοκληρωμένες αλυσίδες ανακύκλωσης υπάρχουν στην Ευρώπη και σε άλλες βιομηχανικές περιοχές, αν και είναι σημαντικό ορισμένα είδη, όπως οι Η/Υ και τα κινητά τηλέφωνα, να μην αναμειγνύονται με άλλα χαμηλής ποιότητας ηλεκτρονικά απόβλητα.
7. Επαρκής χωρητικότητα κατά μήκος ολόκληρης της αλυσίδας για την πραγματοποίηση ολοκληρωμένης ανακύκλωσης. Αφού πληρούνται οι προϋποθέσεις 1-6, η μόνη απαίτηση είναι να διασφαλιστεί ότι υπάρχει επαρκής δυναμικότητα για την επεξεργασία του όγκου του υλικού που διατίθεται για ανακύκλωση.

### 4.3. Τεχνικές ανακύκλωσης

Πριν από την πραγματική ανάκτηση των τεχνολογικών μετάλλων, το υλικό ανακύκλωσης πρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις να υποστεί επεξεργασία. Παραδείγματα τέτοιας επεξεργασίας είναι η αποσυναρμολόγηση ή/και η μηχανική προεπεξεργασία (π.χ. με τεμαχισμό και διαλογή) των ηλεκτρονικών απορριμμάτων. Οποιαδήποτε προεπεξεργασία και αν χρησιμοποιείται, θα πρέπει να διεξάγεται κατά τρόπο ώστε τα κλάσματα εξόδου της να παρέχουν βέλτιστη προσαρμογή στις επακόλουθες μεταλλουργικές διεργασίες ανάκτησης και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες πολύτιμων ουσιών κατά την προεπεξεργασία.

Διαφορετικά μέταλλα απαιτούν διαφορετικές τελικές οδούς μεταλλουργικής επεξεργασίας. Σήμερα χρησιμοποιούνται τρεις κύριες διαδρομές και ένας μεγάλος αριθμός ειδικών διεργασιών:

- Η ανάκτηση σιδηρούχων μετάλλων πραγματοποιείται σε χαλυβουργεία.
- Η ανάκτηση του αλουμινίου πραγματοποιείται σε μεταλλουργικές μονάδες και ανακατασκευαστήρια αλουμινίου.
- Ο χαλκός, ο μόλυβδος, το νικέλιο και τα πολύτιμα μέταλλα ανακτώνται σε σύγχρονα ολοκληρωμένα χυτήρια. Ορισμένα κρίσιμα μέταλλα, όπως το τελλούριο, το σελήνιο και το αντιμόνιο, εντάσσονται επίσης σε αυτή την πορεία και μπορούν να ανακτηθούν σε εξελεγμένες διεργασίες ως παραπροϊόντα.

Ωστόσο, ορισμένα άλλα ειδικά μέταλλα χάνονται σε τέτοιες καθολικές ροές και απαιτούν ειδικές διεργασίες. Ορισμένα από τα κρίσιμα μέταλλα του καταλόγου της ΕΕ, όπως τα PGM, το αντιμόνιο και ίνδιο, μπορούν να ανακτηθούν αποτελεσματικά μέσω της ολοκληρωμένης διαδρομής τήξης. Τα άλλα κρίσιμα μέταλλα απαιτούν ειδικές διεργασίες, αν και για όλα αυτά υπάρχουν μεταλλουργικές λύσεις.

Είναι σαφές ότι ακόμη και η καλύτερη μεταλλουργική διαδικασία ανάκτησης είναι άχρηστη εάν τα κλάσματα των υλικών που περιέχουν τα μέταλλα-στόχους δεν φτάσουν στην κατάλληλη τελική



επεξεργασία. Ως εκ τούτου, η οργάνωση της αλυσίδας ανακύκλωσης και η διαχείριση των διεπαφών μεταξύ των κύριων σταδίων είναι ζωτικής σημασίας για τη συνολική επιτυχία της ανακύκλωσης. Επιπλέον, κάθε σύστημα θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο για ένα συγκεκριμένο τύπο υλικού.

Όσον αφορά την τεχνική και οικονομική ανακυκλωσιμότητα, τα κρίσιμα μέταλλα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες ομάδες:

- Κρίσιμα μέταλλα σε συνδυασμό με πολύτιμα μέταλλα που μπορούν να ανακυκλωθούν οικονομικά με τη χρήση υφιστάμενων μεταλλουργικών διεργασιών.

Τα PGMs είναι τα καλύτερα στην ομάδα αυτή, επειδή η υψηλή τιμή τους τα οδηγεί στην ανακύκλωση. Τεχνικά, για την πλατίνα και το παλλάδιο μπορούν να επιτευχθούν μεταλλουργικές αποδόσεις που ξεπερνούν κατά πολύ το 95%. Για το ρόδιο, το ρουθίνιο και το ιρίδιο οι μεταλλουργικές αποδόσεις είναι επίσης υψηλές αλλά κάπως χαμηλότερες από ό,τι για την πλατίνα και το παλλάδιο. Τα σημαντικότερα προϊόντα που περιέχουν PGM για ανακύκλωση είναι οι καταλύτες αυτοκινήτων και διεργασιών, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία γυαλιού, τα κοσμήματα, οι πλακέτες κυκλωμάτων και τα κινητά τηλέφωνα. Στο μέλλον, οι συστοιχίες κυψελών καυσίμου που περιέχουν λευκόχρυσο ενδέχεται να αποτελέσουν σημαντική πηγή ανακύκλωσης των PGM.

- Κρίσιμα μέταλλα, χωρίς συναφή πολύτιμα μέταλλα που "πληρώνουν", τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν τεχνικά με τη χρήση ειδικών διεργασιών.

Όπως και για την πρώτη ομάδα, η τεχνική ανακυκλωσιμότητα αποτελεί βασική απαίτηση. Αυτή επηρεάζεται από τη σύνθεση και την πολυπλοκότητα του υλικού καθώς και από τη συγκέντρωση αυτών των μετάλλων και μπορεί να είναι τεχνικά πιο δύσκολη από ό,τι για τα πολύτιμα μέταλλα. Η ανακύκλωση είναι οικονομικά πιο ελκυστική για σχετικά υψηλής ποιότητας συγκεντρώσεις ή για εξαρτήματα που περιέχουν κρίσιμα μέταλλα. Αυτά περιλαμβάνουν το Ίνδιο και Γάλλιο από υψηλής ποιότητας απορρίμματα παραγωγής φωτοβολταϊκών ή κοβάλτιο από ορισμένες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ή καταλύτες διεργασιών, και άλλα.

Το κατά πόσον οι νέες διεργασίες θα καταστούν τελικά οικονομικά βιώσιμες εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των μελλοντικών τιμών των μετάλλων, των διαθέσιμων ποσοτήτων και των σχετικών οικονομιών κλίμακας, των προσπαθειών R&D και της τεχνικής προόδου για τη βελτίωση των αποδόσεων των μετάλλων και τη μείωση του κόστους των διεργασιών. Η αποτελεσματική προεπεξεργασία των κρίσιμων μετάλλων που περιέχουν συστατικά και υλικά αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για να εξασφαλιστεί ότι θα οδηγηθούν στις πλέον κατάλληλες μεταλλουργικές διεργασίες.

- Κρίσιμα μέταλλα ως μέρος σύνθετων μιγμάτων υλικών με θερμοδυναμικούς περιορισμούς.

Οι πλακέτες ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αποτελούν ένα καλό παράδειγμα αυτής της ομάδας. Αν και το αντιμόνιο και σε μικρότερο βαθμό το ίνδιο ταιριάζουν θερμοδυναμικά με την ανάκτηση χαλκού και πολύτιμων μετάλλων, άλλα κρίσιμα μέταλλα που υπάρχουν στις πλακέτες κυκλωμάτων δεν ταιριάζουν. Οι υδρομεταλλουργικές διεργασίες για την επεξεργασία των πλακετών κυκλωμάτων δεν προσφέρουν καλύτερη επιλογή, δεδομένου ότι το εύρος και οι αποδόσεις των ανακτώμενων μετάλλων θα χειροτερεύσουν και η επεξεργασία των ισχυρών εκπλυτικών λυμάτων είναι δύσκολη

και δαπανηρή. Επιπλέον, η αποκλειστική υδρομεταλλουργική επεξεργασία πολύπλοκων προϊόντων θα οδηγήσει σε πολυάριθμα άλλα ρεύματα εξόδου και υπολείμματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν, από ιζήματα και ακάθαρτες ρητίνες μέχρι ατμούς ή λάσπες. Ως εκ τούτου, είναι σχεδόν αναπόφευκτο ότι σε πολύπλοκα μίγματα θα υπάρχουν τεχνικές συγκρούσεις συμφερόντων. Κατά συνέπεια, η 100% ανακύκλωση των κρίσιμων μετάλλων δεν θα είναι ποτέ δυνατή και πρέπει να γίνουν επιλογές προτεραιότητας.

Οι μεγαλύτερες προκλήσεις για την ανακύκλωση είναι να ξεπεραστούν τα χαμηλά επίπεδα συλλογής των καταναλωτικών αγαθών και ο αναποτελεσματικός χειρισμός τους στην αλυσίδα ανακύκλωσης. Η δομή του κύκλου ζωής των καταναλωτικών αγαθών διαφέρει θεμελιωδώς από εκείνη των βιομηχανικών προϊόντων. Καλά παραδείγματα αποδοτικών βιομηχανικών κύκλων είναι οι καταλύτες διεργασιών που περιέχουν PGM. Για τα PGM που περιέχονται σε αυτά, η κυριότητα παραμένει συνήθως στον βιομηχανικό χρήστη, η θέση του προϊόντος είναι γνωστή και ο χειρισμός καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής γίνεται με επαγγελματικό και διαφανή τρόπο. Αυτό είναι γνωστό ως σύστημα ανακύκλωσης "κλειστού κύκλου". (critical metals handbook)

## 5. Κοβάλτιο (Co)



Το κοβάλτιο έχει χρησιμοποιηθεί από την κοινωνία από την εποχή του χαλκού, κυρίως για να προσδώσει ένα πλούσιο μπλε χρώμα στο γυαλί και τα κεραμικά. Ωστόσο, απομονώθηκε ως καθαρό μέταλλο μόλις το 1735 από τον Σουηδό χημικό Georg Brandt και η ζήτηση για κοβάλτιο παρέμεινε υποτονική μέχρι τις αρχές του 20ού αιώνα και την ανάπτυξη των κραμάτων κοβαλτίου-χρωμίου. Ειδικότερα, η ζήτηση κοβαλτίου αυξήθηκε σημαντικά μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, λόγω της χρήσης κοβαλτίου υψηλής καθαρότητας σε κινητήρες αεροσκαφών και αεροστροβίλους. Η ζήτηση κοβαλτίου επιταχύνθηκε περαιτέρω τα τελευταία 30 χρόνια, αντανakλώντας την αυξημένη χρήση κοβαλτίου ως βασικού συστατικού υλικών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας, όπως επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, υπερκράματα και καταλύτες. Το κοβάλτιο (χημικό σύμβολο, Co) είναι ένα μεταβατικό μέταλλο, ασημί χρώματος, με ατομικό αριθμό 27, που βρίσκεται στην πρώτη περίοδο του Περιοδικού Πίνακα μεταξύ του σιδήρου και του νικελίου. Το κοβάλτιο έχει δύο κύριες καταστάσεις οξειδωσης (2+ και 3+) και ένα φυσικό ισότοπο ( $^{59}\text{Co}$ ). Το κοβάλτιο παρουσιάζει σιδερόφιλες και χαλκόφιλες τάσεις και έχει υψηλό σημείο τήξης  $1493^{\circ}\text{C}$ . Καθαρό κοβάλτιο δεν απαντάται στη φύση, αλλά, ως αποτέλεσμα των χαλκόφιλων και σιδερόφιλων ιδιοτήτων του, συνδέεται κατά προτίμηση με σίδηρο, νικέλιο, χαλκό και θείο παρά με οξυγόνο σε διάφορες φάσεις σουλφιδίων και σουλφαρσενιδίων. Συγκεκριμένα, σχηματίζει σουλφίδια και αρσενίδια κοβαλτίου, όπως κοβαλτίτη  $(\text{Co,Fe})\text{AsS}$ , καρολλίτη  $(\text{CuCo}_2\text{S}_4)$  και σαφφλορίτης  $(\text{Co,Fe,Ni})\text{As}_2$ , τα οποία συνδέονται συνήθως με τα σουλφίδια σιδήρου, τον πυρίτη, τον αρσενοπυρίτη και τον πυρροτίτη. Ωστόσο, εμφανίζεται επίσης ως ανθρακική φάση, ο σφαιροκοβαλτίτης  $(\text{CoCO}_3)$ , και ως υδροξειδίο  $(\text{CoO}(\text{OH}))$ .

## 5.1. Τύποι κοιτασμάτων

Παρά τη χαμηλή αφθονία του στον φλοιό της γης, το κοβάλτιο συγκεντρώνεται με διάφορες γεωλογικές διεργασίες σε συγκεντρώσεις κατάλληλες για εξόρυξη. Ωστόσο, η εξόρυξη μεταλλικών μεταλλευμάτων κυρίως για την περιεκτικότητά τους σε κοβάλτιο είναι σπάνια, με την πλειονότητα της παραγωγής κοβαλτίου να επιτυγχάνεται μέσω της ανάκτησης ως παραπροϊόν της εξόρυξης χαλκού και νικελίου σε τρεις κύριες γεωλογικές συνθήκες: υδροθερμική, μαγματική και λατεριτική. Ένας τέταρτος, σημαντικός αλλά ακόμη ανεκμετάλλευτος, πόρος κοβαλτίου βρίσκεται σε κόνδυλους σιδήρου-μαγγανίου και κρούστες που αναπτύσσονται στον πυθμένα των ωκεανών και μπορεί να περιέχουν σημαντικές ποσότητες βασικών μετάλλων, συμπεριλαμβανομένου του κοβαλτίου. Παρακάτω, περιγράφεται η γεωλογία που αντιπροσωπεύει την πλειονότητα της παγκόσμιας παραγωγής κοβαλτίου.

## Υδροθερμικά κοιτάσματα

Πρόκειται για κοιτάσματα μεταλλευμάτων κοβαλτίου που προέρχονται από υδροθερμικά ρευστά τα οποία έχουν αλληλεπιδράσει με διάφορα μαφικά ή/και υπερμαφικά (πλούσια σε σίδηρο) βασικά πετρώματα ή προέρχονται ουσιαστικά από ιζηματογενείς λεκάνες. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα κοιτάσματα στο Βου Azer στο Μαρόκο, τα οποία είναι τα μόνα λειτουργούντα ορυχεία που παράγουν κοβάλτιο ως πρωτογενές προϊόν. Τα κύρια παραγωγικά κοιτάσματα της ΛΔΚ και της Ζάμπια ταξινομούνται επίσης ως υδροθερμικής προέλευσης.

## Κεντρική Αφρική Copperbelt

Το Katangan Copperbelt της Κεντρικής Αφρικής, που βρίσκεται εκατέρωθεν των συνόρων μεταξύ της βορειοδυτικής Ζάμπια και της επαρχίας Katanga της νότιας Λαϊκής Δημοκρατίας του Κονγκό (ΛΔΚ), φιλοξενεί μία από τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις χαλκού και κοβαλτίου στον κόσμο. Τα μεταλλεύματα χαλκού και κοβαλτίου αποτελούνται κυρίως από διάσπαρτα σουλφίδια, που σχηματίζουν στρωματοειδή μεταλλευτικά σώματα που φιλοξενούνται σε λεπτόκοκκα πυριτικοκλαστικά ή δολομιτικά ιζηματογενή πετρώματα. Ο χαλκός φιλοξενείται κυρίως σε χαλκοπυρίτη, γεννίτη, χαλκοκίτη και μαλαχίτη. Το κοβάλτιο εμφανίζεται μέσα στον κοβαλίτη, τον καρολλίτη, τον κατιερίτη, τον κοβαλτινοπενταντίτη και τον σιγενίτη, καθώς και ως στερεό διάλυμα στον πυρίτη (έως 20 % κοβάλτιο). Τα πρωτογενή σουλφίδια συνήθως επικαλύπτονται από δευτερογενή υπεργενή μεταλλευτικά ορυκτά, με τον ετερογενή να είναι το πιο άφθονο οξειδωμένο ορυκτό κοβαλτίου. Η διεργασία της αποσάθρωσης είναι οικονομικά σημαντική επειδή συγκεντρώνει έντονα το κοβάλτιο στο οξειδωμένο μεταλλεύμα κοντά στην επιφάνεια. Τα υδροθερμικά ορυκτά που σχετίζονται με την μεταλλοφορία περιλαμβάνουν αστρίους καλίου, φλογοπίτη, σερικήτη, μοσχοβίτη, αλβίτη, ανθρακικό άλας, χαλαζία και ρουτίλιο. Αυτά τα σύνολα είναι ενδεικτικά ασβεστομαγνησιούχων, καλιούχων και νατριούχων αλλοιώσεων. Τα στοιχεία της υψής υποδεικνύουν ότι τα γεγονότα αλλοίωσης συνέβησαν σε πολλαπλά στάδια κατά τη διάρκεια της ιστορίας της λεκάνης και μπορεί να ποικίλλουν μεταξύ και εντός των κοιτασμάτων. Αυτές οι σχέσεις προκύπτουν από έναν συνδυασμό των εξής:

1. την εκτεταμένη και παρατεταμένη φύση της ροής ρευστών,
2. τη μεταβλητότητα στη σύνθεση των στρωμάτων-ξενιστών,
3. τη μεταβλητότητα των συνθηκών στις θέσεις σχηματισμού του μεταλλεύματος
4. τις επιπτώσεις της επακόλουθης περιφερειακής μεταμόρφωσης.

Η μεταορογενετική ιστορία αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη της οικονομικής μεταλλοφορίας κοβαλτίου στην κεντρική Αφρική. Κατά τη διάρκεια διαφόρων επεισοδίων αποσάθρωσης, ανύψωσης και διάβρωσης, τα κοιτάσματα θειούχων μεταλλευμάτων οξειδώθηκαν εν μέρει, συνήθως σε βάθος περίπου 100 m. Η διαδικασία αυτή ήταν ιδιαίτερα συχνή στη ΛΔΚ και είχε ως αποτέλεσμα τον τοπικό εμπλουτισμό κοβαλτίου στο ανώτερο τμήμα της οξειδωμένης ζώνης, που συχνά αναφέρεται ως "κάλυμμα κοβαλτίου", λόγω της έκπλυσης χαλκού και κοβαλτίου

προς τα κάτω από τα μετεωρικά ρευστά. Αυτά τα οξειδωτικά μεταλλεύματα μπορεί να αποτελούν σημαντικό μέρος των πόρων κοβαλτίου σε ένα συγκεκριμένο κοίτασμα.

### Μαγματικές αποθέσεις

Συγκεντρώσεις νικελίου και χαλκού με ανακτήσιμο υποπροϊόν κοβάλτιο, συνήθως μεταξύ 0,04 και 0,08% Co, υπάρχουν σε μαφικά και υπερμαφικά μάγματα, που χαρακτηρίζονται από χαμηλό ολικό πυρίτιο και αλκάλια και υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο. Σουλφίδια όπως ο χαλκοπυρίτης, ο πεντλανδίτης και ο πυρροτίτης κατακρημνίζονται από αυτά τα μάγματα είτε από ροές λάβας είτε μέσα σε τεράστιους θαλάμους μάματος, ιδίως κατά την πρώιμη ιστορία της Γης. Σε όλα τα μαγματικά κοιτάσματα, ο σχηματισμός μιας άφθαρτης φάσης σουλφιδίων αποτελεί ουσιαστικό μέρος της διαδικασίας σχηματισμού του μεταλλεύματος. Ο χαλκός, το νικέλιο και το κοβάλτιο απορροφώνται αποτελεσματικά σε αυτή τη σουλφιδική φάση λόγω των χαλκόφιλων και σιδερόφιλων ιδιοτήτων τους.

### Λατερίτες

Τα λατεριτικά κοιτάσματα νικελίου-κοβαλτίου περιέχουν περίπου το 70% των παγκόσμιων πόρων νικελίου και αντιπροσωπεύουν περίπου το 40% της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου, αλλά περιέχουν επίσης αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις κοβαλτίου, μεταξύ 0,025 και 0,18% Co. Τα κοιτάσματα αυτά είναι προϊόν διάχυτης διάβρωσης υπερμαφικών πετρωμάτων, τα οποία αρχικά περιέχουν μεταξύ 0,06 και 0,09% Co, που εκτίθενται σε τροπικά έως υποτροπικά περιβάλλοντα. Ο σχηματισμός των λατεριτών νικελίου-κοβαλτίου επηρεάζεται από διάφορες γεωλογικές παραμέτρους, όπως η σύνθεση του πρωτολίθου, η τοπογραφία, η δομή και η διάρκεια των κατάλληλων διεργασιών αποσάθρωσης.

Τα κοιτάσματα λατερίτη νικελίου-κοβαλτίου μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. τα υδροπυριτικά κοιτάσματα, όπου υδροφόρα πυριτικά άλατα μαγνησίου-νικελίου εμφανίζονται στον κατώτερο σαπρόλιθ, τα οποία επικαλύπτονται από λατερίτες οξειδίων
2. τα αργιλοπυριτικά κοιτάσματα, όπου αναπτύσσονται κυρίως άργιλοι στον μεσαίο ή ανώτερο σαπρόλιθ
3. τα κοιτάσματα οξειδίων, γνωστά και ως λιμονιτικά κοιτάσματα, που περιλαμβάνουν κυρίως οξυδροοξειδία του σιδήρου πάνω από αλλοιωμένο μητρικό πέτρωμα ή, σε ορισμένα παραδείγματα, υδροφόρα πυριτικά και αργιλικά κοιτάσματα.

Το κλίμα ασκεί τον κύριο έλεγχο στον σχηματισμό του νικελιούχου λατερίτη, καθώς οι σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και οι βροχοπτώσεις διευκολύνουν την έντονη αποσάθρωση των υπερμαφικών πρωτολίθων, με την καταστροφή των πρωτογενών ορυκτών που περιέχουν νικέλιο-κοβάλτιο, ολιβίνη και σερπεντίνη, και την έκπλυση πυριτίου, μαγνησίου και άλλων κινητών στοιχείων. Διαφορετικοί τύποι λατεριτών νικελίου-κοβαλτίου αναπτύσσονται σε διάφορα κλιματικά

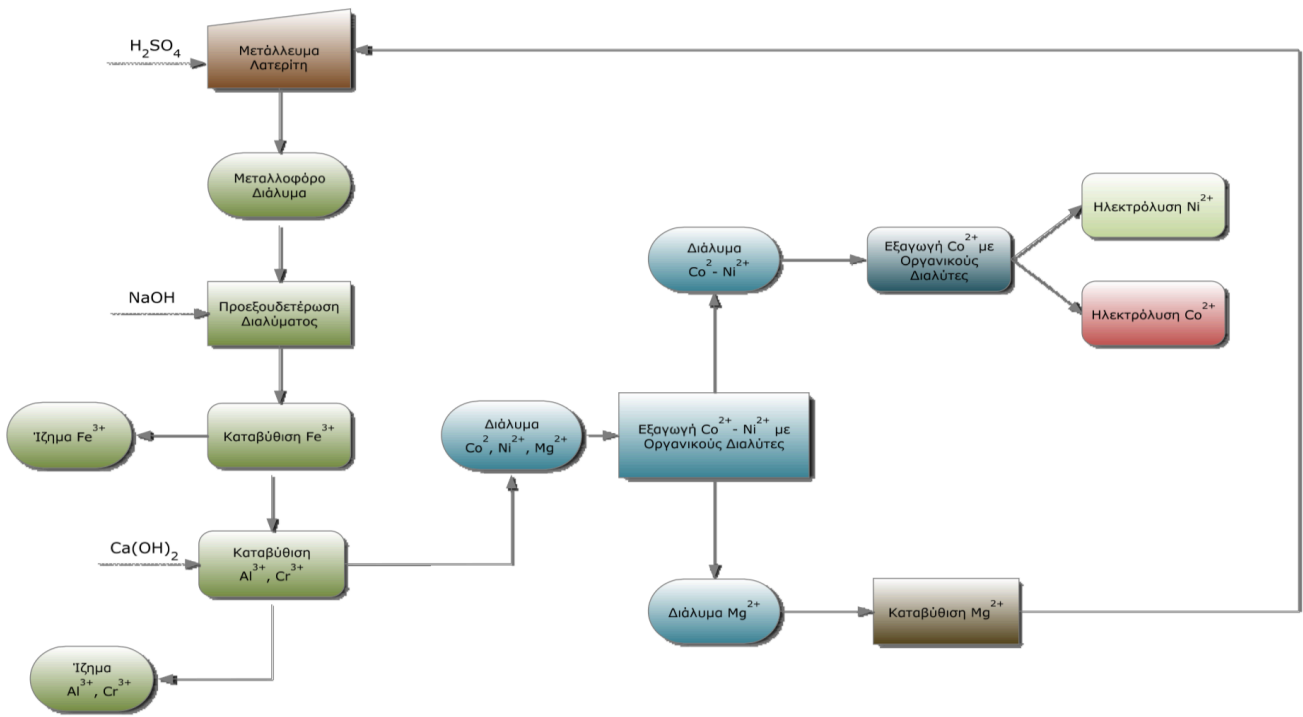
καθεστώτα. Αποθέσεις πλούσιες σε αργιλοπυριτικά εμφανίζονται κυρίως σε ημίξηρες περιοχές, ενώ αποθέσεις πλούσιες σε υδροπυριτικό άλας αναπτύσσονται σε υγρά κλίματα και αποθέσεις που κυριαρχούν τα οξειδία σχηματίζονται σε ένα εύρος κλιματικών συνθηκών.

Η πλειονότητα των λατεριτών νικελίου-κοβαλτίου σχηματίζεται από την αποσάθρωση των οφιολίθων, έτσι ώστε περίπου το 85% όλων των κοιτασμάτων λατεριτών νικελίου να βρίσκονται μέσα σε θραυσμένο φλοιό που σχηματίζεται σε μια τεκτονική πλάκα. Η αστάθεια των συστατικών ορυκτών του πρωτόλιθου, όπως ο ολιβίνης, σε επιφανειακές θερμοκρασίες και πιέσεις, σε συνδυασμό με την αυξημένη περιεκτικότητά τους σε νικέλιο και κοβάλτιο, μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη παχιών προφίλ αποσάθρωσης που διαθέτουν σημαντικούς πόρους νικελίου-κοβαλτίου. Εκτός από τη σημασία του κατάλληλου κλίματος και του πρωτόλιθου, η ανάπτυξη σημαντικού λατερίτη νικελίου-κοβαλτίου απαιτεί επίσης σταθερές γεωλογικές συνθήκες όπου ο ρυθμός χημικής αποσάθρωσης είναι υψηλότερος από τον ρυθμό φυσικής διάβρωσης. Καθώς τα υπερμαφικά πετρώματα υφίστανται διάβρωση για να σχηματίσουν ένα κοίτασμα λατερίτη, η διαδικασία διάβρωσης και το πρωτόλιθο που αναπτύσσεται θα έχουν πεπερασμένη διάρκεια και πάχος ανάλογα με τις γεωλογικές μεταβλητές, όπως οι ρυθμοί ανύψωσης και η ένταση της ανάπτυξης ρωγμών στον πρωτόλιθο. Κατά συνέπεια, όπου η ανύψωση είναι ταχεία, είναι απίθανο να διατηρηθούν παχιά λατεριτικά κοιτάσματα.

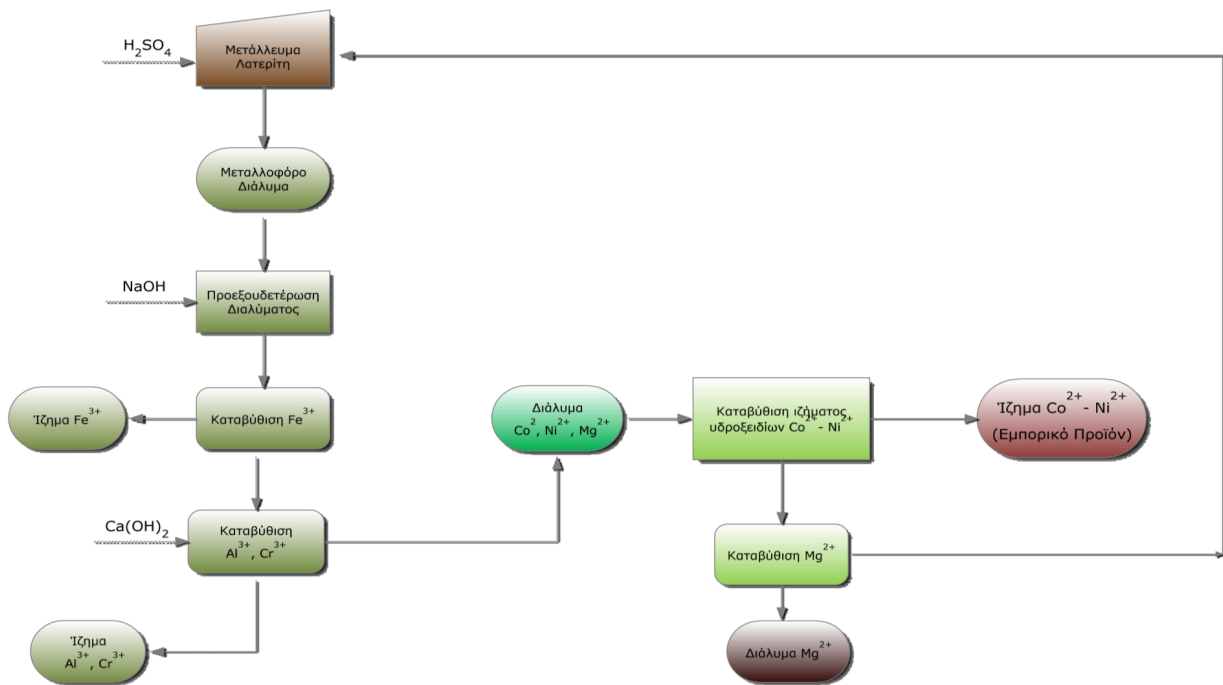
Πρόσφατα δεδομένα υποδηλώνουν ότι η πλειονότητα των περιδοτιτών που υφίστανται σήμερα αποσάθρωση για να σχηματίσουν λατερίτες νικελίου-κοβαλτίου βιώνουν διακριτές κλιματικές συνθήκες που χαρακτηρίζονται από περιορισμένη εποχικότητα και ετήσια βροχόπτωση άνω των 1000mm. Η σημασία της ελάχιστης ετήσιας βροχόπτωσης απεικονίζεται καλά από τον οφιολίτη του Ομάν, ο οποίος βιώνει θερμοκρασίες πολύ παρόμοιες με τις σημερινές αποθέσεις λατεριτών, με μέση ψυχρή μηνιαία θερμοκρασία 23°C και μέση θερμή μηνιαία θερμοκρασία 31°C, αλλά υπόκειται σήμερα σε χαμηλά ετήσια ποσοστά βροχόπτωσης (περίπου 90 mm ετησίως), τα οποία δεν ευνοούν το σχηματισμό κοιτασμάτων λατερίτη νικελίου.

## **5.2. Εξόρυξη, επεξεργασία και εμπλουτισμός**

Η παραγωγή κοβαλτίου από πρωτογενείς πηγές συνδέεται συχνότερα με την παραγωγή χαλκού και νικελίου. Περίπου το ήμισυ της παγκόσμιας παραγωγής κοβαλτίου προέρχεται είτε από την έκπλυση νικελιούχων λατεριτών είτε από την τήξη θειούχων μεταλλευμάτων νικελίου, ενώ μεγάλο μέρος της υπόλοιπης πρωτογενούς προσφοράς προέρχεται από θειούχα ή οξειδωμένα μεταλλεύματα χαλκού. Το φύλλο ροής της διεργασίας για την ανάκτηση κοβαλτίου περιλαμβάνει συνήθως αρχική έκπλυση αλεσμένου μεταλλεύματος, συμπύκνωση επίπλευσης ή τήγμα, ανάλογα με τη φύση του αρχικού υλικού (θειούχο νικέλιο, θειούχο χαλκού-κοβαλτίου ή λατεριτικό μέταλλευμα). Η έκπλυση ακολουθείται από ένα στάδιο ανάκτησης χαλκού και απομάκρυνσης ακαθαρσιών πριν από την ανάκτηση του κοβαλτίου και, τέλος, του νικελίου, εάν υπάρχει.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα Ροής Co (Κατσιάπη, 2011)



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα Ροής Co (Κατσιάπη, 2011)

Για την ανάκτηση του νικελίου και του κοβαλτίου, έχουν αναπτυχθεί δύο πιθανά διαγράμματα ροής. Αρχικώς, προτείνεται η ανάκτηση του νικελίου και του κοβαλτίου από το μεταλλοφόρο διάλυμα, ως ηλεκτρολυτικών υπερκαθαρών μετάλλων. Η συνολική διεργασία δίνεται στο Διάγραμμα Ροής 5.1. Εναλλακτικά, προτείνεται η ανάκτηση του νικελίου και του κοβαλτίου με χημική καταβύθιση μικτού ιζήματος υδροξειδίων τους, εμπλουτισμένου σε νικέλιο (28-30%).

Το Διάγραμμα Ροής του σχήματος 5.1, χαρακτηρίζεται από υψηλότερη αξία του τελικού προϊόντος αλλά μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος και κόστος κεφαλαίου σε σχέση με το Διάγραμμα Ροής του σχήματος 5.2. Το πλεονέκτημα, όμως, του Διαγράμματος Ροής 5.2, πέρα από το χαμηλό κόστος, είναι η δυνατότητα του παραγομένου νικελιούχου ιζήματος να τροφοδοτηθεί σε ηλεκτροκάμινα πυρομεταλλουργικού εργοστασίου διαμορφώνοντας στην ουσία μια μικτή πυρο-υδρο-μεταλλουργική μέθοδο και αξιοποιώντας τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις ενός πυρομεταλλουργικού εργοστασίου.

#### Κοβάλτιο από θειούχα μεταλλεύματα νικελίου

Το κοβάλτιο είναι σχεδόν πάντοτε παρόν στα θειούχα μεταλλεύματα νικελίου, το οποίο εμφανίζεται συνήθως σε πεντλανδίτη ( $(Fe, Ni, Co)_9S_8$ ), με τη συγκέντρωση του κοβαλτίου να κυμαίνεται γενικά μεταξύ 0,01 και 0,15%. Η συνήθης ανάκτηση κοβαλτίου από τα σουλφίδια περιλαμβάνει την παραγωγή συμπυκνώματος επίπλευσης, όπου η συμπεριφορά του νικελίου και του κοβαλτίου συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό, ακολουθούμενη από τήξη του συμπυκνώματος σε ματ κοβαλτίου-νικελίου-θείου. Η παραγωγή ενός χαλκού κατάλληλου για εξευγενισμό πραγματοποιείται είτε με φρύξη του συμπυκνώματος ακολουθούμενη από τήξη, είτε με τήξη του συμπυκνώματος με ταχεία τήξη. Περίπου το ένα τέταρτο της τήξης των θειούχων νικελίου πραγματοποιείται με την πρώτη μέθοδο, η οποία περιλαμβάνει την παραγωγή πυρίτιδας και στη συνέχεια την τήξη της πυρίτιδας με πυριτική ροή για την παραγωγή ενός πλούσιου σε νικέλιο-κοβάλτιο προϊόν και μια φτωχή σε μέταλλα σκωρία. Η προσέγγιση αυτή αποδίδει υψηλή ανάκτηση νικελίου, κοβαλτίου, χαλκού και πολύτιμων μετάλλων, αλλά είναι δαπανηρή όσον αφορά τη χρήση ενέργειας.

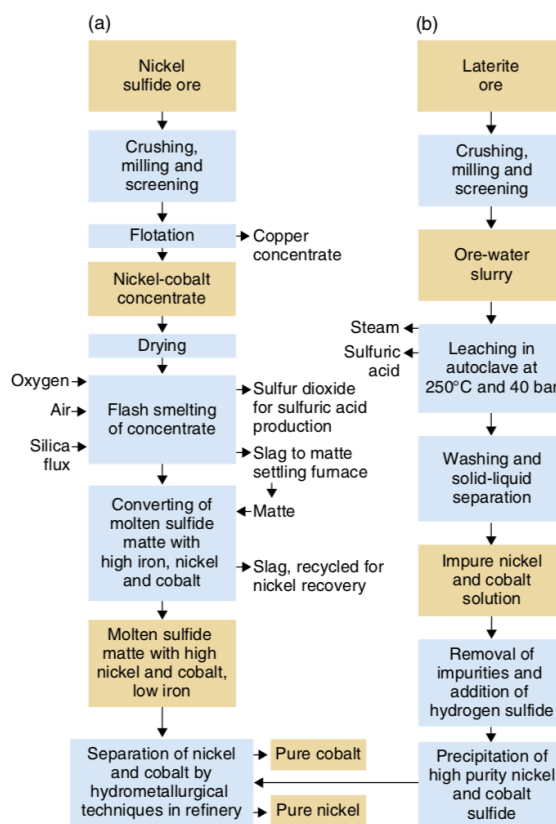
Στο εργοστάσιο εμπλουτισμού, το πρώτο στάδιο της ανάκτησης κοβαλτίου περιλαμβάνει την έκπλυση του υλικού με χρήση χλωρίου σε υδροχλωρικό οξύ, αέρα σε διαλύματα αμμωνίας ή οξυγόνου σε θειικό οξύ. Ακολουθεί εκχύλιση με διαλύτη για το διαχωρισμό του κοβαλτίου και του νικελίου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ηλεκτροαπόπλυση ή αναγωγή με υδρογόνο για την ανάκτηση του μετάλλου κοβαλτίου. Η συνολική ανάκτηση του κοβαλτίου στα χυτήρια σουλφιδίου του νικελίου κυμαίνεται μεταξύ 30-80%, που είναι πολύ μικρότερη από τα τυπικά ποσοστά ανάκτησης για το νικέλιο (97%) και το χαλκό (95%).

Οι αυξανόμενες περιβαλλοντικές πιέσεις τα τελευταία χρόνια οδήγησαν στην ανάπτυξη εναλλακτικών υδρομεταλλουργικών διαδρομών για την επεξεργασία των συμπυκνωμάτων θειούχου νικελίου. Αρκετές μέθοδοι βρίσκονται σε εμπορική λειτουργία, συμπεριλαμβανομένης της έκπλυσης θειικών-χλωριούχων υπό πίεση στο Voisey's Bay στον Καναδά και της βιολογικής έκπλυσης σωρού, υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες, στο Talvinaara στη Φινλανδία.



## Κοβάλτιο από μεταλλεύματα λατερίτη νικελίου

Αν και το κοβάλτιο είναι γενικά συγκεντρωμένο σε κάποιο βαθμό στα νικελιούχα λατεριτικά μεταλλεύματα λόγω του σχετικά υψηλού επιπέδου του στα πρόδρομα υπερμαφικά πετρώματα, ο περισσότερος λατερίτης νικελίου τήκεται σε σιδηρονικέλιο και το κοβάλτιο δεν εξάγεται. Ωστόσο, στη δεκαετία του 1950 στην Κούβα, η εισαγωγή υδρομεταλλουργικών τεχνικών για την επεξεργασία ορισμένων μεταλλευμάτων νικελιούχου λατερίτη κατέστησε δυνατή την ανάκτηση κοβαλτίου από τα υλικά αυτά. Από τότε η τεχνολογία της όξινης εκχύλισης υψηλής πίεσης έχει βελτιωθεί σημαντικά και, με αρκετές μονάδες σε λειτουργία στην Αυστραλία, τη Νέα Καληδονία και τη Μαδαγασκάρη, αποτελεί σήμερα μια σημαντική παγκόσμια πηγή νικελίου και κοβαλτίου. Ένα απλουστευμένο γενικό διάγραμμα ροής για την παραγωγή κοβαλτίου με εκχύλιση υψηλής πίεσης από λατερίτη που περιέχει γκετίτη παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.3: Co Flowsheet με α) τήξη flash smelting και μετατροπής θειούχου μεταλλεύματος νικελίου και β) όξινης εκχύλισης υψηλής πίεσης λατεριτικού μεταλλεύματος (critical metals handbook)

Η Ελλάδα είναι ο σημαντικότερος προμηθευτής νικελίου στην ΕΕ και παράγει το 2%-3% του παγκόσμιου συνολικού νικελίου. Το νικέλιο εξορύσσεται από τα λατεριτικά κοιτάσματα στη Λοκρίδα, την Εύβοια και την Καστοριά και ανακτάται με πυρομεταλλουργικές μεθόδους. Αυτοί οι λατερίτες Fe-Ni, οι οποίοι περιέχουν επίσης κοβάλτιο, είναι κυρίως αλλόχθονες και συνδέονται με μεσοζωικούς οφιολίθους. Παρεμβάλλονται σε μεσοζωικούς ασβεστόλιθους και παρουσιάζουν πολυσταδιακή μεταφορά και επαναπόθεση, υπεύθυνη για μια μεταϊζηματογενή ανακατανομή των μετάλλων, με αποτέλεσμα ζώνες πλούσιες σε Mn, Co, Ni. Η χημική σύσταση διαφόρων λατεριτικών εμφανίσεων στην Ελλάδα δείχνει ότι το κοβάλτιο συγκεντρώνεται κυρίως στις πλούσιες σε Fe-Ni ζώνες, παρουσιάζοντας αυξημένες περιεκτικότητες που φτάνουν το 0,10% στο Παλαιοχώρι Γρεβενών, το 0,14% στο Βέρμιο, το 0,16% στην Καστοριά και το 0,22% στη Λοκρίδα. Το Co σε αυτά τα κοιτάσματα συγκεντρώνεται κυρίως στο ορυκτό ασβολάνη. Η μεταλλουργική επεξεργασία των ελληνικών λατεριτών στη Λάρυμνα από τη ΛΑΡΚΟ, η οποία παράγει κράμα Fe-Ni, δεν επιτρέπει την ανάκτηση Co, το οποίο μπορεί να διαχωριστεί με υδρομεταλλουργική επεξεργασία. Κατά συνέπεια, η Ελλάδα παραμένει μια πιθανή περιοχή που μπορεί να προμηθεύσει την ΕΕ με σημαντικές ποσότητες κοβαλτίου στο μέλλον.

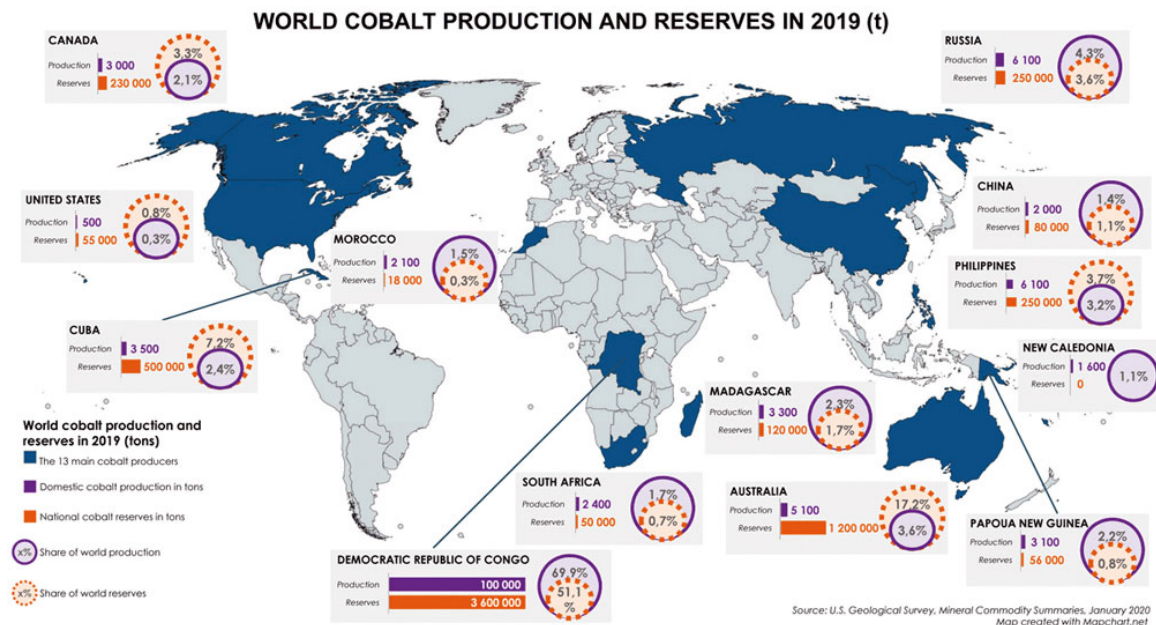
Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί εδώ ότι τα μη οικονομικά θειούχα μεταλλεύματα που φιλοξενούνται στα συμπλέγματα οφιολίθων στην Ελλάδα, συμπεριλαμβανομένων των τύπων Κύπρου και Fe-Cu-Ni-Co, στην Πίνδο και στην Όθρυς περιέχουν έως και 2300 ppm Co.

### **5.3. Παγκόσμια παραγωγή και εμπόριο**

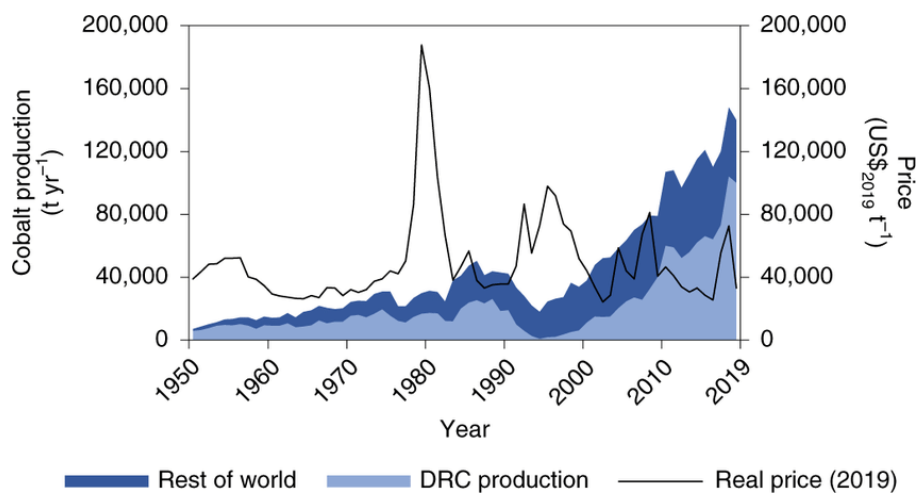
Η παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου σε ορυχεία κυριαρχείται σήμερα από τη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, η οποία παράγει πάνω από το 65% του παγκόσμιου συνόλου και εξορύσσει σήμερα πάνω από δέκα φορές περισσότερη ποσότητα από την Κίνα. Άλλοι σημαντικοί παραγωγοί, αλλά ο καθένας με λιγότερο από το πέντε τοις εκατό της παγκόσμιας παραγωγής, περιλαμβάνουν τη Ζάμπια, την Αυστραλία, τον Καναδά, την Κούβα, τη Ρωσία, τη Νέα Καληδονία και το Μαρόκο. Η παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου στα ορυχεία αυξήθηκε δραματικά τα τελευταία δέκα χρόνια, παρά την παγκόσμια οικονομική ύφεση, από περίπου 47.000 τόνους/έτος το 2002 σε 104.000 τόνους/έτος το 2010. Η αύξηση της παραγωγής των ορυχείων προήλθε σε μεγάλο βαθμό από τη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, η οποία αύξησε την παραγωγή της κατά την ίδια περίοδο από 14.500 τόνους σε 70.000 τόνους.

Το κοβάλτιο διακινείται ως μια ποικιλία εξευγενισμένων προϊόντων, κυρίως ως ειδικά προϊόντα και χημικές ουσίες (κυρίως υδροξείδιο, ανθρακικό, οξείδιο και θειικό κοβάλτιο), αλλά και ως σπασμένες και κομμένες κάθοδοι, χονδροειδής σκόνη, μπρικέτες και πλινθώματα. Η ΛΔΚ είναι ο μεγαλύτερος εξαγωγέας, με σημαντική διαφορά, ραφινάρισμένου μετάλλου, γεγονός που αντανάκλα το αυξανόμενο επίπεδο παραγωγής μετάλλων καθόδου κοβαλτίου τα τελευταία χρόνια. Η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος εισαγωγέας τόσο των μεταλλευμάτων και συμπυκνωμάτων κοβαλτίου όσο και του

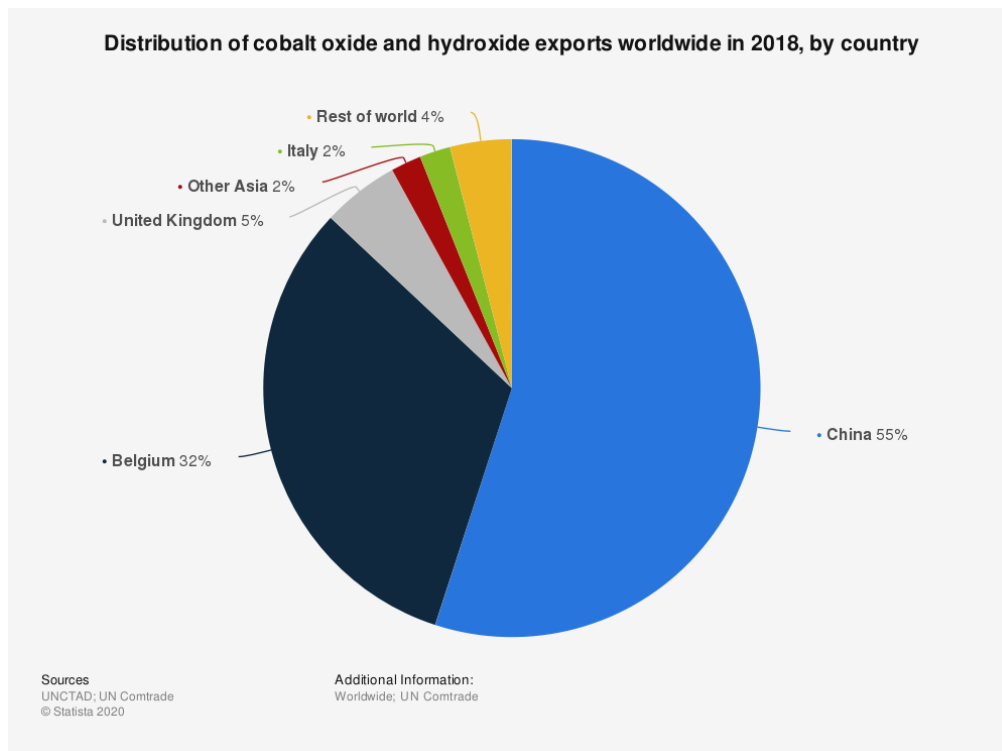
εξευγενισμένου μετάλλου με σημαντικά περιθώρια. Το 2009 η Κίνα εισήγαγε περισσότερους από 283.000 τόνους κοβαλτίου σε μεταλλεύματα και συμπυκνώματα σε σύγκριση με τη Ζάμπια, τον δεύτερο μεγαλύτερο εισαγωγέα, με περίπου 41.000 τόνους.



Σχήμα 5.4: Η κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής μετάλλου κοβαλτίου το 2019 ανά χώρα ([www.ifpenergiesnouvelles.com](http://www.ifpenergiesnouvelles.com))



Σχήμα 5.5: Παγκόσμια παραγωγή ορυχείων κοβαλτίου από το 1950 έως το 2019 ([www.researchgate.net](http://www.researchgate.net))



Σχήμα 5.6: Οι κυριότερες χώρες εξαγωγής μεταλλευμάτων και συμπυκνωμάτων κοβαλτίου και εξευγενισμένου μετάλλου το 2018 (www.statista.com)

### Πόροι και αποθέματα

Σύμφωνα με το Γεωλογικό Ινστιτούτο των ΗΠΑ, τα παγκόσμια αποθέματα το 2011 εκτιμώνται σε 7,5 εκατομμύρια τόνους, με κυρίαρχη χώρα τη ΛΔΚ με περίπου 45% του σημερινού συνόλου, ακολουθούμενη από την Αυστραλία με περίπου 19%. Ακολουθούν Κούβα, Ρωσία και Φιλιππίνες. Οι παγκόσμιοι πόροι κοβαλτίου εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 15 εκατομμυρίων τόνων, με την πλειονότητα να βρίσκεται εντός νικελιούχων λατεριτικών κοιτασμάτων. Οι υπόλοιποι πόροι απαντώνται κυρίως σε κοιτάσματα θειούχων νικελίου-χαλκού που φιλοξενούνται σε μαφικά και υπερμαφικά πετρώματα στην Αυστραλία (περιοχή Kambalda, Δυτική Αυστραλία), στον Καναδά (περιοχή Sudbury, Οντάριο και Voisey's Bay, Λαμπραντόρ) και στη Ρωσία (περιοχή Norilsk-Talnakh), καθώς και στα κοιτάσματα χαλκού-κοβαλτίου της Λαϊκής Δημοκρατίας του Κονγκό και της Ζάμπια. Επιπλέον, έως και ένα δισεκατομμύριο τόνοι άγνωστων πόρων κοβαλτίου μπορεί να υπάρχουν σε κονδύλους μαγγανίου και κρούστες στον πυθμένα των ωκεανών.

## 5.4. Χρήσεις, Ανακύκλωση και Υποκατάστατα

Αν και το κοβάλτιο απομονώθηκε για πρώτη φορά σε στοιχειώδη μορφή το 1730, η χρήση του σε χρωστικές ουσίες παρέμεινε η μόνη πρακτική εφαρμογή του μέχρι το 1907, όταν το μέταλλο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε κράματα. Το κοβάλτιο εξακολουθεί να έχει λίγες εφαρμογές στην καθαρή του μορφή και χρησιμοποιείται συνηθέστερα ως συστατικό κράματος ή χημική ένωση, όπου η χημική αντοχή και η αντοχή στη φθορά, οι μαγνητικές ιδιότητες και η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα υλικών με εμπορικές, βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές.

Επί του παρόντος, οι κύριες χρήσεις του κοβαλτίου είναι:

- **Μπαταρίες:** η μεγαλύτερη χρήση του κοβαλτίου (30 % του συνόλου) είναι στις μπαταρίες. Αποτελεί σημαντικό συστατικό στις τρεις κύριες τεχνολογίες επαναφορτιζόμενων μπαταριών: 1) οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορεί να περιέχουν έως και 60 % κοβάλτιο ως οξειδίο λιθίου-κοβαλτίου. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται από τη χημική κατασκευή της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Οι μπαταρίες που αποτελούνται από Li-Ni-Al-Co μπορεί να περιέχουν μόλις 9% κοβάλτιο- 2) οι υβριδικές μπαταρίες νικελίου-μετάλλου, που χρησιμοποιούνται στα σημερινά υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, περιέχουν έως και 15% κοβάλτιο- 3) το οξειδίο ή η σκόνη υδροξειδίου του κοβαλτίου χρησιμοποιείται στις μπαταρίες νικελίου-καδμίου που αντιπροσωπεύουν 1-5% της σύνθεσης της μπαταρίας.

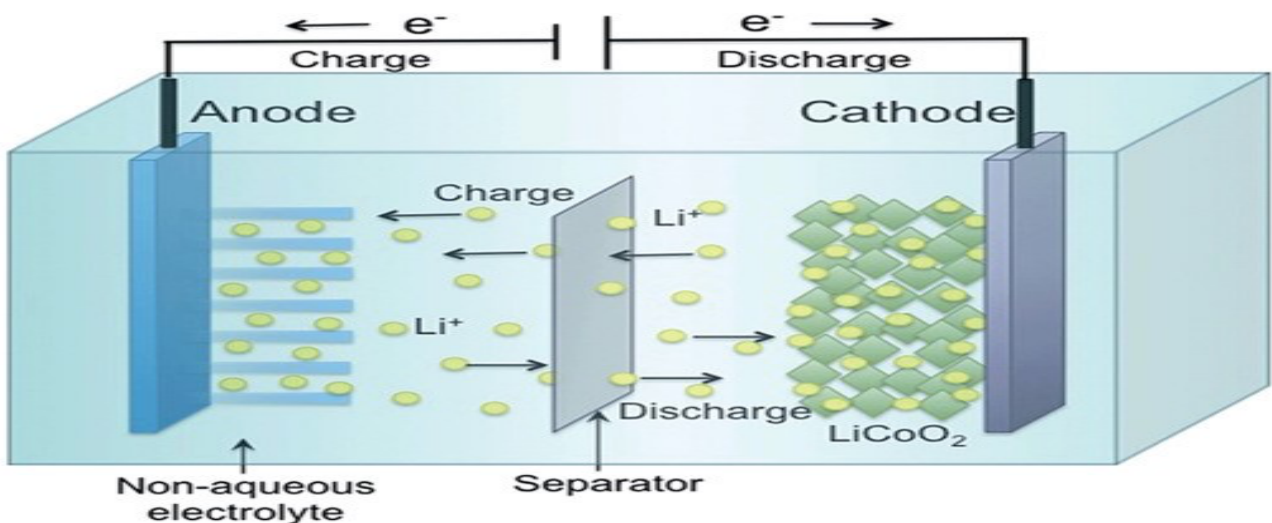
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως για την κάθοδο είναι το οξειδίο του μαγγανίου του λιθίου, το φωσφορικό σίδηρο του λιθίου και το οξειδίο του κοβαλτίου του λιθίου, τα οποία παρέχουν επίσης διάφορες τάσεις και χαρακτηριστικά.

Το οξειδίο του λιθίου χρησιμοποιείται κυρίως ως ενεργό υλικό για την κάθοδο και καθορίζει την τάση και τη χωρητικότητα των μπαταριών. Ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου χρησιμοποιείται για το πλαίσιο της καθόδου, το οποίο επικαλύπτεται με ενεργό υλικό, συνδετικό υλικό και αγωγίμο πρόσθετο. Αυτή η επίστρωση μπορεί να αυξήσει την αγωγιμότητα και μπορείτε εύκολα να προσδιορίσετε τη χωρητικότητα της μπαταρίας και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Περισσότερο λίθιο- περισσότερη θα είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας και μια μεγάλη διαφορά μεταξύ ανόδου και καθόδου θα αυξήσει την τάση της μπαταρίας. μια άνοδος είναι ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο και ενώ η μπαταρία βρίσκεται στη θέση φόρτισης, το ιόν λιθίου μπορεί να μετακινηθεί από την κάθοδο στην άνοδο. Η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας. Οι περισσότερες μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούν γραφίτη ως υλικό ανόδου επειδή ο γραφίτης μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις τάσης και έχει χαμηλό κόστος και καλή αγωγιμότητα.

Η άνοδος είναι επίσης επικαλυμμένη με ενεργό υλικό και μπορεί να στέλνει ηλεκτρόνια μέσω ενός καλωδίου. Στη θέση φόρτισης, η άνοδος είναι το μέρος που αποθηκεύει τα ιόντα λιθίου και τα στέλνει πίσω στη θέση εκφόρτισης μέσω ηλεκτρολυτών. Ένας διαχωριστής μπορεί να είναι ένα πολυμερές όπως το (PP) μικροπορώδες φιλμ ή το (PE) μικροπορώδες φιλμ. Εμποδίζει την άνοδο

και την κάθοδο να αγγίζουν η μία την άλλη και επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να παρέχουν ενέργεια και να ρέουν σε οποιαδήποτε συσκευή. Ο διαχωριστής είναι ένα λεπτό φύλλο και παίζει βασικό ρόλο σε θέματα ασφάλειας. Μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμος σε πολύ θερμές συνθήκες και σώζει τη μπαταρία από έκρηξη. οι ηλεκτρολύτες βοηθούν στη μεταφορά θετικών ιόντων λιθίου μεταξύ της καθόδου και της ανόδου και ένας από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους ηλεκτρολύτες στις μπαταρίες λιθίου είναι το άλας λιθίου. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα μέσο που καθιστά δυνατή την κίνηση της καθόδου και της ανόδου και επιτρέπει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας στις μπαταρίες λιθίου. Περιλαμβάνει διαλύτες, πρόσθετα και άλατα, τα οποία επιτελούν διάφορες λειτουργίες, όπως πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένο σκοπό, διαλύτες που χρησιμοποιούνται για τη διάλυση αλάτων και άλατα που χρησιμοποιούνται για την κίνηση. Μπορείτε να πείτε ότι ο τύπος των ηλεκτρολυτών καθορίζει την ταχύτητα και την κίνηση των ιόντων λιθίου στο εσωτερικό της μπαταρίας.



Εικόνα 5.1: Γενικευμένο διάγραμμα μίας μπαταρίας ([ludabattery.com](http://ludabattery.com))

- **Υπερκράματα και κράματα μαγνητών:** το κοβάλτιο χρησιμοποιείται ευρέως ως μέταλλο κράματος σε υπερκράματα και μαγνήτες. Τα υπερκράματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε κινητήρες αεροσκαφών και τουρμπίνες, καθώς και στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε χημικές εφαρμογές. Το κοβάλτιο χρησιμοποιείται σε μαγνητικά κράματα, είτε σε υψηλής αντοχής μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου είτε σε μαγνήτες AlNiCo χαμηλότερης ισχύος. Αυτοί οι μαγνήτες χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρικού εξοπλισμού υψηλής απόδοσης.
- **Καταλύτες:** οι καταλυτικές διεργασίες αντιπροσωπεύουν το 10% της συνολικής κατανάλωσης κοβαλτίου, με μία από τις κύριες χρήσεις να είναι η αύξηση των ρυθμών πολυμερισμού και οξειδωσης στην κατασκευή πλαστικών ρητινών. Το κοβάλτιο χρησιμοποιείται επίσης σε τεχνολογίες αερίου-υγρού όπου το φυσικό αέριο επεξεργάζεται για την παραγωγή συνθετικού καυσίμου ντίζελ. Χρησιμοποιείται επίσης στην πετροχημική βιομηχανία με τη μορφή οξειδίου του κοβαλτίου για την απομάκρυνση του θείου από το αργό πετρέλαιο κατά τη διαδικασία διύλισης.
- **Άλλες εφαρμογές:** το κοβάλτιο χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία άλλων εφαρμογών, όπως: ως συνδετικό υλικό σε σκληρά υλικά, όπως το τσιμεντοποιημένο καρβίδιο και οι εφαρμογές εργαλείων διαμαντιών (13%), ως συστατικό των χαλύβων υψηλής αντοχής και άλλων κραμάτων υψηλής αντοχής (5%), σε χρωστικές ουσίες σε γυαλί, σμάλτο, κεραμικά και πορσελάνες (9%), σε ιατρικές εφαρμογές ως μέρος των θεραπειών για τον καρκίνο, καθώς και στο κράμα βιταλιού (κοβάλτιο-χρώμιο-μολυβδαίνιο-άνθρακας) που χρησιμοποιείται σε συστήματα προσθετικών μελών και στην οδοντιατρική- και σε ηλεκτρονικούς συνδέσμους σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (που περιέχουν έως και 15% κοβάλτιο).

Οι μπαταρίες έχουν αναγνωριστεί ως βασική πηγή κοβαλτίου στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Οι LIB που βασίζονται σε LCO, οι οποίες περιέχουν περίπου 14 % κοβάλτιο, αντιπροσωπεύουν την πλειονότητα της κατανάλωσης κοβαλτίου. Μικρές ποσότητες κοβαλτίου περιέχονται στις μπαταρίες NiCd και NiMH, καθώς και στις LIB με βάση τις NMC και NCA.

Μια επερχόμενη αλλαγή στη χρήση υλικού καθόδου στις μπαταρίες μπορεί να προκαλέσει σημαντική αλλαγή στη ζήτηση κοβαλτίου. Το σημερινό υλικό καθόδου Οξειδίο λιθίου κοβαλτίου (LCO) θα μπορούσε σταδιακά να αντικατασταθεί από το οξειδίο λιθίου νικελίου κοβαλτίου μαγγανίου (NMC), το φωσφορικό σίδηρο λιθίου (LFP) και το οξειδίο λιθίου νικελίου κοβαλτίου αλουμινίου (NCA). Το LCO περιέχει 60% κοβάλτιο, το NMC 10-20% κοβάλτιο, το NCA 9% κοβάλτιο και το LFP καθόλου κοβάλτιο. Ως αποτέλεσμα, η αύξηση της ζήτησης κοβαλτίου θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά μέσω αυτής της αλλαγής υλικού.

### Ανακύκλωση

Η αστάθεια των τιμών, η γεωπολιτική του εφοδιασμού και τα πιθανά οφέλη από το κόστος και το περιβάλλον οδηγούν στην ανακύκλωση του κοβαλτίου. Τα θραύσματα μετάλλων, οι

χρησιμοποιημένοι καταλύτες και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι τα πιο εύκολα προσβάσιμα προϊόντα που περιέχουν κοβάλτιο για ανακύκλωση, ενώ η ανακύκλωση κοβαλτίου από εφαρμογές σε χειροσυσσκευές, γυαλί και χρώματα δεν είναι δυνατή, επειδή διαχέεται κατά τη χρήση. Σε όρους χωρητικότητας, η ανάκτηση κοβαλτίου από δευτερογενείς τροφοδοσίες υπερδιπλασιάστηκε κατά την περίοδο 1995-2005, από 4200 τόνους σε περισσότερους από 10.000 τόνους αντίστοιχα.

Η ανακύκλωση κραμάτων και σκληρών μετάλλων γίνεται γενικά από και εντός των τομέων των υπερκραμάτων και των μεταλλικών ανθρακούχων αλάτων. Η ανακύκλωση των καταλυτών και των μπαταριών γίνεται επίσης μέσω της βιομηχανίας κοβαλτίου. Αυτά τα προϊόντα στο τέλος του κύκλου ζωής τους αποτελούν όλο και πιο σημαντική πηγή εφοδιασμού κοβαλτίου για τη βιομηχανία κοβαλτίου της ΕΕ ειδικότερα. Το ποσοστό ανακύκλωσης του κοβαλτίου στο τέλος του κύκλου ζωής του εκτιμάται σε 68% και το ποσοστό ανακυκλωμένου περιεχομένου εκτιμάται σε 32%. Συνολικά, ο στόχος της ΕΕ είναι η ανακύκλωση των μπαταριών, προκειμένου να μειωθεί η ζήτηση πρωτογενούς κοβαλτίου. Από πολιτική άποψη, η ανακύκλωση κοβαλτίου έχει επίσης αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία προκειμένου να μειωθεί η εξάρτηση από λίγους πρωτογενείς προμηθευτές, οι οποίοι ιστορικά βρίσκονται στην κεντρική Αφρική. Γεγονότα στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, όπως η κατάσχεση του έργου Kolwezi Tailings Project από την κυβέρνηση, έχουν αποθαρρύνει τις ξένες επενδύσεις στη μεταλλευτική βιομηχανία της χώρας αυτής.

Για την εφαρμογή ακριβέστερης διαλογής και ειδικής επεξεργασίας των LIB ανάλογα με την χημεία τους, απαιτείται ένδειξη της συγκέντρωσης κοβαλτίου στις μπαταρίες. Για παράδειγμα, στοιχεία όπως ο σίδηρος και ο φώσφορος από μπαταρίες LFP αποτελούν εμπόδιο για την ανάκτηση κοβαλτίου από συμπυκνώματα υψηλής περιεκτικότητας σε κοβάλτιο (LIB τύπου LCO). Συνεπώς, τα ρυπογόνα αυτά στοιχεία πρέπει να αφαιρεθούν. Ωστόσο, η διαδικασία απομάκρυνσης αυτών των ρυπογόνων στοιχείων μπορεί να αυξήσει το κόστος της όλης διαδικασίας. Ως εκ τούτου, η διαλογή των μπαταριών ανάλογα με την χημεία τους, ως προκαταρκτική διαδικασία για την περαιτέρω επεξεργασία, καθιστά δυνατή τη δημιουργία αποβλήτων που είναι πιο πλούσιες σε συγκέντρωση των μετάλλων-στόχων (π.χ. κοβάλτιο). Σε σύγκριση με την επεξεργασία αραιών μειγμάτων διαφορετικών τύπων μπαταριών, η επεξεργασία αυτών των συμπυκνωμένων παρτίδων είναι πιο εφικτή τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική άποψη. Καθώς η υδρομεταλλουργική επεξεργασία επικεντρώνεται σε επιλεγμένα υλικά, για παράδειγμα είτε κοβάλτιο και χαλκό στην περίπτωση των μπαταριών LCO είτε χαλκό και μαγγάνιο για τις μπαταρίες LMO, η απώλεια ομάδων υλικών μπορεί να ελαχιστοποιηθεί.

### Υποκατάσταση

Αναζητούνται συνεχώς υποκατάστατα του κοβαλτίου, κυρίως λόγω της αστάθειας των τιμών του μετάλλου. Ωστόσο, δεδομένων των μοναδικών ιδιοτήτων του κοβαλτίου, υπάρχουν περιορισμένες επιλογές υποκατάστασης και σχεδόν όλα τα υποκατάστατα έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη απόδοση του προϊόντος. Παρόλα αυτά, τα πιθανά υποκατάστατα του κοβαλτίου στις κύριες τελικές χρήσεις του περιλαμβάνουν:



- I. σε μαγνήτες από φερρίτες βαρίου ή στροντίου, νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου ή κράματα νικελίου-σιδήρου,
- II. στα χρώματα με χρώμιο, σίδηρο, μόλυβδο, μαγγάνιο ή βανάδιο,
- III. σε κινητήρες αεροσκάφων και καταλύτες πετρελαίου με νικέλιο και κράματα με βάση το νικέλιο.
- IV. σε μπαταρίες ιόντων λιθίου, με σίδηρο-φωσφόρο-μαγγάνιο, νικέλιο-κοβάλτιο-αλουμίνιο ή νικέλιο-κοβάλτιο-μαγγάνιο. Η περιεκτικότητα σε κοβάλτιο μπορεί τελικά να μειωθεί ή να αντικατασταθεί από αυτά τα φθηνότερα μέταλλα και κράματα, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας να μειώνει την περιεκτικότητα σε κοβάλτιο από 60% σε λιγότερο από 10%.

### Περιβαλλοντικά ζητήματα

Το κοβάλτιο στο περιβάλλον προέρχεται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές. Οι φυσικές πηγές κοβαλτίου περιλαμβάνουν τη διάβρωση πετρωμάτων που περιέχουν κοβάλτιο, το θαλασσινό νερό, την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τις βιογενείς εκπομπές. Οι ανθρωπογενείς πηγές κοβαλτίου περιλαμβάνουν την εξόρυξη και την επεξεργασία μεταλλευμάτων που περιέχουν κοβάλτιο, τη γεωργική εφαρμογή σκευασμάτων που περιέχουν κοβάλτιο και την απόθεση ατμοσφαιρικών σωματιδίων από την καύση ορυκτών καυσίμων. Οι μετρούμενες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις κοβαλτίου σε αμόλυντες περιοχές είναι συνήθως <math><1-2 \text{ ng/ m}^3</math> και οι συγκεντρώσεις κοβαλτίου στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα είναι επίσης χαμηλές, συνήθως μικρότερες από 1-10μg/l. Οι μέσες συγκεντρώσεις κοβαλτίου που αναφέρονται σε επιφανειακά ύδατα σε όλη την Ευρώπη είναι 0,333 ±1,01 μg/l. Οι συγκεντρώσεις κοβαλτίου στο πόσιμο νερό είναι γενικά μικρότερες από 1-2μg/l. Η μέση συγκέντρωση κοβαλτίου στα εδάφη σε όλο τον κόσμο είναι περίπου 8ppm.

Το κοβάλτιο είναι βασικό συστατικό της βιταμίνης B12, της κοβαλαμίνης. Ούτε τα ανώτερα φυτά ούτε τα ζώα μπορούν να συνθέσουν τη βιταμίνη B12, αλλά και τα δύο χρειάζονται ιχνοστοιχεία. Τα μη μηρυκαστικά ζώα δεν είναι σε θέση να συνθέσουν τη βιταμίνη B12 από το κοβάλτιο, αλλά χρειάζονται κοβάλτιο με τη μορφή της βιταμίνης B12. Η ανεπάρκεια βιταμίνης B12 μπορεί να έχει διάφορες επιπτώσεις στην υγεία, όπως στειρότητα, αυξημένη περιγεννητική θνησιμότητα, αναιμία, λιπώδες ήπαρ και μειωμένη ικανότητα καταπολέμησης ασθενειών. Χαρακτηριστικά σημάδια της χρόνιας υπερέκθεσης κοβαλτίου για τα περισσότερα είδη περιλαμβάνουν μειωμένη πρόσληψη τροφής, μειωμένο σωματικό βάρος, διαταραχές του αίματος, αδυναμία και αυξημένη ευαισθησία σε ασθένειες.

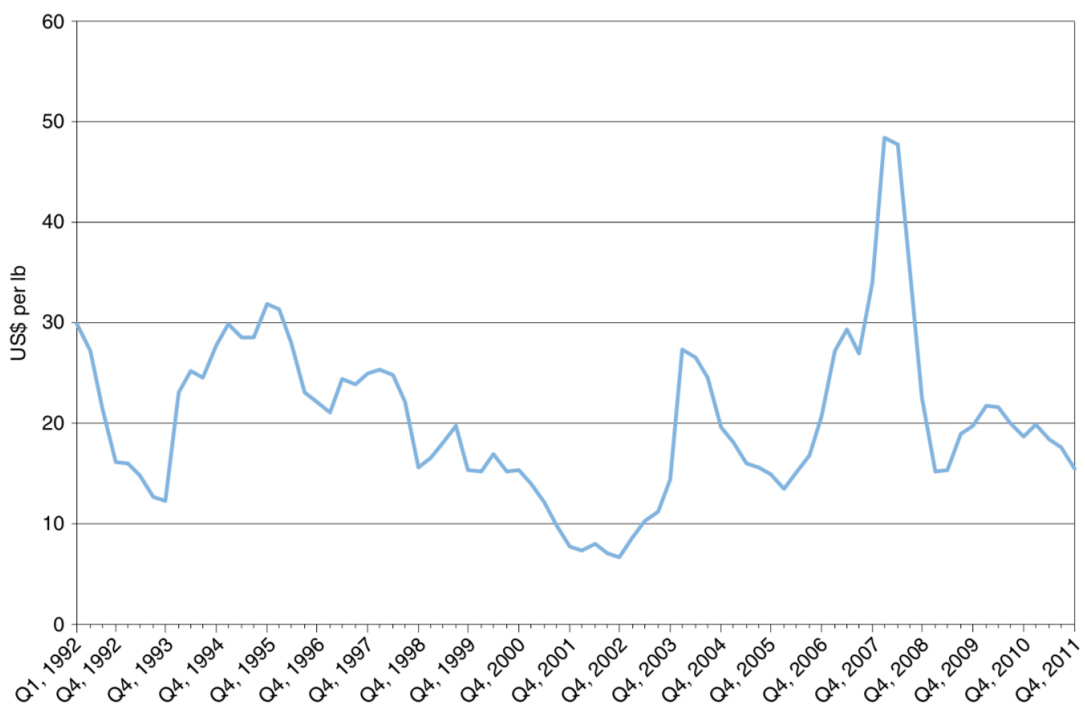
Οι εκτιμήσεις για την έκθεση του ανθρώπου στο κοβάλτιο δείχνουν ότι περισσότερο από το 99% γίνεται μέσω της πρόσληψης τροφής, με εκτιμώμενη ημερήσια πρόσληψη 5-40μg/ημέρα, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας είναι ανόργανο κοβάλτιο και σχεδόν όλο περνάει από τον οργανισμό χωρίς να απορροφηθεί. Η συνιστώμενη διαιτητική πρόσληψη αναφοράς της βιταμίνης B12 για τους ενήλικες είναι 2μg/ημέρα και η πρόσληψη κοβαλτίου εντός των φυσιολογικών διατροφικών ορίων

δεν έχει συσχετιστεί με δυσμενείς συνέπειες για την υγεία. Η εισπνοή υψηλών συγκεντρώσεων κοβαλτίου συνδέεται με πνευμονικές παθήσεις, όπως άσθμα και πνευμονία, αλλά οι επιπτώσεις αυτές φαίνεται να περιορίζονται στους εργαζόμενους που εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα κοβαλτίου στον αέρα.

## 5.5. Διακύμανση της τιμής και προοπτική για το μέλλον

Σε αντίθεση με άλλα σημαντικά βιομηχανικά μέταλλα, το κοβάλτιο άρχισε μόλις πρόσφατα να διαπραγματεύεται στο Χρηματιστήριο Μετάλλων του Λονδίνου. Πριν από αυτό, η Western Mining Corporation άρχισε να πωλεί κοβάλτιο στην ιστοσελίδα της το 1999. Μετά από αυτό, και άλλες εμπορικές εταιρείες άρχισαν να προσφέρουν υπηρεσίες αγοράς και πώλησης μέσω του διαδικτύου. Το 2008 η BHP (που τώρα ενσωματώνει την Western Mining Corp) και το London Metal Exchange (LME) άρχισε την εμπορία κοβαλτίου (ελάχιστη περιεκτικότητα σε Co 99,3%) τον Φεβρουάριο του 2010. Το LME προσφέρει μια πλήρως ρυθμιζόμενη αγορά με την οποία μπορούν να συναλλάσσονται συμβόλαια κοβαλτίου spot και μελλοντικά συμβόλαια. Το παγκόσμιο συμβόλαιο διαπραγματεύεται σε παρτίδες του 1 μετρικού τόνου, ελάχιστο μέταλλο κοβαλτίου 99,3%, με παράδοση σε αποθήκες στην Ασία, την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες.

Η τιμή του κοβαλτίου συνδέεται με την προσφορά, τη ζήτηση και το επικρατούν πολιτικό περιβάλλον του βασικού παραγωγού, της ΛΔΚ. Για παράδειγμα, στις αρχές της δεκαετίας του 1990 η τιμή του κοβαλτίου κορυφώθηκε περίπου στα 33 δολάρια ανά λίβρα, κυρίως λόγω των πολιτικών και οικονομικών εντάσεων στη ΛΔΚ. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των δύο επόμενων χρόνων, η τιμή του κοβαλτίου μειώθηκε ως απάντηση στην εξασθενημένη ζήτηση λόγω της παγκόσμιας οικονομικής ύφεσης. Λόγω των ανησυχιών για την προσφορά κοβαλτίου από τη ΛΔΚ, η τιμή του κοβαλτίου υπερδιπλασιάστηκε στα τέλη του 1993 - αρχές του 1994. Μεταξύ 1993 και 1995, παρά την αυξημένη παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου, τα υψηλά επίπεδα ζήτησης στήριξαν μια τιμή κοβαλτίου μεταξύ 20 και 30 δολαρίων ανά λίβρα. Ωστόσο, οι προβλέψεις για μεγάλες αυξήσεις της ζήτησης νικελίου με συναφείς νέες πηγές παραγωγής κοβαλτίου, οδήγησαν σε ανησυχίες για πιθανή υπερπροσφορά και η τιμή του κοβαλτίου έπεσε σε περίπου 21,50 δολάρια ανά λίβρα στα τέλη του 1995. Από το 1995 έως το 2002, η γενική τάση των τιμών του κοβαλτίου ήταν πτωτική, καθώς η προσφορά ξεπερνούσε τη ζήτηση. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του 2003, οι τιμές του κοβαλτίου αυξήθηκαν απότομα λόγω της μειωμένης παραγωγής και των ανησυχιών για τη στενότητα της παγκόσμιας προσφοράς. Με την έκρηξη των βασικών εμπορευμάτων που ακολούθησε, οι τιμές συνέχισαν να αυξάνονται μέχρι το 2008, όταν, ως απάντηση στην παγκόσμια χρηματοπιστωτική ύφεση, οι τιμές μειώθηκαν από σχεδόν 50 \$ ανά λίβρα σε 15 \$ ανά λίβρα. Μέχρι τα μέσα του 2011 οι τιμές αυτές ήταν σταθερές γύρω στα 20 δολάρια ανά λίβρα, ενώ στις αρχές του 2012 η τιμή ήταν περίπου 15 δολάρια ανά λίβρα. Φαίνεται πιθανό ότι η μεταβλητότητα των τιμών θα συνεχιστεί, αν και αυτό θα εξαρτηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο χρόνος έναρξης λειτουργίας νέων ορυχείων σε σχέση με το κλείσιμο ορυχείων και ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης.



Σχήμα 5.7: Η μέση τριμηνιαία τιμή του κοβαλτίου (critical metals handbook)



Σχήμα 5.8: Διακύμανση της τιμής του Κοβαλτίου στο χρηματιστήριο (LME) τα τελευταία 10 χρόνια (London Metal Exchange)

### Προοπτική

Υπάρχουν πολλές πιθανές νέες πηγές κοβαλτίου, τόσο στην ξηρά, στον Καναδά, τη Δυτική Αυστραλία, τη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, τη Ζάμπια και τη Μαδαγασκάρη, όσο και στην ανοικτή θάλασσα. Μια σημαντική πρόσφατη εξέλιξη ήταν η αύξηση της εξορυκτικής δραστηριότητας στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, όπου εξορύσσονται σημαντικές ποσότητες μεταλλεύματος. Φαίνεται ότι οι μελλοντικές εξελίξεις στη ΛΔΚ θα αποτελέσουν σημαντικό παράγοντα στην παραγωγή κοβαλτίου. Δεδομένης της σημασίας του εφοδιασμού από τη ΛΔΚ και του σχετικά περίπλοκου και αβέβαιου πολιτικού της περιβάλλοντος, δεν αποτελεί ίσως έκπληξη το γεγονός ότι το κοβάλτιο βρίσκεται στους καταλόγους των κρίσιμων μετάλλων, με υψηλή οικονομική σημασία και με σημαντικούς κινδύνους για την ασφάλεια του εφοδιασμού.

Από το 2002 η κατανάλωση κοβαλτίου στην Ασία αυξήθηκε σημαντικά, ενώ η ζήτηση στη Δύση παρέμεινε σταθερή. Η αύξηση της ζήτησης οφείλεται κυρίως στην αυξημένη χρήση σε χημικές εφαρμογές, ιδίως σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και καταλύτες. Η ζήτηση για επαναφορτιζόμενες μπαταρίες για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και σε εφαρμογές αυτοκινήτων είναι πιθανό να συνεχίσει να αυξάνεται, αν και η ζήτηση κοβαλτίου θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογία μπαταριών που θα υιοθετηθεί από την αυτοκινητοβιομηχανία. Το κοβάλτιο χρησιμοποιείται τόσο στις μπαταρίες νικελίου-μετάλλου-υδριδίου, όπως χρησιμοποιούνται σήμερα στα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, όσο και στις ισχυρότερες μπαταρίες ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούνται σε όλα τα ηλεκτρικά και plug-in υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα. Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ ανέλυσε διάφορα σενάρια για τη μελλοντική ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων και το μερίδιο αγοράς των διαφόρων τύπων μπαταριών και κατέληξε στο συμπέρασμα

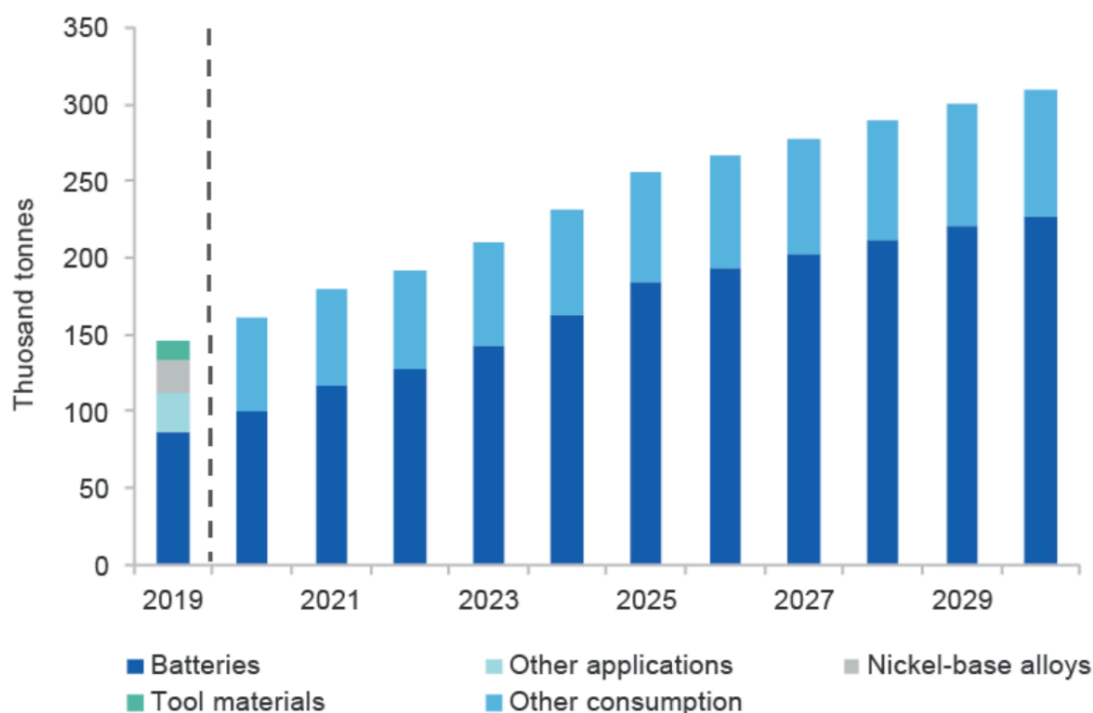
ότι η διαθεσιμότητα κοβαλτίου είναι περισσότερο από επαρκής έως το 2025, ακόμη και χωρίς πρόσθετη προμήθεια από τη ΛΔΚ.

Οι προβλέψεις για την προσφορά και τη ζήτηση κοβαλτίου δείχνουν ότι η αγορά κοβαλτίου θα παραμείνει περίπου σε ισορροπία για την επόμενη δεκαετία. Το Ινστιτούτο Ανάπτυξης Κοβαλτίου προβλέπει ρυθμό ανάπτυξης 2,5 % ετησίως, ο οποίος βρίσκεται μεταξύ των υψηλών και χαμηλών ρυθμών ανάπτυξης που διαμορφώθηκαν από το Öko-Institut, 2,8 % και 1,7 %. Εκτός από την αυξανόμενη ζήτηση κοβαλτίου στις μπαταρίες, η χρήση του σε υπερκράματα αναμένεται να αυξηθεί λόγω της συνεχιζόμενης επέκτασης της παγκόσμιας αγοράς αεροδιαστημικής. Από την πλευρά της προσφοράς υπάρχει σημαντικός βαθμός αβεβαιότητας όσον αφορά το άνοιγμα νέων ορυχείων τα επόμενα χρόνια. Κάποια από αυτά θα ενισχύσουν ή θα αντικαταστήσουν την υπάρχουσα δυναμικότητα, αν και κάποια από αυτά είναι απίθανο να ανοίξουν ή να αξιοποιηθούν πλήρως. Παρ' όλα αυτά, η ύπαρξη αυτής της δυνητικής δυναμικότητας εξόρυξης συμβάλλει σε κάποιο βαθμό στην άμβλυνση των ανησυχιών για την έλλειψη κοβαλτίου, ακόμη και αν η αύξηση της ζήτησης είναι υψηλότερη από την προβλεπόμενη. Η υποκατάσταση του κοβαλτίου από φθηνότερα μέταλλα στις μπαταρίες και η αυξημένη ανακύκλωση του κοβαλτίου από κράματα μετάλλων και από μπαταρίες μπορεί επίσης να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην αγορά στο μέλλον.

Η κατανάλωση κοβαλτίου έχει αυξηθεί με τη χρήση μπαταριών, καθώς αποτελεί θεμελιώδες συστατικό της αναπτυσσόμενης αγοράς καταναλωτικών ηλεκτρονικών ειδών. Από το 2010, η παγκόσμια κατανάλωση αυξήθηκε κατά 24% ετησίως για να φθάσει τους 131.000 τόνους το 2018. Καθώς η κατασκευή μπαταριών και, σε μικρότερο βαθμό, η κατασκευή κραμάτων με βάση το νικέλιο, συνεχίζουν να αυξάνονται, η παγκόσμια κατανάλωση κοβαλτίου προβλέπεται να αυξηθεί κατά περίπου 7% ετησίως, για να φθάσει τους 310.000 τόνους το 2030.

Το 2018, οι μεγαλύτεροι εισαγωγείς μεταλλευμάτων και συμπυκνωμάτων κοβαλτίου ήταν:

- Κίνα (66% του παγκόσμιου συνόλου)
- Ζάμπια (27%)
- Μαρόκο (3%)

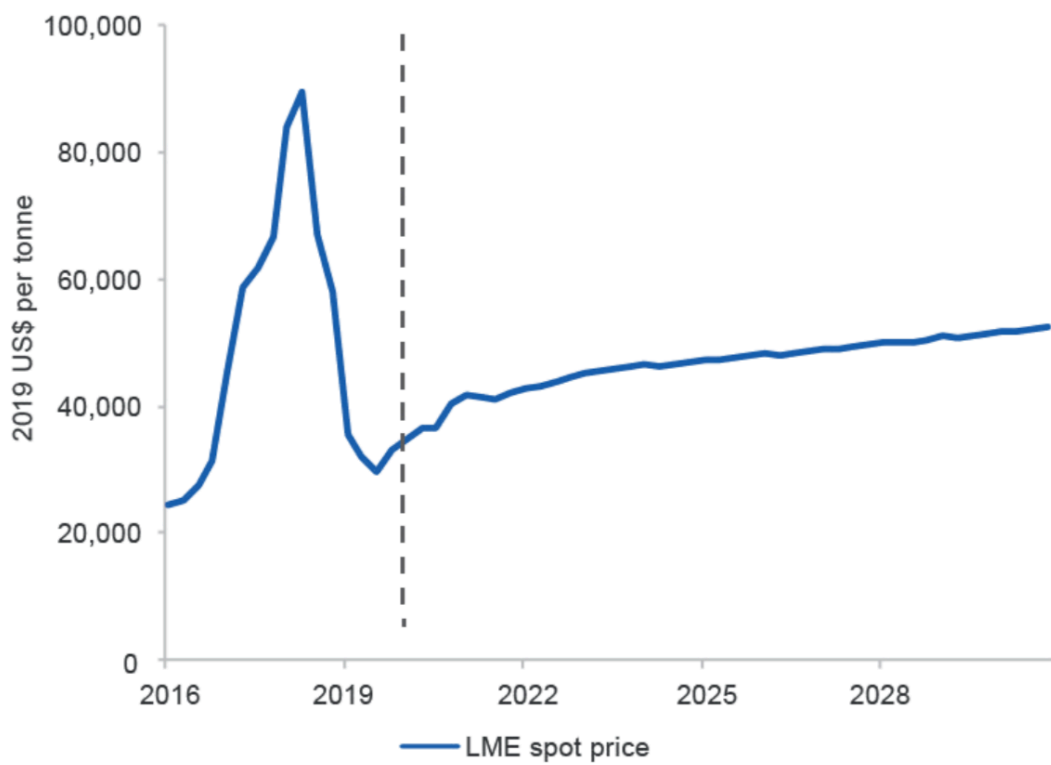


Σχήμα 5.9: Πρόβλεψη κατανάλωσης κοβαλτίου (Australian government)

Πριν από το 2017, υπήρχε επάρκεια Κοβαλτίου στην παγκόσμια αγορά. Ωστόσο, το 2017 και το 2018 οι τιμές του κοβαλτίου εκτοξεύτηκαν, ξεπερνώντας τα 94.000 δολάρια ανά τόνο - διπλάσιες από τον μέσο όρο των προηγούμενων 5 ετών. Στη συνέχεια οι τιμές μειώθηκαν- κατά το πρώτο εξάμηνο του 2019, η τιμή spot του κοβαλτίου LME ήταν κατά μέσο όρο 33.500 δολάρια ανά τόνο. Οι πρόσφατες χαμηλές τιμές και οι προσδοκίες σχετικά με την αύξηση της ζήτησης οδήγησαν στο προσωρινό κλείσιμο του ορυχείου Mutanda της Glencore στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, του μεγαλύτερου ορυχείου κοβαλτίου στον κόσμο.

Οι τιμές του κοβαλτίου αναμένεται να αυξηθούν καθώς αυξάνεται η παραγωγή μπαταριών. Ωστόσο, η αγορά αναμένεται να είναι επαρκώς εφοδιασμένη έως το 2025 περίπου, καθώς εισέρχεται στην αγορά νέα παραγωγή και αυξάνεται η παραγωγή ανακυκλωμένης παραγωγής.

Τα ζητήματα στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης πολιτικής αστάθειας και της νέας φορολογικής μεταχείρισης στην εξόρυξη κρίσιμων ορυκτών, αποτελούν επίσης κίνδυνο για την παγκόσμια παραγωγή. Αυτά τα ζητήματα από την πλευρά της προσφοράς και ο φόβος για αιχμές των τιμών, ωθούν τις επενδύσεις σε εναλλακτικές λύσεις, συμπεριλαμβανομένης της υποκατάστασης του κοβαλτίου στις μπαταρίες. Οι προοπτικές της αγοράς εξαρτώνται από αυτούς τους παράγοντες, καθώς και από την υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.



Σχήμα 5.10: Προοπτικές τιμών κοβαλτίου (Australian government)

## 6. ΙΝΔΙΟ (In)



Το ίνδιο ανακαλύφθηκε το 1863 από δύο Γερμανούς χημικούς, τον Ferdinand Reich και τον Hieronymus Theodor Richter, οι οποίοι εξέταζαν μεταλλεύματα ψευδαργύρου από τα ορυχεία γύρω από το Freiberg της Σαξονίας. Το ονόμασαν "ίνδιο" από το μπλε του ίντιγκο που παρατηρείται στο φάσμα του. Το 1924 διαπιστώθηκε ότι το ίνδιο είχε την πολύτιμη ικανότητα να σταθεροποιεί μη σιδηρούχα μέταλλα, γεγονός που αποτέλεσε την πρώτη σημαντική χρήση του στοιχείου. Ωστόσο, οι πρώτες εφαρμογές του ινδίου ήταν λίγες, με σημαντικότερες τις διόδους εκπομπής φωτός και την επικάλυψη ρουλεμάν σε κινητήρες υψηλής ταχύτητας, όπως οι κινητήρες αεροσκαφών. Οι ημιαγωγοί που περιείχαν ίνδιο έγιναν σημαντικοί από τη δεκαετία του 1950 και μετά, ενώ η ευρεία χρήση των ράβδων πυρηνικού ελέγχου που περιείχαν ίνδιο αύξησε τη ζήτηση κατά τη δεκαετία του 1970. Από το 1992 η κύρια εφαρμογή του ινδίου είναι η μορφή του οξειδίου ινδίου-κασσιτέρου (ITO) σε οθόνες υγρών κρυστάλλων. Η χρήση αυτή κυριαρχεί πλέον στην αγορά και αντιπροσωπεύει περισσότερο από το ήμισυ της συνολικής κατανάλωσης ινδίου.

Το ίνδιο είναι ένα μαλακό, λαμπερό, ασημόλευκο μέταλλο, με τετραγωνική κρυσταλλική δομή. Είναι πολύ εύπλαστο και όλκιμο και διατηρεί αυτές τις ιδιότητες σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες που προσεγγίζουν το απόλυτο μηδέν, καθιστώντας το ιδανικό για κρυογενικές εφαρμογές και εφαρμογές κενού. Το ίνδιο δεν σκληραίνει, αντέχει σημαντική παραμόρφωση μέσω συμπίεσης και συγκολλάται εύκολα εν ψυχρώ. Το μέταλλο ίνδιο δεν οξειδώνεται από τον αέρα σε συνήθεις θερμοκρασίες, αλλά καίγεται σε τριοξείδιο ( $\text{In}(\text{III})$ ) σε υψηλές θερμοκρασίες. Κατά τη θέρμανση, το ίνδιο αντιδρά άμεσα με μεταλλοειδή (αρσενικό, αντιμόνιο, σελήνιο, τελλούριο) και με αλογόνα, θείο



και φώσφορο. Διαλύεται σε ορυκτά οξέα, αλλά δεν επηρεάζεται από αλκάλια, βραστό νερό και τα περισσότερα οργανικά οξέα. Η χημεία του τρισθενούς ινδίου χαρακτηρίζεται από ομοιοπολικό δεσμό. Το ίνδιο χρησιμοποιείται συχνά για επιστρώσεις γυαλιού: ως μέταλλο ινδίου σχηματίζει επιφάνεια με εξαιρετικές ιδιότητες ίσες με εκείνες του αργύρου και με μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση ή σε κράματα για τη δημιουργία διαφανών και αγωγιμών επιστρώσεων.

Το ίνδιο είναι ένα μέταλλο μετά τη μετάβαση της ομάδας 13 του περιοδικού πίνακα που βρίσκεται μεταξύ του γαλλίου και του θαλλίου. Οι γεωχημικές ιδιότητες του ινδίου είναι τέτοιες που τείνουν να εμφανίζονται στη φύση με τα βασικά μέταλλα των ομάδων 11 (Cu, Ag), 12 (Zn, Cd), 14 (Sn, Pb) και 15 (Bi) του περιοδικού πίνακα. Το ίνδιο έχει δύο κύριες καταστάσεις οξειδωσης, +3 (III) και +1 (I). Το φυσικό ίνδιο αποτελείται από δύο ισότοπα, το  $^{113}\text{In}$  (4,3% του συνόλου) και το  $^{115}\text{In}$  (95,7% του συνόλου).

## 6.1. Ορυκτολογία και κατηγορίες κοιτασμάτων

Τα ορυκτά του ινδίου είναι σπάνια σε φυσικά συστήματα. Έχουν οριστεί δώδεκα ορυκτές φάσεις ινδίου. Ο ινδίτης είναι το πιο σημαντικό ορυκτό ινδίου που αποτελεί ιχνοστοιχείο στα κύρια μεταλλευτικά ορυκτά, όπως ο χαλκοπυρίτης και ο σφαλερίτης. Συχνότερα, το ίνδιο υποκαθιστά στοιχεία με παρόμοιες ιοντικές ακτίνες, ιδίως εκείνα που έχουν τετραηλεκτρικό συντονισμό σε σχέση με το κύριο μεταλλικό ιόν, στα σουλφίδια βασικών μετάλλων. Υψηλές συγκεντρώσεις ινδίου εμφανίζονται συνήθως στον σφαλερίτη, στον χαλκοπυρίτη, στον σταννίτη, στα θειούχα άλατα κασσιτέρου, στον τεναντίτη και στον κασιτερίτη. Η ενσωμάτωση του ινδίου και ο σχηματισμός σουλφιδίων που περιέχουν ίνδιο μπορεί να συμβεί με

- (i) διαδοχική αντικατάσταση ή/και συζευγμένη υποκατάσταση σιδήρου, χαλκού, κασσίτερου και αρσενικού που σχηματίζουν σειρές στερεού διαλύματος,
- (ii) την ενσωμάτωση στο πλέγμα τετραεδρικών συντονισμένων σουλφιδίων και
- (iii) το σχηματισμό μικροσκοπικών εγκλεισμάτων ορυκτών ινδίου (π.χ. ινδίτης) σε σουλφίδια ή κασιτερίτη.

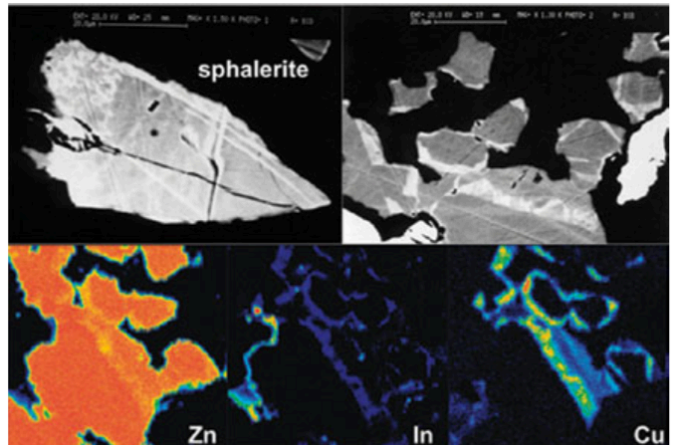
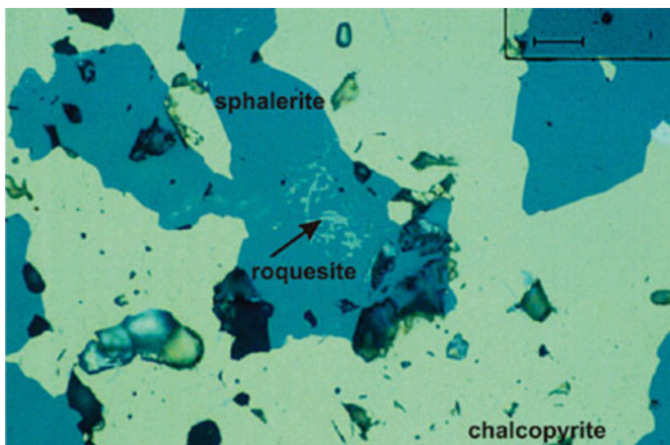
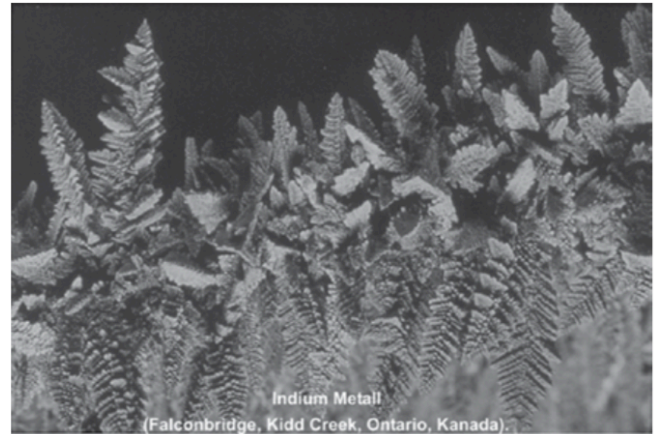
Ο σφαλερίτης είναι το σημαντικότερο ορυκτό που περιέχει ίνδιο και η πηγή του μεγαλύτερου μέρους του ινδίου που εξορύσσεται σήμερα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις ινδίου στον σφαλερίτη συνδέονται στενά με αυξημένες περιεκτικότητες σε χαλκό λόγω του σχηματισμού ενός ασυνεχούς δυαδικού στερεού διαλύματος  $\text{CuInS}_2$  που σχηματίζει μέλη σειράς στερεού διαλύματος με σύσταση  $[\text{Zn}_{2-2x}\text{Cu}_x\text{In}_x\text{S}_2]$ . Η καταβύθιση του ινδίου με χαλκό, ψευδάργυρο και σίδηρο στον χαλκοπυρίτη ευθύνεται για τις αυξημένες συγκεντρώσεις των στοιχείων στα μεταλλεύματα χαλκού. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ινδίου εμφανίζονται συνήθως στους πλούσιους σε χαλκοπυρίτη πυρήνες υψηλής θερμοκρασίας ή στη βάση των επιμέρους κοιτασμάτων. Η μεταλλευτική τεχνολογία των κοιτασμάτων που περιέχουν ίνδιο χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες διαπλάσεις και

υφές αντικατάστασης που περιέχουν σημαντικές συγκεντρώσεις μετάλλων όπως κασσίτερο, χαλκό, ψευδάργυρο, μόλυβδο, άργυρο, βισμούθιο, σελήνιο και αρσενικό.

a)



b)



c)

d)

(α) Παράδειγμα μεταλλεύματος πλούσιου σε ίνδιο (600 ppm In), κοίτασμα μαζικών θειούχων με ηφαιστειακή φιλοξενία (VHMS) Maranda J, Νότια Αφρική και ράβδοι ινδίου (99.95% In)- (β) Μητρικό μέταλλο ινδίου από την πρώτη μονάδα επεξεργασίας Kidd Creek, Καναδάς- (γ) μεταλλεύμα χαλκοπυρίτη-σφαλερίτη με εγκλείσματα ροκεζίτη σε σφαλερίτη- Kidd Creek, Καναδάς- (δ) σειρά στερεών διαλυμάτων σφαλερίτη-ροκεζίτη ως ελαφροί ζωνικοί εμπλουτισμοί σε κόκκους σφαλερίτη από το πεδίο υδροθερμικών εκβολών Vai Lili, νότια λεκάνη Lau, νοτιοδυτικός Ειρηνικός.

Το ίνδιο απαντάται σε διαφορετικούς τύπους μεταλλευτικών κοιτασμάτων όλων των ηλικιών. Κατά φθίνουσα σειρά σπουδαιότητας, τα πλούσια σε ίνδιο κοιτάσματα αντιπροσωπεύονται από ηφαιστειακά και ιζηματογενή κοιτάσματα εξαλλοιωμένων μαζικών θειούχων, επιθερμικά

κοιτάσματα, πολυμεταλλικά κοιτάσματα φλεβών βασικών μετάλλων, γρανιτικά κοιτάσματα κασσίτερου-βασικών μετάλλων, κοιτάσματα skarn (τα κοιτάσματα αυτά, σχηματίζονται όταν μάγμα ανερχόμενο προς τα ανώτερα στρώματα του φλοιού, συναντήσει σχηματισμούς με μεγάλη περιεκτικότητα σε SiO<sub>2</sub>, δημιουργώντας ένα νέο μείγμα πλούσιο σε SiO<sub>2</sub>) και κοιτάσματα πορφυρικού χαλκού. Τα κοιτάσματα αυτά συνδέονται συνήθως με ενεργά περιθώρια ωκεάνιων ή ηπειρωτικών πλακών και ορογενετικές ζώνες με απότομες γεωθερμικές κλίσεις λόγω αυξημένης μαγματικής δραστηριότητας.

Τα κοιτάσματα ινδίου συνδέονται συνηθέστερα με υδροθερμικά συστήματα σχηματισμού μεταλλευμάτων βασικών μετάλλων που είναι εμπλουτισμένα σε ψευδαργύρο, χαλκό, μόλυβδο και κασσίτερο, συνοδευόμενα από ιχνοστοιχεία μετάλλων όπως βισμούθιο, κάδμιο και άργυρο. Το ίνδιο βρίσκεται συνήθως κυρίως σε θειούχα μεταλλεύματα ψευδαργύρου και χαλκού και σε μεταλλεύματα κασσίτερου. Τυπικά μεταλλεύματα πλούσια σε ίνδιο έχουν συγκεντρώσεις ψευδαργύρου μεταξύ 10 και 22 % κ.β. και συγκεντρώσεις χαλκού σε ποσοστό 2 % κ.β. ή και περισσότερο. Λόγω της σχετικά χαμηλής συγκέντρωσής του σε αυτά τα μεταλλεύματα, το ίνδιο μπορεί να εξαχθεί οικονομικά μόνο ως παραπροϊόν υπό κατάλληλες τεχνικές συνθήκες και συνθήκες επεξεργασίας.

Τα σημαντικότερα κοιτάσματα είναι τα ηφαιστειακά και ιζηματογενή κοιτάσματα θειούχων βασικών μετάλλων, τα οποία χαρακτηρίζονται γενικά από υψηλή αφθονία μετάλλων και μεγάλες ποσότητες. Η συγκέντρωση του ινδίου σε αυτά τα μεταλλεύματα κυμαίνεται μεταξύ 20-200ppm. Ακόμη και σε ένα συμπίκνωμα ψευδαργύρου, που αντιπροσωπεύει την πιο κοινή εμπορική πηγή, η συγκέντρωση ινδίου είναι σχετικά χαμηλή, 70-200ppm, αλλά μπορεί να φθάσει τα 500-800ppm. Το ίνδιο έχει μια προτίμηση σε μεταλλευτικά κοιτάσματα που έχουν κάποια μαγνητική συνεισφορά ή υποδεικνύουν μαγνητικά συστατικά, όπως αποδεικνύεται από την εμφάνιση πολλών επιθηρμικών και skarn-τύπων κοιτασμάτων. Συνήθως σχετίζονται με πολλαπλές και εξαιρετικά μεταβλητές πηγές μάγματος και με συνδυασμένες διαδικασίες καταβύθισης μαγματικών στοιχείων.

### Κοιτάσματα σουλφιδίων βασικών μετάλλων

Τα κοιτάσματα σουλφιδίων βασικών μετάλλων προέρχονται από ωκεάνιες ζώνες εξάπλωσης και ρηγμάτων, τόσο στους άξονες εξάπλωσης του μέσου ωκεανού όσο και στις ζώνες ρηγμάτων του οπισθογενούς τόξου. Αποτελούν σημαντικές πηγές βασικών και πολύτιμων μετάλλων και είναι οι σημαντικότερες πηγές παραγωγής ινδίου στον κόσμο. Πολυμεταλλικά παραδείγματα της ομάδας ψευδαργύρου-μολύβδου-χαλκού βρίσκονται στον Καναδά στο Kidd Creek του Οντάριο και σε κοιτάσματα της Ιβηρικής ζώνης πυρίτη στην Ισπανία και την Πορτογαλία. Τα κοιτάσματα της ομάδας ψευδαργύρου- μολύβδου-χαλκού κυριαρχούνται χαρακτηριστικά από πετρώματα-ξενιστές, ενώ τα μαφικά ηφαιστειακά πετρώματα είναι σπάνια ή απουσιάζουν. Μια ευδιάκριτη μεταλλογενετική ζώνη των μεταλλευτικών σωμάτων είναι χαρακτηριστική για την πλειονότητα των κοιτασμάτων μεταλλευμάτων. Τα κοιτάσματα περιέχουν σημαντικές και ανακτήσιμες ποσότητες ιχνοστοιχείων όπως άργυρος, κασσίτερος, βισμούθιο, κοβάλτιο και ίνδιο- το βισμούθιο, το κοβάλτιο και το ίνδιο υποδηλώνουν συνήθως αυξημένες θερμοκρασίες σχηματισμού.

Τα κοιτάσματα θειούχων βασικών μετάλλων που φιλοξενούνται στα ιζήματα είναι σύμμεικτες, μαζικές συσσωρεύσεις θειούχων και θειικών ορυκτών που σχηματίστηκαν από διεργασίες στον πυθμένα ή αμέσως κάτω από αυτόν. Τα ηφαιστειακά πετρώματα μπορεί να αποτελούν δευτερεύον συστατικό των συναφών στρωμάτων, ενώ τοπικά μπορεί να υπάρχουν συνιζηματογενείς διεισδύσεις (μαρμαρυγίες, διχοτόμοι). Ο ψευδάργυρος, ο μόλυβδος και ο άργυρος είναι τα κύρια μέταλλα που ανακτώνται από αυτά τα κοιτάσματα, αλλά ο κασσίτερος και το ίνδιο μπορεί να είναι σημαντικά υποπροϊόντα.

Τα ενεργά υδροθερμικά συστήματα του πυθμένα μπορεί να έχουν αυξημένες συγκεντρώσεις ινδίου. Οι υψηλότερες γνωστές τιμές σε ενεργά υδροθερμικά συστήματα ανιχνεύθηκαν σε σουλφίδια πλούσια σε χαλκό που συνδέονται με κέντρα εξάπλωσης του οπισθογενούς τόξου που διαδίδονται σε φλοιό νησιωτικού τόξου. Τα κέντρα εξάπλωσης του οπισθογενούς τόξου χαρακτηρίζονται από διμορφική ηφαιστειότητα και τα διάφορα πεδία εκρών συνδέονται στενά με πολύ εξελιγμένα μάγματα, που προέρχονται από μερική τήξη παλαιότερου ωκεάνιου φλοιού. Η αφομοίωση του παλαιότερου φλοιού μπορεί να υπήρξε σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη υψηλά κλασματοποιημένων μαγματικών τόξων, εμπλουτισμένων κυρίως σε ασύμβατα στοιχεία όπως το ίνδιο.

## 6.2. Μέθοδοι εξαγωγής, επεξεργασίας και εμπλουτισμού

Οι μέθοδοι εξόρυξης που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του ινδίου σχετίζονται με την ανάκτηση άλλων βασικών μετάλλων σε κοιτάσματα μεικτών θειούχων. Η αποκλειστική εξόρυξη του ινδίου είναι ασύμφορη και συνεπώς το πρωτογενές ίνδιο λαμβάνεται αποκλειστικά ως υποπροϊόν κατά την τήξη πολυμεταλλικών μεταλλευμάτων που περιέχουν ψευδάργυρο, χαλκό και κασσίτερο. Ο εμπλουτισμός με ψευδάργυρο και χαλκό καθιστά τα χαλκούχα μεταλλεύματα ψευδαργύρου τα πλέον ευνοϊκά μεταλλεύματα για την ανάκτηση ινδίου. Η κατάλληλη μέθοδος εξόρυξης εξαρτάται συνήθως από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ορυκτών, τα αποθέματα και την περιεκτικότητα, τη γεωμετρία και το βάθος του μεταλλεύματος. Η συνηθέστερη τεχνική εξόρυξης για τα μεικτά κοιτάσματα θειούχων βασικών μετάλλων είναι συνήθως ένας συνδυασμός επιφανειακής και υπόγειας εξόρυξης, αν και όλα τα οικονομικά σημαντικά μεταλλεύματα που περιέχουν ίνδιο εξορύσσονται με υπόγειες μεθόδους.

Η εξόρυξη των πλούσιων σε ψευδάργυρο κοιτασμάτων μεικτών σουλφιδίων αρχίζει συνήθως ως ανοικτή εξόρυξη, εάν το κοίτασμα βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια. Τα υπερκείμενα, τα τροποποιημένα ηφαιστειακά ή ιζηματογενή πετρώματα και τα απόβλητα μπορεί να εναποτίθενται και να αποθηκεύονται για μεταγενέστερη πλήρωση. Τα κοιτάσματα μεικτών σουλφιδίων έχουν συνήθως διάμετρο μερικών εκατοντάδων μέτρων και περιλαμβάνουν σαφώς καθορισμένα μεταλλευτικά σώματα. Η υπαίθρια εξόρυξη μπορεί να φθάσει σε σημαντικά βάθη, αλλά σπάνια ξεπερνά τα μερικά εκατοντάδες μέτρα πριν από την υπόγεια εξόρυξη.

Εάν η επιφανειακή εξόρυξη οδηγεί σε υψηλό κόστος παραγωγής και οι γεωλογικές συνθήκες είναι πολύπλοκες, τότε τα βαθύτερα τμήματα ενός κοιτάσματος μπορεί να εξορύσσονται υπόγεια. Τα πλούσια σε χαλκό κοιτάσματα μαζικών σουλφιδίων, τα οποία αποτελούν τους κύριους ξενιστές του ινδίου, και τα πλούσια σε χαλκό μεταλλεύματα απαντούν συχνά στα βαθύτερα τμήματα ενός μεμονωμένου κοιτάσματος. Η εξόρυξη εφαρμόζεται όταν το κοίτασμα βρίσκεται εντός σταθερών πετρωμάτων, περιλαμβάνει ικανά μεταλλεύματα και μητρικά πετρώματα και έχει κανονικά όρια μεταλλεύματος. Οι τεχνικές διακοπής κυριαρχούν στην εξόρυξη των περισσότερων υπόγειων κοιτασμάτων μαζικών θειούχων.

Το ίδιο παράγεται σχεδόν αποκλειστικά ως παραπροϊόν της εξόρυξης και επεξεργασίας ψευδαργύρου. Εξάγεται από τα υπολείμματα της συμπύκνωσης και της τήξης των μεταλλευμάτων ψευδαργύρου και από την ανακύκλωση των σκονών και των αερίων που παράγονται κατά την τήξη του ψευδαργύρου. Ένα μικρό ποσοστό, λιγότερο από 5% του συνόλου, εξάγεται από τα υπολείμματα της επεξεργασίας χαλκού και κασσίτερου. Τα σουλφίδια των βασικών μετάλλων διαχωρίζονται γενικά με τεχνικές επίπλευσης, με το ίδιο να είναι συνήθως εμπλουτισμένο σε συμπυκνώματα ψευδαργύρου, που περιλαμβάνουν κυρίως σφαλερίτη, με αυξημένες συγκεντρώσεις χαλκού σε ποσοστό 2 % κ.β. ή περισσότερο.

Στο παρελθόν, όταν η κατανάλωση ινδίου ήταν μικρή, η ζήτηση ικανοποιούνταν με την επεξεργασία πολύ μεγάλων ποσοτήτων χαμηλής ποιότητας μεταλλεύματος ψευδαργύρου που περιείχε ινδίο. Οι χαμηλές τιμές των βασικών εμπορευμάτων και τα προβλήματα διαχωρισμού από στοιχεία όπως ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο κασσίτερος, το αντιμόνιο και το αρσενικό κατέστησαν την ανάκτηση του ινδίου και άλλων ιχνοστοιχείων δαπανηρή, αναποτελεσματική και γενικά ασύμφορη. Ωστόσο, η πρόοδος στην επεξεργασία των ιλύων από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 βελτίωσε τον εμπλουτισμό και μείωσε το κόστος.

Τα ακάθαρτα συμπυκνώματα ψευδαργύρου και χαλκού, που περιέχουν πάνω από 80-90% σφαλερίτη και χαλκοπυρίτη αντίστοιχα, παράγονται συνήθως στο χώρο του ορυχείου ή κοντά σε αυτόν με τεχνικές επίπλευσης. Τα συμπυκνώματα ψευδαργύρου καβουρδίζονται και το παραγόμενο διοξείδιο του θείου χρησιμοποιείται για την παρασκευή θειικού οξέος. Το καθαρισμένο διάλυμα πλούσιο σε ψευδάργυρο αποστέλλεται στη μονάδα ηλεκτρόλυσης, όπου ο ψευδάργυρος επικαλύπτεται σε καθόδους αλουμινίου. Η διεργασία σχηματισμού θειικού σιδήρου για τον καθαρισμό ψευδαργύρου και τη σταθεροποίηση σιδήρου απομακρύνει έως και το 60 % του ινδίου και του αργιλίου από το διάλυμα. Τα υπολείμματα από τη διαδικασία αυτή μπορεί να περιέχουν έως και 600 ppm In. Ως συνέπεια της ηλεκτροχημικής σειράς, τα αδιάλυτα συστατικά, όπως το ινδίο, καθιζάνουν ως στερεά στον πυθμένα των κυψελών ηλεκτρόλυσης σχηματίζοντας ανοδική λάσπη. Σε ορισμένα μεταλλεύματα αυτή η πλούσια σε μέταλλα λάσπη μπορεί να αποτελέσει σημαντική δυναμική πηγή ινδίου και ορισμένων άλλων ιχνοστοιχείων όπως ο άργυρος, το κάδμιο και το σελήνιο. Όπου έχει εγκατασταθεί η κατάλληλη τεχνολογία, τα καθαρά μέταλλα απομονώνονται από την ανοδική λάσπη με περαιτέρω επεξεργασία που περιλαμβάνει συνδυασμό μεθόδων διάλυσης και καταβύθισης.

Το ίδιο μπορεί να διαλυθεί από την ανοδική λάσπη ή τα επεξεργασμένα ενδιάμεσα προϊόντα από την ανάκτηση αργύρου και καδμίου με υδροχλωρικό οξύ ή θειικό οξύ. Τα υπολείμματα ανοδικής λάσπης μπορούν επίσης να υποβληθούν σε επεξεργασία σε χυτήρια μόλυβδου. Η διαδικασία

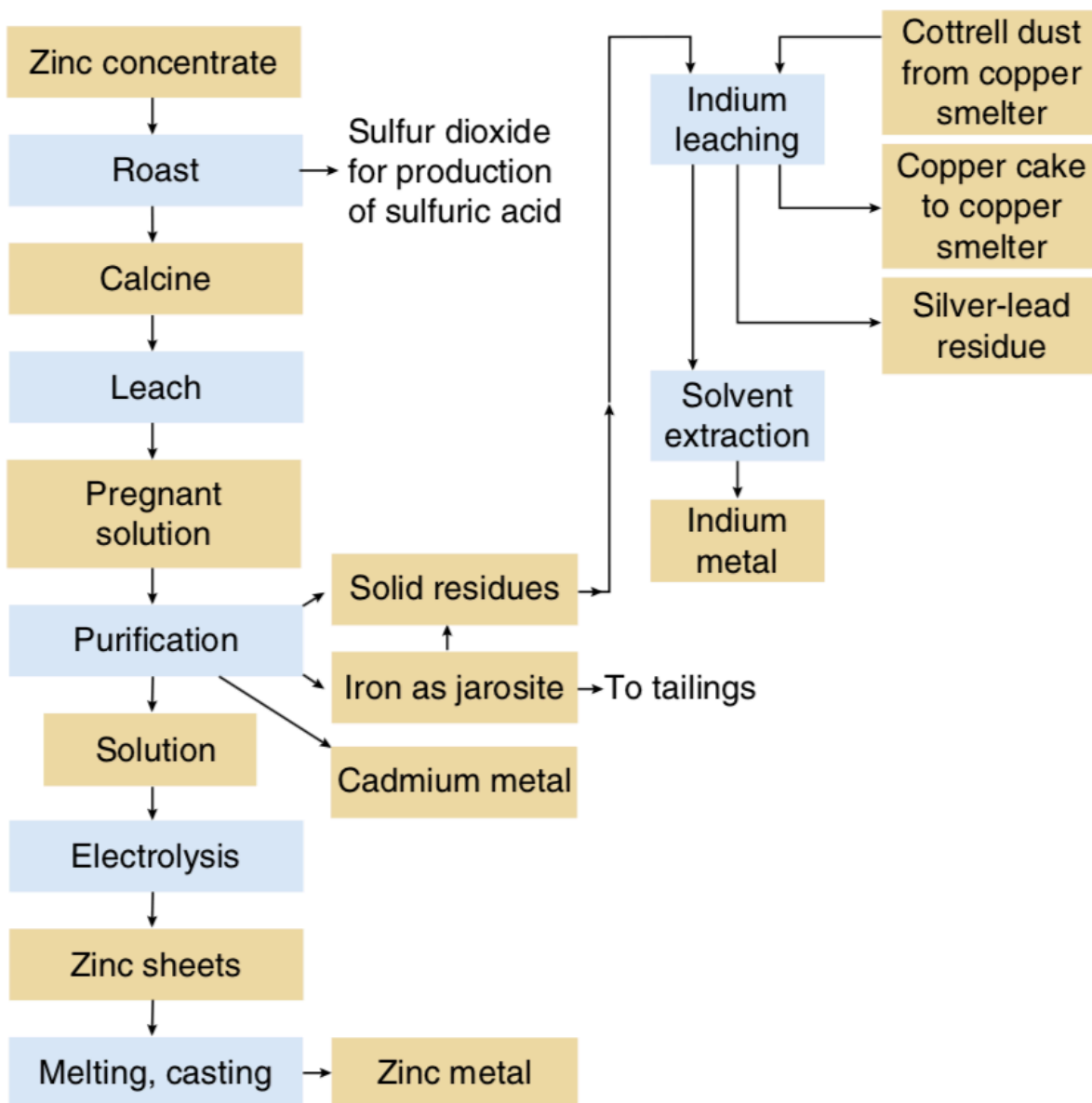
τήξης, εμπλουτίζει περίπου το 50 % του ινδίου με το κλάσμα μολύβδου. Το υπόλοιπο ίνδιο παραμένει με τα απόβλητα της σκωρίας υφικαμίνου και μπορεί να ανακτηθεί με φρύξη σε περιστροφικό κλίβανο και επιλεκτική εξάτμιση. Το ίνδιο διαχωρίζεται από το κλάσμα μολύβδου κατά τη σκωρίαση και με ηλεκτροθερμικές διεργασίες που παράγουν επίσης μόλυβδο, αντιμόνιο και κασσίτερο. Οι ηλεκτρολυτικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ιλύος που περιέχει 20-25% In. Η ιλύς υφίσταται χημική επεξεργασία για να παραχθεί ακατέργαστο μέταλλο ινδίου καθαρότητας 99% περίπου.

Η μεταλλουργία ψευδαργύρου Kidd Creek στο Timmins, Οντάριο, αντιπροσώπευε έναν σημαντικό παραγωγό ινδίου και ανέπτυξε μια επιτυχημένη διαδικασία για την ανάκτηση του ινδίου από τα μεταλλεύματα ψευδαργύρου του κοιτάσματος Kidd Creek VHMS. Η μέση συγκέντρωση ινδίου στο συμπύκνωμα ήταν περίπου 270 ppm. Η διαδικασία οξειδωσης ακολουθείται από μια διαδικασία εκχύλισης δύο σταδίων. Το πρώτο στάδιο απομακρύνει επιλεκτικά τον σίδηρο από το διάλυμα. Το δεύτερο στάδιο εισάγει στο διάλυμα πλούσια σε σκόνη χαλκού από την μεταλλουργία και ο άργυρος και ο μόλυβδος εμπλουτίζονται στο υπόλειμμα. Το διάλυμα που περιέχει ίνδιο επεξεργάζεται στη συνέχεια με εκχύλιση με διαλύτη και πολύπλοκες διεργασίες καταβύθισης-διάλυσης οδηγούν στην ανάκτηση καθαρού ινδίου.

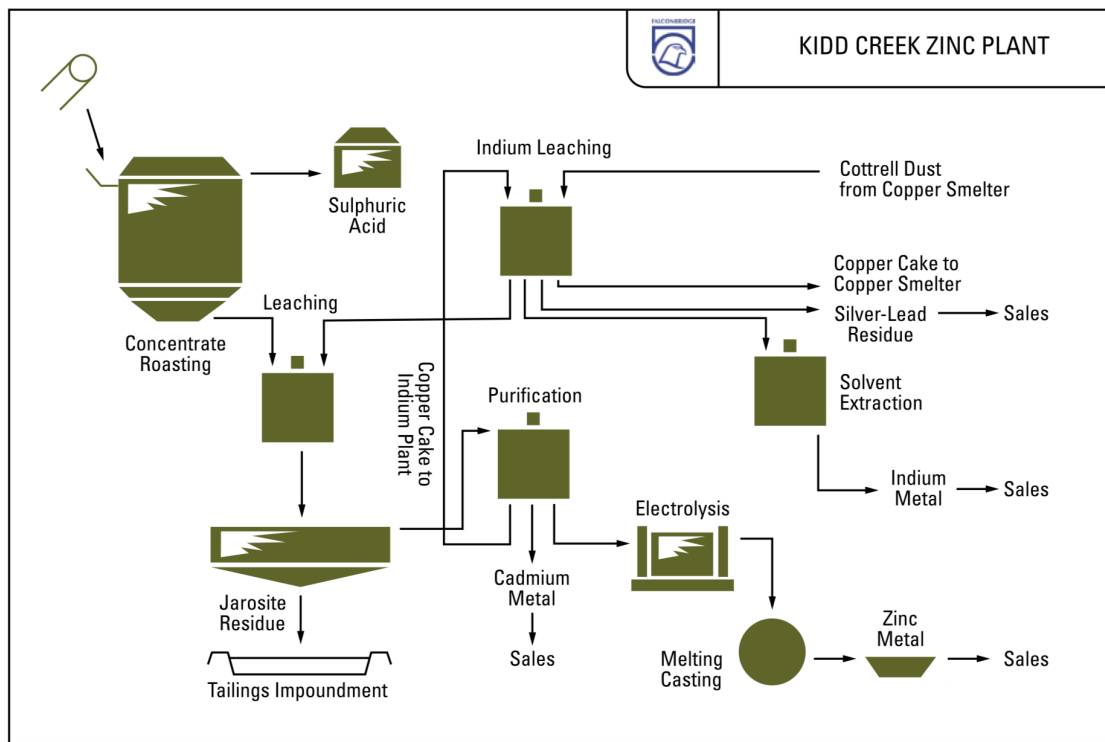
Στις εγκαταστάσεις της Umicore στο Hoboken του Βελγίου, η "Διαδικασία Harris" χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του ινδίου κατά τη παραγωγή μολύβδου. Η διεργασία περιλαμβάνει τη χειραγώγηση της σύνθεσης της σκωρίας με επιλεκτική οξειδωση χρησιμοποιώντας υδροξειδία και νιτρώδη αλκαλίων μετάλλων, και την απομάκρυνση των ακάθαρτων ενώσεων και στοιχείων που βρίσκονται σε ράβδους μολύβδου κατά την πυρομεταλλουργική επεξεργασία. Το ίνδιο παραγόταν παλαιότερα στο χυτήριο La Oroya στο Περού από συμπυκνώματα αργύρου, μολύβδου και ψευδαργύρου. Η διεργασία χρησιμοποιούσε την αναγωγή του ράβδου μολύβδου σε οπτάνθρακα και την προσθήκη χλωριούχων μολύβδου και ψευδαργύρου για την ανάκτηση του χλωριούχου ινδίου ( $\text{InCl}_3$ ) στη σκωρία. Το διάλυμα καθαρίστηκε με την απομάκρυνση του κασσίτερου και του μολύβδου και το ίνδιο ανακτήθηκε με την προσθήκη σκόνης ψευδαργύρου.

Το ίνδιο γενικά συμπυκνώνεται και ανακτάται με καθαρότητα μεγαλύτερη από 99%. Αυτό το πρότυπο ινδίου χαμηλής ποιότητας εξευγενίζεται περαιτέρω σε 4N (99,99%) και σε υψηλότερα επίπεδα καθαρότητας. Η τήξη ζώνης και ο ηλεκτρολυτικός εξευγενισμός χρησιμοποιούνται για τη λήψη υπερκαθαρού ινδίου και για την παραγωγή μονοκρυστάλλων.

## Indium



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής δευτερογενούς παραγωγής ινδίου από συμπυκνώματα Zn (critical metals handbook)



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ροής Ινδίου από μεταλλεύματα Zn στο κοιτάσμα Kidd Creek (Indium report)

### Παραγωγή ινδίου από μεταλλεύματα χαλκού

Η παραγωγή ινδίου από συμπυκνώματα χαλκού είναι ελάχιστα ανεπτυγμένη, παρά το γεγονός ότι υπάρχουν σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις ινδίου στα μεταλλεύματα χαλκού από πολλά κοιτάσματα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο πολύ λεπτό μέγεθος των κόκκων αυτών των μεταλλευμάτων, το οποίο καθιστά την εξόρυξη του ινδίου ασύμφορη. Η Urals Mining and Metals Co, ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός χαλκού της Ρωσίας, αναφέρθηκε ότι ξεκίνησε την ανάκτηση ινδίου από τα κατάλοιπα του κυκλώματος παραγωγής χαλκού το 2006. Το έργο στόχευε στην παραγωγή πέντε τόνων ινδίου ετησίως, αλλά δεν υπάρχουν περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία.

### 6.3. Προδιαγραφές και χρήσεις

Το ίνδιο κυκλοφορεί στο εμπόριο ως μέταλλο ινδίου σε μεγάλη ποικιλία μορφών, όπως σφαιρίδια, σκόνη, πλάκες, σύρματα και φύλλα. Η συνήθης ποιότητα είναι 99,99% (αποκαλούμενη "4 N"), αλλά οι υψηλότερες καθαρότητες έως 5 N και 7 N (99,99999%) είναι επίσης συνήθεις προδιαγραφές. Το ίνδιο είναι πολύτιμο σε ένα ευρύ φάσμα προϊόντων και εφαρμογών λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του:

- χαμηλό σημείο τήξης,



- εργασιμότητα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μέχρι το απόλυτο μηδέν (-273°C),
- καλή πρόσφυση στο γυαλί,
- ευλυγισία, μαλακότερη από τον μόλυβδο,
- στενή πρόσφυση σε άλλα μέταλλα,
- διάλυση σε οξέα,
- αμφοτερικός χαρακτήρας,
- καμία αντίδραση με το νερό, το βόριο, το πυρίτιο ή τον άνθρακα
- αντίδραση με το οξυγόνο μόνο σε υψηλότερες θερμοκρασίες,
- οξειδωση με αλογόνα ή οξαλικό οξύ, για να προκύψουν ενώσεις ινδίου(III).

Το ίνδιο χρησιμοποιείται για πολλούς σκοπούς σε διάφορες εφαρμογές. Ωστόσο, οι τελικές χρήσεις του καθαρού μετάλλου ινδίου είναι περιορισμένες, με την πλειονότητα να χρησιμοποιείται σε κάποια μορφή χημικής ένωσης. Οι κυριότερες χρήσεις είναι σε υψηλής καθαρότητας ενώσεις κραμάτων χαμηλής θερμοκρασίας, συγκόλληση και λεπτά υμένια. Άλλες χρήσεις είναι στην κατασκευή μπαταριών, ηλεκτρικών εξαρτημάτων, ημιαγωγών και στην έρευνα.

Το μέγεθος της αγοράς ινδίου αυξήθηκε ραγδαία τα τελευταία 20 χρόνια, με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη να παρατηρείται στις επιστρώσεις λεπτών υμενίων, έτσι ώστε η εφαρμογή αυτή να αντιπροσωπεύει το 56% της συνολικής κατανάλωσης το 2010. Η εξαιρετική αύξηση της ζήτησης προήλθε από την Ιαπωνία, η οποία αντιπροσώπευε περίπου το 60% της κατανάλωσης ινδίου το 2011, ακολουθούμενη από τη Δημοκρατία της Κορέας, την Κίνα και την Ταϊβάν. Περισσότερα από τα δύο τρίτα της ζήτησης ινδίου από αυτούς τους τέσσερις μεγαλύτερους καταναλωτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές για οξειδίο του ινδίου-κασσίτερου (ITO) και ημιαγωγούς.

### Οξειδίο ινδίου-κασσιτέρου (ITO)

Το οξειδίο του Ινδίου είναι ένα διαφανές αγώγιμο οξειδίο που συνδυάζει τις τρεις ιδιότητες της διαφάνειας, της ανάκλασης της θερμότητας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Τα διαφανή υλικά που είναι επίσης ηλεκτρικά αγώγιμα είναι αρκετά σπάνια, επειδή οι μηχανισμοί της αγωγής και της απορρόφησης της φωτεινής ενέργειας καθορίζονται και οι δύο από την πυκνότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων ενός υλικού. Η πρόσμιξη οξειδίου του ινδίου με περίπου 10 % οξειδίο κασσίτερου για να σχηματιστεί οξειδίο ινδίου-κασσίτερου αυξάνει τόσο την ηλεκτρική αγωγιμότητα όσο και τη θερμική ανακλαστικότητα χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τη διαφάνεια. Ένα υμένιο ITO πάχους 5μm απορροφά λιγότερο από το 20 % του ορατού φωτός που διέρχεται από αυτό. Αυτός ο ασυνήθιστος συνδυασμός ιδιοτήτων καθιστά το ITO χρήσιμο σε πολλές εφαρμογές. Τα διαφανή θερμοανακλαστικά φιλμ ITO χρησιμοποιούνται σε γυάλινες επιστρώσεις, ηλιακούς συλλέκτες και φωτιστικά σώματα δρόμου. Οι μεμβράνες ITO χρησιμοποιούνται επίσης για ηλεκτροφορητικές οθόνες, οθόνες ηλεκτροφωταύγειας, οθόνες πλάσματος, ηλεκτροχρωμικές οθόνες, οθόνες εκπομπής πεδίου και ως επιστρώσεις σε αρχιτεκτονικά τζάμια, ηλιακούς συλλέκτες, τζάμια παρμπρίζ και καθοδικούς σωλήνες. Το ITO χρησιμοποιείται επίσης για τη βελτίωση της απόδοσης των λαμπτήρων ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης.

## Κράματα και συγκολλήσεις

Το ίνδιο σχηματίζει κράματα χαμηλού σημείου τήξης με διάφορα μέταλλα, όπως το βισμούθιο, ο κασσίτερος, ο μόλυβδος και το κάδμιο. Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται ως συγκολλητές Ημιαγωγοί.

Η ζήτηση πολύ υψηλής καθαρότητας ινδίου αυξάνεται ραγδαία στη φωτοβολταϊκή βιομηχανία και στην παραγωγή σύνθετων ημιαγωγών I-III-VI (όπως  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuInGaSe}_2$  (CIGS),  $\text{CuInS}_2$  (CIS),  $\text{CuInGaS}_2$ ) για ηλιακές κυψέλες. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης με μείωση του κόστους παραγωγής λεπτών υμενίων με βάση το ίνδιο για τη μαζική παραγωγή ηλιακών κυψελών.

Το ίνδιο χρησιμοποιείται επίσης σε σύνθετους ημιαγωγούς III-V ( $\text{InP}$ ,  $\text{InSb}$ ,  $\text{InAs}$ ,  $\text{InN}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ) και σε σύνθετους ημιαγωγούς III-VI ( $\text{InS}$ ,  $\text{InSe}$ ,  $\text{InTe}$ ) για την παραγωγή διόδων εκπομπής φωτός. (LED) και διόδων λέιζερ, φωτοανιχνευτών, τηλεπικοινωνιών οπτικών ινών και οπτοηλεκτρονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Ως υπόστρωμα χρησιμοποιούνται ενώσεις αντιμονιδίου, αρσενιδίου ή φωσφιδίου του ινδίου. Οι λυχνίες LED με βάση το ίνδιο χρησιμοποιούνται για την οπτική μετάδοση δεδομένων σε οθόνες. Οι διόδοι λέιζερ με βάση το ίνδιο χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες οπτικών ινών.

## Άλλα

Το μεταλλικό ίνδιο και τα κράματα ινδίου χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές επιφανειακής επικάλυψης. Η σημαντικότερη από αυτές είναι η επιμετάλλωση ρουλεμάν κινητήρων αυτοκινήτων και αεροσκαφών, όπως προαναφέρθηκε. Άλλες χρήσεις περιλαμβάνουν διακοσμητικές επιμεταλλώσεις, αναστολείς διάβρωσης και επιμεταλλώσεις σε αλουμίνιο. Το ίνδιο επιχαλκώνεται εύκολα από όξινα ή αλκαλικά διαλύματα σε μια μεγάλη ποικιλία μεταλλικών υποστρωμάτων. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα διαλύματα επιμετάλλωσης είναι το θειικό ίνδιο, το κυανιούχο ίνδιο, το φθοριοβορικό ίνδιο και το θειικό ίνδιο. Το θειικό ίνδιο είναι ένα εύκολα ελεγχόμενο, χαμηλής συντήρησης μέσο επιμετάλλωσης. Το κυανιούχο ίνδιο δίνει ομοιόμορφα λαμπερά ιζήματα και παρουσιάζει εξαιρετική ισχύ ρίψης (μέτρο της αποτελεσματικότητας της ηλεκτροαπόθεσης). Οι επιμεταλλώσεις φθοριοβορικού ινδίου χρησιμοποιούνται συνήθως για την εφαρμογή βαριών (25-75 $\mu\text{m}$ ), πυκνών εναποθέσεων ινδίου σε αντικείμενα όπως δακτύλιοι στεγανοποίησης.

Το ίνδιο χρησιμοποιείται επίσης για λαμπτήρες χωρίς ηλεκτρόδια, αντικαταστάσεις κραμάτων υδραργύρου και σε αλκαλικές μπαταρίες στις οποίες το ίνδιο εμποδίζει τη διάβρωση του ψευδαργύρου και τη δημιουργία αερίου υδρογόνου μέσα σε σφραγισμένα περιβλήματα.

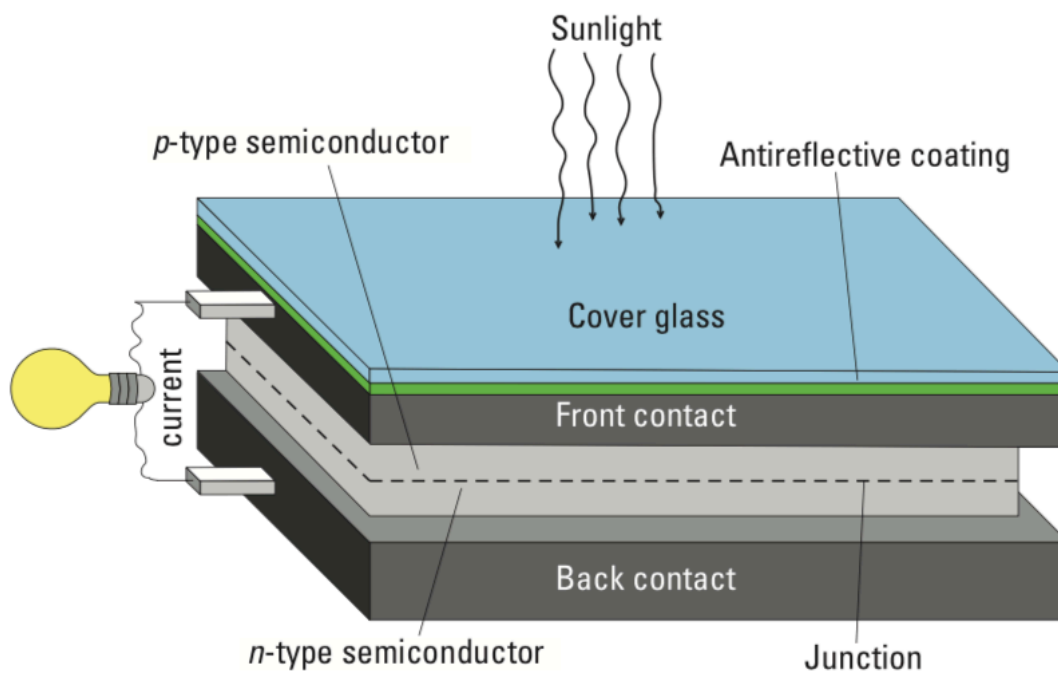
Το σπινθηρογράφημα λευκοκυττάρων ινδίου, με τη χρήση του ραδιενεργού ισότοπου  $^{111}\text{In}$ , έχει ποικίλες ιατρικές εφαρμογές. Αυτές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη φαρμάκων σε πρώιμη φάση και την παρακολούθηση της δραστηριότητας των λευκών αιμοσφαιρίων σε περιοχές μόλυνσης.

Παρόλο που η συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι σχετικά μικρό σε σύγκριση με αυτό που

προέρχεται από άλλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, ο ρυθμός ανάπτυξης του τομέα είναι σημαντικός. Η συνολική αξία της ενέργειας των φωτοβολταϊκών κυττάρων που παράγονται παγκοσμίως αυξήθηκε σε σχεδόν 7 GW το 2008 από 45 MW το 1990, ένας σύνθετος ετήσιος ρυθμός αύξησης περίπου 30%. Μια παραγωγική ικανότητα 1 GW ηλεκτρικής ενέργειας [ή 8.760 γιγαβατώρες<sup>1</sup> (GWh)] ισοδυναμεί με τις ετήσιες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια για περίπου 800.000 μέσα νοικοκυριά στις Ηνωμένες Πολιτείες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση της παραγωγικής ικανότητας, όπως μετράται σε MW, ήταν πιθανώς τόσο το αποτέλεσμα της βελτιωμένης απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων όσο και της αύξησης στη ζήτηση για κυψέλες. Οι Ηνωμένες Πολιτείες συνέχισαν να είναι το κορυφαίο έθνος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Το αμερικανικό Υπουργείο Ενέργειας υπολόγισε ότι λιγότερο από το 0,02% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθη στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2008 από όλες τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών, αιολικών, ξυλοκαυστήρων, βιομάζας και γεωθερμικών πηγών, προερχόταν από φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Ο κύριος λόγος για το χαμηλό ποσοστό ήταν το υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σύγκριση με αυτό άλλων καθιερωμένων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια, η οποία είναι μια άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται συχνά ως σημείο σύγκρισης με την ηλιακή παραγωγή, παρήγαγε 50 φορές περισσότερο από την ποσότητα που παρήγαγαν οι ηλιακές πηγές. Για λόγους προοπτικής, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι περίπου 7 έως 17% αποδοτικά στη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα (η οποία παράγει περίπου το 70% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ) είναι περίπου 28% αποδοτική. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα με βάση το πυρίτιο κυριαρχούν σήμερα στην αγορά και είναι ο τύπος που συναντάται συχνότερα σε ηλιακές εγκαταστάσεις και σε στέγες. Αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 90 % των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιούνται και μπορούν να μετατρέψουν περίπου το 15% του απορροφούμενου φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια σε πραγματική εξωτερική χρήση. Η έρευνα των τελευταίων ετών έχει οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης και μείωση του κόστους παραγωγής σε σημείο που τα φωτοβολταϊκά κύτταρα δεύτερης γενιάς, γνωστά ως κύτταρα λεπτής μεμβράνης, κάνουν σημαντικά βήματα για τη διεύρυνση στην παγκόσμια εμπορική αγορά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αποδοτικότητα αυτών των κυττάρων υπό εργαστηριακές συνθήκες κυμαίνεται από περίπου 20 % έως πάνω από 40 %, ανάλογα με τη σύνθεση και το σχεδιασμό. Ορισμένα από τα ορυκτά που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πιο προηγμένα φωτοβολταϊκά κύτταρα λεπτής μεμβράνης ενσωματώνουν ορισμένα λιγότερο κοινά ορυκτά υλικά που εκτιμώνται ιδιαίτερα για τις ειδικές ιδιότητες που προσδίδουν όταν συνδυάζονται με άλλα ορυκτά. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν ανθεκτικότητα και υψηλότερα επίπεδα απορρόφησης του φωτός και μετατροπής του σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα ορυκτά υλικά περιλαμβάνουν το κάδμιο, το γάλλιο, το γερμάνιο, το ίνδιο, το σεληνίο και το τελλούριο. Ορισμένα παραδείγματα χρήσης αυτών των υψηλής αξίας στοιχείων σε φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμενίου περιλαμβάνουν κράμα χαλκού-ινδίου- γαλλίου-σεληνίου (CIGS), κάδμιο-τελλούριο (CdTe) και γερμάνιο που χρησιμοποιούνται μόνο τους ή σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία στους ημιαγωγούς τύπου p (θετικού τύπου) και n (αρνητικού τύπου) πυριτίου σε φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμενίου.

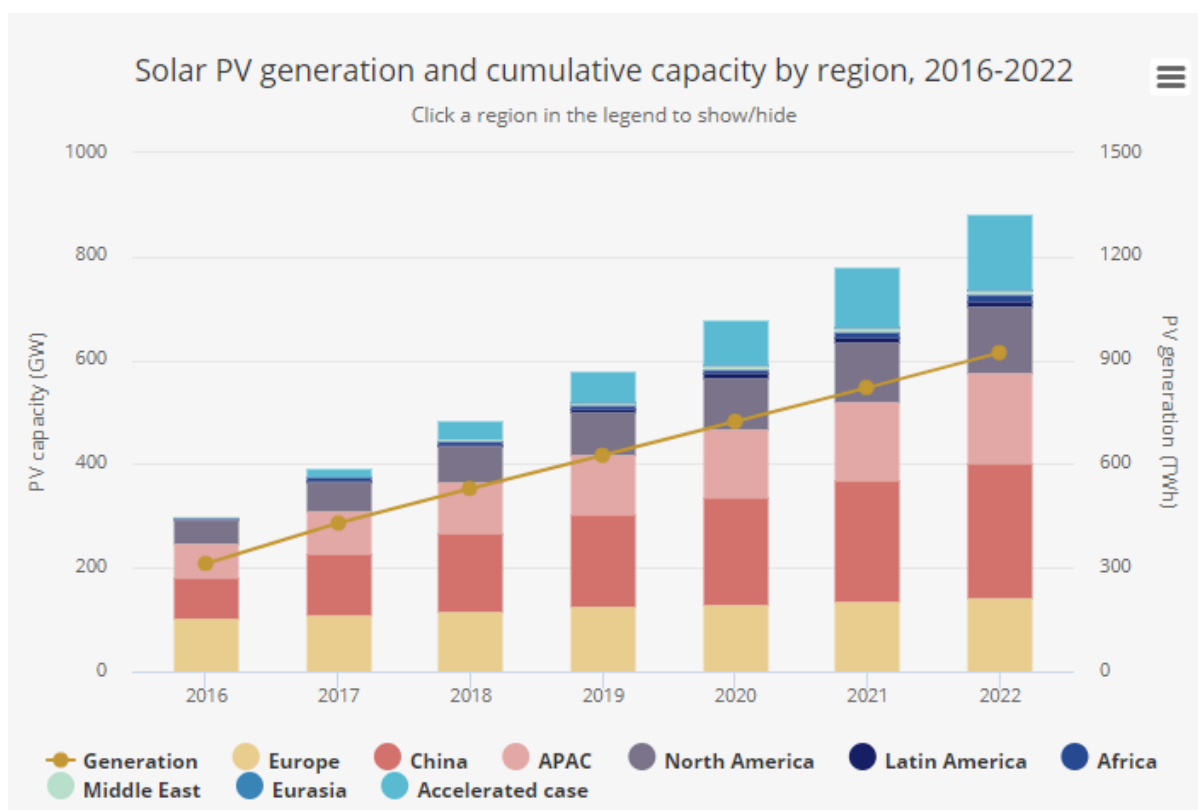


Εικόνα 6.1: Παρουσίαση φωτοβολταϊκής εγκατάστασης



Σχήμα 6.3: Γενικευμένο διάγραμμα που δείχνει τη δομή ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (USGS)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι εφαρμογές λεπτών υμενίων που περιέχουν ίνδιο στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών πρόκειται να ωθήσουν περαιτέρω τη ζήτηση. Παραδοσιακά, οι μονάδες ηλιακών κυψελών χρησιμοποιούν τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου. Εκτός από αυτό, νέες τεχνολογίες εισέρχονται στην αγορά, επιτρέποντας τη μείωση του κόστους στη διαδικασία παραγωγής. Μια από τις νέες τεχνολογίες είναι οι μονάδες λεπτών υμενίων CIGS (χαλκού ίνδιου γαλλίου σεληνίου). Η εγκατεστημένη παγκόσμια ηλιακή ισχύς εκτιμάται ότι θα αυξάνεται με ρυθμό 30-35% κάθε χρόνο, γεγονός που θα οδηγήσει σε ετήσια κατανάλωση 120-130 τόνων πρωτογενούς ίνδιου το 2010. Είναι σαφώς ορατή η αυξανόμενη χρήση κυψελών λεπτού υμενίου στη φωτοβολταϊκή βιομηχανία. Πρέπει να επισημανθεί ότι το ίνδιο δεν είναι η μόνη ένωση από την οποία κατασκευάζονται τα λεπτά υμένια. Ως εκ τούτου, η χρήση άλλων δευτερευόντων μετάλλων, όπως π.χ. το τελλούριο, είναι αυξημένη.



Σχήμα 6.4: Φωτοβολταϊκές παραγωγικές δυνατότητες από το 2016 έως το 2022  
([www.researchgate.net](http://www.researchgate.net))

## 6.4. Εμπόριο και αποθέματα

Δεν υπάρχουν αξιόπιστες εκτιμήσεις για τους παγκόσμιους πόρους ινδίου. Ωστόσο, δεδομένου ότι πάνω από το 95 % του ινδίου ανακτάται ως παραπροϊόν από τα διυλιστήρια ψευδαργύρου, οι εκτιμήσεις των πρωτογενών πόρων ινδίου προέρχονται γενικά από τους παγκόσμιους πόρους ψευδαργύρου. Ένα μικρό ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής ινδίου προέρχεται από την επεξεργασία μεταλλευμάτων χαλκού και κασσίτερου πλούσιων σε θειούχο χαλκό και κασσίτερο, με το καθένα να αντιπροσωπεύει λιγότερο από το 5% της παγκόσμιας προσφοράς. Ωστόσο, η στενή σχέση του ινδίου με συστήματα σχηματισμού μεταλλευμάτων πλούσια σε χαλκό και ο συνεμπλουτισμός του με ψευδάργυρο και χαλκό καθιστούν τα μεταλλεύματα χαλκού από κοιτάσματα μαζικών θειούχων μεταλλευμάτων δυνητικά σημαντικό πόρο ινδίου. Η ιλύς και άλλα κατάλοιπα από τη διαδικασία παραγωγής χαλκού σε κοιτάσματα μεταλλευμάτων που περιέχουν ίνδιο έχουν εισαχθεί σε εργοστάσια εμπλουτισμού ινδίου και συμβάλλουν στην ενισχυμένη παραγωγή ινδίου. Οι αναγνωρισμένοι παγκόσμιοι πόροι ψευδαργύρου ανέρχονται σε περίπου 1,9 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους, ενώ τα αποθέματα ψευδαργύρου εκτιμώνται σε 250 εκατομμύρια τόνους. Χρησιμοποιώντας μια συντηρητική εκτίμηση 50 γραμμαρίων ινδίου ανά τόνο μεταλλεύματος ψευδαργύρου, αυτό ισοδυναμεί με πόρους 95.000 τόνων και ένα απόθεμα 12.500 τόνων μετάλλου ινδίου. Πρόσθετες συνεισφορές στους παγκόσμιους πόρους και αποθέματα ινδίου μπορούν επίσης να εκτιμηθούν από τους παγκόσμιους πόρους χαλκού.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι εκτιμήσεις των πόρων και των αποθεμάτων ινδίου δεν είναι καλά έμπιστες, επειδή αντιμετωπίζουν όλα τα μεταλλεύματα ψευδαργύρου και χαλκού σαν να είχαν την ίδια περιεκτικότητα σε ίνδιο. Στην πραγματικότητα, τα στοιχεία που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο υποτιμούν σημαντικά τους παγκόσμιους πόρους ινδίου. Εάν εξεταστούν το μέσο μέγεθος και οι περιεκτικότητες ψευδαργύρου των αποθεμάτων σε κοιτάσματα μαζικών θειούχων, μπορεί να αποδειχθεί ότι τα γνωστά μεγάλα κοιτάσματα παγκοσμίως περιέχουν 13.750 τόνους μετάλλου ινδίου, με βάση μια μέση περιεκτικότητα σε ίνδιο 50g/t.

Μεταξύ των κοιτασμάτων μαζικών σουλφιδίων μεγάλης περιεκτικότητας, έξι κοιτάσματα στην Κίνα αντιπροσωπεύουν περίπου 317 εκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος με μέσο όρο περίπου 3,2% ψευδαργύρου και περίπου 188 εκατομμύρια τόνους με μέσο όρο περίπου 5,6% ψευδαργύρου, αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη μια εκτιμώμενη μέση περιεκτικότητα σε ίνδιο 50 γραμμάρια ανά τόνο, αυτό ισοδυναμεί με 1100 τόνους αποθεμάτων ινδίου σε μεγάλα κοιτάσματα θειούχων βασικών μετάλλων στην Κίνα. Το μικρό μέγεθος αυτών των αποθεμάτων δεν συνάδει με το γεγονός ότι η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος παγκόσμιος παραγωγός ινδίου, έχοντας αυξήσει συνεχώς την παραγωγή της από το 1998.

Μια μελέτη της Indium Corporation of America υπολόγισε πρωτογενή αποθέματα και πόρους ινδίου 26.000 τόνων μετάλλου ινδίου σε δυτικά μεταλλεία θειούχων βασικών μετάλλων. Η Κίνα, η Ρωσία και άλλα κράτη μέλη αντιστοιχούν σε άλλους 23.000 τόνους μετάλλου ινδίου. Πρόσθετοι 15.000 τόνοι ινδίου μπορεί να προέρχονται από τα απόβλητα και τα υπολείμματα.

Η πιο πρόσφατη εκτίμηση του USGS για τα παγκόσμια αποθέματα ινδίου το 2008 ήταν 11.000 τόνοι. Πρόκειται για σημαντική αύξηση σε σχέση με το 2006, όταν τα αποθέματα εκτιμήθηκαν σε 6.000 τόνους μετάλλου ινδίου. Η Κίνα αντιπροσώπευε πάνω από το 75% των παγκόσμιων αποθεμάτων ινδίου το 2008. Ως αποτέλεσμα των συνεχιζόμενων ερευνητικών προγραμμάτων, τα κινεζικά αποθέματα αυξήθηκαν σημαντικά μέσα σε ένα μόνο έτος, από 280 τόνους το 2006 σε 8000 τόνους ινδίου το 2007. Το Περού, ο Καναδάς, οι ΗΠΑ και η Ρωσία είχαν μαζί πάνω από το 8% των παγκόσμιων αποθεμάτων ινδίου. Τα παγκόσμια αποθέματα ινδίου το 2008 ήταν 49.000 τόνοι, λιγότερο από το ήμισυ της ποσότητας που εκτιμάται για το 2012.

Είναι προφανές ότι η έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων έχει οδηγήσει σε μεγάλη απόκλιση στις παγκόσμιες εκτιμήσεις των πόρων και των αποθεμάτων ινδίου. Ωστόσο, είναι σαφές ότι οι εκτιμήσεις αυτές έχουν αυξηθεί σε μέγεθος με την πάροδο του χρόνου, παράλληλα με την αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση.

Η παγκόσμια παραγωγή ινδίου ήταν μόνο 40-50 τόνοι στις αρχές της δεκαετίας του 1970, αλλά η ταχέως αυξανόμενη ζήτηση κατά τις επόμενες τρεις δεκαετίες οδήγησε σε σημαντική αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής ινδίου. Η παγκόσμια παραγωγή πρωτογενούς ινδίου αυξήθηκε κατά 5% από 609 τόνους το 2010 σε εκτιμώμενους 640 τόνους το 2011, ενώ μεταξύ 2000 και 2011 η παραγωγή των ορυχείων σχεδόν διπλασιάστηκε. Η συνεισφορά στην πρωτογενή παραγωγή ινδίου από τα ορυχεία των επιμέρους χωρών δεν είναι διαθέσιμη, αν και περισσότερο από το ήμισυ της παγκόσμιας παραγωγής ινδίου προέρχεται από την Κίνα, όπου το ίδιο παράγεται κυρίως από κοιτάσματα θειούχων μετάλλων κασσίτερου-βασικών μετάλλων (π.χ. περιοχή Dachang), κοιτάσματα μαζικών θειούχων μετάλλων (Yunnan) και από δευτερογενείς πηγές. Το 2011 η παγκόσμια παραγωγή ψευδαργύρου στα ορυχεία αυξήθηκε κατά 4% σε 12,4 εκατομμύρια τόνους, με την Κίνα, το Περού και την Αυστραλία να είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί.

Η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός εξευγενισμένου ινδίου (340 τόνοι, 53,1% του συνόλου), ακολουθούμενη από τη Δημοκρατία της Κορέας (100 τόνοι), την Ιαπωνία (70 τόνοι), τον Καναδά (65 τόνοι) και το Βέλγιο (30 τόνοι). Άλλοι παραγωγοί αντιπροσώπευαν επιπλέον 35 τόνους. Είναι προφανές ότι η πλειονότητα της παραγωγής προέρχεται από τα χυτήρια ψευδαργύρου που χρησιμοποιούν ηλεκτρολυτική διύλιση και την επεξεργασία ιλύος διυλιστηρίου ψευδαργύρου. Ωστόσο, δεν επεξεργάζονται όλα τα χυτήρια ψευδαργύρου τα δικά τους υπολείμματα για την ανάκτηση ινδίου και άλλων ιχνοστοιχείων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα πλούσια σε μέταλλα υπολείμματα πωλούνται γενικά σε δευτερογενείς παραγωγούς που διαθέτουν τις κατάλληλες εγκαταστάσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι πολλές από τις μεγάλες χώρες πρωτογενών παραγωγών ινδίου δεν διαθέτουν σημαντικά κοιτάσματα μεταλλευμάτων που περιέχουν ίνδιο.

Κατά τη διάρκεια του 2010 περισσότεροι από 90 παραγωγοί παγκοσμίως παρέδωσαν καθαρό μέταλλο ινδίου. Η πλειονότητα αυτών είναι ανεξάρτητα χυτήρια και εταιρείες ανακύκλωσης που διαθέτουν τις τεχνικές γνώσεις και τον εξοπλισμό για την ανάκτηση ιχνοστοιχείων. Υπάρχουν μόνο λίγοι κατετοπιημένοι παραγωγοί που διαθέτουν τις δικές τους επιχειρήσεις εξόρυξης και τήξης για την ανάκτηση του ινδίου. Σε αυτούς περιλαμβάνονται η Xstrata και η Teck Resources που παράγουν στον Καναδά και κρατικές κοινοπραξίες εταιρειών εξόρυξης και μεταλλουργείων στην Κίνα. Ο αριθμός των παραγωγών ινδίου έχει αυξηθεί από το 2000, ιδίως σε βιομηχανικές χώρες όπως η Ιαπωνία, οι ΗΠΑ, η Δημοκρατία της Κορέας και η Γερμανία. Και στην Κίνα, ο αριθμός των

πρωτογενών παραγωγών ινδίου αυξήθηκε ραγδαία, με 21 συνολικά επιχειρήσεις να λειτουργούν το 2010.

Η κινεζική βιομηχανία πρώτων υλών διαθέτει την τεχνολογία και τη λειτουργική ικανότητα για την ανάκτηση διαφόρων σπάνιων μετάλλων από διαφορετικούς τύπους κοιτασμάτων μεταλλευμάτων. Κατά συνέπεια, η Κίνα κυριαρχεί σήμερα στις διεθνείς αγορές για τα περισσότερα από αυτά τα μέταλλα, συμπεριλαμβανομένου του ινδίου. Αντίθετα, ορισμένα διυλιστήρια εκτός Κίνας έχουν εγκαταλείψει την παραγωγή ιχνομετάλλων ή επικεντρώνονται πλέον στην παραγωγή υψηλότερων καθαρισμών ινδίου.

Οι ετήσιες ικανότητες παραγωγής ινδίου υπολογίζονται σε 727 τόνους. Τα μερίδια είναι τα εξής: Κίνα, 360 τόνοι- Δημοκρατία της Κορέας, 120 τόνοι- με 50 τόνους έκαστος στην Ιαπωνία, τον Καναδά και το Βέλγιο και 40 τόνους στις ΗΠΑ. Η Ρωσία, η Ουκρανία, το Καζακστάν, η Γερμανία και το Περού έχουν μικρότερες εγκατεστημένες δυναμικότητες. Η παγκόσμια δυναμικότητα των διυλιστηρίων εκτιμάται ότι είναι 17-25% υψηλότερη από την ετήσια παραγωγή 540 έως 600 τόνων ινδίου.

Ορισμένα διυλιστήρια ινδίου έχουν επεκταθεί τα τελευταία χρόνια, όπως στην Ιαπωνία, στον Καναδά, στην Βολιβία, στην Βραζιλία και στο Περού. Πολλές κινεζικές εταιρείες βελτίωσαν τις γραμμές επεξεργασίας τους για την ανάκτηση ινδίου από υπολείμματα που περιέχουν λιγότερο από 0,5% In, ενώ άλλοι κινεζικοί παραγωγοί επικεντρώθηκαν σε μέταλλο ινδίου υψηλής καθαρότητας.

### Παγκόσμιο εμπόριο

Το μεγαλύτερο μέρος του ινδίου διακινείται με τη μορφή εξαγόμενου ακατέργαστου ινδίου με καθαρότητα 99,97% ή 99,95% που παράγεται από ηλεκτρολυτικά διυλιστήρια ψευδαργύρου. Ορισμένα διυλιστήρια ψευδαργύρου στέλνουν την ανοδική λάσπη σε άλλα διυλιστήρια που είναι εξοπλισμένα για την εξαγωγή και τον καθαρισμό του ινδίου. Τα θραύσματα και οι σκόνες ινδίου αποτελούν επίσης αντικείμενο εμπορίας. Το μέταλλο υψηλής καθαρότητας (5N-7N) παράγεται σε λίγες μόνο χώρες, όπως η Ιαπωνία, οι ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Γερμανία. Το εμπόριο ακατέργαστου ινδίου συνδέεται στενά με τις δυνατότητες εξόρυξης και εξευγενισμού ψευδαργύρου και κυριαρχείται από τον Καναδά, την Κίνα, τη Βολιβία, τη Ρωσία, το Καζακστάν, την Ουκρανία και τη Βραζιλία. Είναι δύσκολο να ληφθούν ακριβή στοιχεία ειδικά για το εμπόριο του ινδίου, επειδή οι κωδικοί εμπορίου καταγράφουν το εμπόριο του ινδίου σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα, όπως το γάλλιο, το γερμάνιο, το άφνιο, το νιόβιο, το θάλιο και το βανάδιο.

Από το 2005 η Κίνα είναι η κύρια παγκόσμια πηγή ινδίου. Οι εξαγωγές ινδίου από την Κίνα στις διεθνείς αγορές μεταξύ 2005 και 2011 υπολογίζονται σε 1854 τόνους. Η ποσότητα αυτή αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 40 % του εκτιμώμενου συνολικού ινδίου που εισήλθε στην εμπορική αγορά. Ωστόσο, από το 2007 οι περιορισμοί των εξαγωγών, που αποσκοπούν στη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων του τομέα του ινδίου, μείωσαν την ποσότητα του διαθέσιμου ινδίου από την Κίνα. Από περίπου 700 τόνους το 2005 μειώθηκε σε μόλις 88 τόνους το 2009, αν και ο αριθμός για το 2010 και το 2011 ήταν 340 τόνοι. Οι άλλοι κύριοι εξαγωγείς ινδίου



είναι ο Καναδάς, οι ΗΠΑ, το Βέλγιο, η Βραζιλία, η Ιαπωνία, η Δημοκρατία της Κορέας και η Ρωσία. Το Βέλγιο, η Γαλλία και η Δημοκρατία της Κορέας αύξησαν τις εξαγωγές τους το 2008 και το 2009. Η Ιαπωνία, οι ΗΠΑ και το Ηνωμένο Βασίλειο είναι οι κύριοι εισαγωγείς υλικών ινδίου από το 2005. Το 2011 οι εισαγωγές των ΗΠΑ έφτασαν τους 150 τόνους, σημειώνοντας αύξηση 43% σε σχέση με το 2009. Οι κύριοι προμηθευτές των ΗΠΑ ήταν η Κίνα (31%, 46,5 τόνοι), ο Καναδάς (25%, 37,5 τόνοι), η Ιαπωνία (16%) και το Βέλγιο (9%). Οι περισσότερες εισαγωγές διυλίστηκαν σε ποιότητες καθαρότητας 5N και σε ενώσεις και κράματα ινδίου. Η Ιαπωνία εισάγει μεγάλες ποσότητες ινδίου από την Κίνα, τον Καναδά, τη Δημοκρατία της Κορέας και την Ταϊβάν. Το 2011 οι ιαπωνικές εισαγωγές ινδίου έφθασαν σε επίπεδο ρεκόρ, καθώς αυξήθηκαν κατά 18% σε 494 τόνους από 418 τόνους το 2010. Το ίδιο εισάγεται στην Ιαπωνία κυρίως με τη μορφή υπολειμμάτων, αποβλήτων, θραυσμάτων και ημι-κατεργασμένου μετάλλου.

## 6.5. Ανακύκλωση και Υποκατάσταση

Η ανάκτηση του ινδίου από τα απόβλητα παραγωγής και, σε μικρότερο βαθμό, από την ανακύκλωση ηλεκτρονικών σκραπ που περιέχουν ίνδιο έχει αποκτήσει όλο και μεγαλύτερη σημασία την τελευταία δεκαετία, καθώς η τιμή του ινδίου έχει αυξηθεί. Περίπου τα δύο τρίτα (1000 τόνοι) της παγκόσμιας προσφοράς ινδίου προέρχονται από την ανακύκλωση.

Οι περισσότερες χώρες παραγωγής ΙΤΟ έχουν αυξήσει σημαντικά τα ποσοστά ανακύκλωσης τα τελευταία χρόνια. Η ανάκτηση του ινδίου από την παραγωγή οξειδίου του ινδίου-κασσιτέρου (ΙΤΟ) και τη διαδικασία sputter αυξήθηκε παράλληλα με την αύξηση της παραγωγής επίπεδων οθονών και πιθανώς αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 50% της παγκόσμιας προσφοράς ινδίου. Η διαδικασία sputter εναποθέτει τμήματα ΙΤΟ ως επίστρωση λεπτού υμενίου σε γυάλινο υπόστρωμα σε θάλαμο κενού. Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά αποτελεσματική και πάνω από το 70 % του υλικού-στόχου ΙΤΟ δεν εναποτίθεται στο γυαλί, ενώ μέρος του παραμένει στα τοιχώματα του θαλάμου. Αυτές οι μεγάλες ποσότητες πλεονάζοντος υλικού, μαζί με τη λάσπη λείανσης, καθιστούν την ανάκτησή του οικονομική. Η ανακύκλωση ινδίου από ηλεκτρονικά απορρίμματα είναι τεχνικά δύσκολη λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε ίνδιο και γίνεται οικονομική μόνο σε τιμές άνω των 400 δολαρίων ΗΠΑ ανά χιλιόγραμμα. Έχει αναπτυχθεί μια διαδικασία ανάκτησης ινδίου απευθείας από θραύσματα πάνελ LCD. Οι νέες τεχνολογίες και οι αυξημένες δυνατότητες, σε συνδυασμό με τη βελτίωση της συλλογής ηλεκτρονικών απορριμμάτων, μπορούν να μειώσουν περαιτέρω το κόστος ανάκτησης.

Η αστάθεια των τιμών και οι ανησυχίες για την προσφορά έχουν προκαλέσει την έρευνα για την ανάπτυξη υποκατάστατων του ΙΤΟ. Ωστόσο, δεδομένου ότι το κόστος του ΙΤΟ αποτελεί πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους ενός πάνελ LCD και ότι έχουν γίνει σημαντικές πρόσφατες επενδύσεις στην τεχνολογία και την παραγωγική δυναμικότητα της εκτόξευσης ΙΤΟ, είναι πιθανό ότι το ΙΤΟ θα παραμείνει η κυρίαρχη αγωγίμη επίστρωση για τις περισσότερες εφαρμογές LCD στο

άμεσο μέλλον. Οι επικαλύψεις οξειδίου του κασσίτερου αντιμονίου, οι οποίες εναποτίθενται με διαδικασία εκτόξευσης μελανιού, είναι μια πιθανή εναλλακτική λύση, ενώ μια άλλη είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου με πρόσμιξη αλουμινίου (AZO), το οποίο έχει καλή διαφάνεια και ηλεκτρικές ιδιότητες. Επικαλύψεις νανοσωλήνων άνθρακα, που εφαρμόζονται με τεχνικές υγρής επεξεργασίας, έχουν αναπτυχθεί ως εναλλακτική λύση για τις επικαλύψεις ITO σε εύκαμπτες οθόνες, ηλιακές κυψέλες και οθόνες αφής. Το πολυ(3,4-αιθυλενοδιοξυθειοφαίνιο- PEDOT) έχει μελετηθεί ως υποκατάστατο του ITO σε εύκαμπτες οθόνες και οργανικές διόδους εκπομπής φωτός. Οι κβαντικές τελείες γραφενίου μπορούν να αντικαταστήσουν τα ηλεκτρόδια ITO στις ηλιακές κυψέλες και έχουν επίσης διερευνηθεί ως αντικαταστάτες του ITO στις LCD. Το αρσενίδιο του γαλλίου μπορεί να αντικαταστήσει το φωσφίδιο του ινδίου στις ηλιακές κυψέλες και σε πολλές εφαρμογές ημιαγωγών.

### Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξόρυξης και της επεξεργασίας των πλούσιων σε σουλφίδια μεταλλευμάτων που περιέχουν ίνδιο εξαρτώνται από ένα ευρύ φάσμα παραγόντων. Τα περισσότερα κοιτάσματα είναι μικρά σε μέγεθος και έχουν περιορισμένες επιπτώσεις στο περιφερειακό υδρολογικό καθεστώς. Ωστόσο, τα διαλυτά θειικά αλατούχα ορυκτά που προέρχονται από την αποσάθρωση και την οξειδωση των θειούχων ορυκτών στις χωματερές των ορυχείων και στους σωρούς αποβλήτων αποτελούν δυνητική πηγή μόλυνσης από μέταλλα και δημιουργίας όξινης αποστράγγισης. Η σημασία αυτής της διαδικασίας και οι συναφείς επιπτώσεις εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος της επιφανειακής εξόρυξης, η φύση και η έκταση των εξορυκτικών εργασιών και η διάθεση των αποβλήτων. Ο τύπος του μητρικού πετρώματος, ιζηματογενές ή ηφαιστειακό, δεν φαίνεται να επηρεάζει αυτά τα χαρακτηριστικά. Το πιο όξινο και πλούσιο σε μέταλλα νερό των ορυχείων, που αποστραγγίζεται από τη βάση των καλά στερεοποιημένων σωρών απόθεσης τελμάτων από ηφαιστειογενή σουλφιδικά κοιτάσματα, έχει pH 2,6 έως 2,7 και περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις μιας σειράς μετάλλων, συμπεριλαμβανομένων ορισμένων με γνωστές τοξικές επιδράσεις, έως 21.000 µg/l Fe, 3600 µg/l Cu, 220 µg/l Pb, 3300 µg/l Zn, 30 µg/l Co, 10 µg/l Cd και 311 mg/l θειικών αλάτων.

Πιθανές περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται με την επεξεργασία μεταλλευμάτων βασικών μετάλλων σχετίζονται κυρίως με τις λίμνες αποβλήτων που μπορεί να περιέχουν υψηλές αφθονίες μολύβδου, ψευδαργύρου, καδμίου, βισμούθιου, αντιμονίου και άλλων αντιδραστηρίων που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα επίπλευσης και ανάκτησης. Τα λεπτόκοκκα και ενδογενή σουλφιδικά μεταλλεύματα μπορεί να απαιτούν πολύ λεπτή άλεση για αποτελεσματικό εμπλουτισμό και μπορούν έτσι να οδηγήσουν στη δημιουργία ιδιαίτερα αντιδραστικών λεπτόκοκκων αποβλήτων. Σήμερα, οι λίμνες τελμάτων επενδύονται συνήθως με αδιαπέραστα φράγματα, αλλά στο παρελθόν τέτοια μέτρα δεν ήταν συνηθισμένα και υπήρχε πιθανότητα σημαντικής μόλυνσης των επιφανειακών και ρηχών υπόγειων υδάτων. Σήμερα, ορισμένα υπόγεια ορυχεία διαθέτουν το μεγαλύτερο μέρος των αποβλήτων τους με την επίχωση και την τσιμεντοποίηση των εξορυγμένων

εξαλείφοντας έτσι ουσιαστικά την επιφανειακή μόλυνση.

Δεδομένης της ραγδαίας αύξησης της χρήσης του ινδίου τα τελευταία χρόνια και της αναμενόμενης μελλοντικής αύξησης της κατανάλωσης σε ηλεκτρονικές, φωτοβολταϊκές και LED εφαρμογές, είναι σημαντικό να κατανοηθεί ο φυσικός και βιομηχανικός κύκλος του ινδίου και η τοξικολογία του. Αυτό θα αποτελέσει τη βάση για τη βελτίωση της γνώσης της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς του και των επιδράσεων στην ανθρώπινη υγεία και θα συμβάλει έτσι στην ασφαλή και βιώσιμη χρήση του. Το ίνδιο δεν έχει καμία γνωστή φυσιολογική λειτουργία στον άνθρωπο ή στα ζώα και δεν είναι γνωστό ότι χρησιμοποιείται από κανέναν οργανισμό. Αν και η τοξικότητα του μετάλλου ινδίου είναι χαμηλή και δεν έχουν αναφερθεί επιβλαβείς επιδράσεις, υπάρχουν στοιχεία που υποδηλώνουν ότι ορισμένα συστατικά του ινδίου είναι τοξικά. Δεν υπάρχει πρότυπο πόσιμου νερού για το ίνδιο στις Ηνωμένες Πολιτείες, αλλά έχουν καθοριστεί όρια έκθεσης στο χώρο εργασίας για το ίνδιο και τις ενώσεις του σε ορισμένες δικαιοδοσίες (0,1 mg/m<sup>3</sup> μέσος σταθμισμένος χρόνος). Έχουν αναφερθεί πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ινδίου στον αέρα, το θαλασσινό νερό, το νερό της βροχής και τα τρόφιμα, αν και έχουν ανιχνευθεί υψηλότερα επίπεδα σε θαλασσινά από μολυσμένα ύδατα κοντά σε μεταλλουργεία. Η μέση ημερήσια πρόσληψη ινδίου εκτιμάται ότι είναι χαμηλή, της τάξης των 8-10μg ανά ημέρα.

Το φωσφίδιο του ινδίου, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ημιαγωγών για διόδους λέιζερ, ηλιακές κυψέλες, LED και ολοκληρωμένα κυκλώματα, ήταν η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ένωση ινδίου μέχρι την τελευταία δεκαετία. Εργαστηριακές μελέτες σε αρουραίους και ποντίκια έχουν παράσχει σαφείς αποδείξεις ότι το φωσφίδιο του ινδίου είναι καρκινογόνο στα ζώα, αν και δεν έχει μελετηθεί επαρκώς στον άνθρωπο. Σε αυτή τη βάση, το φωσφίδιο του ινδίου κατατάχθηκε ως πιθανώς καρκινογόνο για τον άνθρωπο από τον Διεθνή Οργανισμό Έρευνας για τον Καρκίνο.

Δεδομένου ότι το οξειδίο του ινδίου-κασσιτέρου (ΙΤΟ) είναι η κυρίαρχη μορφή στην οποία χρησιμοποιείται σήμερα το ίνδιο, υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον για τη διαπίστωση των κινδύνων που συνδέονται με τη χρήση του. Η δυνητική έκθεση σε σωματίδια ΙΤΟ είναι μεγαλύτερη στο βιομηχανικό χώρο εργασίας, ιδίως κατά την προετοιμασία των στόχων ΙΤΟ, την εναπόθεση και την ανακύκλωση των φιλμ ΙΤΟ. Οι περισσότερες ενδείξεις για την τοξικότητα του ΙΤΟ έχουν προκύψει από την επαγγελματική έκθεση μέσω εισπνοής, αλλά το κατά πόσον αποτελεί δυνητικό κίνδυνο για την υγεία των εργαζομένων δεν έχει πλήρως διευκρινιστεί. Ορισμένες κλινικές και επιδημιολογικές μελέτες, κυρίως από την Ιαπωνία, αλλά και από την Κίνα και τις Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν αναφέρει δυσμενείς επιδράσεις σε εργαζόμενους που εκτίθενται σε ΙΤΟ σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας και ανακύκλωσης ινδίου. Αυτές οι έρευνες δείχνουν ότι η έκθεση σε δύσκολα διαλυτές ενώσεις ινδίου, όπως το σωματιδιακό ΙΤΟ, μπορεί δυνητικά να προκαλέσει διάφορους τύπους πνευμονικών βλαβών. Ωστόσο, μέτρα όπως ο κατάλληλος αερισμός και η χρήση μάσκας αρκούν για την πρόληψη των κινδύνων για την υγεία στην παραγωγή. Ορισμένες μελέτες για τη διερεύνηση της τοξικότητας του ινδίου σε πειραματόζωα (ποντίκια, αρουραίοι, χάμστερ, κουνέλια) έχουν δείξει ότι οι ενώσεις ινδίου παρουσιάζουν συστηματική τοξικότητα στα θηλαστικά με δυσμενείς επιπτώσεις στους νεφρούς, το ήπαρ, το αίμα, τους πνεύμονες και τα αναπαραγωγικά και αναπτυξιακά συστήματα.

Πολλά παραμένουν άγνωστα σχετικά με τον φυσικό και ανθρωπογενή κύκλο του ινδίου, αλλά, δεδομένης της ταχέως αυξανόμενης χρήσης του, απαιτείται περισσότερη έρευνα για να διερευνηθεί

η έκταση των τοξικών και οικοτοξικών επιπτώσεών του και οι παράγοντες που τις ελέγχουν. Η συμπεριφορά του εισπνεόμενου ινδίου στον ανθρώπινο οργανισμό και οι πιθανές επιδράσεις του στην καρκινογένεση και στα αναπτυξιακά και αναπαραγωγικά συστήματα είναι ελάχιστα κατανοητές και θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Παρόλο που οι εκλύσεις ινδίου από τις βιομηχανίες ημιαγωγών και ηλεκτρονικών είναι επί του παρόντος μικρές, υπάρχει ανάγκη για μακροπρόθεσμη παρακολούθηση του περιβάλλοντος και του χώρου εργασίας για την κατανόηση και την ποσοτικοποίηση των κινδύνων που συνδέονται με την αυξημένη χρήση του ινδίου. Η ποσότητα ινδίου που απελευθερώνεται στο περιβάλλον από την εξόρυξη, την τήξη και τις βιομηχανικές δραστηριότητες υπερβαίνει ήδη εκείνη που προέρχεται από φυσικές πηγές, όπως οι ηφαιστειακές εκρήξεις και η αποσάθρωση, και είναι επομένως σημαντικό να παρακολουθούνται αυτές οι πηγές για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και της μεταφοράς του ινδίου και των τοξικών επιπτώσεών του. Τα ορυχεία βασικών μετάλλων, τα μεταλλουργεία και τα διυλιστήρια που επεξεργάζονται υλικά που περιέχουν ίνδιο εφαρμόζουν αρχές, πρακτικές και εξοπλισμό περιβαλλοντικής διαχείρισης που τους επιτρέπουν να πληρούν ή να υπερβαίνουν τις σχετικές περιβαλλοντικές απαιτήσεις. (critical metals handbook)

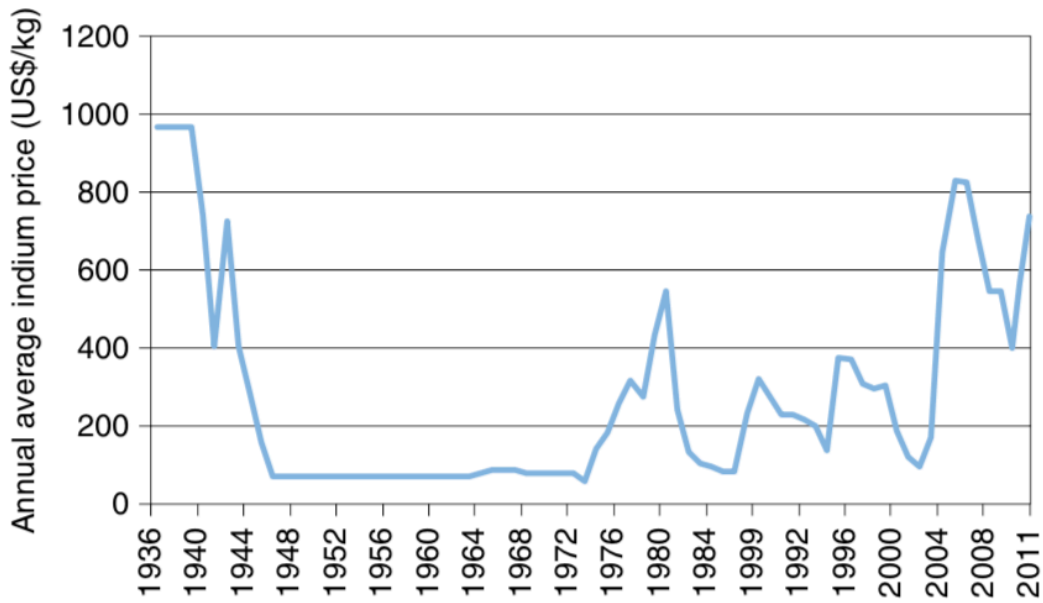
## 6.6. Διακύμανση της τιμής και προοπτική για το μέλλον

Τα μεταλλουργεία παράγουν συνήθως ίνδιο καθαρότητας 99,95%, το οποίο εξευγενίζεται περαιτέρω στο μεταλλουργείο ή από δευτερογενείς μεταποιητές και τριτογενείς παρασκευαστές σε υψηλότερη καθαρότητα. Το μέταλλο ίνδιο (99,99%) διαπραγματεύεται σε δολάρια ΗΠΑ ανά χιλιόγραμμο. Σε αντίθεση με τα κύρια εμπορεύσιμα μέταλλα, το ίνδιο πωλείται με ιδιωτικά συμβόλαια, συχνά μακροπρόθεσμα, μεταξύ αγοραστή και πωλητή. Η εκτιμώμενη αξία του πρωτογενούς μετάλλου ινδίου που διακινήθηκε το 2011, με βάση τη μέση ετήσια τιμή του εμπόρου της Νέας Υόρκης, ήταν περίπου 82 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ.

Το κόστος της εξερεύνησης, εξόρυξης και μεταλλουργίας του ινδίου συνδέεται στενά με εκείνο των κύριων εμπορευμάτων ψευδαργύρου, χαλκού και κασσίτερου, καθώς και πρόσθετων ιχνοστοιχείων (π.χ. κάδμιο). Η ανάκτηση του ινδίου από τα υπολείμματα του διυλιστηρίου ψευδαργύρου απαιτεί σημαντικές πρόσθετες επενδύσεις που περιλαμβάνουν τεχνολογικές εγκαταστάσεις, χημικά, ηλεκτρική ενέργεια και περιβαλλοντική συμμόρφωση. Το άμεσο κόστος παραγωγής ινδίου σε αυτές τις εγκαταστάσεις κυμαίνεται μεταξύ 50 και 100 δολαρίων ΗΠΑ ανά χιλιόγραμμο.

Από το 1970 οι τιμές του ινδίου ακολουθούν μια σχεδόν κυκλική τάση. Τα έτη 1975, 1980, 1988, 1995 και 2003 χαρακτηρίστηκαν από ραγδαίες και σημαντικές αυξήσεις των παγκόσμιων τιμών του ινδίου, τις οποίες ακολούθησε μια αργή σταδιακή μείωση. Μεταξύ 1973 και 1980 η ζήτηση αυξήθηκε για τη χρήση ινδίου σε πυρηνικές ράβδους ελέγχου. Ταυτόχρονα, σταδιακά σταμάτησε η προσφορά από εύκολα προσβάσιμα κοιτάσματα ινδίου, όπως αυτά της Βολιβίας. Η τιμή του ινδίου αυξήθηκε απότομα από 57 US\$/kg το 1973 σε 547 US\$/kg το 1980. Ωστόσο, η εγκατάσταση νέας

δυναμικότητας εξόρυξης, σε συνδυασμό με τη μείωση της παγκόσμιας ζήτησης μετά το ατύχημα στο Three Mile Island και την οικονομική ύφεση στις αρχές της δεκαετίας του 1980, είχε ως αποτέλεσμα την υπερπροσφορά ινδίου και τη μείωση των τιμών. Η μέση ετήσια τιμή το 1986 ήταν μόνο 84 US\$/kg. Το ανανεωμένο ενδιαφέρον για τις χρήσεις ινδίου, κυρίως από την ιαπωνική βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών, άρχισε το 1988, όταν η μέση ετήσια τιμή του ινδίου έφθασε τα 319 US\$/kg. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, η ανάπτυξη των ημιαγωγών φωσφοειδούς ινδίου και των λεπτών υμενίων ITO για τις οθόνες LCD κυριάρχησαν στις αγορές ινδίου. Η μεταβαλλόμενη ζήτηση για LCD, η τεχνολογική πρόοδος που μείωσε την ποσότητα ινδίου στις οθόνες LCD και η διαθεσιμότητα εφοδιασμού από αποθέματα στην Ουκρανία οδήγησαν σε πτώση των τιμών τα επόμενα χρόνια, με τη μέση ετήσια τιμή του ινδίου να πέφτει στα 97 US\$/kg το 2002. Στη συνέχεια, διάφοροι παράγοντες οδήγησαν σε σημαντική άνοδο της τιμής του ινδίου, η οποία έφθασε στο υψηλότερο ετήσιο μέσο όρο όλων των εποχών που ξεπέρασε τα 946 US\$/kg το 2005. Η αύξηση αυτή ήταν μια απάντηση στη βελτίωση των παγκόσμιων οικονομικών συνθηκών, ιδίως στις αναδυόμενες οικονομίες, στην ισχυρή ζήτηση για επίπεδες οθόνες, στις τεχνικές καινοτομίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμενίου και στα προβλήματα στην παγκόσμια παραγωγή ψευδαργύρου και χαλκού. Κατά συνέπεια, οι παραγωγικές ικανότητες επεκτάθηκαν και η ανακύκλωση άρχισε να συμβάλλει σημαντικά στην παγκόσμια προσφορά για πρώτη φορά. Στη συνέχεια, η αυξημένη παραγωγή σε συνδυασμό με την εξασθένηση της ζήτησης από την Ασία και την οικονομική ύφεση επιβράδυναν τις αγορές και η τιμή του ινδίου μειώθηκε σταδιακά. Το 2009, η μέση ετήσια τιμή ήταν 500 US\$/kg ινδίου. Από τα μέσα του 2009 η αυξανόμενη ζήτηση ITO οδήγησε σε γενική αύξηση των τιμών. Το 2011 η τιμή του ινδίου αυξήθηκε κατά 43% περίπου σε σχέση με το 2010, σε μέσο ετήσιο όρο 693 US\$/kg.



Σχήμα 6.5: Διακύμανση της τιμής του Ίνδιου από το 1936 έως το 2011 (critical metals handbook)



Σχήμα 6.6: Η διακύμανση της τιμής του Ινδίου από το 2017 έως σήμερα (London Metal Exchange)

Οι προοπτικές της αγοράς ινδίου είναι υγιείς, με τη ζήτηση να προβλέπεται να αυξάνεται με ρυθμό 5-10% ετησίως. Η ζήτηση για πάνελ LCD μπορεί να αυξηθεί πιο αργά, αλλά θα συνεχίσει να αποτελεί την κύρια χρήση του ινδίου, ιδίως για εφαρμογές όπως οι προσωπικοί υπολογιστές, τα tablets και τα κινητά τηλέφωνα. Η διαδικασία σπατουλαρίσματος ΙΤΟ πάνω σε γυαλί έχει φθάσει σε ωριμότητα και οι εγκαταστάσεις αποδίδουν καλά. Οι νέες εγκαταστάσεις θα χρησιμοποιούν πιθανότατα περιστροφικούς στόχους ΙΤΟ (αντί για επίπεδους) για μεγαλύτερη απόδοση. Ένας άλλος τομέας της αγοράς με σημαντικό δυναμικό ανάπτυξης είναι τα φωτοβολταϊκά κύτταρα λεπτών υμενίων, όπου το κράμα χαλκού-ινδίου-γαλλίου-σεληνιδίου (CIGS) είναι μία από μια σειρά τεχνολογιών που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν ευρέως, καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το γεγονός ότι το ίδιο είναι ένα παραπροϊόν, έχει προκαλέσει κάποια ανησυχία, επειδή η διαθεσιμότητα του πρωτογενούς εφοδιασμού εξαρτάται από την εξόρυξη, την τήξη και τη διύλιση βασικών μετάλλων, κυρίως ψευδαργύρου και χαλκού. Οι φορείς εκμετάλλευσης ενός χυτηρίου ψευδαργύρου και χαλκού είναι πολύ απίθανο να αυξήσουν την παραγωγή απλώς και μόνο για να παραδώσουν μεγαλύτερες ποσότητες ενός παραπροϊόντος. Έχει εκτιμηθεί ότι μόνο περίπου το 25-30% του ινδίου που εξορύσσεται κάθε χρόνο καταλήγει σε ραφινρισμένο ίδιο. Το υπόλοιπο είτε χάνεται στα υπολείμματα είτε πηγαίνει σε μονάδες εμπλουτισμού που δεν διαθέτουν την τεχνολογία για την ανάκτηση του ινδίου. Ωστόσο, η παγκόσμια παραγωγική ικανότητα θα πρέπει να επαρκεί για να καλύψει την προβλεπόμενη σταθερή αύξηση της ζήτησης ινδίου. Η πρόσθετη προσφορά αναμένεται να προέλθει από την αυξημένη παραγωγή ορυχείων ψευδαργύρου και χαλκού, ιδίως από μεταλλεύματα που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις ινδίου. Η παγκόσμια παραγωγή ορυχείων βασικών μετάλλων αυξήθηκε κατά 24% κατά την πενταετία 2006-2011 και, δεδομένης της παγκόσμιας αναζωογόνησης των δραστηριοτήτων εξερεύνησης κοιτασμάτων σουλφιδίων βασικών μετάλλων σε γνωστές περιοχές μεταλλευμάτων και του σημερινού ενδιαφέροντος για τα κρίσιμα μέταλλα, είναι πιθανό να εντοπιστούν νέα αποθέματα ινδίου. Περαιτέρω συνεισφορές στον εφοδιασμό θα προέλθουν επίσης από την εγκατάσταση νέων ή διευρυμένων μονάδων εξόρυξης ινδίου στα χυτήρια βασικών μετάλλων, από τη βελτίωση της αποδοτικότητας της ανάκτησης στις υφιστάμενες μονάδες παραγωγής ινδίου και από τη βελτίωση της τεχνολογίας ανακύκλωσης του ινδίου.

Η πιθανή επίδραση των γεωπολιτικών παραγόντων στην ασφάλεια του εφοδιασμού δεν μπορεί να αποκλειστεί. Ορισμένες χώρες παραγωγοί έχουν επιβάλει περιορισμούς στις εξαγωγές. Η συσσώρευση αποθεμάτων από κυβερνήσεις και ιδιωτικά ιδρύματα μπορεί επίσης να έχει κάποιο αντίκτυπο στην παγκόσμια προσφορά ινδίου. Ορισμένες κυβερνήσεις, ιδίως της Κορέας, της Ιαπωνίας και της Κίνας, έχουν ανακοινώσει τις προθέσεις τους να αποθηκεύσουν απόθεμα ινδίου, αν και μόνο στην Κορέα υπάρχει επίσημο απόθεμα.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέταλλα όπως το ίνδιο και το κοβάλτιο είναι σημαντικά ορυκτά υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρέχουσα τεχνολογία φωτοβολταϊκών κυψελών και μπαταριών. Το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας πρωτογενούς προμήθειας αυτών των ορυκτών πρώτων υλών ανακτάται ως παραπροϊόντα από μεταλλεύματα που επεξεργάζονται κυρίως με σκοπό την παραγωγή αλουμινίου, χαλκού, μολύβδου και ψευδαργύρου (δηλ. συμπυκνώματα). Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα εξευγενισμένα μέταλλα προέρχονται από τις χώρες στις οποίες εξορύσσονται, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, τα ενδιάμεσα προϊόντα που περιέχουν τα μέταλλα και τα εξευγενισμένα μέταλλα ανακτώνται από μεταποιητές που βρίσκονται σε άλλες χώρες. Αν υποθέσουμε ότι ο μέσος ρυθμός διείσδυσης της ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ανταγωνιστικές αγορές αυξάνουν τη ζήτηση για ίνδιο, η προκύπτουσα νέα ζήτηση μπορεί να καλυφθεί σχετικά γρήγορα με την επέκταση των υφιστάμενων κυκλωμάτων ανάκτησης ή την προσθήκη νέων κυκλωμάτων. Είναι πολύ απίθανο, σύμφωνα με τα περισσότερα σενάρια, να προκύψει ανάγκη να εξορυχθούν περισσότερα μεταλλεύματα βωξίτη, χαλκού και ψευδαργύρου για να καλυφθούν οι αναμενόμενες ανάγκες σε υλικά για την κάλυψη της ζήτησης που δημιουργείται από τα φωτοβολταϊκά για τα εν λόγω ορυκτά υλικά. Επίσης για το ίνδιο, είναι πιθανό να απαιτηθεί στοχευμένη εξερεύνηση ορυκτών και βελτίωση της μεταλλουργικής ανάκτησης για να καλυφθούν οι απαιτήσεις της ζήτησης. Η υποκατάσταση αυτών των υλικών σε μη φωτοβολταϊκές εφαρμογές θα μπορούσε επίσης να "απελευθερώσει" την προσφορά. Αντίθετα, ωστόσο, άλλες νέες εφαρμογές μπορούν να δημιουργήσουν περιορισμούς στην προσφορά ή να αυξήσουν τις τιμές των μετάλλων και να ασκήσουν πίεση στη χρήση τους στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Η προσφορά αυτών των μετάλλων από δευτερογενείς πηγές θα αυξηθεί πιθανώς με την πάροδο του χρόνου, όταν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ανακυκλώνονται ως αποτέλεσμα θραύσης ή όταν φτάσουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, η οποία είναι περίπου 20 έως 30 χρόνια.

Εκτός ίσως από βραχυπρόθεσμες διακοπές που οφείλονται σε δυνάμεις της αγοράς ή σε γεωπολιτικά γεγονότα, δεν αναμένεται να υπάρξουν μακροπρόθεσμοι υλικοί περιορισμοί που θα εμπόδιζαν την ανάπτυξη σημαντικής ποσότητας ενέργειας από φωτοηλεκτρικές κυψέλες. Οι εκτιμήσεις των αποθεμάτων δεν είναι στατικές- παρόλο που ένα συγκεκριμένο μέταλλο μπορεί να θεωρείται σπάνιο, αν μπορεί να προκύψει κέρδος από την ανάκτησή του, τότε πιθανότατα δεν θα υπάρξει μακροχρόνια έλλειψη. Η τεχνολογική πρόοδος που οδηγείται από την επιθυμία για παραγωγή ενέργειας με χαμηλότερο κόστος θα οδηγήσει πιθανότατα σε αύξηση της ενεργειακής απόδοσης που απαιτεί μικρότερες ποσότητες αυτών των μετάλλων ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας, υποκατάσταση με άλλα υλικά και άλλες εξελίξεις στην επιστήμη.

Η αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης για τα υπό εξέταση κρίσιμα μέταλλα θα μπορούσε να υποδείξει διαφορετικές εξελίξεις:



- π.χ. φωτοβολταϊκά, συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, καταλύτες για τη μείωση των εκπομπών κ.λπ,
- αύξηση της συνολικής μεταλλευτικής παραγωγής σε συνδυασμό με τις σχετικές περιβαλλοντικές πιέσεις,
- τεράστια αύξηση της σημασίας των τεχνολογιών ανακύκλωσης και των σχετικών υποδομών τα επόμενα 5-10 χρόνια,
- Επενδύσεις πολλών δισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ θα είναι απαραίτητες για μια ενισχυμένη κυκλική οικονομία όσον αφορά τα κρίσιμα μέταλλα για την ικανοποίηση της αύξησης της ζήτησης και τη μείωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων!
- Μια περαιτέρω επιτυχή ανάπτυξη όσον αφορά την ανακύκλωση κρίσιμων μετάλλων θα δημιουργήσει πρόσθετες θέσεις εργασίας στις ανεπτυγμένες χώρες, καθώς και στις αναδυόμενες οικονομίες στις αναπτυσσόμενες χώρες.



# Βιβλιογραφία

1. Renaud Coulomb, "Critical minerals today and in 2030: an analysis of OECD countries", November 2015
2. European Commission, "Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills", Joint Research Centre (JRC), 2019
3. Gus Gunn, "Critical Metals Handbook", 2014
4. Vasilios Melfos and Panagiotis Ch. Voudouris, "Geological, Mineralogical and Geochemical Aspects for Critical and Rare Metals in Greece", 2012
5. Australian Government, Department of Industry, Innovation and Science, "Outlook for selected critical minerals", October 2019
6. United States Geological Survey (USGS), "Factors that influence the price of Al, Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Rare Earth Elements, and Zn", 2008
7. Metabolic, Copper, Universiteit\_Leiden, "Metal demand for electric vehicles", 2019
8. Öko Institut, "Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential", July 2009
9. European Commission, "Analysis of material efficiency aspects of personal computers product group", January 2018
10. United States Geological Survey (USGS), "Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells", 2010
11. Ασημίνα Θ. Κατσιάπη, "Διερεύνηση της δυνατότητας απομάκρυνσης του μαγγανίου από θειικά διαλύματα νικελίου και κοβαλτίου. Επίδραση της παρουσίας του μαγγανίου στην ανάκτηση του νικελίου", 2011
12. [www.orykta.gr](http://www.orykta.gr)
13. [www.lme.com](http://www.lme.com)
14. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
15. [www.statista.com](http://www.statista.com)
16. [www.ifpenergiesnouvelles.com](http://www.ifpenergiesnouvelles.com)
17. Indium (USGS) Open-File Report 2004-1300, John D. Jorgenson and Michael W. George, 2004
18. [www.ludabattery.com](http://www.ludabattery.com)