



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΕΤΡΑΚΟΓΛΟΥ
ΑΕΜ 5816

ΛΙΘΙΟ, ΝΙΚΕΛΙΟ, ΚΟΒΑΛΤΙΟ: ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΤΗΣ
ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2023





ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΕΤΡΑΚΟΓΛΟΥ

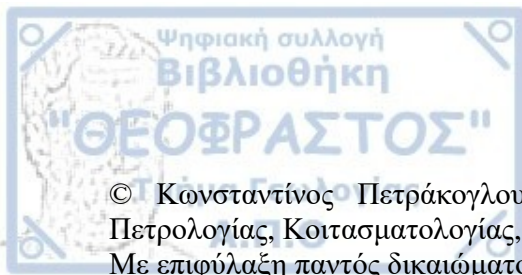
ΛΙΘΙΟ, ΝΙΚΕΛΙΟ, ΚΟΒΑΛΤΙΟ: ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Κωνσταντίνος Πετράκογλου, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Κωνσταντίνος Πετράκογλου, Τμήμα Γεωλογίας Α. Π. Θ. , Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Λίθιο, Νικέλιο, Κοβάλτιο: Τα μέταλλα της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας - *Διπλωματική Εργασία*

© Konstantinos Petrakoglou, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2023
All rights reserved.
Lithium, Nickel, Cobalt: The metals of rechargeable batteries - *Bachelor Thesis*

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

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

Εικόνα Εξωφύλλου: <https://www.techwar.gr/48151/>



ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2. ΛΙΘΙΟ	12
3. ΚΟΒΑΛΤΙΟ	16
4. ΝΙΚΕΛΙΟ	24
5. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.	29
6. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ.	33
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	36

Κωνσταντίνος Πετράκογλου

Στην σημερινή εποχή με την οικονομική και ενεργειακή κρίση να δεσπόζει στην Ευρώπη και στην Παγκόσμια κοινότητα, απαιτούνται να βρεθούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας ώστε να καλυφθούν οι βασικές ανάγκες του ανθρώπου και της κοινωνίας. Τα αποθέματα των ορυκτών πόρων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την παραγωγή ενέργειας (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, λιγνίτης) έχουν εξαντληθεί σε μεγάλο βαθμό και υπολογίζεται ότι θα έχουν εξαντληθεί πλήρως περίπου το 2050. Συνεπώς οι χώρες προσπαθούν μέσα από άλλες πηγές να αντικαταστήσουν τους υδρογονάνθρακες για την παραγωγή ενέργειας, έτσι οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έχουν αυξήσει τις πωλήσεις τους σημαντικά τα τελευταία χρόνια καθώς ο πλανήτης στρέφεται προς την ηλεκτροκίνηση και γενικότερα προς την πράσινη ενέργεια. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα αναλυθούν τα στοιχεία που περιέχουν οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, τα αποθέματα των κοιτασμάτων των στοιχείων αυτών, θα αναλυθεί αν είναι βιώσιμη η χρήση τους, η ανακύκλωση τους και η κατασκευή νέων προϊόντων. Επιπλέον θα εξετασθούν τα συμφέροντα που υπάρχουν στην βιομηχανία για την ανάπτυξη και την καθιέρωση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών και τέλος κάποιες χρηματιστηριακές τιμές ώστε να δειχθεί η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση των στοιχείων αυτών.



ABSTRACT

Lithium, Nickel, Cobalt: The metals of rechargeable batteries

Konstantinos Petrakoglou

Today, with the economic and energy crisis prevailing in Europe and the World community, it is necessary to find alternative sources of energy in order to meet the basic needs of man and society. The reserves of mineral resources currently used for energy production (oil, natural gas, lignite) have been largely depleted and are estimated to be completely depleted around 2050. Therefore, countries are trying to replace hydrocarbons for energy production through other sources, so rechargeable batteries have increased their sales significantly in recent years as the planet turns towards electrification and green energy in general. In this particular thesis, the elements that rechargeable batteries contain, the reserves of the deposits of these elements will be analyzed, it will be analyzed whether their use, their recycling and the manufacture of new products are sustainable. In addition, the interests that exist in the industry for the development and establishment of rechargeable batteries will be examined and finally some stock market prices to show the ever-increasing demand for these elements.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

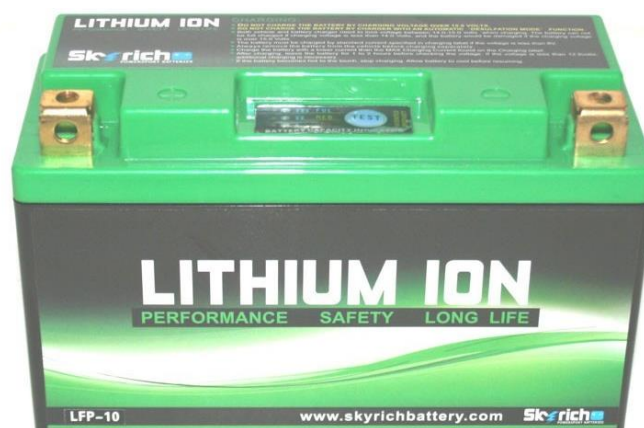
Το θέμα της διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας- Πετρολογίας- Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης κ. Βασίλειο Μέλφο τον Μάιο του 2022.

Η διπλωματική εργασία αφορά τα μέταλλα της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας το λίθιο, το νικέλιο, το κοβάλτιο. Την σημαντικότητα αυτών των στοιχείων ώστε να γίνει η μετάβαση στην πράσινη ενέργεια και αν είναι βιώσιμη αυτή η μεταβολή ή γίνεται λόγω κάποιων συμφερόντων. Τα μέταλλα αυτά έχουν αυξήσει σε μεγάλο ποσοστό την ζήτηση τους τα τελευταία χρόνια καθώς αποτελούν τα κύρια στοιχεία μια επαναφορτιζόμενης μπαταρίας που χρησιμοποιείται πλέον σε μεγάλο βαθμό στην καθημερινότητα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κύριο Βασίλειο Μέλφο, για την επίβλεψη της διπλωματικής αυτής εργασίας και για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και για την συνεχή στήριξη του με τις πολύτιμες συμβουλές του για την σύνταξη της εργασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το λίθιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο είναι μέταλλα που βρίσκονται στην πρώτη, στην δέκατη και στην ένατη ομάδα του περιοδικού πίνακα αντίστοιχα. Από αυτά τα μέταλλα το λίθιο είναι το ελαφρύτερο στοιχείο και χρησιμοποιείται σε μεγάλο ποσοστό στην κατασκευή επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Τα μέταλλα αυτά πλέον έχουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην καθημερινότητα και στην μετάβαση προς την πράσινη ενέργεια, ήδη η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα μέσα από την πράσινη συμφωνία, έτσι για αυτόν τον λόγο προβλέπεται ότι τις επόμενες δύο δεκαετίες η ζήτηση σε νικέλιο και κοβάλτιο θα αυξηθεί κατά 50-60% ενώ η ζήτηση του λιθίου θα αυξηθεί μέχρι 90%. Η ζήτηση για λίθιο έχει εκτοξευτεί τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω τριών διεθνών συνθηκών του Κιότο πρωτόκολλο, την συμφωνία Παρισιού και οι στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων εθνών- με όλα να πιέζουν ώστε να γίνει η ενσωμάτωση περισσότερων τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας και οι τομείς των μεταφορών να στραφούν στην ηλεκτροκίνηση ώστε να υπάρξει μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Πάνω από 60% λιθίου παράχθηκε το 2019 για την κατασκευή μπαταριών ιόντων λιθίου (Σχ. 1. 1) ώστε να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικά οχήματα (Tabelin et al. 2021).



Σχ. 1. 1. Μπαταρία ιόντων λιθίου για αυτοκίνητο. (Google images)

Η ζήτηση για λίθιο στη βιομηχανία μπαταριών έχει διπλασιαστεί περίπου τα τελευταία 5 χρόνια και πιθανότατα θα συνεχίσει να αυξάνεται στο ορατό μέλλον κυρίως για τρεις λόγους. Ο πρώτος λόγος οι κυβερνήσεις θα συνεχίσουν να προωθούν τεχνολογίες καθαρής, πράσινης και ανανεώσιμης ενέργειας για να επιτύχουν μια κοινωνία χαμηλών εκπομπών άνθρακα/ουδέτερης εκπομπών άνθρακα (Tabelin et al. 2021). Ο δεύτερος λόγος είναι η δημιουργία ενός εναλλακτικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, κάτι από το οποίο οι μπαταρίες ιόντων λιθίου απέχουν πολύ από την υλοποίηση του (Tabelin et al. 2021). Τέλος ο τρίτος λόγος είναι οι μοναδικές φυσικές και χημικές ιδιότητες του λιθίου που το καθιστούν απαραίτητο σε πολλές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.

Η πρόσφατη έκθεση του Ομίλου της Παγκόσμιας Τράπεζας εξηγεί ότι η ζήτηση του λιθίου θα εκτοξευτεί μέχρι το 2050 σε 415. 000 τόνους κάτι το οποίο θα βοηθήσει να περιοριστεί η μέση αύξηση της θερμοκρασίας σε 2°C και έως το 2100 θα έχουν περιοριστεί οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι, με την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση του λιθίου στην σύγχρονη κοινωνία πολλοί επιστήμονες το χαρακτηρίζουν ως νέο «λευκό» χρυσό.

Η βιωσιμότητα στις μπαταρίες είναι ένα πολύ περίπλοκο ζήτημα που σχετίζεται με την εξάντληση των φυσικών πόρων, για αυτό το λόγο θα εξεταστούν τα στάδια που απαιτούνται ώστε να κατασκευαστεί η μπαταρία. Αρχικά, για να κατασκευαστεί μια μπαταρία χρειάζεται

μα αλυσίδα εφοδιασμού πρώτων υλών που περιλαμβάνουν συλλέκτες ρεύματος, ενεργά υλικά ηλεκτροδίων, ηλεκτρολύτες κ. ά. (Σχ. 1. 2). Τοποθετώντας όλα τα υλικά αυτά στην κατασκευή της μπαταρίας σε συνδυασμό με την απόδοση, την διάρκεια ζωής της και την ανακύκλωση της, επιτυγχάνεται η δημιουργία μιας βιώσιμης μπαταρίας που πρέπει να συμβαδίζει στο χαμηλό κόστος και στην καλή απόδοση (Σχ. 1. 3).



Σχ. 1. 2. Ο κύκλος δημιουργίας μιας βιώσιμης επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. (Advanced Energy Materials)

Σύμφωνα με την σημερινή τεχνολογία οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες χωρίζονται σε τρεις γενιές: την σημερινή, την επόμενη και την μελλοντική (Σχ. 1. 4). Η σημερινή γενιά μπαταριών είναι μπαταρίες ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούνται στην καθημερινότητα με βελτιωμένη απόδοση και μειωμένο κόστος, με την πάροδο του χρόνου αυτές οι μπαταρίες θα αντικατασταθούν από άλλες με διαφορετική χημική σύσταση. Οι μπαταρίες αυτές θα βασίζονται σε υψηλή τάση και θα περιέχουν μειωμένο ποσοστό κοβαλτίου όπου χρησιμοποιείται στις σημερινές μπαταρίες, το λίθιο θα χρησιμοποιείται με άλλα διάφορα κράματα. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο θα συνυπάρχουν με τις μπαταρίες επόμενης και μελλοντικής γενιάς.

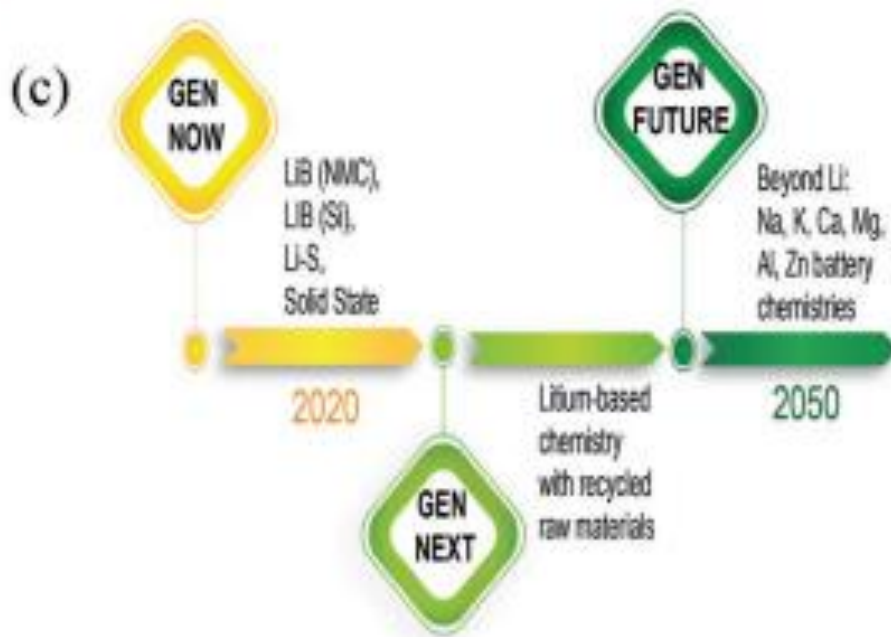
Οι σημερινές μπαταρίες προσφέρουν μια καλύτερη προοπτική στην βιωσιμότητα σε σύγκριση με τις μπαταρίες παλαιότερων γενιών, καθώς περιέχουν περισσότερο νικέλιο αντί για κοβάλτιο (το νικέλιο είναι πιο άφθονο σε σχέση με το κοβάλτιο), το λίθιο χρησιμοποιείται μαζί με άλλα κράματα, οπότε η ποσότητα χρήσης του μειώνεται (Tabelin et al. 2021).



Σχ. 1. 3. Ιδανική εικόνα ενός βιώσιμου οικολογικού σχεδιασμού μπαταρίας με απόδοση και κόστος. (Advanced Energy Materials)

Οι μπαταρίες επόμενης γενιάς θα κατασκευάζονται από ανακυκλώσιμα υλικά και θα υπερτερούν με τις σημερινές μπαταρίες. Αυτή η παραγωγή μπαταριών θα απαιτήσει ευρεία ανακύκλωση που θα εφαρμόζεται σε βιομηχανική κλίμακα ώστε να μπορέσει να επιτραπεί η ανακύκλωση κρίσιμων ακατέργαστων μετάλλων με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε νέες μπαταρίες. Οι μελλοντικές μπαταρίες θα βασίζονται σε χημικά στοιχεία πέρα από το λίθιο και θα είναι κατάλληλες για υψηλή βιωσιμότητα, αυτό θα επιτευχθεί καθώς οι μπαταρίες θα στοχεύουν στην αποθήκευση ενέργειας σε άλλα στοιχεία όπως το νάτριο ή το κάλιο δηλαδή ιόντα με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (Tabelin et al.2021,).

Το ακριβές χρονοδιάγραμμα είναι δύσκολο να δοθεί για το πότε θα διατεθούν οι μπαταρίες επόμενης γενιάς στο εμπόριο, καθώς υπάρχουν διάφορες επιχειρηματικές στρατηγικές στους κατασκευαστές των μπαταριών, την μελλοντική διαθεσιμότητα και ο επενδυτικός κίνδυνος που μπορεί να περιέχει μια τέτοια μετάβαση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται με σταδιακή εξέλιξη για πολλά χρόνια, οι μπαταρίες επόμενης και μελλοντικής γενιάς θα είναι η εξέλιξη των μπαταριών ιόντων λιθίου με κάποια διαφορετικά χημικά στοιχεία. Όλα αυτά όμως θα διαμορφωθούν από την ζήτηση της αγοράς και των αποθεμάτων σε κρίσιμα μέταλλα. Ανεξάρτητα από το πότε θα είναι διαθέσιμες αυτές οι μπαταρίες είναι αδιαμφισβήτητο ότι θα είναι υψηλής τεχνολογίας και απόδοσης ώστε να βοηθήσουν στην επίλυση του μεγαλύτερου προβλήματος που αντιμετωπίζει αυτή την στιγμή η ανθρωπότητα την κλιματική αλλαγή (Tabelin et al. 2021).

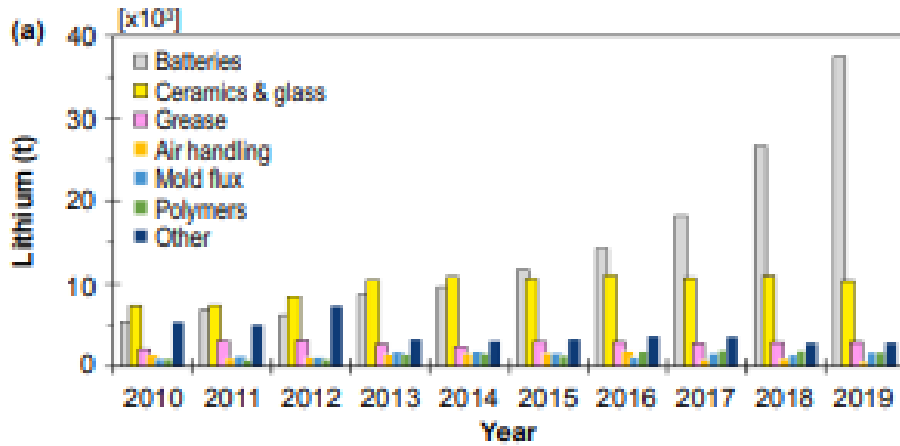


Σχ. 1. 4. Μια σχηματική απεικόνιση για την μετάβαση στις μελλοντικές μπαταρίες.

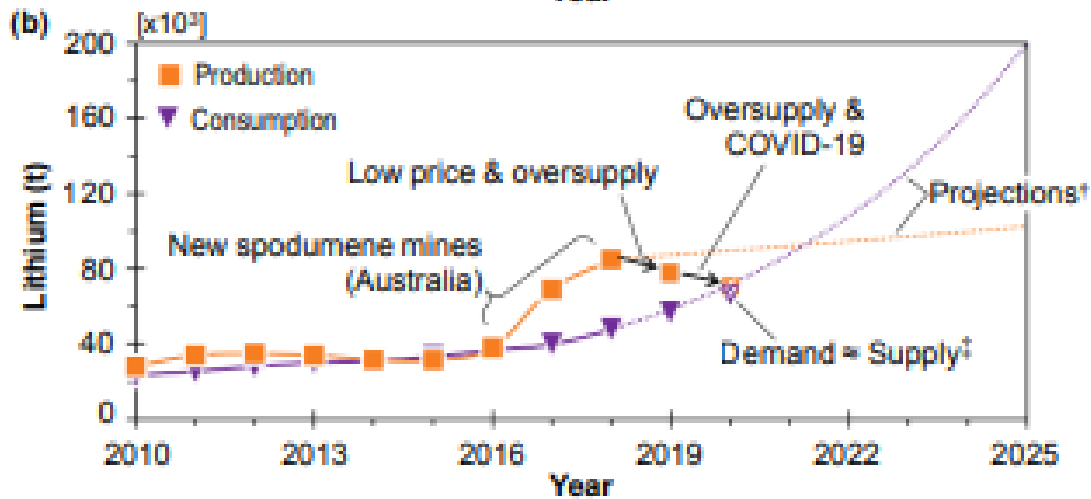
2. ΛΙΘΙΟ

Το λίθιο ανακαλύφθηκε το 1817 από τον Johan August Arfvedson (Tabelin et al.2021) αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα μέταλλα για την παραγωγή μπαταριών ιόντων λιθίου λόγω της αντιδραστικότητάς τους, το μικρό ατομικό βάρος και την ικανότητα ανταλλαγής ιόντων (Tabelin et al. 2021,). Το λίθιο χρησιμοποιείται επίσης ευρέως σε γυάλινα και κεραμικά (Tabelin et al.2021,). Έχει επίσης καταχωρηθεί από το Κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, μεταξύ άλλων μετάλλων ότι το λίθιο αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέταλλο το οποίο θα αποτελέσει πρωταρχικό ρόλο στην οικονομική ανάπτυξη των κρατών, καθώς εφαρμόζεται σε πολλούς διαφορετικούς κλάδους (Tabelin et al.2021).

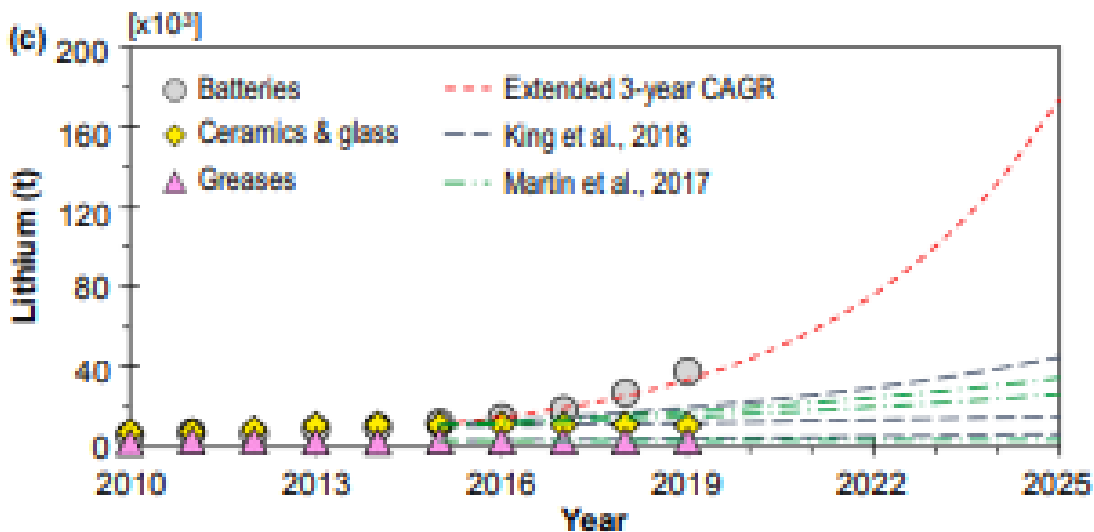
Η παραγωγή λιθίου έχει τριπλασιαστεί την τελευταία δεκαετία (Σχ2. 1), αξιοσημείωτο είναι ότι η παραγωγή του λιθίου μεταξύ του 2016 και 2017 αυξήθηκε κατά 75% ενώ μεταξύ 2017 έως 2018 αυξήθηκε επιπλέον κατά 23%. Μεγάλο μέρος αυτής της αύξησης οφείλεται στην έναρξη τριών επιχειρήσεων στην Αυστραλία (Tabelin et al.2021,). Μέχρι το 2021, η παραγωγή λιθίου της Αυστραλίας αναμένεται να φτάσει περίπου τους 67. 300 τόνους, εμφανίζοντας αύξηση κατά 23% (Σχ. 2.2). Οι προβλέψεις για την μελλοντική ζήτηση και προσφορά του λιθίου ποικίλλουν λόγω της πολυπλοκότητας των διάφορων αγορών, των απαιτήσεων των βιομηχανιών, τις πολιτικές επιρροές και τις νέες τεχνολογίες (Tabelin et al.2021). Το Σχ2. 3 απεικονίζει την ζήτηση του λιθίου που υπάρχει για κεραμικά, μπαταρίες, γυαλί, γράσα λιθίου συμπεριλαμβάνοντας την ανάπτυξη αυτών των κλάδων σε μελλοντικό χρόνο. Το 2019 υπήρξε μια εκτόξευση της ζήτησης λιθίου καθώς αυξήθηκε η παραγωγή μπαταριών ιόντων λιθίου (Σχ. 2.3), η πρόβλεψη για την αύξηση της ζήτησης αυτής ήταν 32%, όμως στην πραγματικότητα αυτό το ποσοστό ήταν το τριπλάσιο. Αν αυτή η ζήτηση επεκταθεί μέχρι το 2025 θα χρειάζονται 174. 000 τόνοι λιθίου για την παραγωγή μπαταριών ιόντων λιθίου. Έτσι με την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση του λιθίου που μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 200. 000 τόνους ετησίως θα χρειαστούν να εκτελεστούν μεγάλες εξορύξεις που θα έχουν σοβαρό αντίκτυπο στο περιβάλλον.



Σχ. 2. 1. Παγκόσμια κατανάλωση λιθίου από το 2010 έως το 2019 (Tabelin et al. 2021).



Σχ. 2. 2. Παγκόσμια παραγωγή (προσφορά) και κατανάλωση (ζήτηση) από το 2010 έως το 2019 (Tabelin et al.2021).



Σχ. 2. 3. Παγκόσμια ζήτηση λιθίου των τριών βασικών κατηγοριών κατανάλωσης λιθίου (Tabelin et al.2021).

Η εμφάνιση του λιθίου στην φύση είναι αρκετά συχνή σε υψηλές συγκεντρώσεις με τα περισσότερα κοιτάσματα να εμφανίζονται σε συγκεκριμένες χώρες κάτι που τις καθιστά πιο ισχυρές οικονομικά, καθώς μπορούν να εκμεταλλεύονται αυτά τα κοιτάσματα. Σημαντικά οικονομικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα εμφανίζονται στην Αργεντινή, στην Αυστραλία, στην Χιλή, στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, στην Βολιβία και στην Κίνα (Σχ. 2. 4), τα κοιτάσματα αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: κοιτάσματα σε αλμυρές λίμνες, κοιτάσματα σε πηγματίτες και σε πλούσιες σε λίθιο άργιλοι ή ιζηματογενή κοιτάσματα.

Τα κοιτάσματα στις αλμυρές λίμνες βρίσκονται κοντά σε ηφαιστειακές περιοχές μέσα σε κλειστές λεκάνες, εκεί εμφανίζονται αρκετά υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης λιθίου λόγω της έντονης εξάτμισης και των χαμηλών ποσοστών κατακρήμνισης. Ωστόσο, το λίθιο σε αυτά τα κοιτάσματα είναι σε χαμηλό ποσοστό περίπου 200-4000mg/L λιθίου (Tabelin et al.2021). Οι συγκεντρώσεις του λιθίου εντοπίζονται σε διαφορετικές περιοχές των λιμνών δηλαδή σε διαφορετικούς χώρους αποθήκευσης κάτι το οποίο κάνει την εξόρυξη και την έρευνα πιο δαπανηρή σε θέμα κόστους και χρόνου εργασίας (Tabelin et al.2021). Τα κοιτάσματα αυτά στην Νότια Αμερική εντοπίζονται σε μεγάλα υψόμετρα εκεί όπου η εξάτμιση λειτουργεί ως κατασταλτικός παράγοντας και βοηθάει στην δημιουργία κοιτασμάτων με πολύ υψηλή συγκέντρωση λιθίου. Για παράδειγμα, το Salar de Olaroz και το Salar del Hombre Muerto στην Αργεντινή περιέχουν 620-690 mg/L Li⁺ ενώ η συγκέντρωση στο Salar de Atacama της Χιλής είναι υψηλότερο στα ~1500 mg/L. Αυτά τα κοιτάσματα αποτελούν και το γνωστό τρίγωνο παραγωγής λιθίου μεταξύ της Αργεντινής, της Βολιβίας και της Χιλής που κατέχουν το περίπου το 59% παραγωγής λιθίου σε παγκόσμιο επίπεδο.

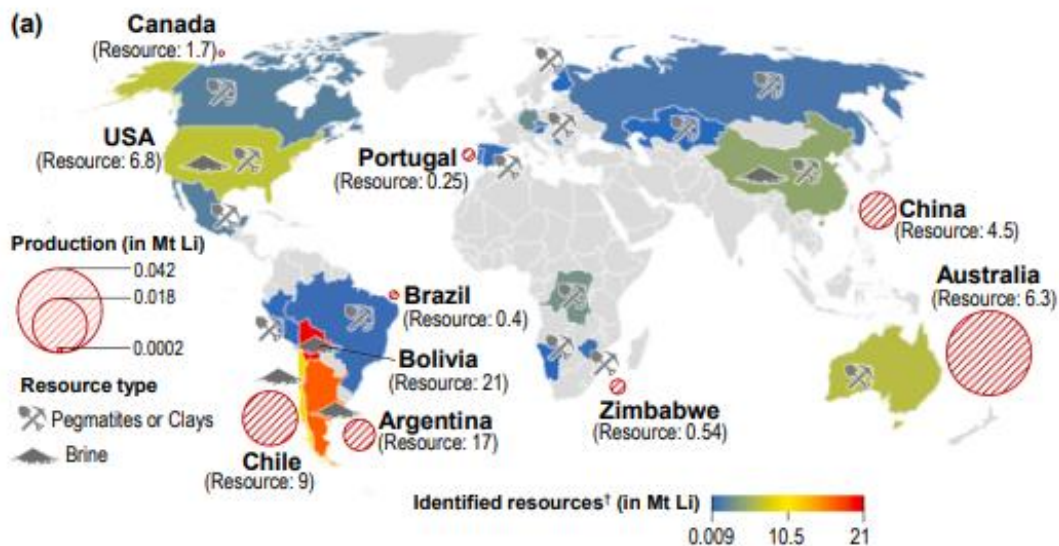
Εκτός από την Νότια Αμερική τα δεύτερα μεγαλύτερα κοιτάσματα λιθίου έχει η Κίνα που βρέθηκαν σε τρεις αλμυρές λίμνες: Chaerhan, West Taijinar και Zhabuye. Οι μέσες συγκεντρώσεις Li⁺ στο Chaerhan και στο West Taijinar είναι 210-350 και 100-300 mg/L, ενώ αυτό που βρέθηκε στο Zhabuye είναι υψηλότερο στα ~1000 mg/L (Tabelin et al.2021). Επιπλέον, υπάρχει και ένα πολύ σημαντικό κοιτάσμα στην κοιλάδα Clayton στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής με μέση συγκέντρωση λιθίου στα 230mg/L (Tabelin et al.2021). Πιο πρόσφατα ένα τέτοιο μεγάλο κοιτάσμα ανακαλύφθηκε στην Σιβηρική χερσόνησο και εκτείνεται σε μια τεράστια περιοχή της Ρωσίας έχοντας έκταση πάνω από 4. 400. 000 km² με συγκέντρωση λιθίου στα 600mg/L (Tabelin et al.2021). Επίσης κοιτάσματα λιθίου εντοπίστηκαν μέσα σε κοιτάσματα υδρογονανθράκων στην περιοχή Gulf Coast των ΗΠΑ με συγκέντρωση 370mg/L (Tabelin et al.2021), μετά από αυτήν την ανακάλυψη συνεχίζονται οι έρευνες για τον εντοπισμό και άλλων τέτοιων κοιτασμάτων (Tabelin et al.2021).

Οι καλύτερες εμφανίσεις λιθίου σε ορυκτά βρίσκονται στους πηγματίτες, οι πηγματίτες είναι πυριγενή πετρώματα που κατατάσσονται στην κατηγορία των φλεβικών πετρωμάτων. Το λίθιο στους πηγματίτες βρίσκεται σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις από τα κοιτάσματα των αλμυρών λιμνών που φέρουν λίθιο με υψηλότερη ποιότητα λιθίου και μεγαλύτερο ποσοστό αποκατάστασης (60-70%). Ωστόσο, η μεγάλη σκληρότητα που έχουν τα πυριγενή πετρώματα (γρανιτικοί πλουτωνίτες) οδηγούν σε δύσκολη πρόσβαση στις φλέβες που έχει σαν αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η εξόρυξη αυτών των κοιτασμάτων και να ανεβαίνει το κόστος εξόρυξης (Tabelin et al.2021). Παρά αυτές τις δυσκολίες τα κοιτάσματα των πηγματιτών παραμένουν στο κέντρο ενδιαφέροντος, καθώς έχουν μεγάλη παγκόσμια εξάπλωση σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία κοιτασμάτων. Το ορυκτό σποδομένης (LiAlSi₂O₆) είναι το κύριο ορυκτό του πηγματίτη που μπορεί να περιέχει λίθιο. Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα του σποδομένη στον κόσμο βρίσκονται στην Αυστραλία (Σχ. 2. 5) με συνολικό απόθεμα ισοδυναμεί με 5, 58 Mt Li, αυτά τα κοιτάσματα βρίσκονται: 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, μέσος όρος ποιότητας μεταλλεύματος 1, 21% Li), Pilgangoora-Pilbara (0, 91 Mt Li, μέση ποιότητα

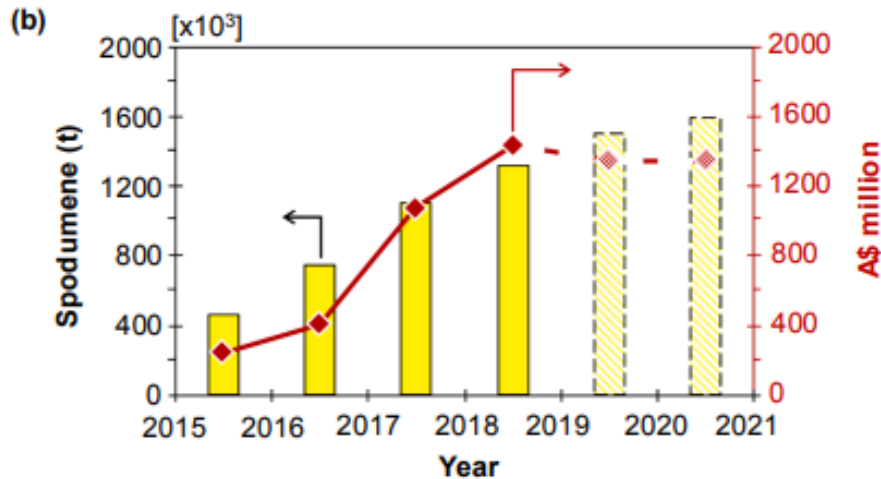
μεταλλεύματος 1, 25% Li), Mount Marion (0, 49 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1, 37% Li), και Pilgangoora-Altura (0, 2 Mt Li, μέση ποιότητα μεταλλεύματος 1, 0% Li) (Tabelin et al.2021).

Επιπρόσθετα, κοιτάσματα πηγματιτών συναντώνται στον Καναδά σε τέσσερις περιοχές: James Bay (0, 26 Mt Li, μέσος όρος ποιότητας μεταλλεύματος 1, 4% Li), λίθιο του Κεμπέκ (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) (Tabelin et al.2021). Άλλα παγκόσμια μεγάλα τέτοιας κατηγορίας κοιτάσματα είναι η Goulamina (0, 64 Mt Li, μέσης ποιότητας μεταλλεύματος 1, 34% Li) στο Μάλι, το San Jose στην Ισπανία, Arcadia και Bikita στην Ζιμπάμπουε (Tabelin et al.2021).

Τέλος, αυξημένες συγκεντρώσεις λιθίου μπορούν να εμφανίζονται σε αργίλους κυρίως σε σμεκτίτη, όμως η κατηγορία αυτή των κοιτασμάτων αντιπροσωπεύει <3% των παγκόσμιων αποθεμάτων σε λίθιο. Μέχρι σήμερα εντοπίζονται δυο σημαντικά τέτοια κοιτάσματα το ένα βρίσκεται στην Νεβάδα στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και το άλλο βρίσκεται στο Μεξικό (Tabelin et al.2021).



Σχ. 2. 4. Παγκόσμια κατανομή των κοιτασμάτων λιθίου και παραγωγής του έτους 2019 (USGS, 2020).

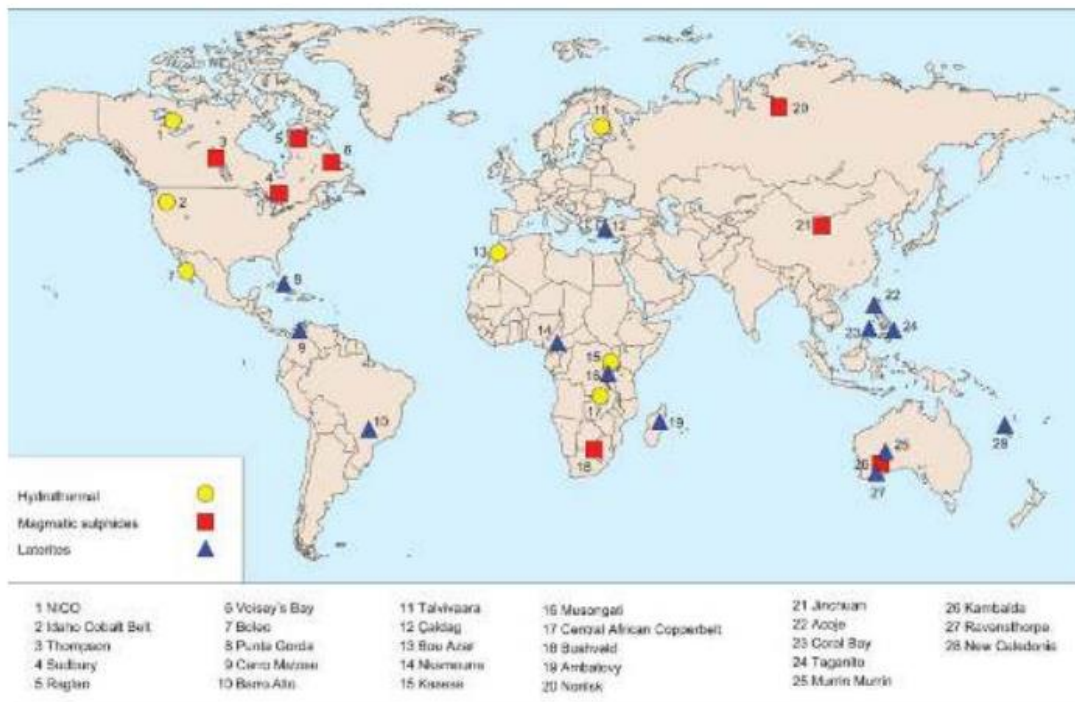


Σχ. 2. 5. Αυστραλιανή παραγωγή σποδομένη από το 2015 έως το 2019 και προβλέψεις παραγωγής για το 2020 και 2021 (Department of Industry, Innovation and Science, 2019).

3. ΚΟΒΑΛΤΙΟ

Το κοβάλτιο έχει χρησιμοποιηθεί παλαιότερα κυρίως για να προσδώσει ένα βαθύ μπλε χρώμα στο γυαλί και στα κεραμικά. Ωστόσο, το κοβάλτιο απομονώθηκε ως καθαρό μέταλλο το 1735 από τον Σουηδό χημικό George Brandt και από τότε άρχισε να έχει αυξανόμενη ζήτηση, καθώς άρχισε η ανάπτυξη των κραμάτων χρωμίου-κοβαλτίου. Η ζήτηση κοβαλτίου έχει επιταχυνθεί περαιτέρω τα τελευταία 30 χρόνια, αντανακλώντας την αυξημένη χρήση του ως βασικό συστατικό των υλικών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας συμπεριλαμβανομένων επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, υπερκράματα και καταλύτες.

Στην φύση δεν συναντάται καθαρό κοβάλτιο, καθώς λόγω των χακλόφιλων και σιδηρόφιλων ιδιοτήτων του δεσμεύεται με το σίδηρο, το νικέλιο, το χαλκό και το θείο μέσα σε σουλφίδια και αρσενοσουλφίδια. Παρά την χαμηλή αφθονία του κοβαλτίου στον φλοιό της Γης, υπάρχουν αρκετά κοιτάσματα για την εξόρυξη και την χρήση του κοβαλτίου. Οι τύποι των κοιτασμάτων όπου συναντάται είναι: υδροθερμικά, μαγματικά και λατεριτικά κοιτάσματα (Σχ. 3. 1). Ένας τέταρτος τύπος κοιτάσματος κοβαλτίου που είναι μέχρι στιγμής ανεκμετάλλευτος είναι το κοβάλτιο που υπάρχει στα οξείδια της βαθιάς θάλασσας μαζί με μεγάλες ποσότητες μαγγανίου και νικελίου. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα κοβαλτίου βρίσκονται στην Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό και την Ζάμπια, όπου το κοβάλτιο εκεί εξορύσσεται ως υποπροϊόν του χαλκού και στην Ρωσία, Αυστραλία όπου εκεί το κοβάλτιο εξορύσσεται ως υποπροϊόν του νικελίου.



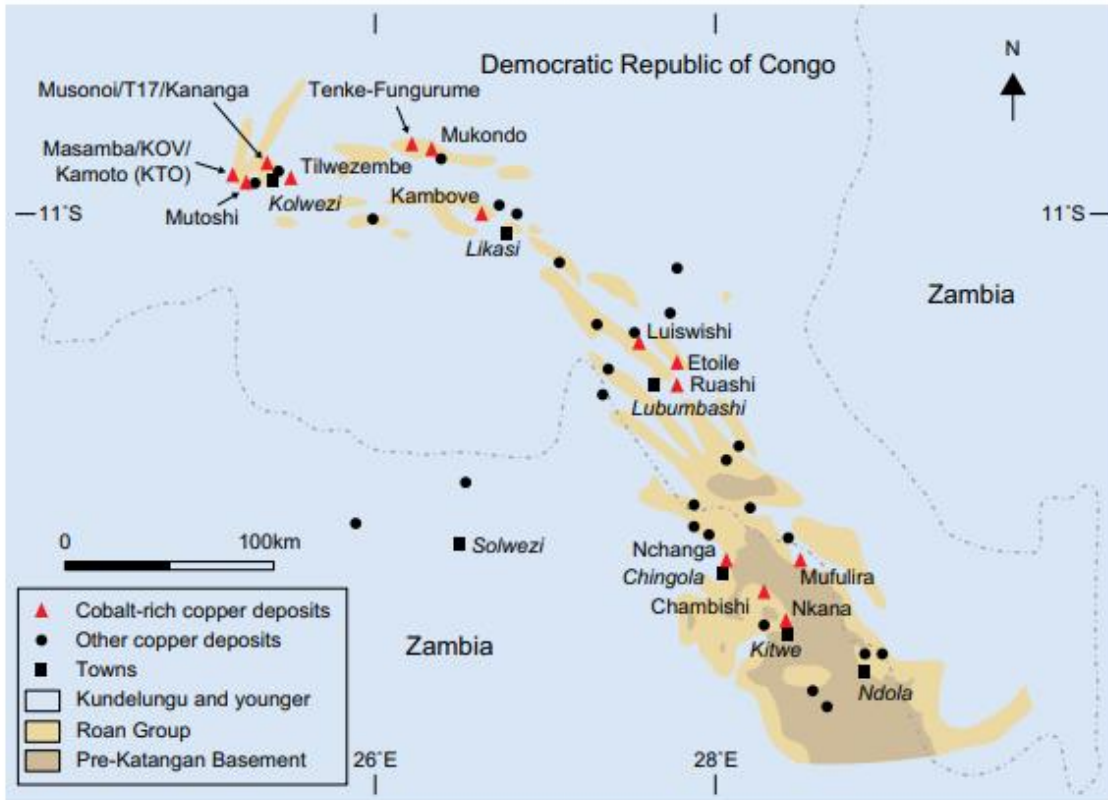
Σχ. 3. 1. Μεγάλα ορυχεία και περιοχές παραγωγής κοβαλτίου. Τύποι κοιτασμάτων: υδροθερμικά, λατεριτικά και μαγματικά. (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014)

Τα υδροθερμικά κοιτάσματα προέρχονται από τα υδροθερμικά ρευστά όπου αποθέτουν την μεταλλοφορία τους στα βασικά και υπερβασικά πετρώματα ή στις ιζηματογενείς λεκάνες. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα αυτού του τύπου είναι το Bou Azer στο Μαρόκο που εξορύσσει κοβάλτιο σαν κύριο προϊόν, τα κοιτάσματα στην Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό και στην Ζάμπια.

Το κοιτάσμα Bou Azer στο Μαρόκο εντοπίζεται 320 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης Αγκαντίρ και περιέχει πάνω από 60 ορυχεία, όπου γίνεται εξόρυξη κοβαλτίου, νικελίου, αρσενικού, χρυσού και αργύρου. Αυτά τα ορυχεία παρήγαγαν περίπου 1800 τόνους κοβάλτιο το 2011 (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014) με κύρια υποπροϊόντα τον χρυσό, το νικέλιο και το αρσενικό. Το κοιτάσμα αυτό φιλοξενείται μέσα σε ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα Παλαιozoικής ηλικίας που περιλαμβάνει σερπεντινωμένους περιδοτίτες, δουνιτες και ακολουθεί μια σειρά από ηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα που περιέχει διορίτες, βασικές λάβες και ιζηματογενή πετρώματα (Stephen Roberts and Gus Gunn 2014). Η ζώνη μεταλλοφορίας του κοβαλτίου έχει πάχος 5 με 20 μέτρα και μήκος 50 έως 600 μέτρα μέσα στις ζώνες διάτμησης με την μορφή φακών. Οι ζώνες διάτμησης σχηματίζονται στις επαφές μεταξύ των σερπεντινιτών και των ηφαιστειακών πετρωμάτων (Stephen Roberts and Gus Gunn 2014). Η μεταλλοφορία του κοβαλτίου δημιουργήθηκε από την έκπλυση των μαγματικών υγρών στο οφιολιθικό σύμπλεγμα σε μέτριες αναγωγικές συνθήκες, έτσι η εναπόθεση των μετάλλων έγινε με την αύξηση του pH σε συνδυασμό της ανάμειξης του μάγματος με μετεωρικό νερό. Στο συγκεκριμένο υδροθερμικό κοιτάσμα η επικράτηση του κοβαλτίου έναντι των άλλων μετάλλων οφείλεται στα διαφορετικά ποσοστά διαλυτότητας του νικελίου (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

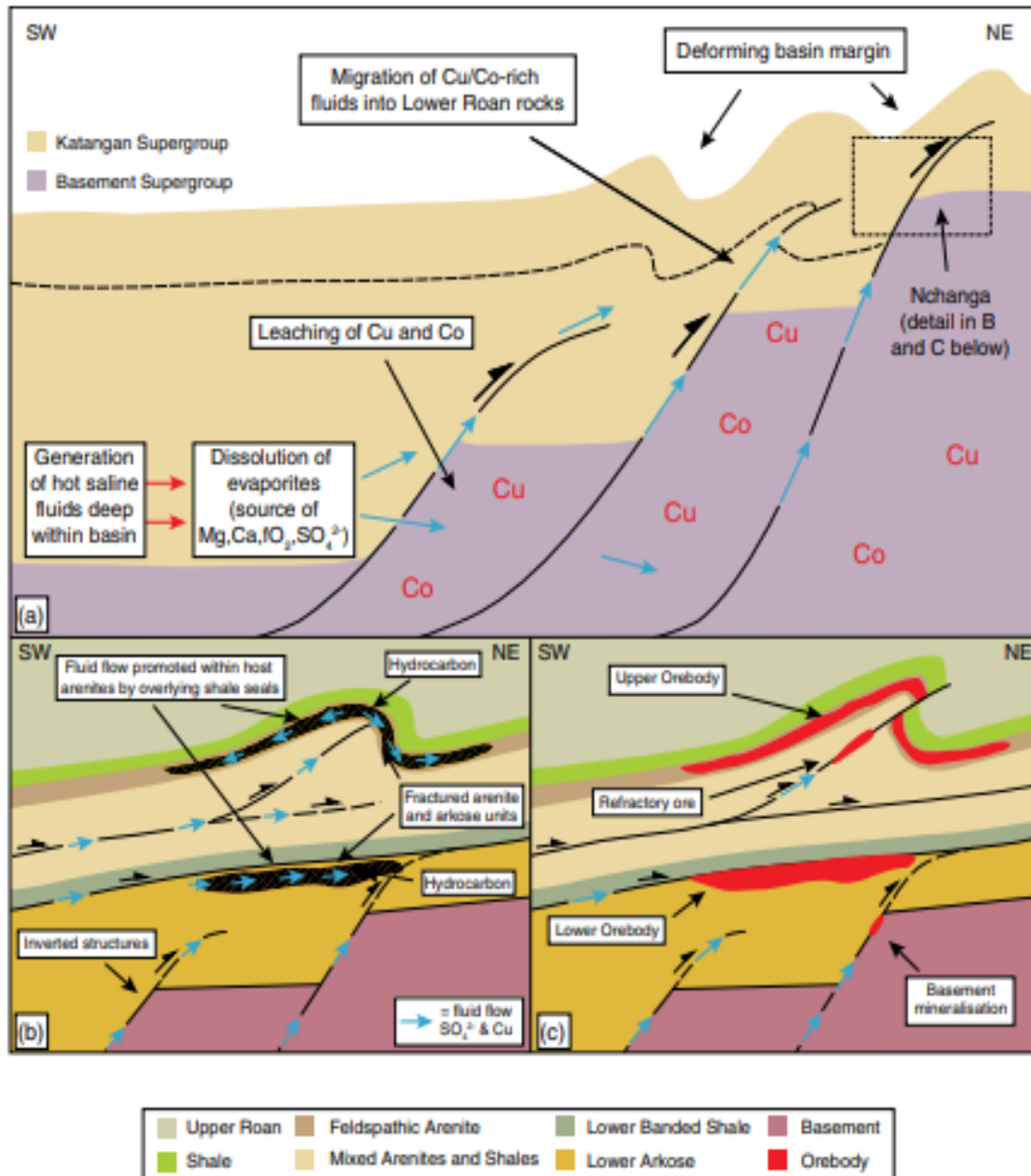
Ένα από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα κοβαλτίου βρίσκεται ανάμεσα στην περιοχή Κατάνγκα της Λαϊκής Δημοκρατίας του Κονγκό και στην βορειοδυτική πλευρά της Ζάμπια, το κοιτάσμα αυτό παράγει τα 2/3 της παγκόσμιας παραγωγής κοβαλτίου όπου το 2010 είχε παραγωγή 70. 000 τόνους μεταλλεύματος κοβαλτίου (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014) (Σχ. 3. 2). Τα μεταλλεύματα χαλκού-κοβαλτίου φιλοξενούνται μέσα σε πυριτικά, ανθρακικά

ιζηματογενή πετρώματα καθώς και σε πλουτωνικά, ηφαιστειακά πετρώματα που συναντώνται στην ηπειρωτική περιοχή της Κατάγκκα (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014). Στη Ζάμπια τα κοιτάσματα χαλκού -κοβαλτίου φιλοξενούνται μέσα σε παρααντόχθονα πυροκλαστικά πετρώματα σε αντίθεση με αυτά του Κονγκό που βρίσκονται μέσα σε πετρώματα ξενιστές, οι κύριες λιθολογικές ενότητες στην Ζάμπια είναι δολομίτες και δολομιτικοί σχιστόλιθοι (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014). Η μεταλλοφορία αποτέθηκε πριν λάβουν χώρα οι συμπιεστικές τάσεις στην Αφρικανική πλάκα, καθώς εμφανίζεται επωθημένη και μέσα σε πτυχές.



Σχ. 3. 2. Τα κοιτάσματα στην Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό και στην Ζάμπια (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

Τα μεταλλεύματα χαλκού και κοβαλτίου αποτελούν κυρίως διάσπαρτα σουλφίδια, σχηματίζοντας στρωματοειδή κοιτάσματα που φιλοξενούνται σε λεπτόκοκκα πυριτοκλαστικά ή δολομιτικά ιζηματογενή πετρώματα, το κοβάλτιο εμφανίζεται μέσα σε πεντλανδίτη και σε σιδηροπυρίτη (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014). Στην Ζάμπια αν και τα κοιτάσματα κοβαλτίου -χαλκού βρίσκονται στα χαμηλότερα στρώματα, συναντάται μεταλλοφορία και σε πιο ψηλά στρώματα (Σχ. 3. 3). Επομένως, η μεγάλη αυτή μεταλλοφορία που συναντάται στο Κονγκό και στην Ζάμπια αποτελεί ένα πολύ μεγάλο οικονομικό όφελος, καθώς με το πέρασμα των χρόνων η ζήτηση για κοβάλτιο αυξάνεται, οπότε αναμένεται και η άνοδο των τιμών.



Σχ. 3. 3. Ο τρόπος σχηματισμού της μεταλλοφορίας του κοβαλτίου στο κοιτάσματα της Ζάμπιας (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

Στα μαγματικά κοιτάσματα το ποσοστό του κοβαλτίου είναι πολύ μικρότερο, καθώς εξορύσσεται σαν υποπροϊόν του νικελίου και του χαλκού σε ποσοστό 0, 04-0, 08%. Οι μεταλλοφορίες φιλοξενούνται σε βασικά και υπερβασικά μάγματα που χαρακτηρίζονται από χαμηλό ποσοστό πυριτίου και αλκαλίων, όμως εμφανίζουν υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο. Μέσα στους θαλάμους μάγματος σχηματίστηκαν τα σουλφίδια όπως ο σιδηροπυρίτης, αρσενοπυρίτης, χαλκοπυρίτης που περιέχουν την μεταλλοφορία του κοβαλτίου. Τα πιο σημαντικά μαγματικά κοιτάσματα βρίσκονται στην Αυστραλία, στον Καναδά και στην Ρωσία.

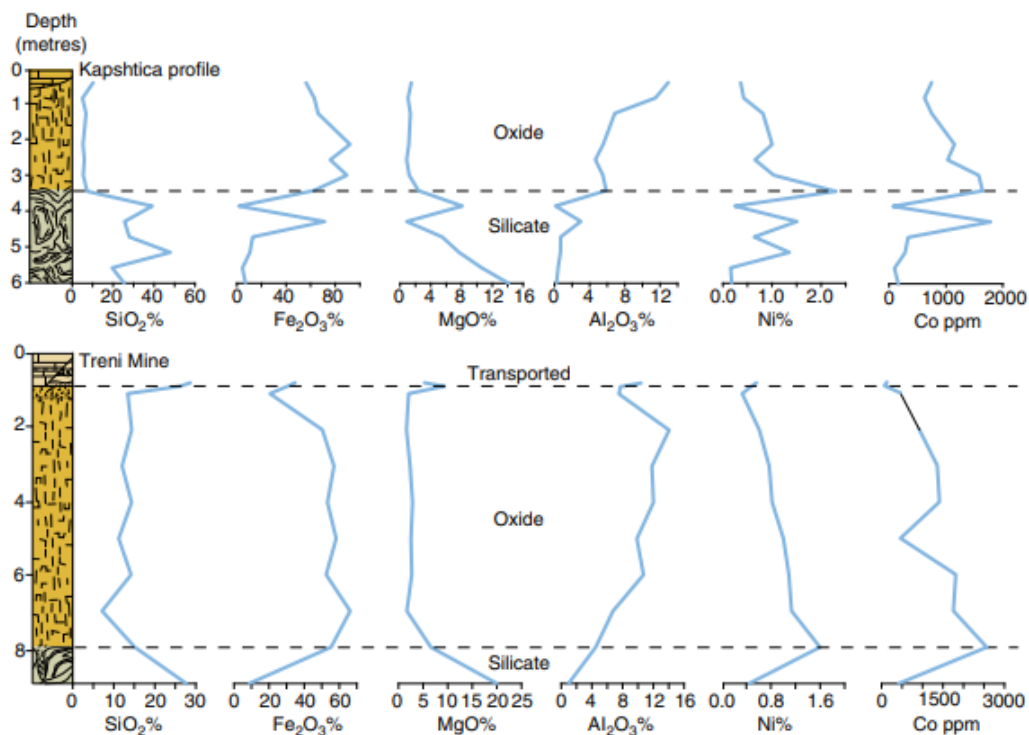
Το κοιτάσμα στην Αυστραλία βρίσκεται στην περιοχή Kambalda όπου είναι 700 χιλιόμετρα ανατολικά του Περθ, εκεί εντοπίζουμε μια σωρό μήκους 3 χιλιομέτρων από θολειτικούς βασάλτες που φιλοξενούν πάνω από 20 κοιτάσματα θείουχου νικελίου με σουλφίδια όπως χαλκοπυρίτη, πεντλανδίτη κ. α. που περιέχουν κοιλάτητες νικελίου με ποσοστό 1-4% και κοβαλτίου 0, 01-0, 33% (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

Το ορυχείο Voisey's Bay βρίσκεται περίπου 35 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά του Nain στο βόρειο Labrador στον Καναδά. Το 2012 η παραγωγή του ορυχείου ήταν 1221 τόνοι μεταλλεύματος με περιεκτικότητα σε κοβάλτιο περίπου 0, 12%. Το κοίτασμα αυτό φιλοξενείται μέσα σε γάββρους Παλαιozoϊκής ηλικίας και αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα απόθεσης μεταλλοφορίας θείουχων (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014). Η μεταλλοφορία έχει διαιρεθεί σε τέσσερις ζώνες την Eastern Deeps, την Ovoid, Discovery Hill και την Reid Brook, από τα ανατολικά προς τα δυτικά η ζώνη μεταλλοφορίες παχαίνει με αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγαλύτερων σουλφιδίων με μεγαλύτερη ποσότητα κοβαλτίου (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

Στην περιοχή του Νορίσκ στην Ρωσία φιλοξενείται ένα μεγάλο κοίτασμα κοβαλτίου, όπου δημιουργήθηκε κατά την Τριαδική εποχή από την διείσδυση του μάγματος μέσα στο μητρικό πέτρωμα και την απόθεση της μεταλλοφορίας του στους πόρους του πετρώματος. Η μεταλλοφορία αυτή αποτελείται από σουλφίδια που είναι εμπλουτισμένα σε χαλκό, νικέλιο και με στοιχεία της πλατίνας (PGE) και γίνεται η εξόρυξη του νικελίου ως υποπροϊόν. Έτσι το κοίτασμα μέσα στους βασάλτες εμφανίζεται με διάφορες μορφές και κατέχει μια σημαντική θέση παραγωγής στην παγκόσμια αγορά (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

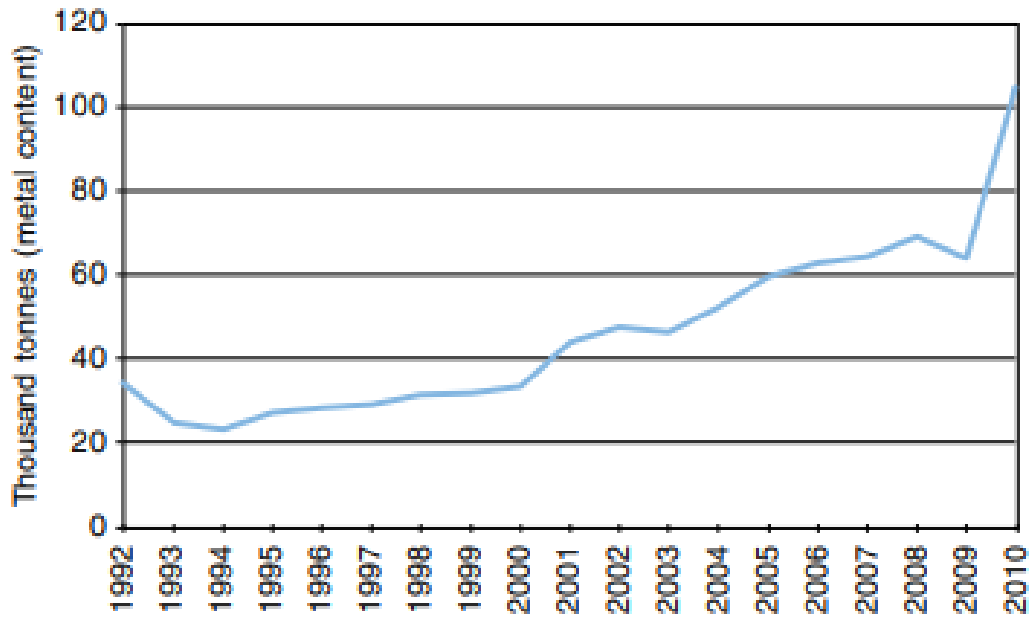
Τέλος, τα λατεριτικά κοιτάσματα περιέχουν περίπου το 70% των παγκόσμιων πόρων νικελίου και το 40% της παγκόσμιας παράγωγης νικελίου, όπου μέσα σε αυτά τα κοιτάσματα περιέχονται σημαντικές ποσότητες κοβαλτίου από 0, 025 έως 0, 18% (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014). Οι αποθέσεις αυτές είναι προϊόν της διάχυτης διάχυσης των υπερβασικών πετρωμάτων που περιέχουν 0, 06-0, 09% κοβάλτιο, σε τροπικά και υποτροπικά περιβάλλοντα. Τα λατεριτικά κοιτάσματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: σε ένυδρα πυριτικά κοιτάσματα, όπου το ένυδρο μαγνήσιο -νικέλιο εμφανίζεται στο κατώτερο μέρος του σαπρόλιτη, σε αποθέσεις πυριτικής αργίλου στο τμήμα του άνω σαπρόλιτη και σε αποθέσεις οξειδίων γνωστές ως αποθέσεις λειμωνίτη που περιλαμβάνουν σε μεγάλο βαθμό υδροξείδια σιδήρου όπου επικαλύπτουν το αλλοιωμένο πέτρωμα (Σχ. 3. 4) (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

Στα λατεριτικά κοιτάσματα ο κύριος παράγοντας σχηματισμού είναι το κλίμα, καθώς οι σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και οι έντονες βροχοπτώσεις διευκολύνουν στην αποσάθρωση του λατερίτη και στην καταστροφή των πρωτόλιθων που περιέχουν νικέλιο - κοβάλτιο. Έτσι, σε περιοχές με διαφορετικό κλίμα αναπτύσσονται διαφορετικά λατεριτικά κοιτάσματα, κοιτάσματα πλούσια σε πυριτική άργιλο εντοπίζονται σε ξηρές περιοχές ενώ ένυδρα κοιτάσματα σε περιοχές με υγρό κλίμα (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014). Τα σημαντικότερα λατεριτικά κοιτάσματα σε ψυχρό κλίμα συναντώνται στην περιοχή Bitincke της Αλβανίας και στην περιοχή Shevchenko στα Ουράλια όρη (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014) ενώ σε ξηρό κλίμα εμφανίζεται το κοίτασμα Murrin στην δυτική Αυστραλία (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

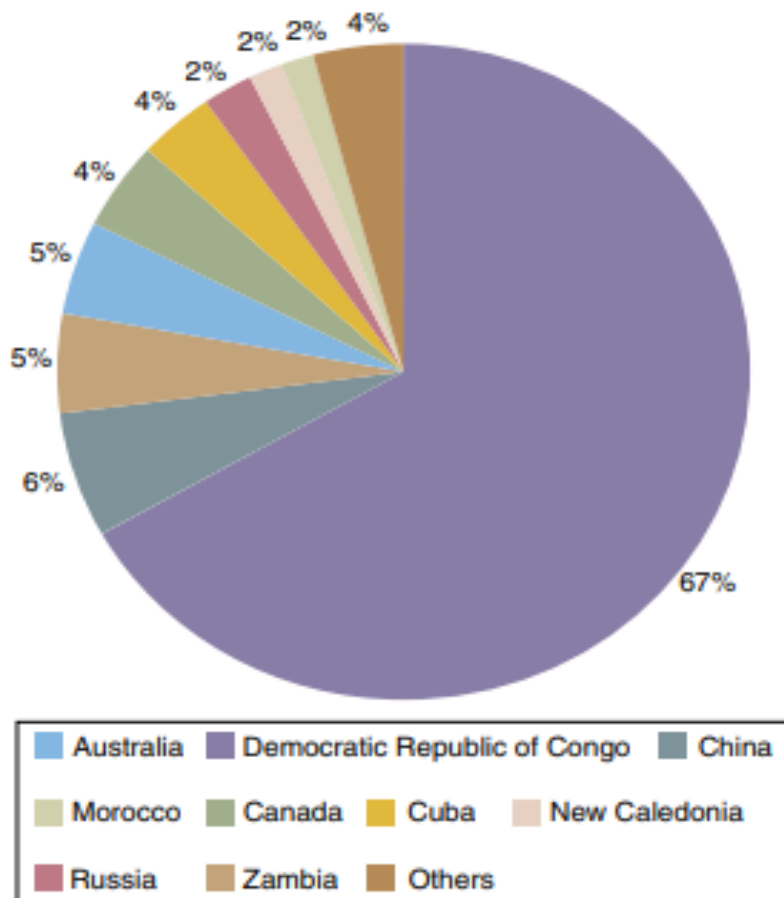


Σχ. 3. 4. Η γεωχημεία του λατερίτη που περιέχει κοβάλτιο σε σχέση με το βάθος (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

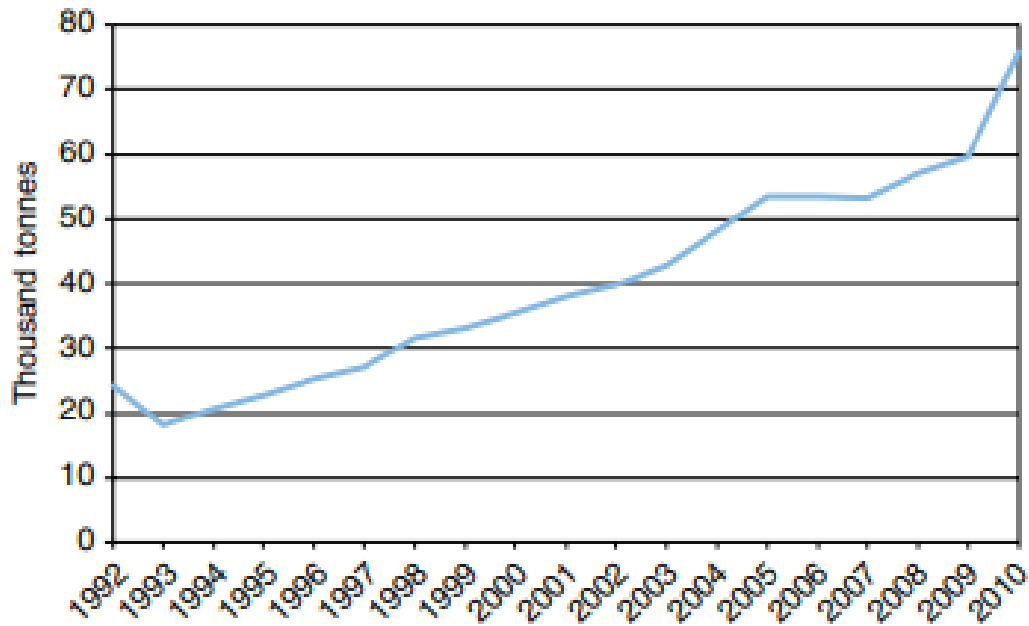
Η παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου προέρχεται από τα ορυχεία που βρίσκονται στην Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό με περισσότερο από το 65% της παγκόσμιας παραγωγής που είναι δέκα φορές μεγαλύτερη παραγωγή από την δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγή την Κίνα. Άλλοι σημαντικοί παραγωγοί, αλλά ο καθένας με λιγότερο από το 5% της παγκόσμιας παραγωγής περιλαμβάνουν Ζάμπια, Αυστραλία, Καναδά, Κούβα, Ρωσία και Μαρόκο. Η παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου έχει αυξηθεί δραματικά από την δεκαετία του 1990-2000, παρόλο την οικονομική ύφεση και την παγκόσμια κρίση που επικρατεί (Σχ. 3. 5), η παραγωγή από 47. 000 τόνους/έτος το 2002 αυξήθηκε σε 104. 000 τόνους/έτος το 2010 (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014). Αυτή η αύξηση φαίνεται χαρακτηριστικά στην παραγωγή κοβαλτίου από τα ορυχεία του Κονγκό καθώς την ίδια περίοδο η παραγωγή από 14. 500 τόνους αυξήθηκε στους 70. 000 τόνους (Σχ. 3. 6), έτσι η παραγωγή κοβαλτίου σαν μέταλλο αυξήθηκε σε μεγάλο βαθμό μέσα σε δυο δεκαετίες (Σχ. 3. 7). Κυρίαρχη παραγωγός χώρα σε κοβάλτιο ως μέταλλο είναι η Κίνα, όπου κατείχε το 40% της παγκόσμιας παραγωγής (Σχ. 3. 8), μετά την διαδέχεται η Φιλανδία με 12% και η Ζάμπια με 7%. Συνεπώς, παρόλο που τα μεγαλύτερα ορυχεία βρίσκονται στο Κονγκό αυτό κατέχει το 6% της παραγωγής κοβαλτίου ως μέταλλο (αφού έχουν αγοραστεί τα ορυχεία από την Κίνα). Η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος εισαγωγέας κοβαλτίου και εξευγενισμένων μετάλλων, καθώς έχει αγοράσει μερικά από τα μεγαλύτερα ορυχεία στο Κονγκό (Σχ. 3. 9). Το 2009 η Κίνα εισήγαγε περισσότερους από 283. 000 τόνους μεταλλεύματος κοβαλτίου και συμπυκνωμάτων με δεύτερη να ακολουθεί η Ζάμπια με 41. 000 τόνους.



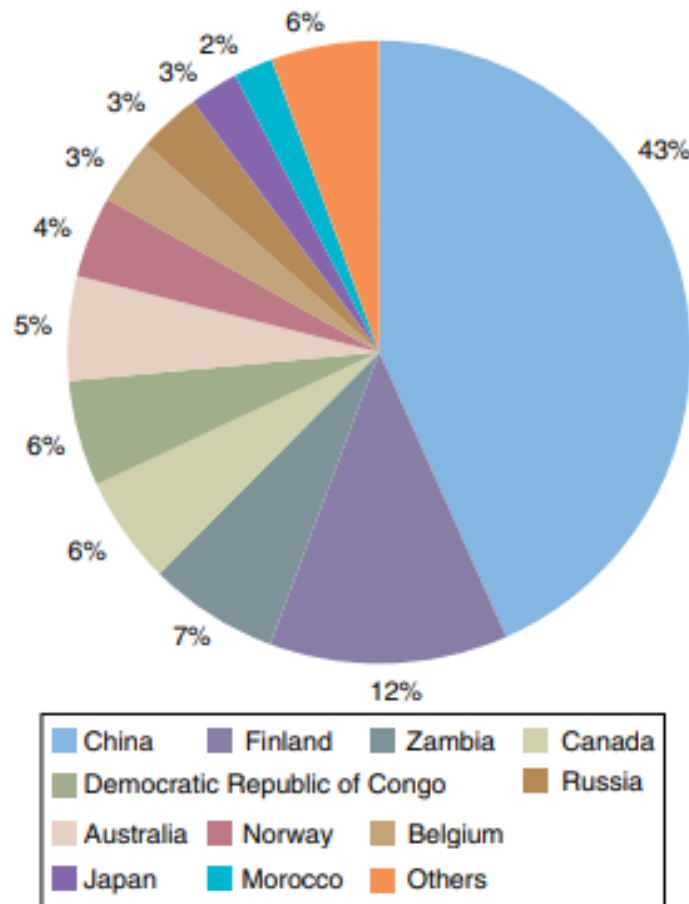
Σχ. 3. 5. Παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου από τα ορυχεία την περίοδο 1992-2010 (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014, British Geological Survey World Mineral Statistics database).



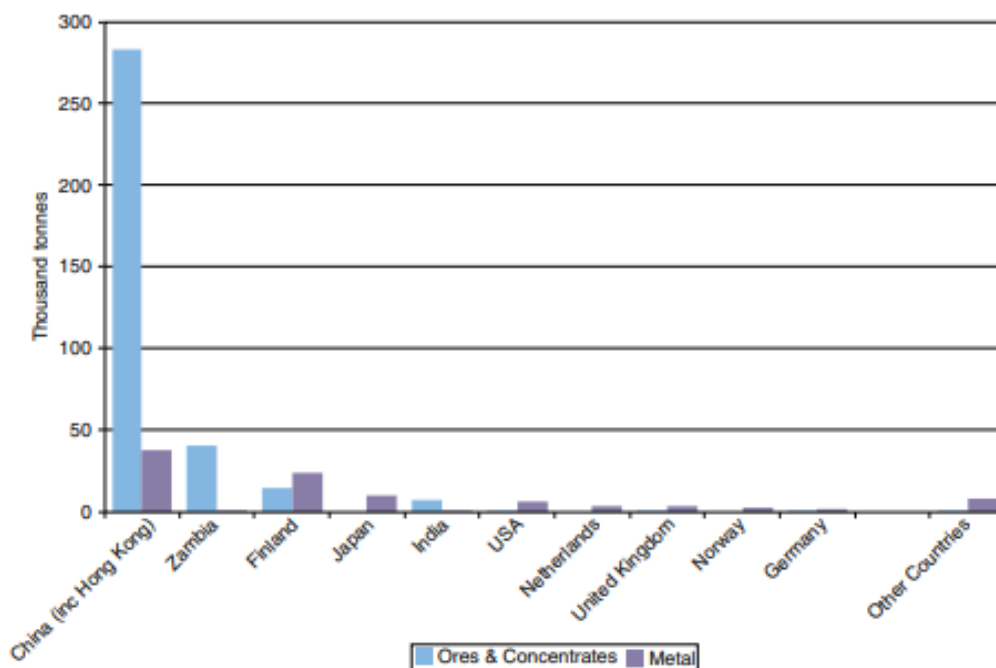
Σχ. 3. 6. Η διανομή της παγκόσμιας παραγωγής ορυχείων κοβαλτίου το 2010 ανά χώρα (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014, Data, British Geological Survey, 2012).



Σχ. 3. 7. Παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου ως μέταλλο από το 1992-2010 (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014, British Geological Survey World Mineral Statistics database)..



Σχ. 3. 8. Η παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου ως μέταλλο ανά χώρα (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014, British Geological Survey, 2012).



Σχ. 3. 9. Οι κύριες χώρες εισαγωγής μεταλλευμάτων και συμπυκνωμάτων κοβαλτίου και εξευγενισμένων μετάλλων το 2010 (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014, British Geological Survey World Mineral Statistics database and UN Comtrade, 2013).

Τα αποθέματα των κοιτασμάτων κοβαλτίου υπολογίζονται γύρω στα 7, 5 εκατομμύρια τόνους σύμφωνα με το US Geological Survey world, όπου κυριαρχεί η Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό με 45% και ακολουθεί με 19% η Αυστραλία. Τα αποθέματα κοβαλτίου εκτιμούνται ότι βρίσκονται μαζί με 15 εκατομμύρια τόνους νικελίου μέσα σε κοιτάσματα λατερίτη. Επιπλέον, έως και ένα δισεκατομμύριο τόνοι άγνωστου (υποθετικού και κερδοσκοπικού) μεταλλεύματος κοβαλτίου μπορεί να υπάρχει στα οξείδια μαγγανίου στον πυθμένα των ωκεανών (Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014).

Τέλος, το κοβάλτιο χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο ποσοστό (περίπου 30%) στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Χρησιμοποιείται σε τρία είδη μπαταριών, η πρώτη κατηγορία είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου που μπορεί να περιέχουν μέχρι και 60% κοβάλτιο ως οξείδιο λιθίου- κοβαλτίου, ωστόσο εξαρτάται από την χημική σύσταση την μπαταρίας, καθώς μπαταρίες που αποτελούνται από Li-Ni-Al-Co μπορεί να περιέχουν και 9% κοβάλτιο. Η δεύτερη κατηγορία είναι οι μπαταρίες νικελίου- μέταλλου που χρησιμοποιούνται σε υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα και περιέχει μέχρι 15% κοβαλτίου. Η τρίτη κατηγορία είναι οι μπαταρίες νικελίου- καδμίου που χρησιμοποιείται μέχρι 5% κοβάλτιο.

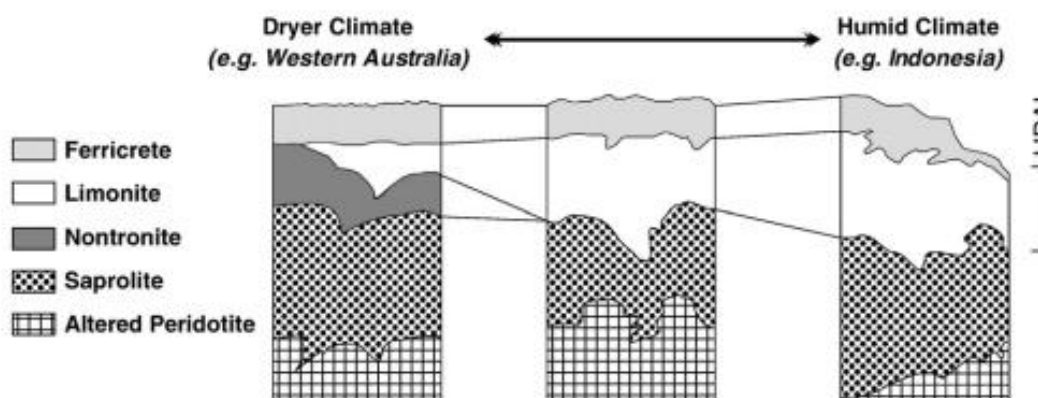
4. ΝΙΚΕΛΙΟ

Το νικέλιο μαζί με τα άλλα δυο προηγούμενα στοιχεία το λίθιο και το κοβάλτιο αποτελούν βασικά στοιχεία στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και σε πολλές νέες τεχνολογίες. Η χρήση του νικελίου έχει μακρά ιστορία, καθώς έχει διάφορες εφαρμογές μέσα στον χρόνο. Το στοιχείο αυτό ανακαλύφθηκε επίσημα το 1751 από τον Axel Fredrik Cronstedt (Konstantinos Gounaris, 2019), παρόλα αυτά είχε χρησιμοποιηθεί πολύ πιο νωρίς σε ορισμένα κράματα χαλκού και ως υποκατάστατο του ασημιού. Από την αρχή της

βιομηχανικής επανάστασης η χρήση του νικελίου επεκτάθηκε στην κατασκευή ανοξειδώτου χάλυβα, σε ηλεκτρικές συσκευές και στις μπαταρίες (Konstantinos Gounaris, 2019). Η ζήτησή του αυξάνεται συνεχώς και ακόμη περισσότερο μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου (Konstantinos Gounaris, 2019) και συνεχίζεται μέχρι σήμερα με γρηγορότερο ρυθμό λόγω των νέων τεχνολογιών.

Ως μέταλλο το νικέλιο θεωρείται ένας <<πεπερασμένος>> πόρος και επομένως η εξόρυξη του να είναι μη βιώσιμη. Ωστόσο, με την κατάλληλη τεχνολογία, πολιτικές αποφάσεις και διάφορα προγράμματα το νικέλιο μπορεί εύκολα να γίνει ανακυκλώσιμο, έχοντας σαν αποτέλεσμα να χρειάζεται επιπλέον εξόρυξη μεταλλεύματος. Τα κύρια ζητήματα επικεντρώνονται γύρω από τις ενεργειακές απαιτήσεις, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το οικονομικό κόστος, που οδηγούν στην τρέχουσα προτίμηση για το μεγαλύτερο μέρος του Νι να προμηθεύεται από την εξόρυξη και όχι από κάποιο πρόγραμμα ανακύκλωσης. Υπάρχουν αρκετοί οικονομικοί πόροι νικελίου σε όλο τον κόσμο, τα σημαντικότερα από αυτά βρίσκονται στην Ρωσία, στην Αυστραλία, στον Καναδά, στις Φιλιππίνες και στην Ινδονησία. Σύμφωνα με το Γεωλογικό Ινστιτούτο των ΗΠΑ, οι παγκόσμιοι οικονομικοί πόροι εκτιμήθηκαν το 2008 σε 220 εκατομμύρια τόνοι, όπου αποδείχθηκε ότι ήταν περισσότεροι.

Το νικέλιο εμφανίζεται σε δυο κύριους τύπους κοιτασμάτων τα σουλφίδια και οι λατερίτες. Τα θειούχα μεταλλεύματα προέρχονται συνήθως από ηφαιστειακές ή υδροθερμικές διεργασίες και συνήθως περιλαμβάνουν χαλκό ή/και κοβάλτιο, επιπλέον περιέχουν συχνά πολύτιμα μέταλλα όπως χρυσό, πλατίνα, ρόδιο, παλλάδιο δηλαδή τα μέταλλα της ομάδας της πλατίνας (PGM) (Mudd, 2010). Τα λατεριτικά κοιτάσματα εμφανίζονται σε περιοχές που βρίσκονται υπερβασικά πετρώματα, όπου επικρατούν έντονες καιρικές συνθήκες με μεγάλο βαθμό διάβρωσης, δηλαδή σε τροπικά και υποτροπικά κλίματα κοντά στον Ισημερινό, καθώς επίσης και σε άνυδρα ξηρά κλίματα όπως στην δυτική και κεντρική Αυστραλία. Τα πετρώματα που φιλοξενούν λατεριτικά κοιτάσματα είναι κυρίως σαπρολίτης, νοτρονίτης, λειμωνίτης με διαφορετική περιεκτικότητα μαγνησίου, σιδήρου και πυριτίου, καθώς και στην ζώνη μετάβασης μεταξύ των τύπων του μεταλλεύματος (Σχ. 4. 1).



Σχ. 4. 1. Τυπικά προφίλ διάβρωσης για μεταλλεύματα λατερίτη νικελίου (Gavin M. Mudd, 2010, Dalvi et al. 2004, Wedderburn, 2009).

Η παγκόσμια παραγωγή Νι συνεχίζει να αυξάνεται σημαντικά μακροπρόθεσμα, συμπεριλαμβανομένης της σχεδόν εκθετικής ανάπτυξης από το 1950, από περίπου 10. 000 τόνους Νι το 1900 σε υψηλό ρεκόρ 1, 6 εκατομμύρια τόνους Νι το 2007 (Σχ. 4. 2 συμπεριλαμβάνει και τις τιμές με την πάροδο του χρόνου). Η αυξανόμενη ζήτηση οφείλεται στην ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών και των επαναφορτιζόμενων μπαταριών, η κινεζική ζήτηση αυξάνεται συνεχώς έχοντας σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής νικελίου.

Το κύριο ζήτημα με την αυξανόμενη ζήτηση είναι το σενάριο για την βιωσιμότητα της αύξησης της παραγωγής και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μπορεί να έχει (Mudd, 2010). Επί του παρόντος, η παραγωγή του νικελίου είναι διαδομένη σε όλο τον κόσμο, όμως οι σημαντικοί οικονομικοί πόροι εμφανίζονται σε ορισμένες χώρες και εκμεταλλεύονται από συγκεκριμένες εταιρίες. Η παραγωγή του μεταλλεύματος νικελίου από σουλφίδια και από λατερίτες εμφανίζεται στον πίνακα 4. 1 και 4. 2 αντίστοιχα, συμπεριλαμβανόμενης της μεθόδου εξόρυξης, του τύπου του μεταλλεύματος και της επεξεργασίας διαμόρφωσης. Η πρόσφατη παραγωγή Ni με την πάροδο του χρόνου ανά τύπο μεταλλεύματος και χώρα φαίνεται στο σχήμα 4. 3, που δείχνει την παραγωγή νικελίου από έναν μικρό αριθμό χωρών και την συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή από κοιτάσματα λατερίτη (Σχ. 4. 4).

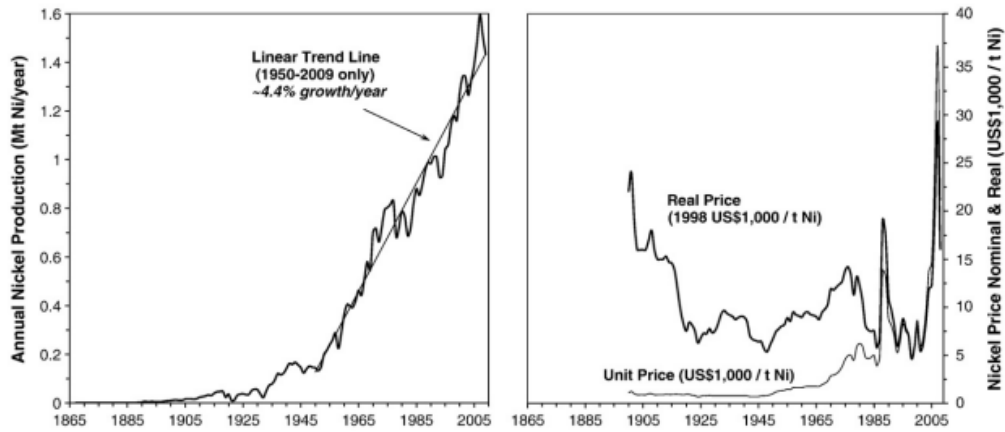
Project, country	Ore (kt)	%Ni	%Cu	%Co	g/t PGM	kt Ni	kt Cu	t Co	t PGM ^d	Mine Type	Proc.	Company
Taimyr Peninsula, Russia	15,034	1.56	2.65	-	8.42	194.0	381.6	-	103.7	UG/OC	CSR	Norilsk Nickel
Jinchuan, China ^b	~8300 ^b	~1.3 ^b	~2.4 ^b	~0.01 ^b	~0.2 ^b	~90 ^b	~150 ^b	~450 ^b	~2 ^b	UG	CSR	Jinchuan Nickel
Vale Inco Sudbury, Canada	8219	1.26	1.36	~0.04	~1.9	85.3	115.3	804	15.0	UG	CSR	Vale Inco
Voisey's Bay, Canada	2385	3.50	2.38	0.14	-	77.5	55.4	1,695	-	OC	CSR	Vale Inco
Mt Keith, Australia ^c	10865	0.62	-	-	-	45.0	-	-	-	OC	Conc.	BHP Billiton
Leinster, Australia ^c	2445	2.03	-	-	-	40.8	-	-	-	OC/UG	Conc.	BHP Billiton
Kola Peninsula, Russia	8149	0.59	0.25	-	0.10	38.3	18.8	-	-	UG/OC	CSR	Norilsk Nickel
Kambalda, Australia ^d	1269	2.80	~0.22	~0.05	~1.5	33.1	~2.7	-	~1.8	UG	Conc.	BHP Billiton
Thompson, Canada	2291	1.66	~0.1	-	-	28.9	~1.4	168	-	UG	CSR	Vale Inco
Raglan, Canada	1300	2.30	0.62	~0.05	-	25.9	6.4	512	-	UG/OC	Conc.	Xstrata
Tati, Botswana	9629	0.29	0.21	-	-	20.8	13.3	-	-	OC/UG	Conc.	Norilsk Nickel
Black Swan, Australia	2846	0.84	-	-	-	17.6	-	-	-	OC/UG	Conc.	Norilsk Nickel
Falconbridge, Canada	1915	0.98	1.14	~0.18	-	16.8	19.1	3,186	-	UG	CSR	Xstrata
Lake Johnston, Australia	1391	1.53	-	-	-	15.5	-	-	-	UG	Conc.	Norilsk Nickel
Jilin Jien, China	nd	nd	nd	-	-	~10 ^b	nd	-	-	UG	CSR	Jilin Jien Nickel
Montcalm, Canada	927	1.20	0.65	~0.05	-	8.9	5.1	338	-	UG	Conc.	Xstrata
Aguablanca, Spain	1,825	0.6	0.4	-	-	8.1	7.1	-	-	OC	Conc.	Lundin Mining
Savannah, Australia	684	1.30	0.62	0.07	-	7.8	4.1	218	-	UG	Conc.	Panoramic Resources
Cosmos-Sinclair, Australia	263	3.53	~0.15	~0.06	-	7.6	0.3	120	-	UG	Conc.	Xstrata
Levack-Podolsky, Canada	1256	~0.7	~1.5	~0.01	~1.5	6.0	16.0	75	1.62	UG	Conc.	FNX Mining
Nkomati, South Africa	1070	0.70	0.24	~0.04	0.71	5.1	2.6	276	1.27	OC	Conc.	ARM / Norilsk Nickel
Waterloo, Australia	253	2.63	-	-	-	5.0	-	-	-	UG	Conc.	Norilsk Nickel
Bindura, Zimbabwe	722	0.59	-	-	-	3.1	-	-	-	OC/UG	CS	Mwana Africa
Hitura-Kotalahti, Finland	600	0.63	-	-	-	2.4	-	-	-	UG	Conc.	Belvedere Resources
Avebury, Australia	268	0.91	-	-	-	2.1	-	-	-	UG	Conc.	OZ Minerals
Lockerby, Canada	136	1.66	0.88	~0.04	-	1.7	1.0	32	-	UG	Conc.	First Nickel
Redstone-McWatters, Canada	68	1.66	~0.9	-	-	1.0	~0.6	-	-	UG	Conc.	Liberty Mines
Shakespeare, Canada	83	0.39	0.40	-	-	0.3	0.3	25	-	OC	Conc.	Ursa Major
Total	84.2 Mt	1.15	1.05	-	-	788.6	801.1	7,899	~125.4			
PGM mines, South Africa ^a	84.4 Mt	~0.11	~0.03	-	3.97	46.4	13.5	-	276.9	UG/OC	CSR	various

Πίνακας 4. 1. Τα ορυχεία παραγωγής νικελίου από σουλφίδια, την διαμόρφωση της επεξεργασίας και εταιρίες που εκμεταλλεύονται τα κοιτάσματα (Gavin M. Mudd, 2010).

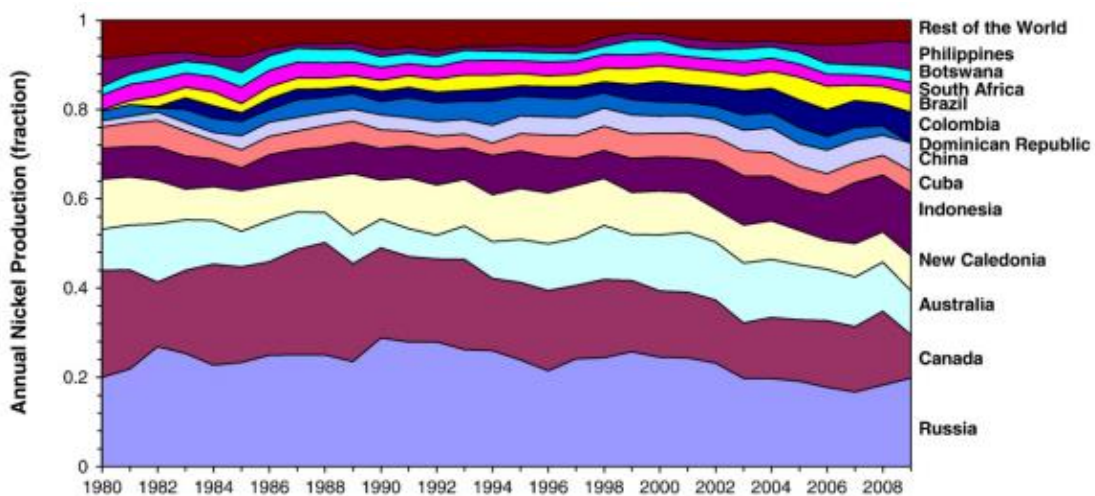
Τα σημαντικότερα κοιτάσματα νικελίου συναντώνται στις περιοχές της Ρωσίας, του Καναδά και της Αυστραλίας. Η Ρωσία είναι επί του παρόντος ο μεγαλύτερος παραγωγός Ni στον κόσμο, όπου τα κοιτάσματα της βρίσκονται στην περιοχή Norilsk-Talnakh στη χερσόνησο Ταιμυρ της βόρειας Σιβηρίας και στην χερσόνησο Κόλα της βορειοδυτικής Ρωσίας στα σύνορα με την Φιλανδία. Το 2008 η παραγωγή του νικελίου είχε φτάσει στους 3.000 εκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος ετησίως, το οποίο έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, μόνο το ορυχείο στην περιοχή του Ταιμυρ περιέχει την διπλάσια ποσότητα σε νικέλιο από ότι το Sudbury στην περιοχή του Καναδά.

Project, country	Ore (kt)	%Ni	%Co	kt Ni	t Co	Process	Company
Sorowako, Indonesia	4675	2.10	nd	72.4	nd	RKEF	Vale Inco/PT Inco
Doniambo, New Caledonia ^a	2930 ^a	2.0 ^a	-	51.1	-	RKEF	SLN/Eramet
Cerro Matoso, Colombia ^a	~2415 ^a	~2.3 ^a	-	41.6 ^b	-	RKEF	BHP Billiton
Yabulu, Australia	nd	nd	nd	35.1	1600	Caron	BHP Billiton
Moa Bay, Cuba ^a	2881 ^a	~1.5 ^a	~0.16 ^a	32.4	3428	HPAL	Sherritt International
Murrin Murrin, Australia	2446	1.43	~0.10	30.5	2018	HPAL	Minara Resources
Larco-Larymna, Greece ^{a,c}	2500 ^a	1.2 ^a	-	21.2	-	RKEF	Larco SA
Falcondo, Dominican Republic	1708	1.14	-	18.8	-	RKEF	Xstrata
Pomalaa, Indonesia	1113	1.58	-	17.6	-	RKEF	PT Antam
Kavadarci, Macedonia	~750	~2	nd	15.0	nd	RKEF	Feni Industries/Cunico
Loma de Niquel, Venezuela	677	1.6	-	10.9	-	RKEF	Anglo American
Rio Tuba (Coral Bay), Philippines ^a	858 ^a	1.5 ^a	-	9.7	-	HPAL	Sumitomo JV
Codemin, Brazil	476	2.1	-	9.1	-	RKEF	Anglo American
Ufaleynickel, Russia	nd	nd	nd	~9 ^a	nd	RKEF	OAO Ufaleynickel
Berong, Philippines ^{a,d}	~293 ^a	~1.48 ^a	nd	4.3 ^d	-	Caron ^f	Toledo Mining
Cawse, Australia	678	0.69	nd	3.7	-	HPAL	Norilsk Nickel
Total-laterite (Caron)	~293	~1.48	-	~35.1	~1600		
Total-laterite (HPAL)	~6900	~1.4	~0.12	76.3	~5500		
Total-laterite (RKEF)	~17,250	~1.0	nd	257.7	-		

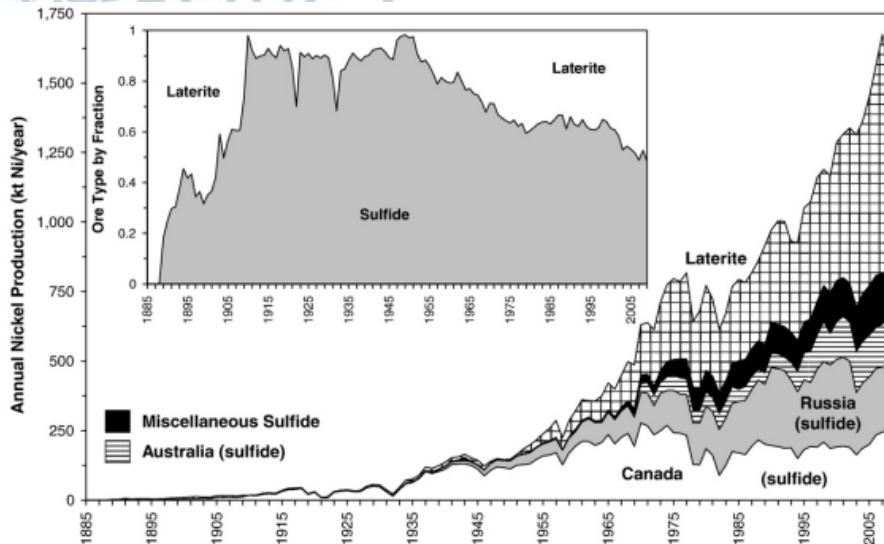
Πίνακας 4. 2. Τα ορυχεία παραγωγής νικελίου από λατεριτικά κοιτάσματα, την διαμόρφωση της επεξεργασίας και εταιρίες που εκμεταλλεύονται τα κοιτάσματα (Gavin M. Mudd, 2010).



Σχ. 4. 2. Η εκθετική αύξηση της παραγωγής του νικελίου και οι τιμές διαμορφώσεις του μεταλλευματος (Gavin M. Mudd, 2010).



Σχ. 4. 3. Παγκόσμια παραγωγή νικελίου ανά χώρα (Gavin M. Mudd, 2010)



Σχ. 4. 4. Παγκόσμια παραγωγή νικελίου ανά τύπο κοιτάσματος (Gavin M. Mudd, 2010).

Στην Αυστραλία όταν ανακαλυφθήκαν τα πρώτα κοιτάσματα ήταν ασύμφορη η εξόρυξη τους, όμως με το πέρασμα των χρόνων η ανακάλυψη και άλλων κοιτασμάτων μαζί με την ανάπτυξη της τεχνολογίας ώθησαν στην εξόρυξη αυτών των κοιτασμάτων που ήταν λατεριτικά και από σουλφίδια. Οι οικονομικοί πόροι της Αυστραλίας το 2008 ήταν 26, 4 εκατομμύρια τόνοι μεταλλεύματος με 23 εκατομμύρια τόνους να βρίσκονται στα κοιτάσματα που δεν είχε γίνει ακόμη η εξόρυξη. Ακόμα ανακαλύπτονται νέα κοιτάσματα σουλφιδίων που περιέχουν νικέλιο υψηλής ποιότητας σε διάφορες περιοχές της δυτικής Αυστραλίας όπως Sinclair, Flying Fox και Prospero, καθώς και στην περιοχή Kambalda που περιέχει τα σημαντικότερα και μεγαλύτερα κοιτάσματα νικελίου (Mudd, 2010). Οι περισσότεροι πόροι νικελίου προέρχονται από νέες ανακαλύψεις κοιτασμάτων, όπου υπήρχαν ελάχιστα στοιχεία για τα αποθέματα τους και μετατράπηκαν σε οικονομικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα. Η εξόρυξη του νικελίου στην Αυστραλία ανέρχεται στους 5, 3 εκατομμύρια τόνους από κοιτάσματα σουλφιδίων και 3, 7 εκατομμύρια τόνους από λατεριτικά κοιτάσματα ενώ η εκτίμηση των πόρων είναι περίπου στους 26, 4 εκατομμύρια τόνους κάτι το οποίο σημαίνει ότι πολλά οικονομικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα θα αναπτυχθούν.

Ο Καναδάς έχει πρωταγωνιστικό ρόλο στην βιομηχανία παραγωγής νικελίου από τα τελευταία χρόνια της δεκαετίας 1880, όταν βρέθηκε ένα από τα σημαντικότερα κοιτάσματα με πλούσια μεταλλεύματα χαλκού και νικελίου στην περιοχή Sudbury Basin βόρεια του Οντάριο. Η μεγάλη αυτή ανακάλυψη συνδέθηκε με την ανάπτυξη των κραμάτων του χαλκού και του νικελίου, όπου χρησιμοποιούνταν στις ηλεκτρικές συσκευές (Mudd, 2010). Πρωταγωνιστικό ρόλο στην εκμετάλλευση των κοιτασμάτων νικελίου στον Καναδά είχε η εταιρία Inco που από το 1902 μέχρι το 2006 ήταν επικεντρωμένη στο νικέλιο. Ενώ η εταιρία Falconbridge επικεντρώθηκε στα κράματα χαλκού, ψευδαργύρου και αλουμινίου. Με την πάροδο του χρόνου και οι δυο εταιρίες έχουν αυξήσει την παραγωγή του μεταλλεύματος μέχρι το 2006, όπου η εταιρία Inco έγινε εξαγορά από την Vale, καθώς η συνεχόμενη μείωση της ποιότητας του μεταλλεύματος οδήγησε στην κατάληξη αυτή, σε σύγκριση με την αύξηση της ποιότητας του μεταλλεύματος από την εταιρία Falconbridge. Μια συλλογή των πόρων μεταλλεύματος νικελίου περιέχεται στον πίνακα 4. 3. Επιπλέον, μια σημαντική πρόκληση που σημειώθηκε στην περιοχή Sudbury ήταν το διοξείδιο του θείου που απελευθερωνόταν στην ατμόσφαιρα από την τήξη των κραμάτων χαλκού, ώστε να γίνει ο διαχωρισμός του νικελίου. Αυτό προκάλεσε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα στην περιοχή όπως την καταστροφή των λιμνών, την δημιουργία όξινης βροχής και την γενικότερη καταστροφή του

οικοσυστήματος που μέχρι σήμερα γίνονται μεγάλες προσπάθειες ώστε να γίνει η αποκατάσταση του σε κάποιο βαθμό (Mudd, 2010).

Project, Country	Ore (Mt)	%Ni	%Cu	g/t Pt	g/t Pd	g/t Au	kt Ni	kt Cu
Vale Inco Sudbury, Canada	150.4	1.17	1.35	0.7	0.9	0.3	1760	2031
Xstrata Falconbridge Sudbury, Canada	59.9	1.84	1.82	-	-	-	1103	1093
Voisey's Bay, Canada	26.0	2.76	1.62	-	-	-	717	421
Thompson, Canada	24.5	1.78	0.12	-	-	-	436	30
Raglan, Canada	32.6	2.85	0.82	-	-	-	930	268
Levack, Canada	8.05	1.99	1.75	0.01	0.01	-	160	141
Podolsky, Canada	9.53	0.64	1.34	0.01	0.02	0.01	61	127
Lockerby, Canada	2.42	2.23	1.36	-	-	-	54	33
Redstone, Canada	2.87	1.54	0.07	-	-	-	44	2
Montcalm, Canada	3.0	1.26	0.59	-	-	-	38	18
Sub-total - Canada	319.3	1.66	1.30	-	-	-	5302	4160
Taimyr Peninsula, Russia	2205	0.78	1.47	1.03	3.77	0.21	17,200	32,415
Kola Peninsula, Russia	846.0	0.54	0.25	0.02	0.04	0.01	4568	2115
Sub-total - Russia	3051	0.71	1.13	0.75	2.74	0.15	21,768	34,530
Kambalda, Australia ^a	7.27	3.87	-0.2	-	-	-	281	-15
Mt Keith, Australia	422	0.53	-	-	-	-	2220	-
Leinster-Cliffs, Australia	192.3	0.86	-	-	-	-	1648	-
Savannah-Copernicus, Australia	5.59	1.45	0.73	-	-	-	81	41
Lake Johnston, Australia	12.9	1.53	-	-	-	-	197	-
Black Swan, Australia	6.06	0.86	-	-	-	-	52	-
Waterloo, Australia	0.91	1.76	-	-	-	-	16	-
Forrestania, Australia (Western Areas)	15.88	1.8	-	-	-	-	288	-
Cosmos-Sinclair, Australia	56.3	0.83	-	-	-	-	47	-
Sub-total - Australia	719.2	0.73	-	-	-	-	5271	456
Munali, Zambia (Albidon) ^b	10.3	1.2	0.2	0.3	0.6	-	124	21
Mirabela-Santa Rita, Brazil ^b	150.1	0.60	0.16	0.091	-	-	901	240
Aguablanca, Spain	25.6	0.39	0.33	0.21	0.19	0.11	100	85
Kotalahti, Finland	5.47	0.55	0.37	-	-	-	30	20
Hitura, Finland	4.15	0.63	0.23	-	-	-	26	9.5
Pora-Vammala, Finland	2.09	0.67	0.21	-	-	-	14	4.4
Talvivaara, Finland ^b	1004	0.22	0.13	-	-	-	2209	1305
Bindura, Zimbabwe	70.95	0.64	-	-	-	-	452	-
Tati, Botswana	319.7	0.26	0.23	-	-	-	833	746
Nkomati, South Africa	401.2	0.36	0.14	-	-	-	1441	552
Jinchuan, China	~432	~1.04	~0.69	-	-	-	~4500	~3000
Total	6515	0.66	0.69	-	-	-	~42,966	~44,706

Πίνακας 4. 3. Βεβαιωμένα κοιτάσματα νικελίου ανά χώρα (Gavin M. Mudd, 2010).

5. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.

Η ανακύκλωση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών αποτελεί ένα πολύ σημαντικό τομέα στην σύγχρονη κοινωνία, καθώς συμβάλει σε πολύ μεγάλο βαθμό στην προστασία του περιβάλλοντος από τα όξινα απόβλητα των μετάλλων που περιέχουν. Τα θραύσματα κοβαλτίου συχνά ανακυκλώνονται και είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν κατά την ίδια χρήση, το κοβάλτιο από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι πιθανόν να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί ξανά σε μπαταρίες LCO ή σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Τα παγκόσμια ποσοστά ανακύκλωσης εκτιμάται ότι είναι περίπου 68%, ωστόσο, αυτό είναι πιθανό να διαφέρει πολύ μεταξύ στα διάφορα προϊόντα. Το παγκόσμιο ανακυκλωμένο περιεχόμενο υπολογίζεται περίπου στο 32%, για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου υπολογίζεται ότι το 8, 5-12% του κοβαλτίου δεν περιέχεται από την πρωταρχική πηγή αλλά από δευτερεύουσα, κάτι το οποίο μειώθηκε το 2019 7, 5-10% (Dominish et al. 2021).

Το νικέλιο που χρησιμοποιείται σε ανοξείδωτο χάλυβα ή σε κράματα συνήθως ανακυκλώνεται και χρησιμοποιείται στις ίδιες κατασκευές, ενώ το νικέλιο που περιέχεται στις μπαταρίες ιόντων λιθίου και σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές καταλήγει στις χωματερές. Το παγκόσμιο ανακυκλωμένο περιεχόμενο κυμαίνεται μεταξύ 29 και 41%. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής είναι μεγάλο το ποσοστό ανακύκλωσης νικελίου με

αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ξανά σε ανοξειδωτο χάλυβα και σε άλλες εφαρμογές όπως μπαταρίες, καταλύτες κράματα κ. α. (Dominish et al. 2021).

Η παγκόσμια πρωτοβουλία για στροφή σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα και σε πηγές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής θα δημιουργήσει ένα πολύ μεγάλο όγκο από μπαταρίες ιόντων λιθίου που θα πρέπει να ανακυκλωθούν ή να καταλήξουν στην χωματερή. Για παράδειγμα υπολογίστηκε ότι το 2020 το βάρος των δαπανημένων μπαταριών ιόντων λιθίου θα ξεπεράσει τις 25 δισεκατομμύρια μονάδες και τους 500. 000 τόνους (Tabelin et al. 2021). Στην Αυστραλία προβλέπεται το 2030 οι μπαταρίες ιόντων λιθίου να φτάσουν στις 425. 000 μονάδες, μια δραματική αλλαγή που καθοδηγείται από κρατικά κίνητρα καθώς θα γίνει η εγκατάσταση πολλών σταθμών φόρτισης σε όλη τη χώρα, με την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρικά αυτοκίνητα υπολογίζεται ότι η παραγωγή δαπανημένων μπαταριών ιόντων λιθίου θα αυξηθεί από 3. 300 τόνους το 2016 μεταξύ 100. 000-188. 000 τόνων το 2036 (Σχ. 5. 1). (Tabelin et al.2021).

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου στο τέλος του κύκλου ζωής τους περιέχουν 2 με 15% λίθιο ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην μπαταριά και την χημική σύσταση της, οι μπαταρίες μπορεί να περιέχουν: οξειδίο κοβαλτίου λιθίου (LCO), λίθιο- νικέλιο- κοβάλτιο- μαγγάνιο (NMC), λίθιο- νικέλιο- αλουμίνιο (NCA), σίδηρος- νικέλιο- φώσφορο (LFP) και οξειδίο του μαγγανίου λιθίου (LMO) (Tabelin et al.2021). Το λίθιο στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες χρησιμοποιείται και ως ηλεκτρολύτης για την μεταφορά του Li^+ κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση. Επίσης, οι χρησιμοποιημένες μπαταρίες ιόντων λιθίου περιέχουν σημαντικά μέταλλα όπως το κοβάλτιο (5-30%), τον χαλκό (7-25%), το νικέλιο (0, 2-10%), το αλουμίνιο (3-14%) και τον σίδηρο (20%), σε σύγκριση με τα φυσικά μεταλλεύματα η ποσότητα του λιθίου, του κοβαλτίου και του νικελίου είναι σε μεγαλύτερο ποσοστό στις μπαταρίες ιόντων λιθίου που σημαίνει ότι η ανακτήσιμη αξία που μπορεί να υπάρξει από την ανακύκλωση αυτών των στοιχείων ήταν 10-13 εκατομμύρια δολάρια το 2016 και το 2036 εκτιμάται ότι το ποσό αυτό μπορεί να ανέρχεται στα 2 δισεκατομμύρια δολάρια (Tabelin et al.2021).

Ακόμη και με αυτές τις ποσότητες των κρίσιμων μετάλλων που περιέχουν οι χρησιμοποιημένες μπαταρίες ιόντων λιθίου η ανακύκλωση των μπαταριών αυτών παραμένει σε πολύ χαμηλά ποσοστά έως αμελητέα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Αυστραλία καθώς μόνο το 2% από τους 3. 300 τόνους επαναφορτιζόμενων μπαταριών ανακυκλώνεται (Tabelin et al.2021), ο χαμηλός αυτός ρυθμός ανακύκλωσης σε παγκόσμιο επίπεδο οφείλεται σε αρκετούς λόγους. Πρώτον, τα υλικά των χρησιμοποιημένων επαναφορτιζόμενων μπαταριών είναι πολύ εύφλεκτα και επιρρεπή σε έκρηξη όταν εκτίθενται σε αέρα, νερό και σε μηχανικό σοκ. Δεύτερον, η χειροκίνητη αποσυναρμολόγηση τους είναι μια χρονοβόρα διαδικασία και δύσκολη, καθώς περιέχουν πολλά τοξικά υλικά που είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για την υγεία του ανθρώπου. Τρίτον, υπάρχει μεγάλη έλλειψη σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους, όπου θα μπορεί να γίνεται σωστά η διαδικασία της ανακύκλωσης με την σωστή διαχείριση των αποβλήτων, επομένως η ανάμειξη διαφόρων τύπων μπαταριών ιόντων λιθίου μπορεί να περιπλέξει και να καταστήσει την ανακύκλωση λιγότερο αποτελεσματική. Τέλος, το κόστος του ανακυκλωμένου λιθίου θα είναι πολύ μεγαλύτερο από την απευθείας εξόρυξη του από κάποιο κοίτασμα (Tabelin et al.2021). Με την συνεχώς προστιθέμενη αξία από την ανάκτηση του κοβαλτίου, του νικελίου και του χαλκού εκτός από το λίθιο, που προέρχονται από την ανακύκλωση των μπαταριών ιόντων λιθίου, η ανακύκλωση αυτών γίνεται όλο και πιο ελκυστική όχι μόνο από τις κυβερνήσεις αλλά και από πολυεθνικές εταιρίες. Για παράδειγμα, το υπουργείο ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής το 2019 ανακοίνωσε χρηματοδότηση ύψους 15 εκατομμυρίων δολαρίων για ένα κέντρο μελέτης ανακύκλωσης μπαταριών ιόντων λιθίου (Tabelin et al.2021). Επιπλέον, ο όμιλος της αυτοκίνητο- βιομηχανίας Volkswagen ανακοίνωσε την έναρξη μιας πιλοτικής μονάδας

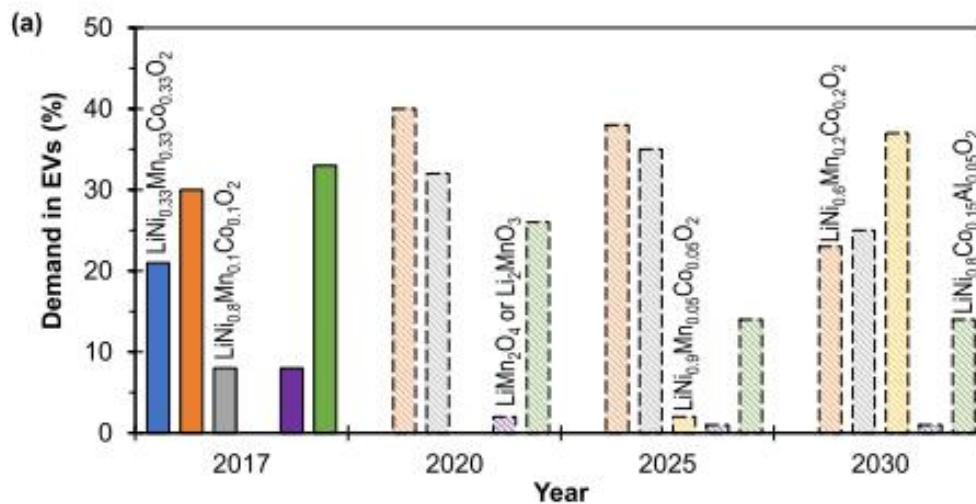
ανακύκλωσης επαναφορτιζόμενων μπαταριών για την ανάκτηση του κοβαλτίου, του λιθίου και του νικελίου που εδρεύει στην περιοχή Salzgitter στην Γερμανία (Tabelin et al.2021).

Η ανακύκλωση βιομηχανικής κλίμακας μπαταριών ιόντων λιθίου μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με πυρομεταλλουργία, ο δεύτερος τρόπος είναι η υδρομεταλλουργία και ο τρίτος τρόπος είναι ο συνδυασμός των προηγούμενων δυο, η ανακύκλωση αυτή γίνεται κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες που έχουν τις κατάλληλες εγκαταστάσεις. Αυτό οφείλεται κυρίως στο πολύ υψηλό κόστος κεφαλαίου που απαιτείται για την κατασκευή αποκλειστικών μονάδων ανακύκλωσης και στα ζητήματα που προκύπτουν για την βιωσιμότητα μιας αυτόνομης μονάδας ανακύκλωσης. Για αυτό τον λόγο πολλές χώρες συνεργάζονται μεταξύ τους ώστε να μειώσουν τα έξοδα, για παράδειγμα στην Αυστραλία η εταιρία EnviroStream έχει αναπτύξει μονάδα μόνο συλλογή και μηχανική διαλογή, συνεργάζεται με την εταιρία SungEel HiTech της Κορέας, όπου της αποστέλλει το προϊόν (με μορφή σκόνης) και αυτή με την σειρά της εκτελεί την περαιτέρω επεξεργασία. Μια διαφορετική προσέγγιση χρησιμοποιείται στην Ιαπωνία για την αντιμετώπιση των δύο προβλημάτων που επισημάνθηκαν προηγουμένως. Αντί να κατασκευαστούν εργοστάσια αποκλειστικών μονάδων ανακύκλωσης, αναπτύχθηκαν στα είδη υπάρχοντα μεταλλουργία κλάδοι που αφορούν την ανακύκλωση των μπαταριών που έχουν ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί. Η υβριδική πυροϋδρομεταλλουργική προσέγγιση που αναπτύχθηκε από τη Sumitomo-Sony για την ανακύκλωση μπαταριών LIB και NiMH, για παράδειγμα, ενσωματώθηκε σε δύο υπάρχουσες εγκαταστάσεις: Toyo Smelter & Refinery (διαδικασία διύλισης πυρομεταλλουργικού) στην πόλη Saijo και της Niihama Nickel Refinery (διεργασία υδρομεταλλουργικής διύλισης νικελίου) στην πόλη Niihama. Σε αυτήν την διαδικασία οι χρησιμοποιημένες μπαταρίες φρίνονται πρώτα ώστε να απομακρυνθεί το νερό, ο ηλεκτρολύτης και οι οργανικές ενώσεις. Στην συνέχεια το υπόλοιπο υλικό τροφοδοτείται στο μεταλλουργείο μαζί με τα συμπυκνώματα χαλκού για την ανάκτηση του κοβαλτίου, του νικελίου, του σιδήρου και του χαλκού ως κράμα, το οποίο μεταφέρεται στην πιο κοντινή υδρομεταλλουργική μονάδα επεξεργασίας για τον διαχωρισμό του χαλκού, του νικελίου και του κοβαλτίου (Tabelin et al.2021). Όμως σε αυτήν την διαδικασία το λίθιο χάνεται στην σκωρία και στην ιπτάμενη τέφρα. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής η ανακύκλωση των χρησιμοποιημένων μπαταριών ιόντων λιθίου γίνεται από την εταιρία International Metals Reclamation Company, όπου σε αυτή τη διαδικασία, οι χρησιμοποιημένες μπαταρίες συνθλίβονται, σφαιροποιούνται και τροφοδοτούνται σε φούρνους περιστροφικής εστίας που λειτουργούν στους 1260°C υπό αναγωγικές συνθήκες δηλαδή χωρίς την ύπαρξη οξυγόνου. Κατά την διαδικασία αυτή το νικέλιο διαχωρίζεται και χρησιμοποιείται ξανά σε ανοξειδωτο χάλυβα ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ενώ το λίθιο κατά την διαδικασία αυτή δεν μπορεί να διατηρηθεί και χάνεται (Σχ. 5. 2) (Tabelin et al.2021).

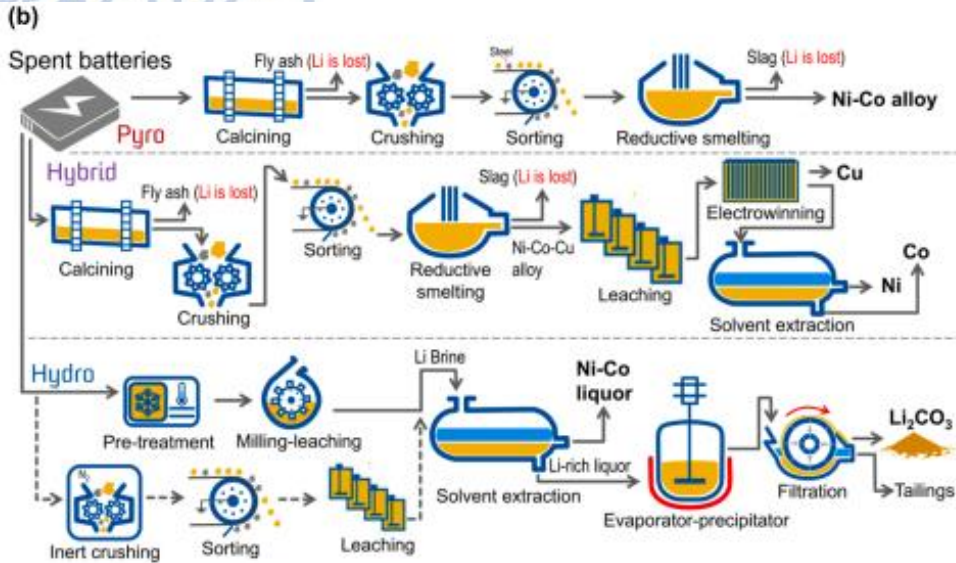
Πιο πρόσφατα, η Li-Cycle του Καναδά εισήγαγε μια νέα ιδέα χρήσης κινητών μονάδων προεπεξεργασίας και ενός κεντρικού κέντρου υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας, η οποία ιδέα ήταν πολλά υποσχόμενη καθώς θα μπορούσε να αντιμετωπίσει ζητήματα όπως η κυμαινόμενη σύνθεση προσφοράς/ζήτησης και τα σημεία <<συμφόρησης>> στο εργοστάσιο υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας χρησιμοποιώντας κινητές μονάδες συλλογής και προεπεξεργασίας σε συνδυασμό με ανάλυση δεδομένων. Μια άλλη πολλά υποσχόμενη εναλλακτική είναι η στρατηγική της Duesenfeld (LithoRec) που χρησιμοποιεί κινητές, αποκεντρωμένες μονάδες επεξεργασίας που θα μπορούσαν να χωρέσουν σε δύο αποθηκευτικούς χώρους περίπου των 14 μέτρων. Αυτές οι κινητές εγκαταστάσεις συνδυάζουν μηχανικές, θερμοδυναμικές και υδρομεταλλουργικές τεχνικές για την ανάκτηση >80% των υλικών από χρησιμοποιημένες μπαταρίες ιόντων λιθίου, συμπεριλαμβανομένων των πλαστικών και των επικίνδυνων οργανικών ηλεκτρολυτών. Όπως η προσέγγιση της Li-Cycle, η LithoRec διαθέτει μια κεντρική υδρομεταλλουργική μονάδα που θα χειρίζεται την

εξόρυξη Li+ και άλλων πολύτιμων μετάλλων από το υλικό που θα παράγεται από τις κινητές μονάδες εγκατάστασης επεξεργασίας της.

Οι τρέχουσες τεχνολογίες ανακύκλωσης βιομηχανικής κλίμακας που χρησιμοποιούνται για μπαταρίες ιόντων λιθίου στο τέλος του κύκλου ζωής τους παραμένουν αναποτελεσματικές. Δηλαδή, το λίθιο και άλλα κρίσιμα μέταλλα χάνονται στην πυρομεταλλουργία, ενώ απαιτούνται σχετικά υψηλές αναλογίες στερεού προς υγρό για να είναι οικονομικά βιώσιμες οι υδρομεταλλουργικές προσεγγίσεις. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής σε τοπικό και εθνικό επίπεδο θα πρέπει επίσης να αντιμετωπίσουν τις δυσκολίες ανακύκλωσης που προκύπτουν από την ακούσια ανάμειξη χρησιμοποιημένων μπαταριών LIB (μπαταρίες ιόντων λιθίου), NiCd (μπαταρίες νικελίου- καδμίου) και NiMH (μπαταρίες νικελίου- μαγγανίου). Χωρίς την κατάλληλη επισήμανση και ταξινόμηση, η ανάμειξη επαναφορτιζόμενων μπαταριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους γίνεται αναπόφευκτη και τα προκύπτοντα σύνθετα μίκτα απόβλητα μπαταριών μπορεί να προκαλέσουν αναποτελεσματικό διαχωρισμό και ανάκτηση των κρίσιμων μετάλλων με αποτέλεσμα η διαδικασία της ανακύκλωσης να μην μπορεί να γίνει σωστά (Tabelin et al.2021). Κατ' αναλογία, ο διαχωρισμός πλαστικού-πλαστικού για ανακύκλωση υλικού είναι σχεδόν αδύνατος λόγω των πολυάριθμων πλαστικών παραλλαγών που υπάρχουν σε ανάμεικτα πλαστικά απόβλητα με πολύ περίπλοκες συνθέσεις και απρόβλεπτες φυσικοχημικές ιδιότητες. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα και να βελτιωθεί η διαλογή των επαναφορτιζόμενων μπαταριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους είναι η ανάπτυξη ενός ισχυρού πλαισίου πολιτικής που περιλαμβάνει την επισήμανση, τον διαχωρισμό και τη συλλογή των μπαταριών παρόμοια με αυτά που αναπτύχθηκαν για πλαστικά προϊόντα και αστικά στερεά απόβλητα. Αυτές οι πολιτικές θα μπορούσαν να ελαχιστοποιήσουν την ανάμειξη διαφόρων τύπων LIB, NiMH και άλλων επαναφορτιζόμενων μπαταριών, γεγονός που θα βελτιώσει σημαντικά την απόδοση της ανακύκλωσης στο μέλλον.



Σχ. 5. 1. Παγκόσμια ζήτηση LIB ανά τύπο για ηλεκτρικά οχήματα το 2017 και προβλεπόμενες αλλαγές το 2020, το 2025 και το 2030 (Carlito Baltazar Tabelin, Jessica Dallas, Sophia Casanova, Timothy Pelech, Ghislain Bournival, Serkan Saydam, Ismet Canbulat, 2021, Azevedo et al. 2018).



Σχ. 5. 2. Απλουστευμένα διαγράμματα ροής διεργασιών για τη βιομηχανική κλίμακα ανακύκλωσης χρησιμοποιημένων μπαταριών με χρήση πυρομεταλλουργίας, υδρομεταλλουργίας και υβριδικών πυρο-υδρομεταλλουργικών προσεγγίσεων (Carlito Baltazar Tabelin, Jessica Dallas, Sophia Casanova, Timothy Pelech, Ghislain Bournival, Serkan Saydam, Ismet Canbulat, 2021).

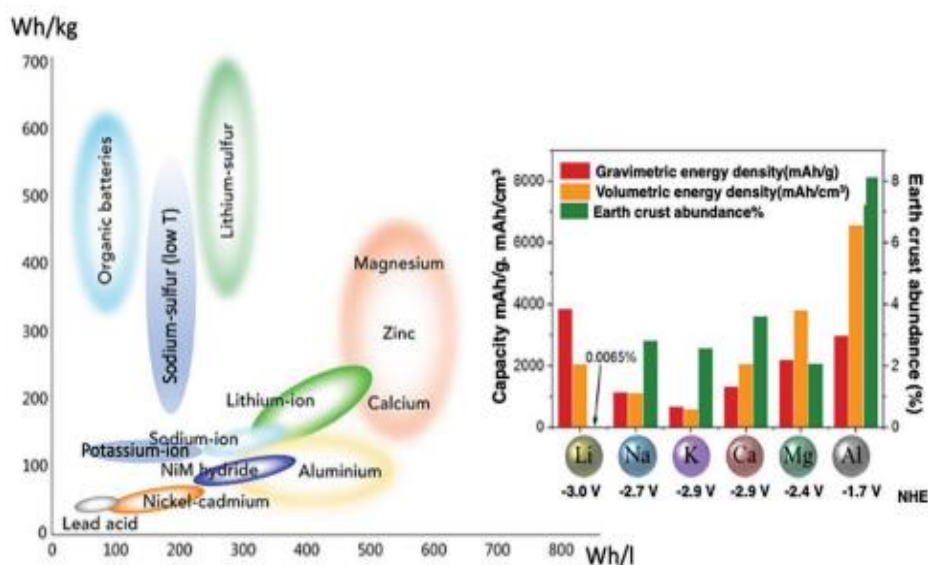
6. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ.

Η απόδοση μιας μπαταρίας ανεξάρτητα από τη χημεία της επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, δηλαδή τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη, την ποσότητα του ηλεκτρολύτη, το πάχος και τη σύνθεση των ηλεκτροδίων, τον τύπο και την ποσότητα του συνδετικού κ. α. Αυτοί οι παράγοντες υπαγορεύουν επίσης τον σχηματισμό πολλών ηλεκτροχημικών διεπαφών μεταξύ όλων αυτών των εξαρτημάτων που με τη σειρά τους υπαγορεύουν την απόδοση και την αξιοπιστία μιας μπαταρίας. Δεδομένου ότι υπάρχει ήδη μια τεράστια βιβλιοθήκη υλικών/ηλεκτρολυτών/συνδετικών κ. λπ. , η τεχνολογική συμφόρηση αυτή τη στιγμή είναι η δυνατότητα δοκιμής κάθε πιθανής παραμέτρου.

Πρόσφατα έχουν προκύψει πολλές διαφορετικές εναλλακτικές χημείες για τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που είναι σε πειραματικό στάδιο πέρα από το λίθιο. Το σχήμα 6. 1 δείχνει μερικές από αυτές τις χημείες μαζί με την ογκομετρική και βαρυστατική ενεργειακή τους πυκνότητα και την παγκόσμια αφθονία αυτών των εναλλακτικών στοιχείων σε σύγκριση με το λίθιο. Έτσι με αυτόν τον τρόπο τα στοιχεία αυτά θα βοηθήσουν σε παγκόσμιο επίπεδο να μειωθεί η μεγάλη ζήτηση που έχει προκύψει για κρίσιμα μέταλλα και ιδιαίτερα για το λίθιο (Titirici, 2021). Ωστόσο, για να μειωθεί πλήρως η εξάρτηση από κρίσιμα υλικά, όχι μόνο το μεταλλικό ιόν που κατευθύνει τη χημεία πρέπει να προέρχεται από αφθονη πηγή δηλαδή από μέταλλα που βρίσκονται σε αφθονία στον φλοιό της γης αλλά και όλα τα άλλα συστατικά μιας μπαταρίας (ηλεκτρόδια, συνδετικά κ. λπ).

Οι μπαταρίες ιόντων Na και K (NIBs και KIBs) είναι κατάλληλες για σταθερή αποθήκευση ενέργειας χαμηλού κόστους και μεταφορά σε μικρές αποστάσεις. Οι μπαταρίες πολυσθενών ιόντων όπως Mg-, Ca- και Al είναι ελκυστικές για τα ηλεκτρικά οχήματα και τα φορητά ηλεκτρονικά, καθώς μπορούν, θεωρητικά να προσφέρουν υψηλότερη ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούνται σήμερα στην ηλεκτροκίνηση και στις ηλεκτρικές συσκευές (Σχ. 6. 1). Παρά το γεγονός ότι αυτές οι νέες

χημικές ουσίες παρουσιάζουν πραγματικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη διαθεσιμότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που εμποδίζουν τέτοιες νέες και βιώσιμες τεχνολογίες μπαταριών να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους. Για τα NIB/KIBs (μπαταρίες ιόντων νατρίου και καλίου) οι προκλήσεις σχετίζονται με: την έλλειψη κατασκευασμένων ανοδίων άνθρακα που επιτρέπουν υψηλή χωρητικότητα και χαμηλό κόστος, καθόδους χωρίς κρίσιμα μέταλλα που λειτουργούν σε υψηλή τάση, χαμηλές αποδόσεις λόγω της έλλειψης κατανόησης των ηλεκτροχημικών διεπαφών τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο και χαμηλή ισχύ, περιορισμένη από το μεγαλύτερο μέγεθος ιόντων Na/K (0, 1/0, 2 nm) έναντι ιόντων λιθίου (0, 07 nm) (Titirici, 2021). Για τις μπαταρίες πολυσθενών ιόντων, αυτές οι προκλήσεις είναι ακόμη πιο περίπλοκες και προκύπτουν από: την έλλειψη κατάλληλων καθόδων υψηλής τάσης για την προσαρμογή της υψηλής πόλωσης και αργής διάχυσης των πολυσθενών ιόντων, την απώλεια ιοντικής αγωγιμότητας από τη διεπιφάνεια στερεού ηλεκτρολύτη (SEI) μετά τον πρώτο κύκλο στην άνοδο, τα φαινόμενα παθητικοποίησης και την έλλειψη κατάλληλων ηλεκτρολυτών που επιτρέπουν αναστρέψιμες αντιδράσεις οξειδοαναγωγής (Titirici, 2021).



Σχ. 6. 1. Τρέχουσες εμπορικές μπαταρίες και μελλοντικές χημικές ουσίες που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μπαταριών και η αφθονία των στοιχείων (στο φλοιό της γης) από όπου θα κατασκευάζονται (Titirici, 2021, Wiley, 2016).

Η απόδοση της μπαταρίας είναι σημαντική, αλλά εξίσου σημαντική είναι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, που σημαίνει για πόσο καιρό και πόσο αποτελεσματικά θα μπορούσε να διατηρηθεί η απόδοση της μπαταρίας. Οι μπαταρίες αποτυγχάνουν είτε λόγω εξωτερικών παραγόντων, όπως ακραίες θερμοκρασίες ή μηχανική καταπόνηση, είτε λόγω εσωτερικών παραγόντων που συμβαίνουν κατά τη λειτουργία της μπαταρίας, όπως σχηματισμός δενδρίτη, μηχανική βλάβη στο ηλεκτρόδιο, διάβρωση του συλλέκτη ρεύματος, αποκόλληση ηλεκτροδίου από τον συλλέκτη ρεύματος, απώλεια ηλεκτρονική αγωγιμότητα του ηλεκτροδίου, απώλεια ιοντικής αγωγιμότητας στη διεπαφή κ. α. Προς το παρόν, τέτοια φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στο κύτταρο δεν μπορούν να παρακολουθηθούν ή να προβλεφθούν ταυτόχρονα, στο άμεσο μέλλον με την γρήγορη ανάπτυξη της τεχνολογίας και τις νέες χημικές ενώσεις των επαναφορτιζόμενων μπαταριών, αυτοί οι κίνδυνοι θα μειώνονται συνεχώς καθώς οι μπαταρίες θα είναι πολύ πιο αποδοτικές και με μεγαλύτερο κύκλο ζωής. Επιπλέον, με την εφεύρεση νέων τεχνολογιών θα μπορεί να ελέγχεται η

κατάσταση που βρίσκεται η μπαταρία ώστε να μπορεί να αντικατασταθεί εγκαίρως. Έτσι, από την άποψη της βιωσιμότητας, η οικονομική απόδοση και η αξιοπιστία είναι βασικές προϋποθέσεις για τη διασφάλιση μιας μακροχρόνιας φάσης χρήσης των μπαταριών.

Η αποκατάσταση της λειτουργίας της μπαταρίας θα μπορούσε να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση έξυπνων λειτουργιών στην κυψέλη που είναι σε θέση να επιδιορθώσουν τη ζημιά, όμως για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια καινοτομία πρέπει να ξεπεραστούν κάποια προβλήματα που εμφανίζονται. Τα πιο συνηθισμένα προβλήματα που προκαλούν αστοχία στις μπαταρίες είναι: η δημιουργία μεγάλων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας μέσα στο στοιχείο, που σχετίζονται με μεταφορά φορτίου και χημικές αντιδράσεις, που οδηγούν σε βλάβη στο συνδεδετικό/ηλεκτρολύτη/διαχωριστή, απώλεια ιοντικής αγωγιμότητας στον ηλεκτρολύτη, αποκόλληση του ηλεκτροδίου για τον τρέχοντα συλλέκτη κ. α. Επιπλέον, κάποια άλλα προβλήματα που δημιουργούνται είναι οι ογκομετρικές αλλαγές κατά τη διάρκεια φόρτισης-εκφόρτισης λόγω δυναμικών διαδικασιών παρεμβολής-κράματος και σχηματισμού SEI, με αποτέλεσμα να υπάρχει μηχανική βλάβη των ηλεκτροδίων και απώλεια ηλεκτρονικής αγωγιμότητας, καθώς επίσης και απώλεια της ιοντικής αγωγιμότητας στο SEI λόγω σχηματισμού δενδρίτη ή σχηματισμό μη ιονικά αγώγιμων ενεργών ειδών.

Η βιομηχανία έχει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή των μπαταριών καθώς όπως σε κάθε τεχνολογία, η τάση στην ανάπτυξη μπαταριών καθοδηγείται από τη βιομηχανία μπαταριών που επικεντρώνεται κυρίως στο κέρδος και στην κατασκευή μπαταριών με μεγαλύτερη απόδοση από τους ανταγωνιστές της. Όπως σε πολλές σημερινές βιομηχανίες, στη βιομηχανία μπαταριών η βιωσιμότητα αγνοείται επί του παρόντος σε μεγάλο βαθμό, καθώς εμφανίζονται ολοένα και περισσότερες νεοσύστατες μπαταρίες κάθε μέρα, που προσπαθούν να συνδυάσουν την καλύτερη απόδοση με μεγαλύτερο κέρδος για την βιομηχανία. Αυτό θα πρέπει να περιοριστεί ώστε να αποφευχθούν οι καταστροφικές συνέπειες που θα προκαλέσει η βιομηχανία στο περιβάλλον, έτσι οι κυβερνήσεις θα πρέπει να θεσπίσουν ένα αυστηρότερο νομοθετικό πλαίσιο για την χρήση τοξικών χημικών και απειλούμενων στοιχείων, καθώς και την επιβολή υποχρεωτικής ανακύκλωσης. Αρκετές χώρες έχουν τώρα μεγάλα εθνικά προγράμματα χρηματοδότησης σε μπαταρίες. Το «The Faraday Institution» στο Ηνωμένο Βασίλειο, το Federal Consortium for Advanced Batteries (FCAB) στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, η RS2E στη Γαλλία, καθώς και η European Battery Alliance μαζί με την Battery 2030 της Ευρωπαϊκής Ένωσης προχωρούν σε ανοιχτές συνεργασίες των ακαδημαϊκών κοινοτήτων με την βιομηχανία ώστε να αντιμετωπιστούν αρκετά προβλήματα. Ωστόσο, αν και ενθαρρύνονται πολύ από χρηματοδότες και κυβερνητικές πρωτοβουλίες, οι ανοιχτές συζητήσεις βιομηχανίας-ακαδημαϊκών για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφορετικών τεχνολογιών μπαταριών εξακολουθούν να αποτυγχάνουν, καθώς οι πολύ μεγάλες βιομηχανίες μπαταριών με πολλά δισεκατομμύρια επενδυτές δεν είναι διατεθειμένοι να μοιραστούν καμία από τις πρακτικές τους, πράγμα που σημαίνει ότι οι ερευνητές στον ακαδημαϊκό χώρο δεν έχουν πρόσβαση στις πιο πρόσφατες βιομηχανικές τάσεις με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εκφέρουν την άποψη τους πάνω σε αυτό το αντικείμενο λόγω έλλειψης πειραμάτων και επιβεβαιωμένων στοιχείων που θα βασίζονται σε επιστημονική έρευνα. Είναι γνωστό ότι τέτοια λάθη έχουν γίνει σε μεγάλο βαθμό στο παρελθόν, σε όλους σχεδόν τους χημικούς και ενεργειακούς τομείς μας και θα ήταν σκόπιμο να μην επαναλαμβάνονται αυτά τα λάθη για τις μπαταρίες, καθώς είναι ένας κλάδος που έχει τεράστια ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και θα έχει μεγάλη εξέλιξη τις επόμενες δεκαετίες.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

- Dominish, E. , Florin, N. , & Wakefield-Rann, R. (2021). Reducing new mining for electric vehicle battery metals: responsible sourcing through demand reduction strategies and recycling.
- 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.
- Mudd, G. M. (2010). Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. *Ore Geology Reviews*, 38 (1-2), 9-26.
- Paulikas, D. , Katona, S. , Ilves, E. , & Ali, S. H. (2020). Life cycle climate change impacts of producing battery metals, land ores versus deep-sea polymetallic nodules. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123822.
- Stephen Roberts and Gus Gunn, 2014. *Critical Metals Handbook* pages 122-146.
- 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.
- Titirici, M. M. (2021). Sustainable batteries—quo vadis?. *Advanced Energy Materials*, 11 (10), 2003700.