



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΗΜΟΚΡΑΤΗΣ ΚΑΡΑΤΣΟΜΠΑΝΗΣ

ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΙΣ
ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024

Σελίδα 1 από 40





ΔΗΜΟΚΡΑΤΗΣ ΚΑΡΑΤΣΟΜΠΙΑΝΗΣ

ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Μέλφος

© Δημοκράτης Καρατσομπάνης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Κοιτασματολογίας,
2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΕΣ
ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥΣ– *Διπλωματική Εργασία*

© Dimokratis Karatsompanis, School of Geology, Dept. of Minerology, 2024

All rights reserved.

METALS USED IN RECHARGEABLE BATTERIES AND THEIR DEPOSITS
– *Bachelor Thesis*



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

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

Εικόνα Εξωφύλλου : NewsCenterMaine



Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ.....	9
3. ΛΙΘΙΟ	12
3.1 ΕΞΟΡΥΞΗ ΛΙΘΙΟΥ	14
3.2 ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΛΙΘΙΟΥ	18
3.3 ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	20
4. ΝΙΚΕΛΙΟ	21
4.1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ	22
4.2 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ	23
4.3 ΕΞΟΡΥΞΗ ΝΙΚΕΛΙΟΥ	25
5. ΚΟΒΑΛΤΙΟ.....	29
6. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ	34
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	37



Η διπλωματική εργασία εξετάζει τα κύρια μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, συγκεκριμένα το λίθιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο, καθώς και τα κοιτάσματά τους παγκοσμίως. Η εργασία εστιάζει στη σημασία αυτών των μετάλλων για την ενεργειακή αποθήκευση και τη μελλοντική ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης, λαμβάνοντας υπόψη τη σπανιότητα και τη στρατηγική τους σημασία για την παγκόσμια αγορά. Αναλύεται η εξόρυξη και η διάθεση των συγκεκριμένων μετάλλων, ενώ δίνεται έμφαση στην ανακύκλωση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών ως μέσο για τη μείωση της εξάρτησης από τα πρωτογενή κοιτάσματα και τη βιωσιμότητα του κλάδου. Η εργασία καταλήγει ότι η αυξανόμενη ζήτηση για μπαταρίες θα απαιτήσει νέες στρατηγικές για τη διαχείριση των πόρων και την ανακύκλωση, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της βιώσιμης ανάπτυξης.

ABSTRACT

This thesis examines the main metals used in rechargeable batteries, specifically lithium, nickel, and cobalt, and their major global deposits. It highlights the importance of these metals for energy storage and the increasing demand from the electric vehicle industry, because of their limited availability and strategic importance. The study discusses the mining methods and the supply of these metals, emphasizing the role of recycling as a key solution to reduce reliance on raw materials and support sustainability. In conclusion, the growing demand for batteries calls for improved resource management strategies and increased recycling efforts to ensure sustainable development and minimize environmental impact.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας ο κόσμος βρίσκεται στα μέσα μιας ουσιαστικής τεχνολογικής μετάβασης. Καθώς καταργείται η παραγωγή ενέργειας με την χρήση ορυκτών πόρων, λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων, παρατηρείται μια στροφή σε εναλλακτικές μορφές παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Βάσει εκτιμήσεων μέχρι το έτος 2040 προβλέπεται ότι η μισή παραγόμενη ενέργεια θα προέρχεται από εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Η αυξανόμενη χρήση συσκευών όπως ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, tablet και κινητό καθώς επίσης και το στοίχημα της ηλεκτροκίνησης στα αυτοκίνητα ακόμα και στα στρατιωτικά μη επανδρωμένα οχήματα καθιστά την αξία ορισμένων μετάλλων όπως το λίθιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο ιδιαίτερα σημαντική λόγω και της σχετικής σπανιότητάς τους (Demirbas, 2009).

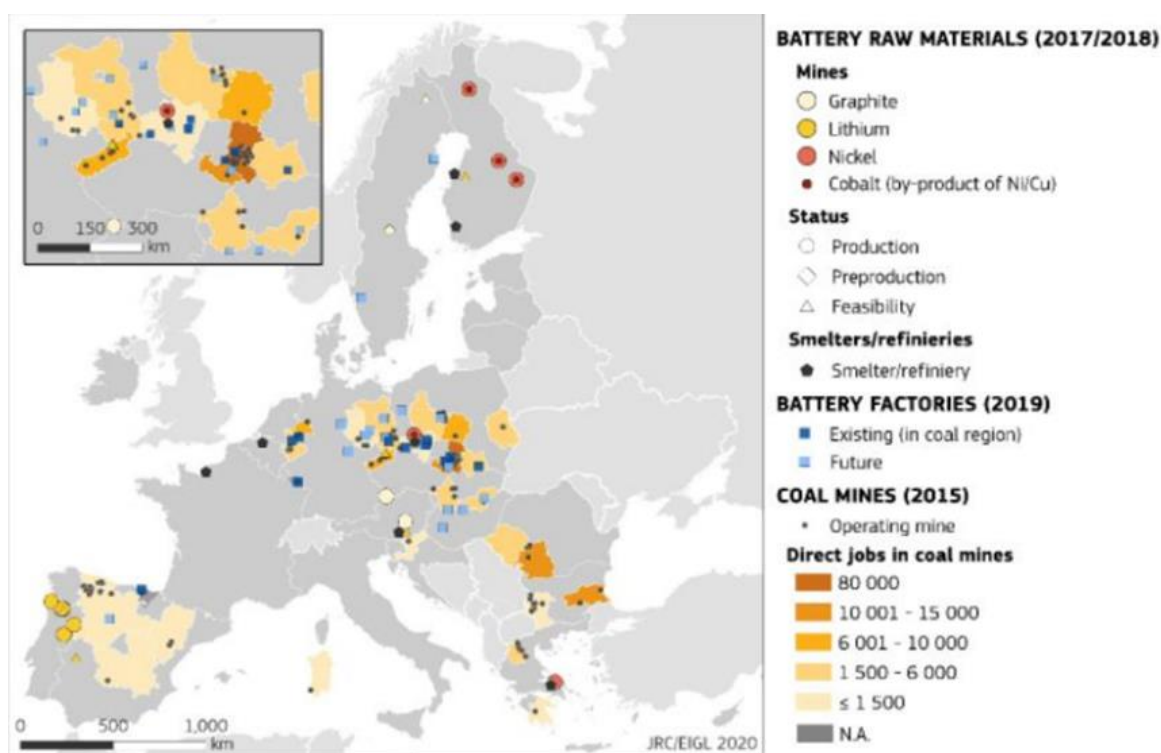
Η γρήγορη ανάπτυξη της βιομηχανίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προβλέπεται να αυξήσει τη ζήτηση για μπαταρίες, η οποία, με τη σειρά της, οδηγεί την παγκόσμια αγορά μετάλλων μπαταριών. Η παγκόσμια αγορά μετάλλων μπαταρίας αποτιμήθηκε σε 11,3 δισ. δολάρια το 2019 και αναμένεται να φτάσει τα 20 δισ. δολάρια. 5 δισ. έως το 2027, σημειώνοντας αύξηση με 8,2% από το 2020 έως το 2027, σύμφωνα με την Έρευνα Παγκόσμιας Αγοράς για το 2020 (Market Research Report, 2020).

Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα υλικά πρώτων υλών στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι τα μέταλλα του λιθίου, του νικελίου και του κοβαλτίου. Η σημασία τους μπορεί να αποδοθεί σε τρεις κύριους παράγοντες. Αρχικά, η έλλειψη η οποία παρουσιάζουν η οποία μπορεί να επηρεάσει τον εφοδιασμό τους. Παρότι το νικέλιο έχει μια πιο διαφοροποιημένη αγορά, δεν παρουσιάζει τέτοιου είδους εμπόδια, όμως το ίδιο δεν ισχύει για δεκαετίες για το λίθιο και ιδιαίτερα για το κοβάλτιο. Το κοβάλτιο ταξινομήθηκε ως CRM στις εκθέσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τις κρίσιμες πρώτες ύλες το 2010, το 2014 και το 2017 (European Commission, 2010, 2014, 2017). Το δεύτερο στοιχείο είναι η σχετική, αλλά συστηματική, απουσία διαθέσιμων στο κοινό πληροφοριών σχετικά με τις προαναφερθείσες πρώτες ύλες. Ο τρίτος και ίσως ο πιο βασικός παράγοντας είναι η μεγάλη αναγκαιότητα του νικελίου, του λιθίου και του κοβαλτίου στην παραγωγή μπαταριών ιόντων λίθου. Η ποσότητα κάθε πρώτης ύλης που απαιτείται για την παραγωγή μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου ποικίλλει ανάλογα με τον

τύπο της. Ωστόσο, όλα αυτά απαιτούνται για την παραγωγή των πιο διαδεδομένων τύπων μπαταριών ιόντων λιθίου στην τρέχουσα παγκόσμια αγορά (Nicholson and Evans, 1998; Nazri and Pistoia, 2008; Naumov and Naumova, 2010; Olivetti et al., 2017)

Η αύξηση των αποβλήτων από μπαταρίες και ο υψηλός κίνδυνος για την ασφάλεια της προμήθειας υλικών λόγω των διεθνών εμπορικών σχέσεων πιθανότατα θα περιορίσουν την ανάπτυξη της παγκόσμιας αγοράς των μετάλλων για μπαταρίες. Αντίθετα, οι αυξημένες επενδύσεις για την ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων και αγροτικών περιοχών αναμένεται να προσφέρουν νέες ευκαιρίες ανάπτυξης για τους κύριους παράγοντες της αγοράς. Επιπλέον, η αυξανόμενη ζήτηση για ενεργειακή απόδοση στις σύγχρονες καταναλωτικές συσκευές προβλέπεται να δημιουργήσει αποδοτικές ευκαιρίες για την επέκταση της παγκόσμιας αγοράς.

Η παγκόσμια αγορά μετάλλων μπαταριών (Εικόνα 1) κατανέμεται ανάλογα με τους τύπους μετάλλων λίθιο, κοβάλτιο, νικέλιο και άλλα., τις εφαρμογές και τις περιοχές.



Εικόνα 1: Ορυχεία πρώτων υλών μπαταριών, εργοστάσια μπαταριών και ανθρακωρυχεία (EC, 2020).

2. ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Βιωσιμότητα σημαίνει αποφυγή της εξάντλησης των φυσικών πόρων για τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας. Η αιφόρος ανάπτυξη αφορά την κάλυψη των αναγκών του παρόντος χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες. Αν μεταφράσουμε αυτούς τους ορισμούς στις μπαταρίες, μια βιώσιμη μπαταρία θα πρέπει να κατασκευάζεται χωρίς να εξαντλούνται οι φυσικοί πόροι, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι θα είναι διαθέσιμοι και προσιτοί για πολλές γενιές στο μέλλον.

Η βιωσιμότητα στις μπαταρίες είναι ένα πολύπλοκο ζήτημα, στενά συνδεδεμένο με την εξάντληση των φυσικών πόρων, αλλά παράλληλα υπερβαίνοντας το κατά πολύ. Για να αξιολογήσουμε καλύτερα τη βιωσιμότητα μιας μπαταρίας, πρέπει να εξετάσουμε όλα τα στάδια ζωής της (Εικόνα 2α), συμπεριλαμβανομένης της αλυσίδας εφοδιασμού πρώτων υλών, της κατασκευής των εξαρτημάτων της μπαταρίας (συλλέκτες ρεύματος, ενεργά υλικά ηλεκτροδίων, συνδετικά, διαλύτες, διαχωριστικό, ηλεκτρολύτες, κύτταρα), της συναρμολόγησης όλων αυτών των εξαρτημάτων για την κατασκευή του κυττάρου και της συσκευασίας, και της φάσης χρήσης που περιλαμβάνει την απόδοση, τη διάρκεια ζωής και τις επιλογές στο τέλος της ζωής της. Μόνο όταν υπάρχει θετική ανάπτυξη σε όλα αυτά τα στάδια της μπαταρίας, μπορούμε να επιτύχουμε μια πραγματικά βιώσιμη μπαταρία. Η βιωσιμότητα πρέπει να συμβαδίζει με την οικονομική προσιτότητα (χαμηλό κόστος) και την απόδοση (Εικόνα 2β).

Βασιζόμενοι στην τρέχουσα βιβλιογραφία για τις μπαταρίες και τις εμπορικές δραστηριότητες στην κατασκευή μπαταριών, φαίνονται τρεις γενιές μπαταριών:

- Gen Now,
- Gen Next και
- Gen Future (Εικόνα 2γ).

Οι Gen Now είναι οι αναδυόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου (LIBs) με βελτιωμένη απόδοση όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα, την ασφάλεια και τον κύκλο ζωής, αυτές οι χημικές συνθέσεις μπαταριών θα αντικαταστήσουν σταδιακά τις τρέχουσες εμπορικές LIBs. Θα βασίζονται σε καθόδους υψηλής τάσης με μειωμένη περιεκτικότητα σε κοβάλτιο, όπως (NMCs) $[\text{Li}(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Co})\text{O}_2]$ και NCA $[\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Al})\text{O}_2]$, νέες ανόδους όπως κράματα με Si, νέες χημικές συνθέσεις λιθίου όπως Li-S, καθώς και μπαταρίες

στερεάς κατάστασης που βασίζονται σε μεταλλικές ανόδους λιθίου και μπαταρίες μετάλλου λιθίου με ανόδους από εξαιρετικά λεπτό λίθιο. Αν και αναφέρονται ως Gen Now σε αυτή την προοπτική, αυτές οι νέες χημικές συνθέσεις λιθίου θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται και να συνυπάρχουν παράλληλα με τις Gen Next και Gen Future (Εικόνα 2γ). Η Gen Now προσφέρει καλύτερες προοπτικές όσον αφορά τη βιωσιμότητα σε σύγκριση με τις τρέχουσες χημικές συνθέσεις LiCoO_2 (LCO), τόσο σε σχέση με την αφθονία των υλικών (π.χ., νικέλιο αντί για κοβάλτιο, καθόδους θείου για Li-S καθώς και μειωμένη ποσότητα λιθίου για τις μπαταρίες μετάλλου λιθίου με μηδενική περίσσεια λιθίου) όσο και με τη βελτιωμένη ασφάλεια λόγω της πρόληψης της ανάπτυξης δενδριτών λιθίου (μέσω της ανάπτυξης της επόμενης γενιάς στερεών ηλεκτρολυτών καθώς και της μείωσης του πάχους των ανόδων λιθίου στις μπαταρίες μετάλλου).

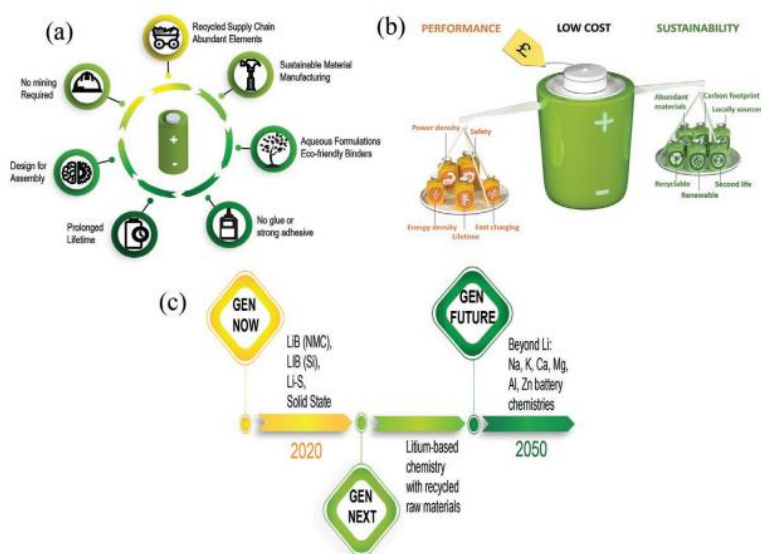
Οι Gen Next είναι η επόμενη γενιά μπαταρίες που θα κατασκευάζονται με ανακυκλωμένα υλικά/εξαρτήματα από τις μπαταρίες Gen Now. Αυτή η γενιά μπαταριών θα απαιτήσει την ευρεία εφαρμογή της ανακύκλωσης σε βιομηχανική κλίμακα, ώστε να επιτρέπεται η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση κρίσιμων πρώτων μετάλλων σε νέες μπαταρίες.

Οι Gen Future είναι οι πραγματικά βιώσιμες μπαταρίες του μέλλοντος, βασισμένες σε χημικές συνθέσεις πέρα από το λίθιο, που στηρίζονται σε άφθονα και παγκοσμίως διαθέσιμα στοιχεία. Αυτές οι μπαταρίες μπορούν είτε να στοχεύουν στην σταθερή αποθήκευση ενέργειας είτε στη μεταφορά μικρών αποστάσεων (π.χ., βασισμένες σε ιόντα νατρίου ή καλίου) είτε να έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που τις καθιστά κατάλληλες για μεταφορά μεγάλων αποστάσεων (π.χ., πολυδύναμες ιονικές μπαταρίες μαγνησίου, ψευδαργύρου, ασβεστίου, αλουμινίου).

Είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια πότε θα είναι εμπορικά διαθέσιμες αυτές οι διαφορετικές γενιές μπαταριών, καθώς αυτό θα εξαρτηθεί από τις επιχειρηματικές στρατηγικές των διάφορων κατασκευαστών μπαταριών, τη μελλοντική διαθεσιμότητα και το κόστος των πρώτων υλών (ανακυκλωμένων και μη), καθώς και από τις επενδύσεις των διαφόρων κυβερνήσεων στην έρευνα και ανάπτυξη για τις μελλοντικές γενιές μπαταριών. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πιθανότατα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (LIBs) θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται και να εξελίσσονται για πολλά χρόνια, και ότι οι Gen Next και Gen Future δεν θα αντικαταστήσουν τις LIBs ή άλλες χημικές συνθέσεις

βασισμένες στο λίθιο (Gen Now), αλλά θα διαφοροποιήσουν την αγορά των μπαταριών ανάλογα με τη ζήτηση για διάφορες εφαρμογές, μειώνοντας παράλληλα την πίεση που συνδέεται με την εξάρτηση από κρίσιμα υλικά.

Ανεξαρτήτως του πότε ακριβώς θα είναι διαθέσιμες αυτές οι νέες γενιές μπαταριών σε υψηλό επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας, αυτό που είναι αδιαμφισβήτητο είναι ο καθοριστικός τους ρόλος στην αντιμετώπιση της μεγαλύτερης πρόκλησης που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα σήμερα - την κλιματική αλλαγή. Οι μπαταρίες είναι σημαντικές για την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας των Παρισίων και βοηθούν στη μετάβασή μας προς μηδενικές εκπομπές έως το 2050, όπως έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και πολλές κυβερνήσεις παγκοσμίως. Επιπλέον, δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας, φέρνουν σημαντικά οικονομικά έσοδα, εξασφαλίζουν την παγκόσμια πρόσβαση στην ενέργεια και επιτρέπουν μια αξιόπιστη και δίκαιη αλυσίδα εφοδιασμού για την επίτευξη αρκετών από τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ.

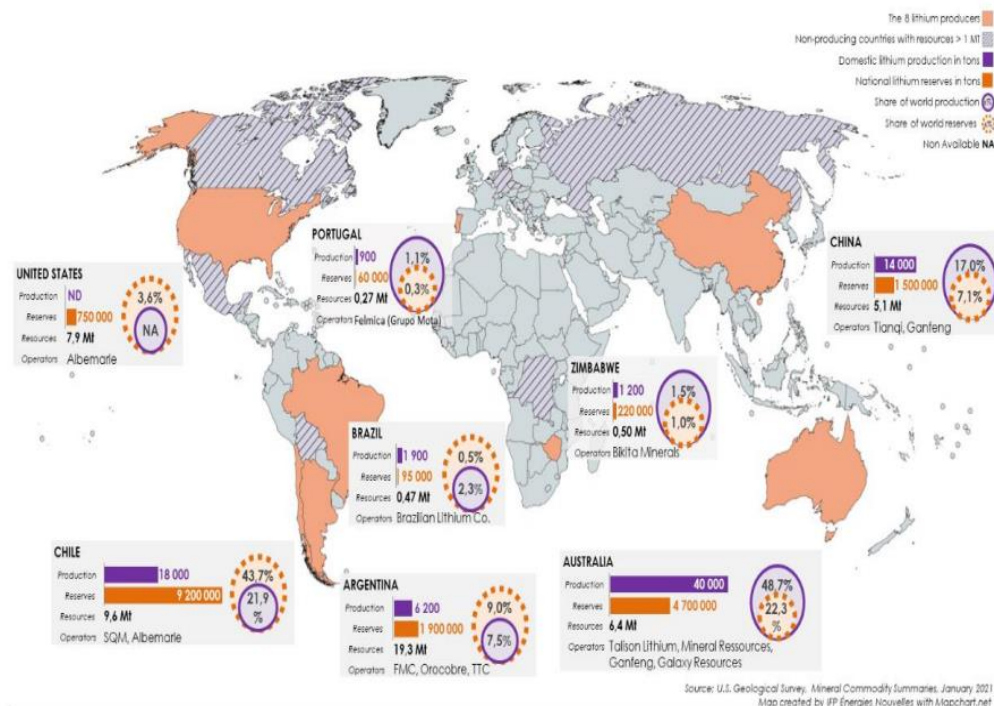


Εικόνα 2: α) Κύκλοι ζωής μιας βιώσιμης μπαταρίας. β) Ιδανική εικόνα μιας βιώσιμης μπαταρίας που ισορροπεί τον οικολογικό σχεδιασμό με το κόστος και την απόδοση. γ) χάρτης για τις μελλοντικές βιώσιμες μπαταρίες.

3. ΛΙΘΙΟ

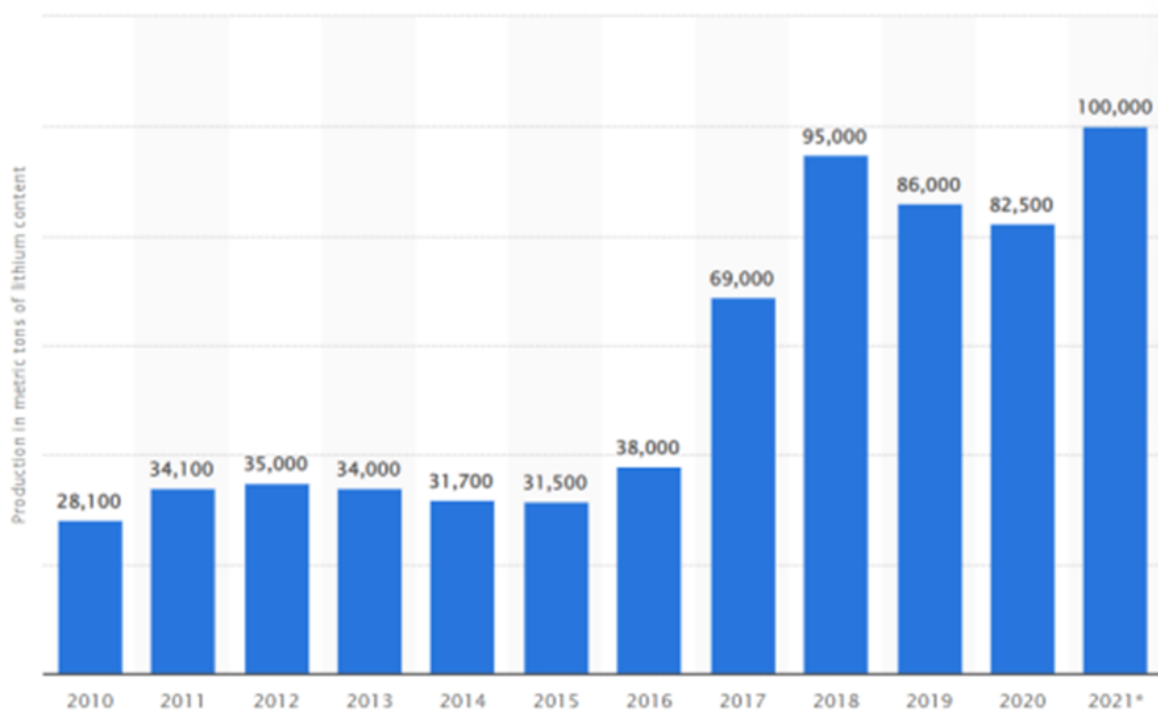
Η αύξηση της παραγωγής λιθίου συνδέεται φυσικά με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτησή του, ιδιαίτερα λόγω της αυξανόμενης χρήσης σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα και μπαταρίες ιόντων λιθίου. Από το 2007 έως το 2020, η ζήτηση λιθίου για μπαταρίες αναμένεται να αυξηθεί κατά 34%. Υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με την επάρκεια των παγκόσμιων αποθεμάτων λιθίου για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση, με ορισμένες πηγές να προβλέπουν υπέρβαση της ζήτησης έναντι της διαθέσιμης προσφοράς αν δεν επενδυθεί σημαντικά στην ανακύκλωση (Kesler et al., 2012; Sonoc and Jeswiet, 2014; Martin et al., 2017; Mohammadi, 2018).

Παρά τις αντιφατικές απόψεις, οι θετικότερες προβλέψεις υποστηρίζουν ότι η προσφορά λιθίου δεν θα αποτελέσει κρίσιμο παράγοντα περιορισμού για τη βιομηχανική ανάπτυξη, λόγω της υπάρχουσας διαθεσιμότητας ανεκμετάλλευτων κοιτασμάτων λιθίου σε παγκόσμιο επίπεδο (Εικόνα 3.1), καθώς και της δυνατότητας αντικατάστασης του λιθίου με άλλες πρώτες ύλες στην τεχνολογία μπαταριών (Narins, 2017). Ένα από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα λιθίου βρίσκεται στη Βολιβία.



Εικόνα 3: Παγκόσμια παραγωγή και αποθέματα λιθίου το 2020 (σε τόννους) (USGS, 2021).

Όσον αφορά την εξέλιξη των τιμών του λιθίου στις αρχές της δεκαετίας του 1990, ήταν σχετικά σταθερές. Αλλά το 1995, η είσοδος της SQM, μίας από τις μεγαλύτερες εταιρείες παραγωγής λιθίου παγκοσμίως, στην αγορά άλλαξε τα δεδομένα και προκάλεσε πτώση των τιμών. Το επόμενο σημαντικό σημείο αύξησης των τιμών παρατηρήθηκε στις αρχές έως τα τέλη της δεκαετίας του 2000, λόγω της οικονομικής ανάπτυξης στην Κίνα, πριν την κρίση του 2008 που οδήγησε σε νέα πτώση των τιμών. Η άνοδος τιμών μεταξύ των ετών 2015 και 2016 οφείλεται σε προσωρινή μείωση της παγκόσμιας παραγωγής λιθίου. Από τότε, οι τιμές έχουν συνεχίσει να αυξάνονται σε ασταθή επίπεδα, φτάνοντας τα 16.500 δολάρια ΗΠΑ ανά τόνο το 2018. Οι προβλέψεις για το μέλλον δείχνουν την πιθανότητα ανόδου των τιμών (Narins, 2017; Metalary, 2019)



Εικόνα 4: Παραγωγή Λιθίου από ορυχεία παγκοσμίως από το 2010 έως το 2021 (Statista, 2022).

3.1 ΕΞΟΡΥΞΗ ΛΙΘΙΟΥ

Το λίθιο είναι σχετικά άφθονο στη Γη, όντας το 25ο πιο άφθονο στοιχείο (Taylor and McLennan, 1985). Το λίθιο βρίσκεται σε περισσότερα από 150 ορυκτά, σε αργίλους, σε πολλές ηπειρωτικές άλμες, σε γεωθερμικά ύδατα και σε θαλασσινό νερό. Η συγκέντρωση λιθίου στο θαλασσινό νερό είναι πολύ χαμηλή, με μέσο όρο 0,17 ppm. Τα γεωθερμικά ύδατα παγκοσμίως παρουσιάζουν συγκεντρώσεις από 1 έως 100 ppm. Αν και τα κοιτάσματα λιθίου είναι ευρέως διανεμημένα παγκοσμίως, λίγα από αυτά είναι αρκετά μεγάλα και συγκεντρωμένα ώστε να επιτρέπουν πιθανή εκμετάλλευση. Μόνο μερικά υψηλής ποιότητας ορυκτά λιθίου και άλμες είναι οι τρέχουσες εμπορικές δραστηριότητες εξόρυξης λιθίου (Kesler et al., 2012; Vikström et al., 2013; Kunasz, 2006).

Το ενδιαφέρον για την ανακύκλωση των μπαταριών λιθίου έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω περιβαλλοντικών ανησυχιών και της ανάγκης για βιώσιμη ανάπτυξη. Ωστόσο, η ανακύκλωση δεν είναι ακόμη οικονομικά ελκυστική σε σύγκριση με την εξόρυξη των πρώτων υλών. Υπάρχουν πλέον εγκαταστάσεις ανακύκλωσης στις ΗΠΑ, τον Καναδά, το Βέλγιο, τη Γερμανία και την Ιαπωνία. Παρ' όλα αυτά, η διαθεσιμότητα λιθίου από την ανακύκλωση είναι ασήμαντη σε σύγκριση με τις εξορυκτικές πρώτες ύλες (U.S. Geological Survey, 2018; Jaskula, 2017).

Οι πόροι και τα αποθέματα λιθίου διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την πηγή, αν και υπάρχει ομοφωνία ότι οι πόροι λιθίου σε άλμη είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτούς σε σκληρά πετρώματα. Οι πιο πρόσφατοι αριθμοί από την US Geological Survey υποδεικνύουν ότι οι συνολικοί πόροι λιθίου (άλμη + σκληρός βράχος) ανέρχονται σε 54,1 εκατομμύρια τόνους (U.S. Geological Survey, 2018). Το 2013 έγινε αναφορά στους εκτιμώμενους ελάχιστους και μέγιστους πόρους για το λίθιο σε σκληρό βράχο σε 12,8 εκατομμύρια τόνους και 30,7 εκατομμύρια τόνους αντίστοιχα, ενώ οι αριθμοί για τα κοιτάσματα άλμης αναφέρθηκαν ως 21,3 εκατομμύρια τόνους και 65,3 εκατομμύρια τόνους, αντίστοιχα για τις ελάχιστες και μέγιστες εκτιμήσεις (Kunasz, 2006; Kesler et al., 2012; Vikström et al., 2013; Munk et al., 2016; U.S. Geological Survey, 2018).

Hard rock

Η εξαγωγή λιθίου από σκληρά πετρώματα απαιτεί ένα ευρύ φάσμα υδρομεταλλουργικών διεργασιών, σε αντίθεση με την εξαγωγή λιθίου από άλμες. Η

εκμετάλλευση συνήθως προσαρμόζεται για ένα συγκεκριμένο ορυκτό, δεδομένου ότι αυτά διαφέρουν σημαντικά στη χημική τους σύσταση και σε άλλες ιδιότητες (Vikström et al., 2013). Οι αναφερόμενες διεργασίες περιλαμβάνουν τη θραύση και τη θέρμανση του μεταλλεύματος για τη μετατροπή της κρυσταλλικής φάσης του λιθίου από άλφα σε βήτα. Αυτό επιτρέπει στο λίθιο που υπάρχει στο μετάλλευμα να αντικατασταθεί από νάτριο. Το προκύπτον συμπύκνωμα ψύχεται και αλέθεται σε λεπτή σκόνη πριν αναμιχθεί με θειικό οξύ και ψηθεί ξανά. Ένα σύστημα παχυντήρα-φίλτρου διαχωρίζει τα απόβλητα από το συμπυκνωμένο διάλυμα, ενώ η καθίζηση απομακρύνει το μαγνήσιο και το ασβέστιο από αυτό το διάλυμα. Τέλος, προστίθεται ανθρακική σόδα και το ανθρακικό λίθιο κρυσταλλώνεται, φιλτράρεται και ξηραίνεται με καθαρότητα κοντά στο 99% (Habashi, 1997; Barbosa et al., 2014; Meshram et al., 2014 Hien-Dinh et al., 2015; Lee, 2015;).

Αν και το κόστος για την εξαγωγή λιθίου από πετρώματα εκτιμάται ότι είναι περίπου διπλάσιο από αυτό του λιθίου που εξάγεται από άλμες, αυτή η μέθοδος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται.

Η Αυστραλία είναι επί του παρόντος ο κορυφαίος παραγωγός λιθίου παγκοσμίως, καθώς δεν υπάρχει αρκετή προσφορά λιθίου από άλμες (Jaskula, 2017, U.S. Geological Survey, 2018). Όπως ήδη αναφέραμε, οι συνολικοί πόροι λιθίου σε άλμες είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτούς σε σκληρά πετρώματα. Επιπλέον, οι συγκρίσεις δείχνουν ότι ένα μέσο κοίτασμα άλμης λιθίου είναι κατά μέσο όρο δέκα φορές μεγαλύτερο από ένα μέσο κοίτασμα σκληρού πετρώματος λιθίου (1,45 εκατομμύρια τόνοι Li έναντι 0,11 εκατομμύρια τόνοι Li. Παρά αυτές τις συντριπτικές διαφορές, οι πηγματίτες θα συνεχίσουν να εκμεταλλεύονται λόγω της ευρύτερης γεωγραφικής τους κατανομής και, κατά συνέπεια, της μικρότερης ευπάθειάς τους σε διακοπές της προσφοράς (Kesler et al., 2012).

Brines

Οι άλμες μπορούν να περιγραφούν ως ιδιαίτερα αλατούχα διαλύματα, όπου τα συνολικά διαλυμένα στερεά (ανόργανα άλατα) εμφανίζουν πολύ υψηλότερες τιμές από ότι στο θαλασσινό νερό, συνήθως κατά μέσο όρο 170-330 g/L. Οι άλμες μπορούν να είναι άμεσα προσβάσιμες από την επιφάνεια ή βαθιά κάτω από μεγάλους αλατούχους δόμους σε πολύ ξηρές περιοχές. Το λίθιο στις άλμες αναμειγνύεται με μεγάλες

ποσότητες NaCl. Το μεγαλύτερο ποσοστό ανιόντων προέρχεται από το Cl^- , με μικρές ποσότητες CO_3^{2-} , SO_4^{2-} και διάφορων βορικών ενώσεων. Εκτός από το Na^+ και το Li^+ , τα κατιόντα που υπάρχουν στις άλμες περιλαμβάνουν τα K^+ , Mg^{2+} και Ca^{2+} , μεταξύ άλλων. Η περιεκτικότητα σε λίθιο στις εξορύξιμες άλμες κυμαίνεται από 0,01 έως 0,2%. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι παγκοσμίως, οι άλμες λιθίου είναι κυρίως συγκεντρωμένες σε μια μικρή περιοχή της Νότιας Αμερικής, συχνά αναφερόμενη ως το Τρίγωνο του Λιθίου. Αυτή η περιοχή, η οποία εκτείνεται μεταξύ βορειοδυτικής Αργεντινής, νοτιοδυτικής Βολιβίας και βόρειας Χιλής, θα μπορούσε ενδεχομένως να αντιπροσωπεύει έως και το 80% των παγκόσμιων πόρων λιθίου σε άλμες, με πιο ακριβή στοιχεία να αναμένονται από γεωλογικές έρευνες (Houston et al., 2011). Δεύτερη μετά το Τρίγωνο του Λιθίου, η Κίνα έχει μεγάλη συγκέντρωση αλμυρών λιμνών στο οροπέδιο Qinghai-Tibet. Μικρότερα κοιτάσματα βρίσκονται στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες και στη Βόρεια Αφρική (Kesler et al., 2012; Talens Peiró et al., 2013; Vikström et al., 2013).

Η άλμη λιθίου συγκεντρώνεται με ηλιακή εξάτμιση και άνεμο μέχρι τη συγκέντρωση περίπου των 6000 ppm λιθίου, ενώ στη συνέχεια γίνεται η ανάκτηση. Η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια εξάτμισης της αρχικής άλμης σε διαφορετικές λιμνοθάλασσες με ταυτόχρονη αποξένωση και συλλογή των αλάτων άλλων ιόντων (Na, K, Mg). Όταν το χλωριούχο λίθιο στις λιμνοθάλασσες εξάτμισης φτάνει σε μια βέλτιστη συγκέντρωση, η συγκεντρωμένη άλμη αναρροφάται σε μια μονάδα ανάκτησης ή επεξεργασίας. Χημικά είδη που δεν προκαλούν αυτόματα άλαση στις λιμνοθάλασσες πρέπει να απομακρύνονται με χημική επεξεργασία. Οι βοράτες συνήθως αφαιρούνται με εκχύλιση διαλυτών, ενώ τα κατιόντα μαγνησίου απομακρύνονται με προκαθορισμό με ασβέστη (δείτε παρακάτω). Η συγκεντρωμένη άλμη υποστηρίζεται στη συνέχεια με καρβονικό νάτριο (σόδα), προκειμένου να προκαλέσει άλαση του ανθρακικού λιθίου. Συνήθως, το πρωταρχικό άλας λιθίου επαναδιαλύεται και επανατροφοδοτείται για να φτάσει την επιθυμητή καθαρότητα που απαιτείται για τη βαθμονόηση μπαταριών. Οι συγκεκριμένες λεπτομέρειες της διαδικασίας διαφέρουν φυσικά ανάμεσα σε διαφορετικές μονάδες επεξεργασίας και συνήθως δεν αποκαλύπτονται από τις μεταλλευτικές εταιρείες (An et al., 2012, Zhang et al., 2012, Peiró et al., 2013, Border and Sawyer, 2014, T. Choubey et al., 2016, Swain, 2017).

Συνολικά, αυτά τα βήματα εξάτμισης/αλάσης διαρκούν από 12 έως 24 μήνες από την έναρξη της διαδικασίας εξαγωγής (άντλησης της άλμης από τους υπόγειους υδροφορείς). Επειδή οι άλμες από αλμυρές λίμνες εμφανίζονται φυσικά σε υψηλό υψόμετρο και σε περιοχές με εξαιρετικά χαμηλές βροχοπτώσεις, η ηλιακή/ανεμική εξάτμιση είναι μια οικονομικά αποδοτική μέθοδος για τη συγκέντρωση των άλμων και την αλάση των αλάτων. Το καρβονικό λίθιο είναι κρίσιμο ενδιάμεσο στοιχείο στην αγορά του λιθίου, επειδή μπορεί να μετατραπεί σε συγκεκριμένα βιομηχανικά άλατα και χημικά προϊόντα, ή να επεξεργαστεί σε μέταλλο λιθίου. Η τεχνολογία εξάτμισης που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του είναι μια διαδικασία χαμηλού κόστους με υψηλό κέρδος. Συγκεκριμένα, υπάρχει σχετική συμφωνία ότι η τρέχουσα τεχνολογία έχει σχετικά χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (British Geological Service, 2016), σε σύγκριση, για παράδειγμα, με την εξόρυξη και επεξεργασία μετάλλων (χρυσός, ασήμι, μόλυβδος, κλπ.) από ορυκτά, η οποία έχει οδηγήσει σε πολλές ομάδες περιβαλλοντολόγων να συσχετίζουν τη λέξη "εξόρυξη" με έντονη ρύπανση.

Αναφορικά με τις έννοιες εξορυκτική και μεταλλευτική διαδικασία, είναι δύο έννοιες που έχουν συνδεθεί με την επιτυχημένη εκμετάλλευση ενός μεταλλευτικού αποθέματος, δηλαδή τη φυσική απομάκρυνση των ορυκτών από το κοίτασμα. Για το λίθιο, αυτό συμβαίνει με την άντληση της άλμης από τις υπόγειες αποθέσεις. Μετά την επιτυχημένη μεταλλευτική διαδικασία, οι ορυκτοί πόροι χρειάζονται επεξεργασία για να αποκτήσουν ένα συγκεκριμένο μεταλλευτικό χαρακτήρα. Στην περίπτωση της άλμης η οποία είναι ένα σύνθετο μείγμα πολλών ιόντων, όπου το λίθιο είναι μόνο ένα μικρό συστατικό, θα πρέπει να υποστεί επεξεργασία για την παραγωγή καθαρών αλάτων λιθίου. Όταν ορισμένοι συγγραφείς αναφέρονται σε νέες μεθόδους εξαγωγής λιθίου, εννοούν πραγματικά νέες μεθόδους επεξεργασίας άλμης, δηλαδή μεθόδους επεξεργασίας διαφορετικές από την εξάτμιση. Πιστεύεται ότι υπάρχει πολύς χώρος για βελτίωση όσον αφορά τις τεχνικές επεξεργασίας άλμης, όπως η αιχμή αλάτων λιθίου, η ανάκτηση, ο διαχωρισμός ή η αλάση από άλμες. Έτσι γίνεται κατανοητό πως το πρώτο βήμα για μια επιτυχή παραγωγή αλάτων λιθίου θα παραμείνει η άντληση της άλμης, ακολουθώντας σχεδόν την ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται επί του παρόντος.

3.2 ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΛΙΘΙΟΥ

Το λίθιο συναντάται σε σημαντικές ποσότητες στη φύση, και οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του βρίσκονται σε συγκεκριμένες χώρες, γεγονός που τους δίνει σημαντική οικονομική δύναμη καθώς μπορούν να αξιοποιούν αυτά τα αποθέματα. Τα μεγαλύτερα οικονομικά αξιοποιήσιμα κοιτάσματα εντοπίζονται στην Αργεντινή, την Αυστραλία, τη Χιλή, τις ΗΠΑ, τη Βολιβία και την Κίνα, και κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: κοιτάσματα άλμης σε αλμυρές λίμνες, κοιτάσματα σε πηγματίτες, και κοιτάσματα πλούσια σε λίθιο άργιλοι ή ιζηματογενείς αποθέσεις.

Τα κοιτάσματα που εντοπίζονται στις άλμες βρίσκονται σε ηφαιστειακές περιοχές και εντός κλειστών λεκανών, όπου οι συνθήκες έντονης εξάτμισης και χαμηλών βροχοπτώσεων ευνοούν τη συγκέντρωση λιθίου. Παρ' όλα αυτά, η συγκέντρωση του λιθίου στα κοιτάσματα αυτά είναι σχετικά χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ 200 και 4.000 mg/L. Επιπλέον, η συγκέντρωση του λιθίου διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία εντός της λίμνης, γεγονός που αυξάνει το κόστος και τον χρόνο που απαιτούνται για την εξόρυξη.

Τα κοιτάσματα της Νότιας Αμερικής βρίσκονται σε περιοχές με υψηλό υψόμετρο, όπου η εξάτμιση συντελεί στην ανάπτυξη κοιτασμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε λίθιο. Για παράδειγμα, οι περιοχές Salar de Olaroz και Salar del Hombre Muerto στην Αργεντινή περιέχουν μεταξύ 620 και 690 mg/L λιθίου, ενώ στο Salar de Atacama στη Χιλή οι συγκεντρώσεις είναι ακόμη υψηλότερες, φτάνοντας περίπου τα 1500 mg/L. Οι περιοχές αυτές συνιστούν το λεγόμενο «τρίγωνο του λιθίου» ανάμεσα στην Αργεντινή, τη Βολιβία και τη Χιλή, το οποίο παράγει περίπου το 59% του παγκόσμιου λιθίου. Εκτός από τη Νότια Αμερική, η Κίνα φιλοξενεί τα δεύτερα μεγαλύτερα κοιτάσματα λιθίου, τα οποία εντοπίζονται σε τρεις αλμυρές λίμνες: την Chaerhan, την West Taijinar και την Zhabuye. Οι συγκεντρώσεις λιθίου σε αυτές τις λίμνες κυμαίνονται από 210 έως 350 mg/L στο Chaerhan, από 100 έως 300 mg/L στο West Taijinar, και έως και 1000 mg/L στη Zhabuye.

Στις ΗΠΑ, υπάρχει επίσης ένα σημαντικό κοιτάσμα στην κοιλάδα Clayton με συγκέντρωση λιθίου περίπου στα 230 mg/L. Πρόσφατα, ένα μεγάλο κοιτάσμα ανακαλύφθηκε στη Σιβηρία, που εκτείνεται σε μια τεράστια περιοχή 4.400.000 km² και έχει συγκέντρωση λιθίου περίπου 600 mg/L. Επιπρόσθετα, κοιτάσματα λιθίου βρέθηκαν

και σε αποθέσεις υδρογονανθράκων στην περιοχή Gulf Coast των ΗΠΑ με συγκέντρωση 370 mg/L, και οι έρευνες συνεχίζονται για την ανακάλυψη νέων κοιτασμάτων.

Οι καλύτερες συγκεντρώσεις λιθίου σε ορυκτά βρίσκονται στους πηγματίτες, οι οποίοι είναι πυριγενή πετρώματα που ανήκουν στην κατηγορία των φλεβικών πετρωμάτων. Το λίθιο σε αυτά τα κοιτάσματα έχει πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις σε σύγκριση με τα κοιτάσματα άλμης και χαρακτηρίζεται από καλύτερη ποιότητα και υψηλότερη απόδοση (60-70%). Παρ' όλα αυτά, λόγω της σκληρότητας των πηγματιτών (π.χ. γρανιτικοί πλουτωνίτες), η πρόσβαση στις φλέβες που περιέχουν το λίθιο είναι δύσκολη και συνεπάγεται με αυξημένο κόστος εξόρυξης. Παρά τις προκλήσεις, τα κοιτάσματα πηγματιτών παραμένουν στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος, δεδομένης της μεγάλης γεωγραφικής τους εξάπλωσης σε όλο τον κόσμο, σε αντίθεση με τα κοιτάσματα άλμης. Το κύριο ορυκτό στους πηγματίτες που περιέχει λίθιο είναι ο σποδοιμένης ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$). Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα σποδοιμένη στον κόσμο βρίσκονται στην Αυστραλία, με συνολικό απόθεμα που ισοδυναμεί με 5,58 Mt λίθιο. Οι κυριότερες περιοχές στην Αυστραλία περιλαμβάνουν: Greenbushes (1,34 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 2,4% Li), Mount Holland (1,32 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,5% Li), Wodgina (1,32 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,21% Li), Pilgangoora-Pilbara (0,91 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,25% Li), Mount Marion (0,49 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,37% Li) και Pilgangoora-Altura (0,2 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,0% Li).

Επιπλέον, κοιτάσματα πηγματιτών βρίσκονται και στον Καναδά σε τέσσερις περιοχές: James Bay (0,26 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,4% Li), Quebec Lithium (0,26 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,2% Li), Rose (0,15 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 0,92% Li) και Whabouchi (0,24 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,4% Li). Άλλα σημαντικά κοιτάσματα αυτής της κατηγορίας εντοπίζονται στη Goulamina (0,64 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1,34% Li) στο Μάλι, στο San Jose στην Ισπανία, καθώς και στις περιοχές Arcadia και Bikita στη Ζιμπάμπουε.

Τέλος, αυξημένες συγκεντρώσεις λιθίου παρατηρούνται και σε αργιλώδη κοιτάσματα, ιδιαίτερα στον σμεκτίτη, αν και αυτά τα κοιτάσματα αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 3% των παγκόσμιων αποθεμάτων λιθίου. Σήμερα, δύο σημαντικά

κοιτάσματα αυτής της κατηγορίας έχουν εντοπιστεί: ένα στη Νεβάδα των ΗΠΑ και ένα στο Μεξικό (Tabelin et al., 2021).

3.3 ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

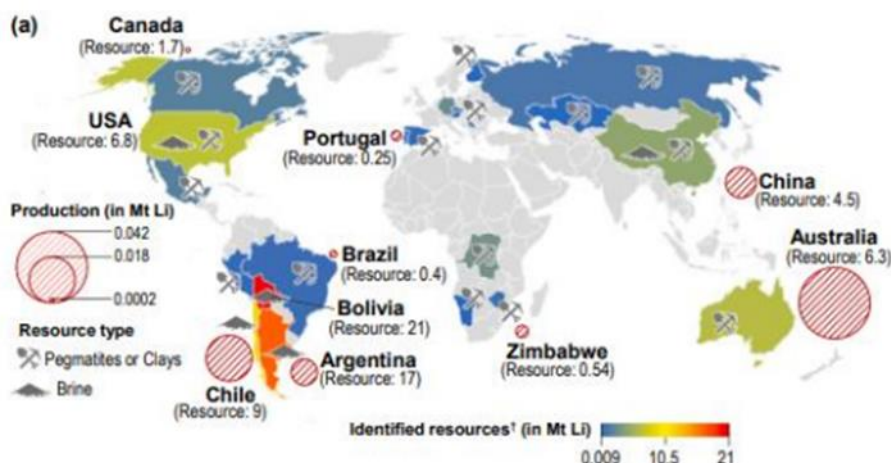
Η μελλοντική προοπτική των πόρων λιθίου αναμένεται να περιλαμβάνει μία συνδυασμένη αύξηση της παραγωγής και από τρία είδη αποθέσεων. Οι αποθέσεις άλμεων, παρά το γεγονός ότι αυτή τη στιγμή είναι οι πιο σημαντικές, αντιμετωπίζουν περιορισμούς που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη κεντροειδών και άλλων αποθέσεων. Οι κεντροειδείς προσφέρουν δυνατότητες για νέες ανακαλύψεις και θα μπορούσαν να διαφοροποιήσουν τις γεωγραφικές πηγές του λιθίου. Αυτή η διαφοροποίηση είναι σημαντική για τη μείωση των γεωπολιτικών κινδύνων που σχετίζονται με τη συγκέντρωση των αποθεμάτων.

Η αυξανόμενη ζήτηση για λίθιο, που οδηγείται από τη διεύρυνση της αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων και την αυξανόμενη χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου σε διάφορες εφαρμογές, υπογραμμίζει την ανάγκη για μια σταθερή και ποικιλόμορφη προσφορά λιθίου. Οι καινοτομίες στις τεχνολογίες εξόρυξης και επεξεργασίας αναμένεται επίσης να παίξουν κρίσιμο ρόλο στην κάλυψη της μελλοντικής ζήτησης. Για παράδειγμα, οι τεχνολογίες άμεσης εξόρυξης λιθίου (DLE), που προσφέρουν πιο αποδοτικές και περιβαλλοντικά φιλικές μεθόδους εξόρυξης λιθίου από άλμες, κερδίζουν έδαφος και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον κλάδο.

Επιπλέον, η ανακύκλωση των μπαταριών ιόντων λιθίου εμφανίζεται ως ζωτικό συστατικό της αλυσίδας προσφοράς λιθίου. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των μπαταριών στο τέλος της ζωής τους, οι αποδοτικές μέθοδοι ανακύκλωσης θα είναι θεμελιώδους σημασίας για την ανάκτηση του λιθίου και άλλων πολύτιμων υλικών, μειώνοντας την εξάρτηση από πρωτογενείς πόρους και μειώνοντας τις επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Ως συμπέρασμα, ενώ οι αποθέσεις άλμης κυριαρχούν προς το παρόν στην παγκόσμια αγορά λιθίου, η έρευνα και ανάπτυξη των κεντροειδών και άλλων τύπων αποθέσεων θα παίξει κρίσιμο ρόλο στην κάλυψη της μελλοντικής ζήτησης. Προόδους στην τεχνολογία εξόρυξης και γεωλογικής έρευνας θα είναι ουσιώδους σημασίας για την εξασφάλιση μιας σταθερής και ποικιλόμορφης προσφοράς λιθίου για τις αυξανόμενες

ανάγκες των βιομηχανιών αποθήκευσης ενέργειας και ηλεκτρικών οχημάτων (Kesler et al., 2012).



Εικόνα 5: Παγκόσμια κατανομή των κοιτασμάτων λιθίου και παραγωγής του έτους 2019 (USGS, 2020).

4. ΝΙΚΕΛΙΟ

Το νικέλιο είναι ένα μεταλλικό στοιχείο με ασημόλευκη, γυαλιστερή εμφάνιση. Είναι το πέμπτο πιο κοινό στοιχείο στη γη και απαντάται εκτενώς στο φλοιό και τον πυρήνα της γης. Το νικέλιο, μαζί με τον σίδηρο, είναι επίσης κοινό στοιχείο στους μετεωρίτες. Το νικέλιο εμφανίζεται φυσικά στο έδαφος και το νερό. Αποτελεί επίσης βασικό θρεπτικό συστατικό για τα φυτά. Ενώ η συγκέντρωση νικελίου στον φλοιό της γης είναι 80 μέρη ανά εκατομμύριο, ο πυρήνας της γης αποτελείται κυρίως από ένα κράμα νικελίου-σιδήρου.



Εικόνα 6: Ορυκτό νικελίου

Το νικέλιο έχει εξαιρετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες, οι οποίες το καθιστούν απαραίτητο σε εκατοντάδες χιλιάδες προϊόντα. Η μεγαλύτερη χρήση του σε κράματα όπως με το χρώμιο και άλλα μέταλλα για την παραγωγή ανοξείδωτων και ανθεκτικών στη θερμότητα χαλύβων.

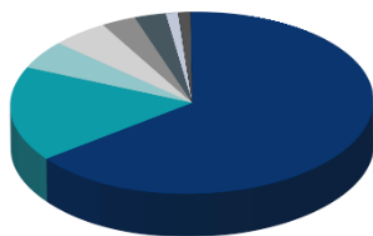


Εικόνα 7:Ιδιότητες του Νικελίου (<https://nickelinstitute.org/en/nickel-applications/>)

4.1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

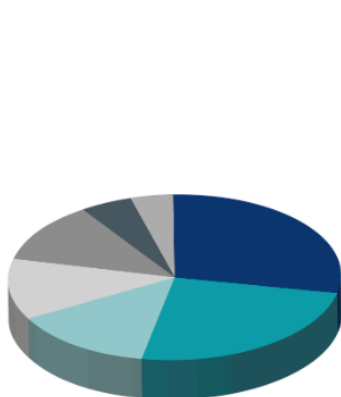
Η χρήση του νικελίου έχει μακρόχρονη ιστορία και περιλαμβάνει διάφορες εφαρμογές. Από την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης η χρήση του επεκτάθηκε στην παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα, στην ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση και στις μπαταρίες (Davenport, 2011). Η ζήτησή του αυξάνεται συνεχώς και μάλιστα μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου (Kuck, 2010b), ενώ η τάση αυτή συνεχίζεται μέχρι σήμερα.

Ως "πρώτη χρήση" του νικελίου ορίζεται η μετατροπή προϊόντων νικελίου σε ενδιάμεσα προϊόντα, τα οποία αποτελούν τη βάση για προϊόντα τελικής χρήσης που περιέχουν νικέλιο. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, αυτά τα προϊόντα πρώτης χρήσης υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία πριν είναι έτοιμα για χρήση.



STAINLESS STEEL	BATTERIES	NICKEL-BASED ALLOYS
65%	17%	5%
PLATING	ALLOY STEELS	OTHERS
5%	3%	2%
STAINLESS STEEL FOUNDRIES	NICKEL-BASED ALLOY FOUNDRIES	
1%	1%	

Εικόνα 8: Πρώτες χρήσεις Νικελίου (<https://nickelinstitute.org/en/nickel-applications/>)
Λόγω των εξαιρετικών φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του, το νικέλιο χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα τομέων τελικής χρήσης.



CONSUMER GOODS, CATERING & FOOD PROCESSING	MOBILITY & TRANSPORT	PROCESS INDUSTRIES
29%	25%	14%
ARCHITECTURE, BUILDING & CONSTRUCTION	ENERGY	OTHER INDUSTRIAL COMPONENTS
12%	12%	5%
OTHERS		
4%		

Εικόνα 9: Τελική χρήση του νικελίου (<https://nickelinstitute.org/en/nickel-applications/>)

4.2 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

Οι όροι "αποθέματα" και "πόροι" χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών. Η Επιτροπή για τα Διεθνή Πρότυπα Αναφοράς Ορυκτών Αποθεμάτων ορίζει τους όρους ως εξής: «Ορυκτός πόρος είναι μια συγκέντρωση ή εμφάνιση στερεών υλικών οικονομικού ενδιαφέροντος μέσα ή πάνω στο φλοιό της γης σε τέτοια μορφή, βαθμό ή ποιότητα και ποσότητα ώστε να υπάρχουν βάσιμες προοπτικές για ενδεχόμενη οικονομική εξόρυξη». Ενώ «ορυκτό απόθεμα είναι το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο μέρος ενός μετρημένου ή/και ενδεικνυόμενου ορυκτού πόρου».

Οι μεταλλευτικές εταιρείες μετατρέπουν συνεχώς τους πόρους σε αποθέματα μέσω της εξερεύνησης. Επομένως, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι περιορισμοί στη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών δεν αφορούν τόσο το αν υπάρχει αρκετή πρώτη ύλη στο έδαφος, όσο το αν υπάρχει αρκετή παραγωγική ικανότητα διαθέσιμη σε σύντομο χρονικό διάστημα για να ικανοποιήσει μια απότομη αύξηση της ζήτησης. Οι παγκόσμιοι πόροι νικελίου εκτιμώνται σήμερα σε σχεδόν 350 εκατομμύρια τόνους. Η Αυστραλία, η Ινδονησία, η Νότια Αφρική, η Ρωσία και ο Καναδάς αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 50% των παγκόσμιων πόρων νικελίου. Οι οικονομικές συγκεντρώσεις νικελίου εμφανίζονται σε θειούχα και λατεριτικού τύπου κοιτάσματα.

Παρά το γεγονός ότι σχεδόν το 80% του συνόλου του νικελίου που εξορύχτηκε ιστορικά έχει εξορυχθεί τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, τα γνωστά αποθέματα και οι πόροι νικελίου έχουν επίσης αυξηθεί σταθερά. Διάφορες παράμετροι παίζουν ρόλο σε αυτή την εξέλιξη, συμπεριλαμβανομένης της καλύτερης γνώσης νέων κοιτασμάτων σε απομακρυσμένες περιοχές και των αυξημένων δραστηριοτήτων εξερεύνησης από τις εταιρείες εξόρυξης, με κίνητρο τις ελκυστικές τιμές των εμπορευμάτων.

Οι βελτιωμένες τεχνολογίες στην εξόρυξη, την τήξη και τη διύλιση, καθώς και οι αυξημένες παραγωγικές δυνατότητες, επιτρέπουν επίσης την επεξεργασία νικελιούχων μεταλλευμάτων χαμηλότερης ποιότητας. Η μείωση των βαθμών του μεταλλεύματος δεν αποτελεί επομένως απαραίτητα ένδειξη μείωσης των πόρων, αλλά αντανακλά την καινοτομία και τις βελτιώσεις που πραγματοποιούνται στην τεχνολογία εξόρυξης και επεξεργασίας.

Υπολογίζεται επίσης ότι υπάρχουν σημαντικά κοιτάσματα νικελίου στα βάθη της θάλασσας. Οι όζοι μαγγανίου, οι οποίοι βρίσκονται στον πυθμένα της βαθιάς θάλασσας, περιέχουν σημαντικές ποσότητες νικελίου. Πρόσφατες εκτιμήσεις κάνουν λόγο για περισσότερους από 300 εκατομμύρια τόνους νικελίου που περιέχονται σε τέτοια κοιτάσματα. Η ανάπτυξη τεχνολογιών εξόρυξης σε βαθιές θάλασσες αναμένεται να διευκολύνει την πρόσβαση σε αυτούς τους πόρους στο μέλλον.

Nickel reserves



Εικόνα 10: Αποθέματα νικελίου (<https://nickelinstitute.org/en/nickel-applications/>)

Nickel resources



Εικόνα 11: Πόροι νικελίου (<https://nickelinstitute.org/en/nickel-applications/>)

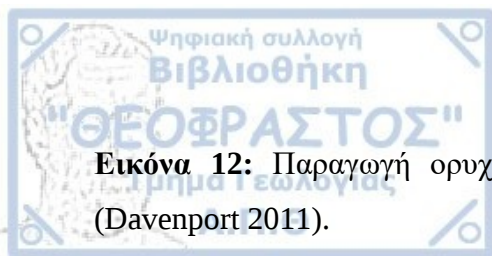
4.3 ΕΞΟΡΥΞΗ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

Όσον αφορά την εξόρυξη νικελίου, η μεγαλύτερη παραγωγός χώρα σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία είναι η Ρωσία, η οποία είναι υπεύθυνη για το 21,2% της παγκόσμιας εξόρυξης, ακολουθεί ο Καναδάς με 13,4% και η Αυστραλία με 12,7%. Αυτές οι τρεις χώρες μαζί κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο της εξόρυξης νικελίου, 47,3%

της παγκόσμιας προσφοράς. Ακόμη και κατά την ανασκόπηση παλαιότερων δεδομένων, παρουσιάζονται παρόμοια αποτελέσματα. Ωστόσο, μια μικρή αλλά ορατή τάση που μπορεί να συναχθεί μέσω της σύγκρισης παλαιότερων και πιο πρόσφατων συνόλων δεδομένων είναι η "συγκεντροποίηση" της παραγωγής νικελίου. Αυτό σημαίνει ότι οι μεγαλύτερες χώρες παραγωγής νικελίου κατέχουν ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο της παγκόσμιας προσφοράς νικελίου. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι από το 2009 έως το 2017 η Ρωσία αύξησε κατά 2,49% τη συμμετοχή της στην παγκόσμια παραγωγή νικελίου, ενώ ο Καναδάς και η Αυστραλία είχαν αύξηση κατά 3,61% και 0,91% αντίστοιχα. Αν και ελάχιστη, αυτή δεν είναι η μόνη μεταβολή που έχει παρατηρηθεί στον κλάδο (Davenport, 2011; Nakajima et al., 2017).

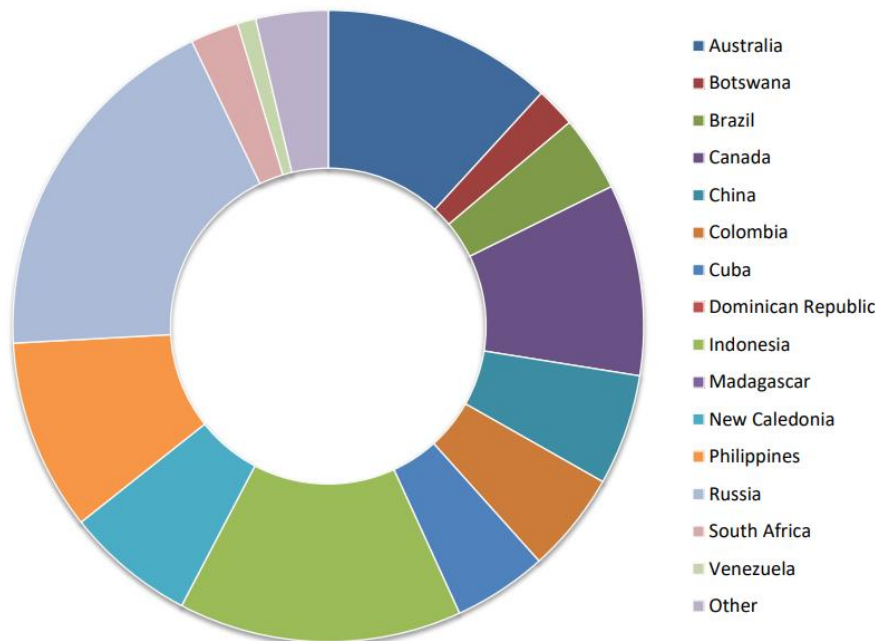
Το νικέλιο μπορεί να βρεθεί και να εξαχθεί από διάφορους τύπους κοιτασμάτων, όπως τα λατεριτικά και τα θειούχα κοιτάσματα (Davidson, 2006; Davenport, 2011). Οι περισσότερες επιχειρήσεις εξόρυξης όσον αφορά τα κοιτάσματα σουλφιδίων βρίσκονται στον Καναδά και τη Ρωσία, ενώ τα λατεριτικά κοιτάσματα βρίσκονται σε πιο τροπικά περιβάλλοντα, όπως την Κούβα, την Ινδονησία και τις χώρες της Νότιας Αμερικής. Αυτό οφείλεται στον καταλυτικό ρόλο του κλίματος στο σχηματισμό των λατεριτικών κοιτασμάτων (Elias, 2002).

Country	Production (tonnes)	Reserves (tonnes)	Production (%)
Australia	165,000	24,000,000	11.79
Botswana	28,600	490,000	2.04
Brazil	54,100	6,700,000	3.86
Canada	137,000	3,800,000	9.79
China	79,400	3,000,000	5.67
Colombia	72,000	1,600,000	5.14
Cuba	67,300	5,500,000	4.81
Dominican Republic	-	960,000	-
Indonesia	203,000	3,900,000	14.50
Madagascar	-	1,300,000	-
New Caledonia	92,800	7,100,000	6.63
Philippines	137,000	1,100,000	9.79
Russia	262,000	6,000,000	18.71
South Africa	34,600	3,700,000	2.47
Venezuela	13,200	490,000	0.94
Other	51,700	4,500,000	3.69
Total	1,400,000	76,000,000	100.00



Εικόνα 12: Παραγωγή ορυχείων και αποθέματα μεταλλεύματος νικελίου το 2009 (Davenport 2011).

Ενώ η πλειονότητα της εξόρυξης νικελίου προέρχεται από την εξόρυξη κοιτασμάτων σουλφιδίων (56%), τα περισσότερα αποδεδειγμένα αποθέματα νικελίου βρίσκονται σε κοιτάσματα λατερίτη (73%) (Davidson, 2006). Προκειμένου να ανταποκριθεί στην αυξανόμενη ζήτηση νικελίου, η βιομηχανία έχει εντείνει τις ήδη υπάρχουσες εξορυκτικές δραστηριότητες, ενώ παράλληλα έχει στραφεί στην εξόρυξη νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα. Η μετάβαση αυτή οδήγησε, τις τελευταίες δύο δεκαετίες, σε αύξηση της χρήσης γης για την εξόρυξη νικελίου κατά 2,3 φορές. Αντίθετα, η πραγματική ποσότητα εξόρυξης νικελίου αυξήθηκε μόνο κατά 1,8 φορές, λόγω της πολυπλοκότητας της παραγωγής νικελίου από λατερίτες και της ιδιαίτερης μορφολογίας τους. Συνεπώς, ο κλάδος βρίσκεται αντιμέτωπος με την ανάγκη δυσανάλογης χρήσης γης σε σχέση με την πραγματική παραγωγή νικελίου, η οποία θα αυξήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι οι χώρες παραγωγής νικελίου απέχουν πολύ από τις περιοχές μεγάλης κατανάλωσης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλες παγκόσμιες ροές νικελίου (Davidson, 2006; Mudd, 2010; Nakajima et al., 2017, 2018).

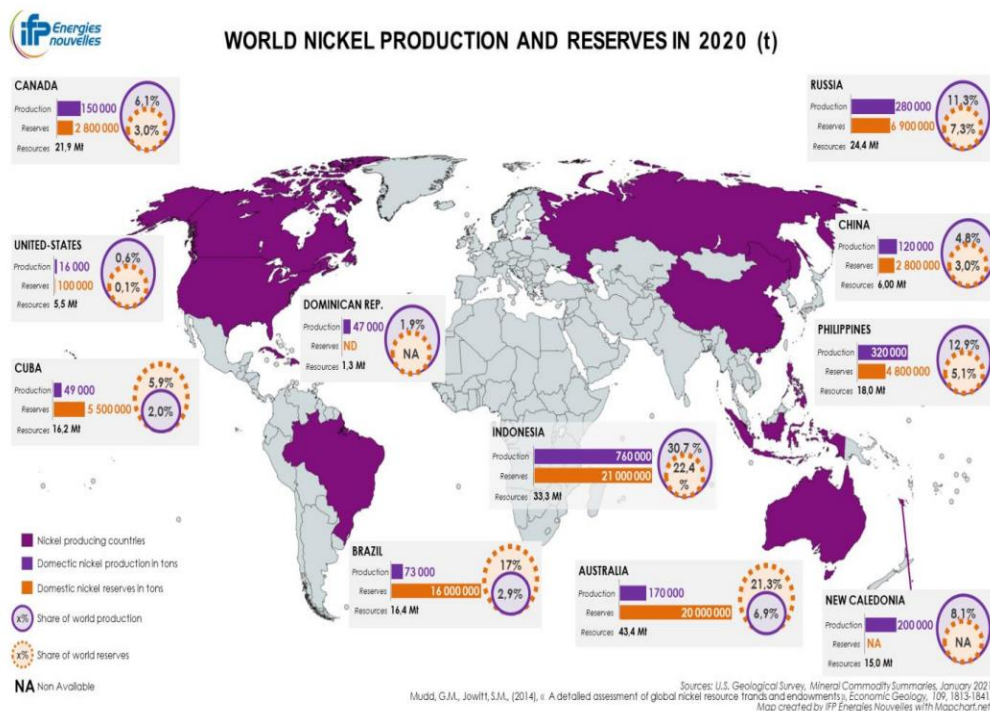


Εικόνα 13: Παραγωγή νικελίου (%) ανά χώρα το 2009 (Davenport 2011).

Οι τιμές του νικελίου έχουν αυξηθεί συνολικά από το 2000 και παρουσιάζουν κυκλικό μοτίβο, με τη μηνιαία μεταβλητότητά τους να είναι αντίστοιχη με εκείνη του αργού πετρελαίου (Plourde and Watkins, 1998). Όπως και με άλλα εμπορεύματα, οι τιμές επηρεάζονται από την προσφορά και τη ζήτηση. Όταν η ζήτηση αυξάνεται, οι τιμές ακολουθούν ανοδική πορεία μέχρι να μειωθεί η ζήτηση, οδηγώντας σε επαναλαμβανόμενους κύκλους. Μια εξαίρεση συνέβη το 2007, όταν η ζήτηση ξεπέρασε την προσφορά, προκαλώντας απότομη άνοδο των τιμών. Έκτοτε, οι τιμές του νικελίου έχουν γενικά σταθεροποιηθεί γύρω στα 20.000\$ ανά τόνο (Davidson, 2006, White and Dunlop, 2012).

Η μελλοντική παραγωγή νικελίου είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένη ανάμεσα στις κύριες χώρες παραγωγής σε σύγκριση με το λίθιο και το κοβάλτιο. Οι προβλέψεις δείχνουν ότι η παραγωγή θα φτάσει τα 2.000 kt ετησίως μέχρι το 2025 (Olivetti et al., 2017). Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν αποτελούν τον κύριο λόγο ζήτησης για το νικέλιο, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή

ανοξειδωτου χάλυβα. Έτσι, η πιθανότητα μελλοντικών προβλημάτων στην προμήθεια νικελίου θεωρείται μικρή.



Εικόνα 14: Παγκόσμια παραγωγή και αποθέματα νικελίου το 2020 (σε τόνους) (USGS, 2021).

5. ΚΟΒΑΛΤΙΟ

Παρότι, το κοβάλτιο χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες, η εκτενής χρήση του στη βιομηχανία άρχισε κατά τη διάρκεια της Βιομηχανικής Επανάστασης και κυρίως στον 20ό αιώνα. Στη σύγχρονη βιομηχανία, το κοβάλτιο έχει διάφορες εφαρμογές, όπως στις χρωστικές κόλλες, στις μπαταρίες ιόντων λιθίου και ως βιομηχανικό κράμα. Τα τελευταία χρόνια, όμως, έχουν προκύψει πολλές αντιπαραθέσεις γύρω από την παραγωγή και χρήση του κοβαλτίου στη βιομηχανία. Ένα σημαντικό μέρος της παγκόσμιας παραγωγής κοβαλτίου προέρχεται από ασταθείς περιοχές, όπως η Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό (ΛΔΚ), όπου η παιδική εργασία είναι διαδεδομένη. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει κατατάξει το κοβάλτιο ως κρίσιμη πρώτη ύλη (CRM), υπογραμμίζοντας

τις επισφαλείς διαδικασίες παραγωγής και προμήθειάς του (Hawkins, 2001; Harper et al., 2012; Mudd et al., 2013)



Εικόνα 15: Ορυκτό κοβάλτιο.

Το κοβάλτιο, όπως και το νικέλιο και το λίθιο, έχει δει μια δραματική αύξηση στην παγκόσμια παραγωγή τις τελευταίες δεκαετίες. Από το 1995 έως το 2005, η παγκόσμια παραγωγή αυξήθηκε από 23.207 τόνους σε 53.635 τόνους, ενώ το 2011 η παραγωγή έφτασε τους 104.900 τόνους (Karusta, 2006, Mudd et al., 2013). Οι κύριες χώρες παραγωγής κοβαλτίου περιλαμβάνουν τη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, την Κίνα, τη Ρωσία και τη Ζάμπια. Η Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό διαθέτει τα μεγαλύτερα αποθέματα κοβαλτίου, ακολουθούμενη από την Αυστραλία, η οποία κατέχει περίπου το ένα τρίτο των αποθεμάτων της Κονγκό (Farjana et al., 2019).

Country	Production (tonnes)	Production (%)
Australia	3,851	3.7
Brazil	3,500	3.3
Canada	2,966	2.8
China	6,800	6.5
Cuba	4,000	3.8
DRC	60,000	57.2
Morocco	2,200	2.1
New Caledonia	3,200	3.1
Russia	6,300	6.0
Zambia	5,400	5.1
Others	6,700	6.4
Total	104,917	100

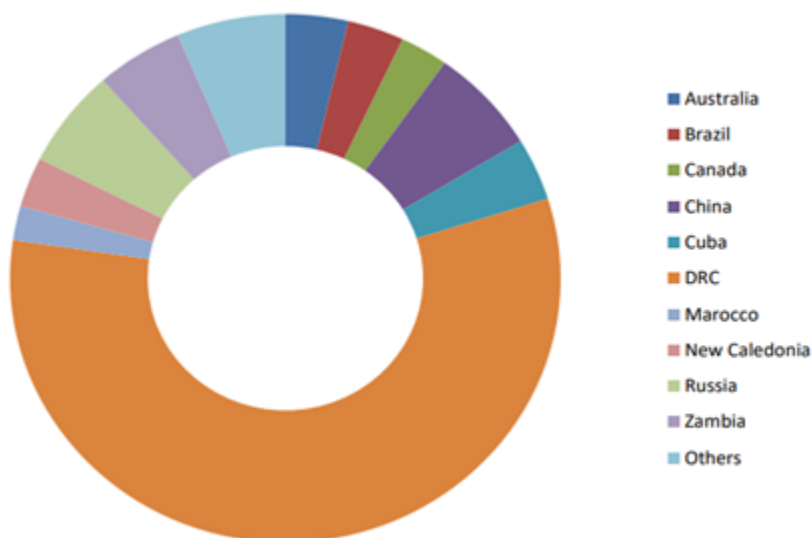
Εικόνα 16: Παραγωγή κοβαλτίου ανά χώρα το 2011 (Mudd et al., 2013).

Τα κοιτάσματα κοβαλτίου κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με την επεξεργασία τους, καθεμία από τις οποίες περιλαμβάνει διάφορους τύπους μεταλλοφορίας με διαφορετικά επίπεδα περιεκτικότητας σε κοβάλτιο. Αυτές οι κατηγορίες είναι:

- τα μαγματικά θειούχα κοιτάσματα Ni - Cu – Co
- τα ιζηματογενή κοιτάσματα Cu - Co και
- τα κοιτάσματα λατερίτη Ni - Co.

Στην πρώτη κατηγορία, το κοβάλτιο συναντάται σε υπερβασικά και βασικά πετρώματα, συνήθως μαζί με το νικέλιο, και εξάγεται κυρίως ως παραπροϊόν. Τέτοια κοιτάσματα υπάρχουν σε χώρες όπως ο Καναδάς, η Νότια Αφρική, η Κίνα και η Αυστραλία. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα ιζηματογενή κοιτάσματα Cu - Co, που βρίσκονται στη Ζάμπια και σε πολλά μέρη της Λαϊκής Δημοκρατίας του Κονγκό. Σε αντίθεση με τα θειούχα κοιτάσματα Ni - Cu - Co, τα ιζηματογενή κοιτάσματα Cu - Co έχουν συνήθως υψηλότερο ποσοστό ανάκτησης κατά τη διαδικασία εμπλουτισμού. Η τρίτη κατηγορία, τα κοιτάσματα λατερίτη Ni - Co, αποδίδει σημαντικές ποσότητες

κοβαλτίου αλλά χρησιμοποιείται κυρίως για την εξόρυξη νικελίου (Mudd et al., 2013; Schmidt et al., 2016; Olivetti et al., 2017).



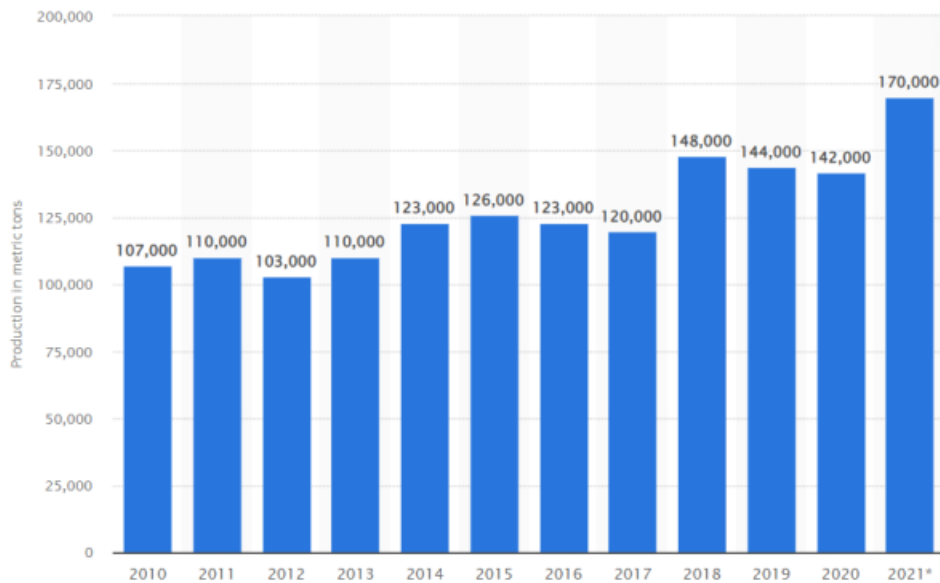
Εικόνα 17: Κατανομή της παραγωγής κοβαλτίου ανά χώρα το 2011 (Mudd et al. 2013).

Δεδομένου ότι το κοβάλτιο εξαρτάται από την εξόρυξη νικελίου και χαλκού, προκύπτουν σημαντικά θέματα σχετικά με τη διαθεσιμότητά του. Τα μεταλλεύματα νικελίου-χαλκού Ni-Cu-Co και τα κοιτάσματα λατερίτη Ni-Co είναι ευρέως διαδεδομένα γεωγραφικά, αλλά η εξαρτημένη σχέση του κοβαλτίου με το νικέλιο και οι υψηλές συγκεντρώσεις νικελίου σε αυτά τα κοιτάσματα δημιουργούν σύνδεση με την παραγωγή κοβαλτίου. Έτσι, μια μείωση στη ζήτηση νικελίου μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της παραγωγής κοβαλτίου.

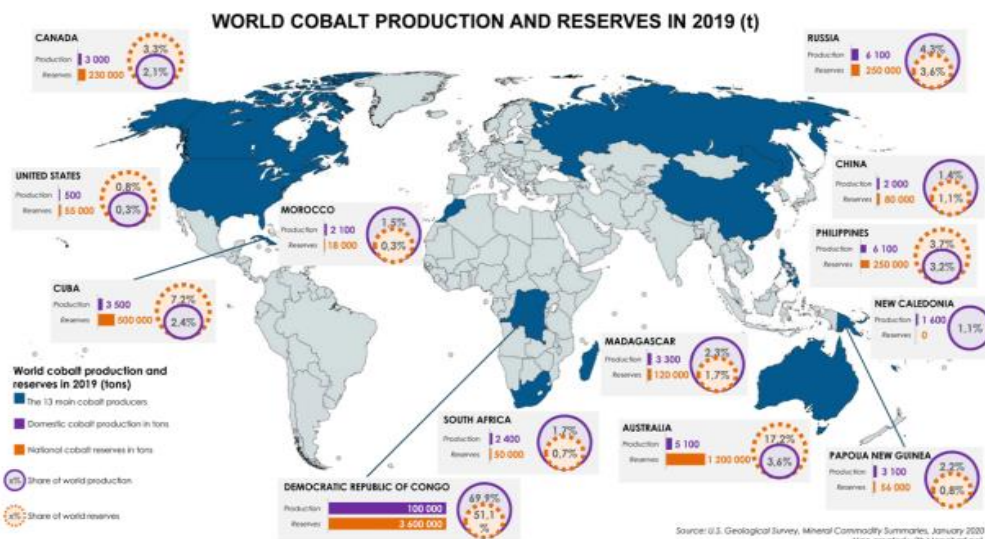
Από την άλλη πλευρά, το κοβάλτιο ως παραπροϊόν από τα κοιτάσματα Cu-Co σε ιζήματα στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό δεν αντιμετωπίζει τέτοια ζητήματα λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων κοβαλτίου εκεί, παρά τον περιορισμένο όγκο της παραγωγής χαλκού (που αντιπροσωπεύει μόλις το 5% της παγκόσμιας παραγωγής) και την υψηλή τιμή του κοβαλτίου. Ταυτόχρονα, η πολιτική αστάθεια ιστορικά συνδέεται με τον εφοδιασμό κοβαλτίου στην περιοχή. Στη δεκαετία του 1970, η συνδυασμένη προσφορά κοβαλτίου και η πολιτική αστάθεια στη ΛΔΚ οδήγησαν σε σημαντική αύξηση

των τιμών του κοβαλτίου. Επιπλέον, η διύλιση κοβαλτίου είναι γεωγραφικά συγκεντρωμένη, με την Κίνα να αποτελεί τον κύριο διυλιστή κοβαλτίου παγκοσμίως.

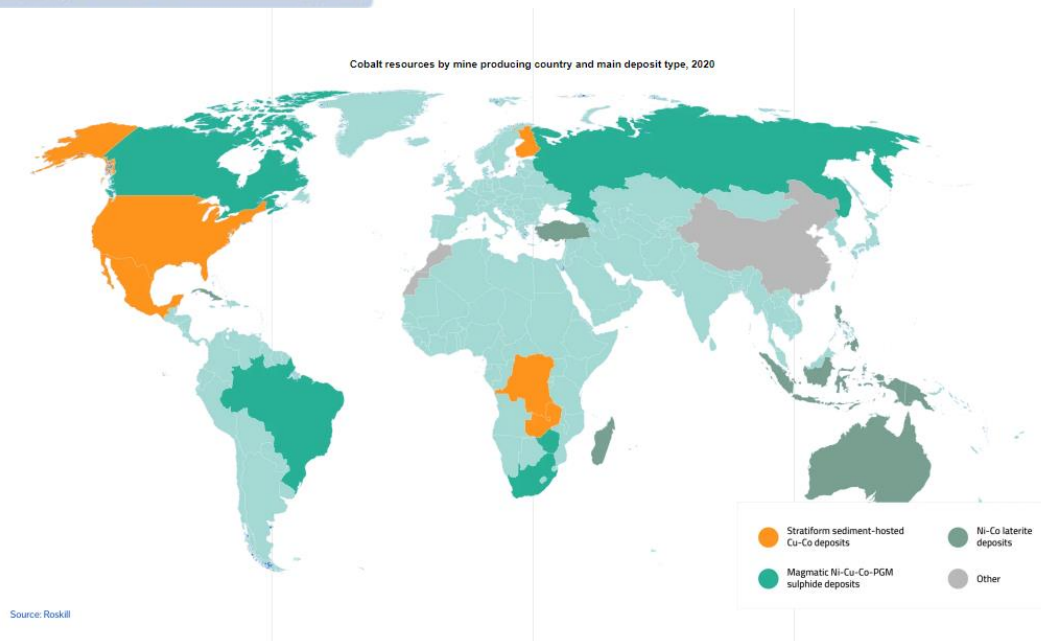
Συνολικά, για όλους αυτούς τους λόγους, το κοβάλτιο αποτελεί το μέταλλο με τον υψηλότερο κίνδυνο έλλειψης στην τρέχουσα αγορά, σε σύγκριση με το νικέλιο και το λίθιο, ειδικά δεδομένη τη συνδεσμολογία του με την παραγωγή ιόντων λιθίου (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2010-2014-2017; Olivetti et al., 2017).



Εικόνα 18: Παραγωγή κοβαλτίου από ορυχεία παγκοσμίως από το 2010 έως το 2021 (Statista, 2022).



Εικόνα 19: Παγκόσμια παραγωγή και αποθέματα κοβαλτίου το 2019 (σε τόνους) (USGS,2021).



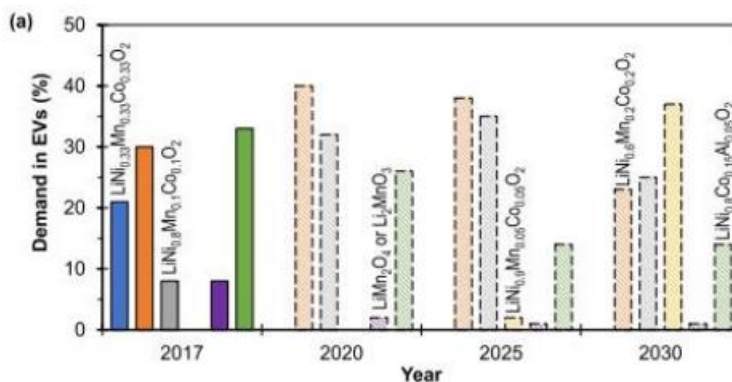
Εικόνα 20: Cobalt resources by mine producing country and main deposit type, 2020.

6. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Η ανακύκλωση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών είναι ένας πολύ σημαντικός τομέας στη σύγχρονη κοινωνία, καθώς συμβάλλει σημαντικά στην προστασία του περιβάλλοντος από τα τοξικά απόβλητα των μετάλλων που περιέχουν. Τα κομμάτια κοβαλτίου συχνά ανακυκλώνονται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά για τον ίδιο σκοπό. Το κοβάλτιο από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου πιθανόν να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί ξανά σε μπαταρίες LCO ή σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Τα παγκόσμια ποσοστά ανακύκλωσης εκτιμώνται γύρω στο 68%, αν και αυτό μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το προϊόν. Το παγκόσμιο ποσοστό ανακυκλωμένου περιεχομένου υπολογίζεται περίπου στο 32%, ενώ για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου εκτιμάται ότι το 8,5-12% του κοβαλτίου προέρχεται από δευτερεύουσες πηγές και όχι από πρωτογενείς. Αυτό το ποσοστό μειώθηκε στο 7,5-10% το 2019 (Dominish et al. 2021).

Η παγκόσμια στροφή προς τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής θα δημιουργήσει έναν τεράστιο όγκο από μπαταρίες ιόντων λιθίου που θα χρειαστεί να ανακυκλωθούν ή να καταλήξουν στις χωματερές. Για παράδειγμα, υπολογίζεται ότι το 2020 το βάρος των απορριφθέντων μπαταριών ιόντων λιθίου θα ξεπεράσει τις 25 δισεκατομμύρια μονάδες και τους 500.000 τόνους. Στην Αυστραλία, προβλέπεται ότι το 2030 οι μπαταρίες ιόντων λιθίου θα φτάσουν στις 425.000 μονάδες, μια δραματική αύξηση που καθοδηγείται από τα κρατικά κίνητρα και την εγκατάσταση πολλών σταθμών φόρτισης σε όλη τη χώρα. Με την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρικά αυτοκίνητα, υπολογίζεται ότι η παραγωγή απορριφθέντων μπαταριών ιόντων λιθίου θα αυξηθεί από 3.300 τόνους το 2016 σε μεταξύ 100.000 και 188.000 τόνων το 2036.

Οι υφιστάμενες τεχνολογίες ανακύκλωσης σε βιομηχανική κλίμακα για μπαταρίες ιόντων λιθίου εξακολουθούν να είναι αναποτελεσματικές στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Το λίθιο και άλλα κρίσιμα μέταλλα χάνονται κατά την πυρομεταλλουργία, ενώ η οικονομική βιωσιμότητα των υδρομεταλλουργικών προσεγγίσεων απαιτεί σημαντικές αναλογίες στερεού προς υγρούς αναλύτες. Οι πολιτικοί θεσμοί σε τοπικό και εθνικό επίπεδο πρέπει επίσης να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις της ανακύκλωσης, ιδίως την ανάμειξη ακούσιων τύπων μπαταριών όπως LIB (μπαταρίες ιόντων λιθίου), NiCd (μπαταρίες νικελίου-καδμίου) και NiMH (μπαταρίες νικελίου-μαγγανίου). Χωρίς κατάλληλη επισήμανση και ταξινόμηση, η ανάμειξη αυτών των επαναφορτιζόμενων μπαταριών κατά το τέλος του κύκλου ζωής τους είναι αναπόφευκτη, και τα αποτελούμενα σύνθετα μίκτα απόβλητα μπορούν να εμποδίσουν την αποτελεσματική διαχωριστική και ανακτητική διαδικασία των κρίσιμων μετάλλων. Μια λύση είναι η ανάπτυξη ενός ισχυρού πλαισίου πολιτικής που περιλαμβάνει την επισήμανση, τον διαχωρισμό και τη συλλογή των μπαταριών, παρόμοια με εκείνα που έχουν αναπτυχθεί για πλαστικά προϊόντα και αστικά στερεά απόβλητα. Αυτές οι πολιτικές μπορούν να μειώσουν την ανάμειξη διαφορετικών τύπων μπαταριών LIB, NiMH και άλλων, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την αποδοτικότητα της ανακύκλωσης στο μέλλον (Tabelin et al., 2021).



Εικόνα 21: Παγκόσμια ζήτηση LIB ανά τύπο για ηλεκτρικά οχήματα το 2017 και προβλεπόμενες αλλαγές το 2020, το 2025 και το 2030 (Baltazar Tabelin, et al., 2021; Azevedo et al. 2018).

Η ανακύκλωση εξακολουθεί να παρουσιάζει περιορισμούς και σήμερα. Η δυνατότητα ανακύκλωσης μπαταριών εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα των μπαταριών που κυκλοφορούν στην αγορά και το χρονικό σημείο που φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Ωστόσο, λόγω της αύξησης της διάρκειας ζωής των μπαταριών κάθε χρόνο, η στιγμή αυτής της ανακύκλωσης μπορεί να αναβληθεί. Είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε ότι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σήμερα σε οχήματα ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμες για ανακύκλωση πριν από τα επόμενα 10-15 χρόνια (Huisman et al., 2020).

Από την οπτική γωνία της κυκλικής οικονομίας, όσον αφορά τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, υπάρχει επείγουσα ανάγκη για βελτίωση του σχεδιασμού και της κατασκευής τους μέσω ανακυκλωμένων πηγών. Προκειμένου να υπερβούμε τα σήμερα χαμηλά ποσοστά ανάκτησης ορισμένων κρίσιμων υλικών όπως το λίθιο και ο γραφίτης, είναι ζωτικής σημασίας η προηγούμενη ολοκληρωμένη αξιολόγηση του κύκλου ζωής και η μοντελοποίηση του υλικού του κύκλου ζωής. Αυτή η διαδικασία προβλέπει επίσης νέες εφαρμογές για το υλικό από ανακυκλωμένες μπαταρίες προτού προχωρήσει στη σχεδίαση του προϊόντος.



7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

British Geological Service, 2016

Carlito Baltazar Tabelin, Jessica Dallas, Sophia Casanova, Timothy Pelech, Ghislain Bournival, Serkan Saydam, Ismet Canbulat, 2021, Azevedo et al. 2018.

Davenport, W.G., 2011. Extractive metallurgy of nickel, cobalt, and platinum group materials.

Davidson, V., 2006. Nickel market overview-the supply response. World.

Demirbas, A., 2009. Global Renewable Energy Projections. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy 4 (2), 212–224. 10.1080/15567240701620499.

European Commission, 2010; 2014; 2017.

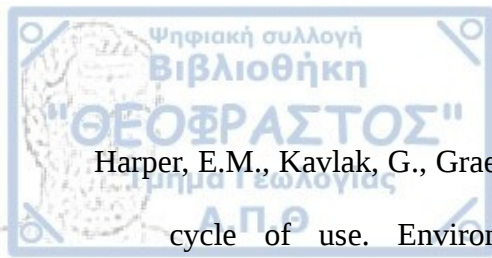
Elias, M., 2002. Nickel laterite deposits – geological overview, resources and exploitation. Giant Ore Deposits: Characteristics, genesis and exploration.

Farjana, S.H., Huda, N., Mahmud, M.P., 2019. Life cycle assessment of cobalt extraction process.

Flexer et al (2018) Lithium recovery from brines.

Grosjean, C., Miranda, P.H., Perrin, M., Poggi, P., 2012. Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (3), 1735–1744. 10.1016/j.rser.2011.11.023.

Habashi, 1997; Barbosa et al., 2014; Hien-Dinh et al., 2015; Lee, 2015; Meshram et al., 2014.



Harper, E.M., Kavlak, G., Graedel, T.E., 2012. Tracking the metal of the goblins: cobalt's cycle of use. *Environmental science & technology* 46 (2), 1079–1086.

10.1021/es201874e.

Hawkins, M., 2001. Why we need cobalt. *Applied Earth Science* 110 (2), 66–70.

10.1179/aes.2001.110.2.66.

<https://nickelinstitute.org/en/nickel-applications/#firstuse>.

Kapusta, J.P.T., 2006. Cobalt production and markets: A brief overview. *JOM* 58 (10), 33–36. 10.1007/s11837-006-0198-2.

Kesler et al., 2012; Vikström et al., 2013; Kunasz, 2006; U.S. Geological Survey, 2018; Munk et al., 2016).

Kesler et al (2012) Global lithium resources.

Konstantinos Gounaris, 2019. Applicability of digital tools for the assessment of the global mining industry of battery raw materials. Faculty of Geosciences, Geotechnics and Mining Sustainable Mining and Remediation Management.

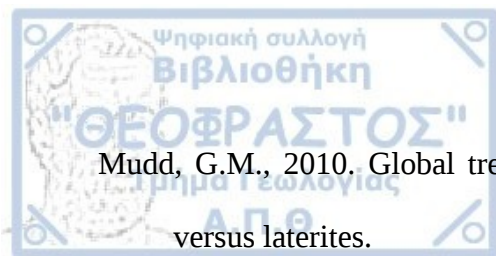
Kuck, P.H., 2010b. Nickel: Mineral commodity summaries, 108–109.

Market Research Report, 2020, Battery Metals Market by Metals Type and Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2020-2027.

Martin, G., Rentsch, L., Höck, M., Bertau, M., 2017. Lithium market research – global supply, future demand and price development. *Energy Storage Materials* 6, 171–179. 10.1016/j.ensm.2016.11.004.

Metalary, 2019. Lithium. <https://www.metalary.com/lithium-price/>.

Mohammadi, F (Ed.), 2018. Electric Vehicle Battery Market Analysis: Lithium-ion.



Mudd, G.M., 2010. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites.

Mudd, G.M., Weng, Z., Jowitt, S.M., Turnbull, I.D., Graedel, T.E., 2013. Quantifying the recoverable resources of by-product metals: The case of cobalt. Ore Geology Reviews 55, 87–98. 10.1016/j.oregeorev.2013.04.010.

Narins, T.P., 2017. The battery business: Lithium availability and the growth of the global electric car industry.

Nakajima, K., Nansai, K., Matsubae, K., Tomita, M., Takayanagi, W., Nagasaka, T., 2017. Global land-use change hidden behind nickel consumption.

Nazri, G., Pistoia, G., 2008. Lithium batteries: science and technology. Springer Science & Business Media.

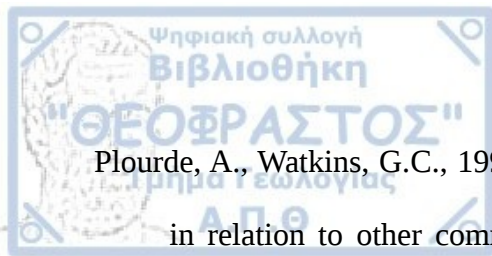
N.Paraskevopoulou, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2022 All rights reserved. Geopolitics of metal batteries.

NewsCenterMaine.<http://www.newscentermaine.com/article/news/special-reports/maines-changing-climate/electric-vehicle-ev-cobalt-mining-lithium-ion-battery-ethics/97-fb4c9993-6d5d-4809-a192-414faa12fecf>

Nicholson, P., Evans, 1998. Evaluating new directions for the lithium market. JOM 50 (5), 27–29. 10.1007/s11837-998-0028-9.

Olivetti, E.A., Ceder, G., Gaustad, G.G., Fu, X., 2017. Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals.

Olivetti et al (2017) Battery metals.



Plourde, A., Watkins, G.C., 1998. Crude oil prices between 1985 and 1994: how volatile in relation to other commodities? *Resource and Energy Economics* 20 (3), 245–

262. 10.1016/S0928- 7655(97)00027-4.

Swain, 2017; Talens Peiró et al., 2013; Zhang et al., 2012; Choubey et al., 2016; Border and Sawyer, 2014; An et al., 2012).

Statista. <https://www.statista.com>.

Sonoc, A., Jeswiet, J., 2014. A Review of Lithium Supply and Demand and a Preliminary Investigation of a Room Temperature Method to Recycle Lithium Ion Batteries to Recover Lithium and Other Materials. *Procedia CIRP* 15, 289–293. 10.1016/j.procir.2014.06.006.

Tabelin, C. B., Dallas, J., Casanova, S., Pelech, T., Bournival, G., Saydam, S., & Canbulat, I (2021). Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives. *Minerals Engineering*, 163, 106743.

Taylor and McLennan, 1985 Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust.

Titirici (2021) Sustainable Batteries.

United States Geological Survey, USGS, <https://www.usgs.gov/>.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2010-2014-2017.