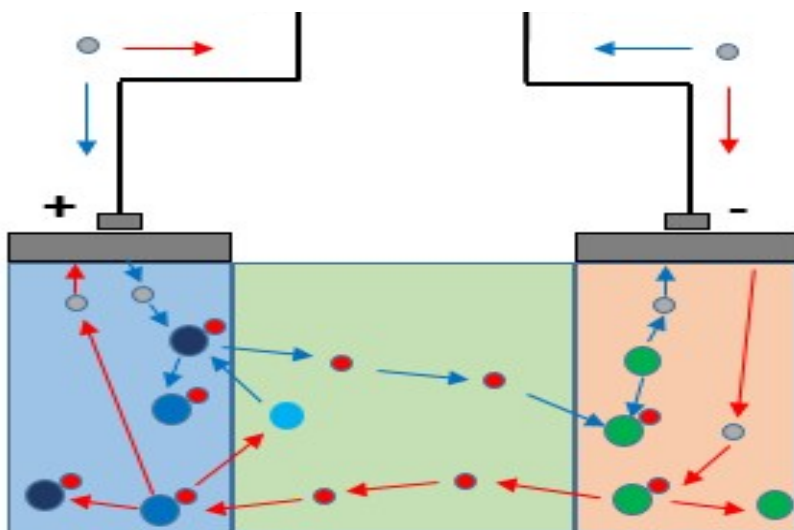




ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΛ ΜΠΕΝΤΡΙ
ΑΕΜ 5307

ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ: ΝΙΚΕΛΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024



ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΛ ΜΠΕΝΤΡΙ

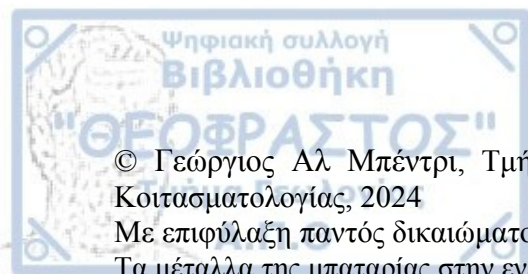
ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ:
ΝΙΚΕΛΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Γεώργιος Αλ Μπέντρι, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Γεώργιος Αλ Μπέντρι, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Τα μέταλλα της μπαταρίας στην ενεργειακή μετάβαση: νικέλιο και τα κοιτάσματά του - *Διπλωματική Εργασία*

© Georgios Al Mpentri, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2024

All rights reserved.

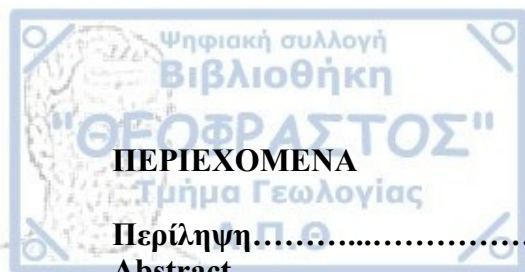
The battery metals in energy transmission. Nickel and its deposits.

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: Ganthia et al. (2021).





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	7
Abstract.....	8
Εισαγωγή.....	11
Ιστορική αναδρομή.....	12
Δομή μπαταρίας.....	13
Χαρακτηριστικά μπαταρίας.....	14
Μέταλλα που χρησιμοποιούνται για τις μπαταρίες.....	14
Το Νι και οι χρήσεις του στις μπαταρίες.....	16
Παγκόσμια αποθέματα Νικελίου.....	21
Χώρες πλούσιες σε αποθέματα νικελίου.....	23
Ινδονησία.....	23
Η εκμετάλλευση κοιτασμάτων Νι στη νήσο Sulawesi, Ινδονησία.....	24
Καναδάς.....	28
Sudbury, Οντάριο Καναδάς.....	30
Ρωσική Ομοσπονδία.....	33
Norilsk, Ρωσική Ομοσπονδία.....	34
Χερσόνησος Kola.....	38
Βιβλιογραφία.....	40

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει ως αποτέλεσμα την αναζήτηση εναλλακτικών ενεργειακών λύσεων κυρίως όσο αφορά τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τόσο στην κίνηση όσο και στη βιομηχανία αλλά και την οικιακή χρήση το πέρασμα σε ήπιες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική. Σε αυτή την περίπτωση ή παραγόμενη ενέργεια δεν μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις καταναλωτικές απαιτήσεις αφού εξαρτάται από τα καιρικά φαινόμενα (φως, άνεμος). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναζήτηση τρόπων αποθήκευσής της σε ώρες που η ζήτηση είναι μικρή και την απόδοσή της όταν υπάρχει αύξηση της κατανάλωσης. Οι μπαταρίες διαδραματίζουν πολύ σημαντικό όλο σε αυτό το κύκλο (παραγωγή - αποθήκευση - κατανάλωση).

Η μπαταρία είναι μια συσκευή που μπορεί να μετατρέπει, μέσα από οξειδοαναγωγικές διεργασίες, την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική (εκφόρτιση), ενώ οι επαναφορτιζόμενες μπορούν να μετατρέψουν την ηλεκτρική σε χημική (φόρτιση) και να την αποθηκεύσουν με τον τρόπο αυτό, για μελλοντική χρήση. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται μια σειρά από μέταλλα που πρέπει να πληρούν βασικές προϋποθέσεις όπως μικρό βάρος και κόστος και να είναι όσο δυνατόν πιο φιλικά προς το περιβάλλον μειώνοντας το αποτύπωμα σε CO₂ σε όλα τα στάδια (εξόρυξη, χρήση, ανακύκλωση).

Από τα μέταλλα που βρίσκουν βιομηχανική εφαρμογή σε την παραγωγή μπαταριών είναι το νικέλιο (Ni). Η πρώτη μπαταρία Ni / Fe κατασκευάστηκε από τον Σουηδό Jungner το 1897 και το 1901 αντικατέστησε το σίδηρο (Fe) από κάδμιο (Cd), ενώ η μαζική χρήση των μπαταριών NiCd εμφανίστηκε από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Το νικέλιο εντοπίζεται σε βασικά - υπερβασικά πετρώματα και εξάγεται από λατερίτες και σουλφίδια.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια γενική επισκόπηση της αρχής λειτουργίας των μασταριών, ως μέσων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, με έμφαση στις μπαταρίες: Νικελίου Καδμίου, Νικελίου Υδριδίων μετάλλων και Νατρίου - Χλωριούχου Νικελίου. Ενώ περιγράφονται κοιτάσματα νικελίου σε τρεις από τις χώρες με τα μεγαλύτερα αποθέματα.

A) Ινδονησία: σε λατερίτες από τα νησιά Sulawesi και Halmahera.

B) Καναδά: σε θειούχα μαγματικά κοιτάσματα από την περιοχή Sudbury, Οντάριο.

Γ) Ρωσική Ομοσπονδία: σε θειούχα μαγματικά κοιτάσματα από τις περιοχές Norilsk (Σιβηρία) και στη Χερσόνησο Kola (στα βόρεια σύνορα με Φιλανδία)

ABSTRACT

Global warming results in the research for alternative energy solutions as an alternative of fossil fuels. This results in both cars and industry as well as in domestic use switching to renewable energy such as solar and wind. In this case, the produced energy cannot be regulated according to consumption requirements since it depends on availability of sun and wind. This results in the search for ways to store produced power, at times when demand is low and its performance when there is an increase in consumption. Batteries play a very important role in this cycle (production - storage - consumption).

A battery is a device that can convert, through redox processes, chemical energy into electrical energy (discharge), while rechargeable batteries can convert electrical energy into chemical (charge) and store it for future use. For their construction, a series of metals are used that must fulfill basic requirements such as light weight and low cost and be as environmentally friendly as possible by reducing CO₂ emissions at all stages (extraction, use, recycling).

Among the metals that find industrial application in the production of batteries is nickel (Ni). The first Ni / Fe battery was manufactured by the Swede Jungner in 1897 and in 1901 he replaced iron (Fe) with cadmium (Cd), while the mass use of NiCd batteries appeared from the middle of the 20th century. Nickel is found in mafic and ultramafic rocks and is extracted from laterites and sulfides.

In this paper, description on batteries construction and operation is presented a general, especially in batteries: Nickel Cadmium, Nickel Metal Hydride and Sodium - Nickel Chloride. Furthermore, nickel deposits are described in three of the countries with the largest reserves:

- A) Indonesia: in laterites from Sulawesi and Halmahera islands.
- B) Canada: in sulfide magmatic deposits from the Sudbury area, Ontario.
- C) Russian Federation: in sulfide magmatic deposits from Norilsk (Siberia) and the Kola Peninsula (on the northern border with Finland).

Εισαγωγή

Ο άνθρωπος, από την εμφάνιση του στη Γη, ήταν εξαρτημένος από την χρήση της ενέργειας σε όλες της εκφάνσεις της καθημερινότητας του όπως κίνηση, θέρμανση, επεξεργασία μετάλλων, ανεύρεση και επεξεργασία της τροφής, βιομηχανία, κ.ά. (Goudsblom 2012). Ιδιαίτερα στη σύγχρονη κοινωνία, τόσο η καθημερινότητα των πολιτών όσο και η οικονομική δραστηριότητά τους είναι απόλυτα εξαρτημένη από την ηλεκτρική ενέργεια. Όπως αναφέρεται από τον Heth (2019), μόνο στις ΗΠΑ η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε από τις 291 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες το 1959 σε 3.946 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες το 2018, από τα οποία το 37% καταναλώνεται από οικιακές συσκευές και το 35% από την εμπορική δραστηριότητα. Παρόμοιες τάσεις, ως προς τις απαιτήσεις σε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζονται και στην Ευρώπη (Damm et al. 2017).

Οι αυξημένες απαιτήσεις σε ενέργεια οδήγησε στην αύξηση των καύσεων ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο, αέριο), αφού αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα τόσο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, όσο και για την κίνηση (αυτοκίνητα, αεροπλάνα), με τη χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης (Omer 2012). Οι εκπομπές, στην ατμόσφαιρα, του CO₂ που παράγεται από τις καύσεις σχετίζονται με την εμφάνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη, με πολύ σοβαρές επιπτώσεις σε όλα τα οικοσυστήματα (Bose 2010, Van Ruijven et al. 2019, Ghosh & Ghosh 2020).

Για να ανακοπή ή τάση της υπερθέρμανσης του πλανήτη υπάρχει η ανάγκη να στραφεί η ανθρωπότητα στην μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως του CO₂. Αυτό απαιτεί την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μηδενική εκπομπή αερίων ρύπων, που εξειδικεύεται στην ελάττωση - μέχρι και την σταδιακά οριστική κατάργηση- των θερμικών μηχανών τόσο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και στην βιομηχανία και την κίνηση των οχημάτων.

Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι η ηλιακή, η υδροηλεκτρική (βαρυτική), η αιολική και η γεωθερμική, μόνο οι τρεις πρώτες μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρική για καθημερινή χρήση (Oliveira et al. 2015, Ogunniyi & Pienaar 2017). Όμως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από φυσικούς παράγοντες όπως η φωτοπερίοδος και η ηλιοφάνεια (για τα φωτοβολταϊκά) η ταχύτητα του ανέμου για τα αιολικά και οι βροχοπτώσεις για τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Αυτό αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα γιατί η προσφορά ενέργειας δεν συμβαδίζει πάντοτε με την αυξημένη ζήτηση. Για παράδειγμα μπορεί σε ώρες αιχμής για κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να έχει άπνοια ή η ζήτηση να

εμφανίζεται νυκτερινές ώρες όπου δεν λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά. Η ανάγκη από την μια για αυξημένη προσφορά ενέργειας αλλά και η δυνατότητα αυτή να αποθηκεύεται όταν η ζήτηση είναι μικρότερη από την παραγωγή οδήγησε στην αναζήτηση μορφών αποθήκευσής της. Οι Dehghani-Saniij et al. (2019) κατέταξαν τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε πέντε κατηγορίες.

α) Μηχανικά συστήματα, όπως αυτά της άντλησης νερού, από την περίσσεια ενέργειας, σε μεγαλύτερο ύψος και την αποθήκευση του για υδροηλεκτρική χρήση.

β) Χημικά, παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση, και αποθήκευση του σε κυψέλες υδρογόνου.

γ) Θερμικά, όπου αποθηκεύεται θερμότητα για χρήση κυρίως σε θέρμανση.

δ) Ηλεκτρομαγνητικά όπως πυκνωτές και υπεραγώγιμα υλικά για την αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας.

στ) Ηλεκτροχημικά συστήματα, στα οποία υπάγονται οι διάφοροι τύποι μπαταριών.

Από όλα τα παραπάνω στη συνέχεια θα μας απασχολήσουν στην βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία οι μπαταρίες, αφού αυτές είναι α) εύχρηστες β) το μέγεθος και το βάρος τους να ποικίλει και γ) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών από ακουστικά βαρηκοΐας και μικρές ηλεκτρονικές συσκευές μέχρι για παροχή ενέργειας σε αυτοκίνητα αλλά και για χρήση ως αποθήκες ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αιολικά ή φωτοβολταϊκά στοιχεία (Dehghani-Saniij et al. 2019, Sufyan et al. 2019, Faessler 2021).

Πιο συγκεκριμένα θα μας απασχολήσει το Νικέλιο (Ni) και οι χρήσεις του στη κατασκευή μπαταριών καθώς επίσης και τα σημαντικά αποθέματα Ni σε τρεις χώρες (Ινδονησία, Καναδάς και Ρωσική Ομοσπονδία).

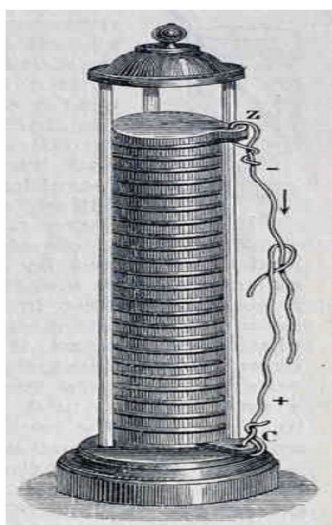
Ιστορική αναδρομή (Από τον Βόλτα μέχρι σήμερα)

Η μπαταρία είναι μια συσκευή που μπορεί να μετατρέπει, μέσα από οξειδοαναγωγικές διεργασίες, την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η ενέργεια αυτή μπορεί να βρει εφαρμογές σε μια σειρά από μικροσυσκευές όπως ακουστικά, τηλέφωνα, υπολογιστές μέχρι και την κίνηση οχημάτων (Whittingham 2012, Heth 2019).

Η πρώτη μπαταρία κατασκευάστηκε από τον Ιταλό φυσικό Αλεσάντρο Βόλτα (Alessandro Volta, 1745-1827) και προς τιμή του ονομάζεται «ηλεκτρική στήλη του Βόλτα». Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1, αποτελείτο από εναλλασσόμενους δίσκους Ψευδάργυρου (Zn) και Αργύρου (Ag). Οι δίσκοι διαχωρίζονταν μεταξύ τους από χαρτί εμποτισμένο σε διάλυμα NaCl (Krepelková 2017, Heth 2019, Szydło 2021).

Στην άνοδο ο Zn αποβάλλοντας ηλεκτρόνια μετατρέπεται σε ιόντα (Zn^{+2}), τα ηλεκτρόνια δια μέσου του καλωδίου μεταφέρονταν τελικά στον Άργυρο (κάθοδο) και στη συνέχεια αντιδρώντας με τα πρωτόνια (H^+) του διαλύματος σχημάτιζαν φυσαλίδες από αέριο υδρογόνο (Decker 2005, Heth 2019). Η στήλη του Βόλτα βελτιώθηκε στη συνέχεια με τους ερευνητές να πειραματίζονται με διαφορετικά ηλεκτρόδια στην άνοδο και την κάθοδο αλλά και διαφορετικούς τύπους ηλεκτρολυτών. Οι μπαταρίες αυτές σταδιακά έχαναν το φορτίο τους και τερμάτιζαν την λειτουργία τους.

Η πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Εικ. 1) παρουσιάστηκε το 1860 από τον Gaston Planté (1834-1889) και ήταν μια μπαταρία μολύβδου (Pb) σε ηλεκτρολύτη που περιείχε διάλυμα θεικού οξέος (Kurzweil 2010).



Εικόνα 1. Στην εικόνα απεικονίζεται η πρώτη μπαταρία, όπως αυτή κατασκευάστηκε από τον Βόλτα (Szydło 2021).

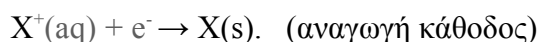
Δομή μπαταρίας

Μια τυπική μπαταρία αποτελείται από τέσσερα μέρη:

α) Την άνοδο (-). Αυτή αποτελείται από ένα μέταλλο σε στερεά κατάσταση $M(s)$ το οποίο μπορεί να αποδώσει ηλεκτρόνια (οξειδωση), που ο αριθμός τους εξαρτάται από τον αριθμό οξείδωσης του μετάλλου.



β) Την κάθοδο (+). Αποτελείται από ένα μέταλλο που μπορεί να ιονιστεί ($X^+(aq)$) και κατά συνέπεια έχει την τάση να προσλάβει ηλεκτρόνια (αναγωγή).



γ) Έναν ηλεκτρολύτη που παρεμποδίζει την ροή των ηλεκτρονίων εσωτερικά της συσκευής για να αποφευχθεί η αποφόρτισή της (Meng et al. 2022). Ο ηλεκτρολύτης αποτελεί το πιο σημαντικό τμήμα της μπαταρίας αφού πρέπει να ικανοποιεί ταυτόχρονα τις εξής τρεις προϋποθέσεις (Meng, et al. 2022):

- Αποτελεσματική μόνωση των ηλεκτρονίων μεταξύ των πόλων της μπαταρίας.
- Γρήγορη μεταφορά ιόντων (και μάζας) μέσα στο διάλυμα.
- Ικανοποιητική προστασία των ισχυρά οξειδοαναγωγικών πόλων της μπαταρίας, ώστε να ελαχιστοποιείται η φθορά τους.

Οι ηλεκτρολύτες, ανάλογα με τη σύστασή τους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Zhong et al. 2015):

- Σε αυτούς όπου περιέχουν υδατικά διαλύματα οξέων, βάσεων ή αλάτων είτε σε αυτούς που περιέχουν οργανικά ιοντικά διαλύματα σε υγρή μορφή.
- Σε αυτούς που βρίσκονται σε στερεή ή ημίρρευστη κατάσταση (σε μορφή γέλης, gel). Σε αυτούς ανήκουν και οι ηλεκτρολύτες ιόντων λιθίου (Li), που θα ασχοληθούμε πιο διεξοδικά στη συνέχεια.
- Στους ενεργά οξειδοαναγωγικούς ηλεκτρολύτες που μπορούν να βρίσκονται στη μορφή υδατικών διαλυμάτων, οργανικών ενώσεων ή σε μορφή gel.

δ) Τις περισσότερες φορές τοποθετείται μέσα στον ηλεκτρολύτη ένα πορώδες διαχωριστικό το οποίο επιτρέπει την κίνηση των ιόντων σε αυτόν αλλά, παρεμποδίζει την ευπαθείας επαφή των δύο πόλων της μπαταρίας (Whittingham 2012).

Όταν ή συσκευή δεν είναι συνδεδεμένη αγωγίμα εξωτερικά, το σύστημα βρίσκεται σε μια κατάσταση ισορροπίας και τα ιόντα του ηλεκτρολύτη κινούνται άτακτα ενώ η ροή ηλεκτρονίων μεταξύ ανόδου και καθόδου, διαμέσου του διαλύματος, παρεμποδίζεται από τον

ηλεκτρολύτη. Αν συνδεθεί, εξωτερικά, αγωγίμα με ένα καλώδιο τότε τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην άνοδο θα ρέουν προς την κάθοδο αποδίδοντας με το τρόπο αυτό ηλεκτρική ενέργεια. Ταυτόχρονα τα ιόντα του διαλύματος μετακινούνται αντίστοιχα προς τους δύο πόλους της μπαταρίας, κλείνοντας με το τρόπο αυτό το κύκλωμα.

Οι μπαταρίες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (Cairns, 2004):

- Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτές που αποδίδοντας την ενέργεια σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σταδιακά αποφορτίζονται (μπαταρίες μιας χρήσης).

- Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν αυτές που μπορούν με την αντιστροφή των χημικών διεργασιών να μετατρέψουν την ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από κάποια εξωτερική πηγή σε χημική (επαναφορτιζόμενες μπαταρίες). Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με οποιοδήποτε τρόπο, κάποια χρονική στιγμή, μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον. Όπως έχει ήδη αναφερθεί αυτές βρίσκουν στις μέρες μας πολλές και σημαντικές εφαρμογές.

Χαρακτηριστικά μπαταρίας

Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας είναι (Krepelkonά, M. 2017).

- Η **τάση (V)**. Είναι η διαφορά δυναμικού που μετριέται σε volts (V), μεταξύ των δύο πόλων της. Εξαρτάται από τη χημική σύσταση των στοιχείων που αποτελούν την άνοδο και την κάθοδο. Η συνολική τάση μπορεί να αυξηθεί αν συνδέσουμε σε σειρά τα στοιχεία μεταξύ τους (ο θετικός πόλος του πρώτου με τον αρνητικό του δεύτερου κ.ο.κ). Τότε η συνολική τάση V θα ισούται με το άθροισμα της τάσης του κάθε στοιχείου της. Στο εμπόριο η πιο συνηθισμένες τάσεις είναι 1,5 V και 12 V.

- Η **χωρητικότητα (C)**. Εκφράζει την ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να μεταφερθεί μέσω ενός αγωγού όταν αυτός συνδεθεί με τη μπαταρία, ισούται με το γινόμενο της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος επί το χρόνο ($I \cdot t$) με μονάδα μέτρησης το αμπερώριο (Ah) ή υποδιαίρεσεις του (mAh). Στην μπαταρία αναφέρεται η μέγιστη τιμή δηλαδή η ποσότητα φορτίου που μεταφέρεται, σε κάποια συσκευή, μέχρι την αποφόρτισή της.

- Η **ενέργεια (Wh)**. Μετριέται σε βατώρες (Wh) και δίνει το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποδοθεί στο κύκλωμα μέχρι την αποφόρτιση της μπαταρίας. Υπολογίζεται από το γινόμενο της χωρητικότητας της μπαταρίας (C) με τη τάση λειτουργίας της (V):

$$E = V \cdot I \cdot t =$$

$$V \cdot (I \cdot t) =$$

$$V \cdot C$$

Επιπλέον τεχνικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται -ιδιαίτερα για να τη σύγκριση μπαταριών- με διαφορετικό βάρος ή όγκο που έχουν διαφορετικό βάρος ή όγκο όπως για παράδειγμα όταν αυτές χρησιμεύουν για την κίνηση ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι τα (Borah et. al. 2020, Šimić et al. 2021):

- **Ειδική ενέργεια (Specific energy)** δίνει την ενεργειακή χωρητικότητα μιας μπαταρίας ανά μονάδα βάρους (Wh/kg στο S.I.)

- **Ειδική ισχύς (Specific power)** αντίστοιχα αν αναφερόμαστε στη ισχύ που αποδίδει μια μπαταρία (W/kg στο S.I.).

- Όταν αναφερόμαστε για την ενέργεια ή την ισχύ ανά μονάδα όγκου τα αντίστοιχα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι η **ενεργειακή πυκνότητα** (kWh/m³) και η ενεργειακή ισχύς (kW/m³).

- Τέλος ένα ακόμη σημαντικό τεχνικό χαρακτηριστικό είναι ο **κύκλος ζωής** μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Ο αριθμός αυτός δείχνει τον μέγιστο αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας φόρτισης - εκφόρτισης, που μπορεί μια μπαταρία να πραγματοποιήσει, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την απόδοσή της.

Μέταλλα που χρησιμοποιούνται για τις μπαταρίες

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει μια σειρά από μέταλλα έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μπαταριών. Όμως για μαζική -βιομηχανική - παραγωγή απαιτείται τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν να ικανοποιούν τρία κριτήρια Borah et al.(2020):

- Μικρό βάρος ιδιαίτερα στην βιομηχανία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.
- Σχετικά μικρό κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας.
- Όσο το δυνατόν πιο φιλικά στο περιβάλλον σε όλα τα στάδια (εξόρυξη, χρήση, ανακύκλωση).

Οι παραπάνω ερευνητές κατέταξαν όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα σύμφωνα με τα κριτήρια (κόστους - απόδοσης - περιβαλλοντικής επιβάρυνσης) και παρουσιάζονται στην εικόνα 2.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί (Εικ. 2), τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται σήμερα στις μπαταρίες είναι κυρίως τα Li, Co, Ni, Cu και Zn, αφού τα υπόλοιπα δεν πληρούν τα κριτήρια που αναφέρθηκαν προηγούμενα.

Στη συνέχεια της εργασίας από όλα τα παραπάνω μέταλλα θα μας απασχολήσει το νικέλιο (Ni) και οι χρήσεις του στη κατασκευή μπαταριών.

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be	^z E											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	^z E											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 ⁺ Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Εικόνα 2. Χαρακτηρισμός των στοιχείων του περιοδικού πίνακα σχετικά με τη διαθεσιμότητά τους, την τοξικότητα και το κόστος παραγωγής τους για την χρήση τους σε μπαταρίες χαμηλού κόστους (Borah et al.2020). Ο πίνακας τροποποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. +: σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το κάδμιο αναφέρεται ως τοξικό (Habeck 2013, Heth 2019)

Το Ni και οι χρήσεις του στις μπαταρίες

Όπως φαίνεται από τον περιοδικό πίνακα (Εικ. 2), το νικέλιο ανήκει στα στοιχεία μετάπτωσης Ni. Έχει ατομικό αριθμό 28 και αποτελείται από ένα μίγμα πέντε ισοτόπων (^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{61}Ni , ^{62}Ni , ^{64}Ni) με τα δύο πρώτα να βρίσκεται σε αφθονία, 68.08% και 26.22% αντίστοιχα (Gramlich et al. 1989, Elliott & Steele 2017, Gall et al. 2017).

Το νικέλιο βρίσκει πολλές εφαρμογές στη μεταλλουργία για την δημιουργία κραμάτων ανθεκτικών στη διάβρωση, στην κατασκευή ανοξείδωτου χάλυβα, ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και ως καταλύτης σε πολλές χημικές αντιδράσεις (Harman & King 1952, Keim 1990, Scheppe et al. 2002, Agarwal 2004, Bide et al. 2008). Από όλες τις εφαρμογές που βρίσκει το νικέλιο, στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε κυρίως με τη χρήση του στη κατασκευή μπαταριών πρώτου τύπου - μη επαναφορτιζόμενες- (Siburian et al.2022) αλλά κυρίως δεύτερου τύπου -επαναφορτιζόμενες (Notten 2000, Pop et al.2005, Siburian et al.2022), που όπως έχει ήδη αναφερθεί βρίσκουν πολλές εφαρμογές στη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

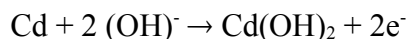
Η πρώτη μπαταρία Ni / Fe κατασκευάστηκε από τον Σουηδό Jungner το 1897 και το 1901 αντικατέστησε το σίδηρο (Fe) από κάδμιο (Cd), ενώ το ίδιο έτος (1901) στις ΗΠΑ ο Edison κατέθεσε αίτηση για πατέντα σε μπαταρία από Ni / Fe (Heth 2019).

- Μπαταρίες Νικελίου Καδμίου Ni / Cd (NiCd)

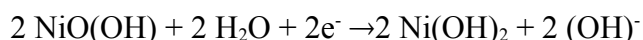
Η μαζική χρήση των μπαταριών NiCd εμφανίστηκε από τα μέσα του 20^{ου} (Bertin et al. 2015, Heth 2019). Όταν η μπαταρία είναι φορτισμένη αποτελείται από:

Το ηλεκτρόδιο της καθόδου (+): Υδροξείδιο του οξειδίου του νικελίου, $\text{NiO}(\text{OH})$,
το ηλεκτρόδιο της ανόδου (-): Κάδμιο (Cd),
τον ηλεκτρολύτη: διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH , H_2O).

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης το Cd της ανόδου οξειδώνεται αποδίδοντας e^- και αντιδρώντας με το $(\text{OH})^-$ του ηλεκτρολύτη μετατρέπεται σε $\text{Cd}(\text{OH})_2$ σύμφωνα με την αντίδραση:

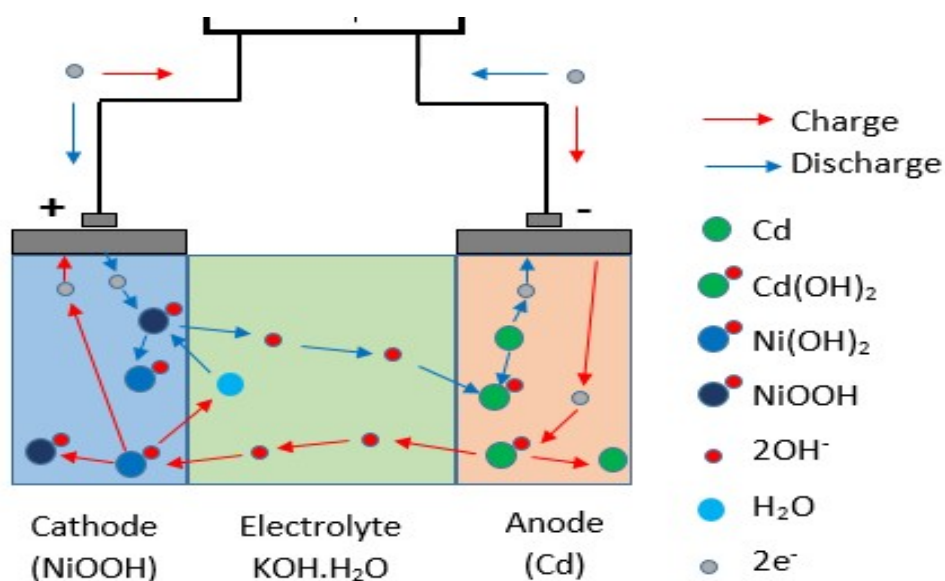


Ενώ το $\text{NiO}(\text{OH})$ της καθόδου ανάγεται σε $\text{Ni}(\text{OH})_2$ σύμφωνα με:



Οι αντίθετες ακριβώς διαδικασίες πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της φόρτισής της όταν τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από μία εξωτερική πηγή οδηγούν στην

επαναδημιουργία Cd και NiO(OH) στους δύο πόλους της μπαταρίας (Nogueira & Margarido 2007, Heth 2019, Šimić et al. 2021) και παρουσιάζονται συνοπτικά στην εικόνα 3.



Εικόνα 3: Παρουσίαση των χημικών διαδικασιών που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας Ni Cd (Nikolaidis & Poullikkas 2017).

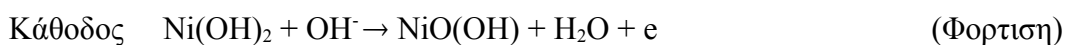
Οι μπαταρίες Ni Cd βρίσκουν πολλές εφαρμογές γιατί έχουν: μεγάλο κύκλο ζωής (1500-3000 κύκλοι), υψηλό ρυθμό φόρτισης, ενεργειακή πυκνότητα 40-60 Wh/kg, ρυθμό αυτοεκφόρτισης περίπου 10% το μήνα και τη δυνατότητα να λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη εμφανίζουν και σημαντικά μειονεκτήματά όπως: το φαινόμενο μνήμης, για το λόγο αυτό απαιτείται πλήρης φόρτιση ώστε να μην μειωθεί η χωρητικότητα της μπαταρίας και υψηλό κόστος παραγωγής (Nikolaidis & Poullikkas 2017, Jeyaseelan et al. 2020, Šimić et al. 2021, Muslimin et al. 2022). Το πιο σημαντικό όμως μειονέκτημα αποτελεί ύπαρξη του Cd που είναι τοξικό μέταλλο (Habeck M 2013 Heth, C. L. (2019).

- Μπαταρίες Νικελίου Υδριδίων μετάλλων Ni (MH)

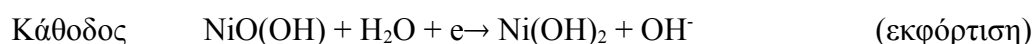
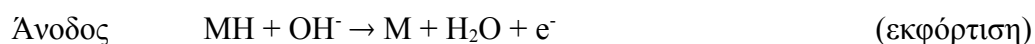
Τη δεκαετία του 1990 στην προσπάθεια για την κατασκευή πιο φιλικών προς το περιβάλλον μπαταριών Ni, αντικαταστάθηκε το Cd που υπάρχει στην άνοδο από Υδρίδια μετάλλων (MH), όπου M ένα μέταλλο ή ένα κράμα (Heth 2019, Muslimin et al. 2022).

Κατά την διάρκεια της φόρτισής της στην άνοδο πραγματοποιείται αναγωγή αφού το H₂O προσλαμβάνοντας δύο ηλεκτρόνια μετατρέπεται σε στοιχειακό υδρογόνα και (OH)⁻ (Scherson & Palencsár 2006). Το H₂ στη συνέχεια θα αντιδράσει με το μέταλλο M του

ηλεκτρολύτη που θα μετατραπεί σε υδρίδιο, ενώ το Ni(OH)_2 της καθόδου οξειδώνεται σε NiO(OH) σύμφωνα με τις αντιδράσεις (Nikolaidis & Poullikkas 2017):



Ακριβώς ή αντίστροφη πορεία πραγματοποιείται κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας, όπου στην άνοδο το υδρίδιο αποδίδοντας ηλεκτρόνια στο κύκλωμα αντιδρά με το OH^- του διαλύματος και μετατρέπεται σε μέταλλο ενώ στην κάθοδο το NiO(OH) (Nikolaidis & Poullikkas 2017). Σύμφωνα με:

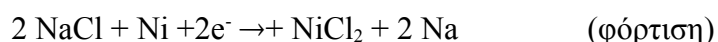
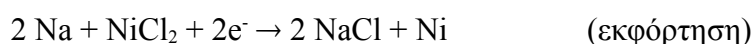


Οι μπαταρίες NiMH εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματά συγκριτικά με αυτές NiCd αφού είναι πιο φιλικές στο περιβάλλον, μειώνουν το φαινόμενο μνήμης, μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλή τάση (320+ V) και σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ενώ εμφανίζουν μεγάλο εύρος ως προς το μέγεθος των κυψελών από 30 mAh-250 Ah (Kopera & Orion 2005, Fetcenko et al. 2007, Heth 2019).

- Μπαταρίες Νατρίου - Χλωριούχου Νικελίου (Na NiCl_2)

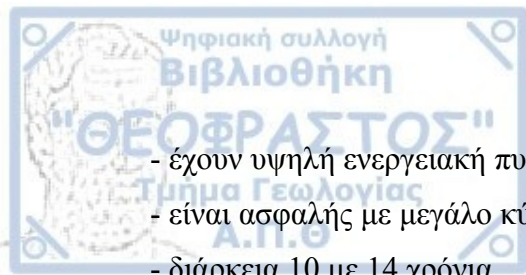
Οι μπαταρίες αυτές γνωστές και ως ZEBRA από τα αρχικά «Zero Emission Battery Research Activities» που μπορούν να αποδοθούν ως «Ερευνητικές Δραστηριότητες Μπαταριών Μηδενικών Εκπομπών» επινοήθηκαν για πρώτη φορά στην Ν. Αφρική. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας κατατέθηκε το 1978 ενώ η πρώτη πιλοτική τους παραγωγή ξεκίνησε το 1994 (Kluiters et al. 1999, Dustmann 2004).

Σε αυτού του τύπου τις μπαταρίες, το ένα ηλεκτρόδιο αποτελείται από νάτριο (Na) και το άλλο από χλωριούχο νικέλιο NiCl_2 . Κατά την εκφόρτισή της το Na αποδίδει e^- στο κύκλωμα μετατρέπεται σε Na^+ το οποίο στη συνέχεια αντιδρά με το NiCl_2 δίνοντας NaCl και Ni (Böhm & Beyermann 1999, Sudworth, J. L. (2001). Η συνολική οξειδωαναγωγική αντίδραση κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση δίνονται παρακάτω (Sudworth 2001, Agarwal, 2004,) και αποδίδει 2,58 V (Li et al. 2016).



Οι μπαταρίες Na NiCl_2 εμφανίζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως (Manzoni et al. 2008, Akinyele et al. 2017):

- είναι φιλικές προς το περιβάλλον
- έχουν μικρό σχετικά κόστος υλικών,



- έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (5 φορές μεγαλύτερη από τις μολύβδου οξέος)
- είναι ασφαλής με μεγάλο κύκλο ζωής (περισσότερους από 2000 κύκλους)
- διάρκεια 10 με 14 χρόνια
- διαθέτουν πυκνότητες ενέργειας και ~100-120 Wh/kg και πυκνότητα ισχύος ~150-200 W/kg. Ενώ έχουν αναφερθεί τιμές πυκνότητας 350 Wh/kg (Li et al. 2016)
- ο χρόνο εκφόρτισης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μερικά δευτερόλεπτα έως λίγες ώρες, Τα πλεονεκτήματα, που αναφέρθηκαν, καθιστούν τις μπαταρίες Na NiCl₂ ιδανικές για τη χρήση τους σε συσκευές που έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια σε μικρό σχετικά χρόνο όπως τα αυτοκίνητα και τα πλοία (Kluiters et al.1999).

- Το Ni σε μπαταρίες ιόντων Λιθίου (Li)

Εκτός από τις χρήσεις του Ni, που έχουμε ήδη αναφέρει, αυτό βρίσκει εφαρμογές και στις πολλά υποσχόμενες μπαταρίες ιόντων LI (Li et al. 2009, Gu et al. 2012, Xu et al. 2017, Akbar 2022).

Στη συνέχεια της εργασίας θα γίνει μια προσπάθεια βιβλιογραφικής επισκόπησης σε τρεις χώρες με σημαντικά κοιτάσματα νικελίου.

Παγκόσμια αποθέματα Νικελίου

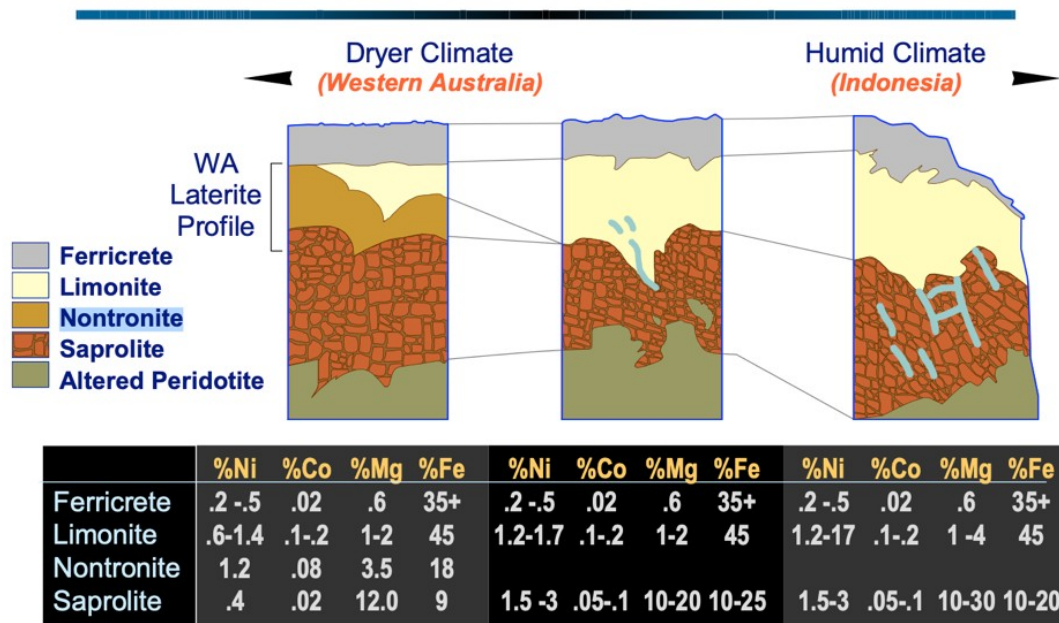
Η παραγωγή νικελίου έχει αυξηθεί σημαντικά, αξίζει να αναφερθεί ότι το 1900 ήταν περίπου 10,000 t ενώ το 2007 άγγιξε τους 1.6 εκατομμύρια τόνους παρουσιάζοντας μια σχεδόν εκθετική αύξηση (Dalvi et al. 2004, Mudd 2009). Το Ni εντοπίζεται σε βασικά - υπερβασικά πετρώματα ενώ το γεγονός της υψηλής περιεκτικότητάς σε νικέλιο που παρατηρείται σε ορυκτά όπως ολιβίνη, αμφιβολίτες περιδοτίτη και πυροξενίτη αποδεικνύουν ότι εμφανίζει υψηλή συγγένεια με τα αρχικά ορυκτά που σχηματίζονται κατά την κλασματική κρυστάλλωση του μάγματος (Paquet et al. 1997). Επιπλέον μπορεί να βρεθεί ενωμένο με S σχηματίζοντας σουλφίδια καθώς επίσης με αρσενικό (As) και άλλα μέταλλα όπως με σίδηρο (Fe) και κοβάλτιο (Co) (Marston et al. 1981, Paquet et al. 1997, Rao 2000).

Το Ni εξάγεται κυρίως από σουλφίδια και λατερίτες (Mudd 2010, Brown et al. 2011). Αν και στα παγκόσμια αποθέματα οι λατερίτες επικρατούν με ένα ποσοστό της τάξης 60% - 70% έναντι 30%-40% των σουλφιδίων, εντούτοις το μεγαλύτερο ποσοστό στην παραγωγή νικελίου προέρχεται από τα σουλφίδια (Elias 2002, Mudd 2009, Stanković et al. 2020). Πιο συγκεκριμένα το 1950 η παραγωγή του από σουλφίδια άγγιξε το 90% ενώ η παραγωγή του από λατερίτες ήταν μόλις στο 10%, το 2003 η παραγωγή από λατερίτες είχε μια τιμή κοντά στο 40 % ενώ το 2009 προσέγγισε το 50% (Dalvi et al. 2004, Oxley et al. 2016). Η εξαγωγή του νικελίου από σουλφίδια αποδίδεται στις σχετικά υψηλότερες συγκεντρώσεις νικελίου σε αυτά αλλά και στους απλούστερες και λιγότερο ενεργοβόρες μεθόδους εξαγωγής του σχετικά με τους λατερίτες (Mudd, 2009, 2010, Stanković et al. 2020).

Από τα θειούχα ορυκτά, το σημαντικότερο για την παραγωγή νικελίου είναι ο πεντλανδίτης $(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$, ενώ πολλές φορές συνυπάρχουν με μέταλλα της ομάδας του λευκοχρύσου (Platinum Group Elements, PGEs) με οικονομικό ενδιαφέρον (Mastromatteo 1986, Rao 2000, Hoatson et al. 2006). Οι λατερίτης προέρχονται από τη χημική διάβρωση όπου τα αρχικά επιφανειακά πετρώματα διαλύονται και σχηματίζουν νέα πιο σταθερά υλικά (Elias 2002). Όσον αφορά το Ni το πιο σημαντικό ορυκτό είναι ο σιδηρονικελιούχος λειμωνίτης $[(\text{Fe}, \text{Ni})\text{O}(\text{OH})]$ (Dalvi et al. 2004, Brown et al. 2011). Γενικά είναι παραδεκτό ότι οι πρωτογενείς συγκεντρώσεις το Ni στα αρχικά βασικά -υπερβασικά πετρώματα (κυρίως δουνίτες, χαρτσβουργίτες και περιδοτίτες που εντοπίζονται σε οφιολιθικά σύμπλοκα και σπανιότερα σε κοματιίτες) είναι της τάξης του 0,2-0,4%, με τη λατεροποίηση η συγκέντρωση αυξάνεται από 3 έως και 30 φορές συγκριτικά με το μητρικό πέτρωμα (Elias 2002). Η διαδικασία αυτή επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων όπως οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή καθώς και τα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας (Εικ. 4), όπου

σε τροπικές συνθήκες ευνοείται η συσσώρευση νικελίου εικόνα 4 (Paquet et al. 1997, Gleeson et al 2003, Dalvi et al. 2004).

Laterite Profiles: Wet and Dry Laterites

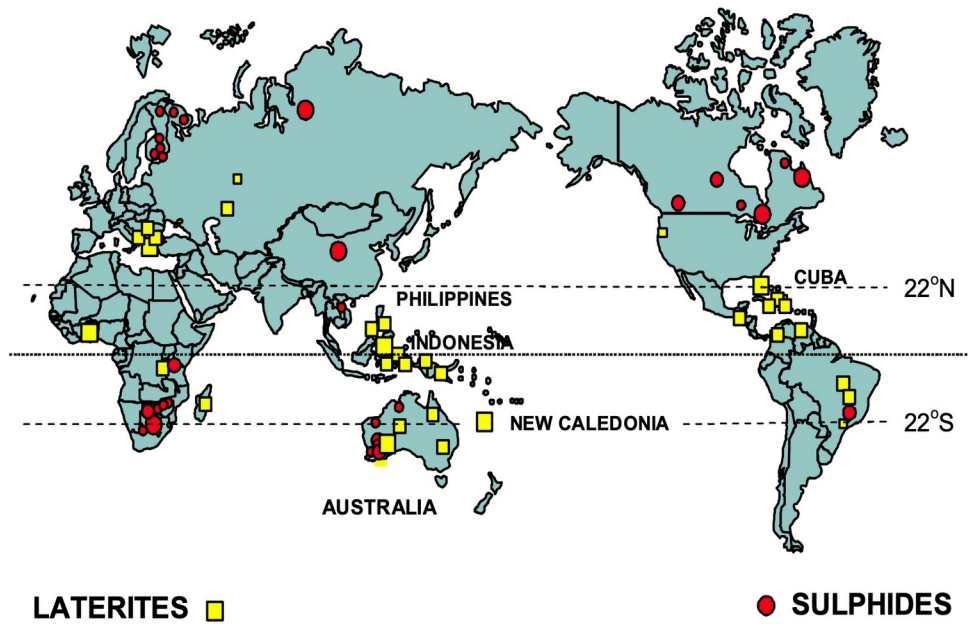


Εικόνα 4. Η επίδραση του κλίματος στην λατεροποίηση του αρχικού πετρώματος και στη συγκέντρωση (%) των μετάλλων Ni, Co, Mg και Fe σύμφωνα με τους Dalvi et al. (2004).

Στη συνέχεια της εργασίας θα πραγματοποιηθεί μια βιβλιογραφική επισκόπηση σχετική με τρεις χώρες που διαθέτουν από τα μεγαλύτερα αποθέματα νικελίου, που όπως φαίνεται και στην εικόνα 5, που είναι:

- Ινδονησία
- Ρωσία
- Καναδάς

Στην Ινδονησία το νικέλιο εξάγεται από λατερίτες, τα κοιτάσματα του Καναδά περιέχουν σουλφίδια Ni - Cu, ενώ αυτά που εντοπίζονται στη Σιβηρία εκτός από σουλφίδια Ni - Cu είναι πλούσια και σε Παλλάδιο (Pd) (Mudd 2009, Brown et al 2011).

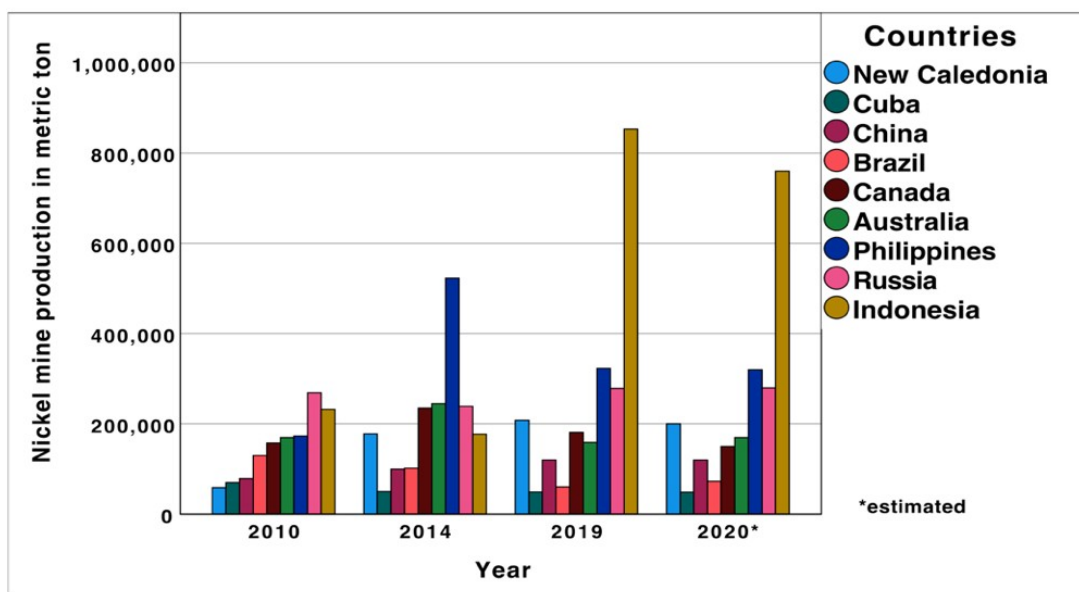


Εικόνα 5. Παγκόσμιος χάρτης που δείχνει τις χώρες με τα σπουδαιότερα αποθέματα νικελίου καθώς και τον τύπο των πετρωμάτων (σουλφίδια ή λατερίτες) σύμφωνα με τον Elias (2002).

ΧΩΡΕΣ ΠΛΟΥΣΙΕΣ ΣΕ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

Ινδονησία

Η Ινδονησία (Εικ. 5) αποτελείται από ένα σύμπλεγμα περισσότερων από 3000 νησιών με τροπικό κλίμα (Sigit 1973), που, όπως έχει αναφερθεί, ευνοεί τη συγκέντρωση Ni σε λατερίτες. Κοιτάσματα Ni, ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά το 1901 στα ορεινά του νότιου Sulawesi και το 1909 στο νοτιοανατολικό Sulawesi (Naryono 2023), ενώ η πρώτη εκμετάλλευσή τους πραγματοποιήθηκε στο Sulawesi το 1938. Από το 2019 (Εικ. 6) η Ινδονησία καταλαμβάνει τη πρώτη θέση στην παγκόσμια παραγωγή νικελίου.



Εικόνα 6. Οι εννιά χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή νικελίου. Το διάγραμμα δημοσιεύτηκε από τους Pandyaswargo et al. (2021) και προέκυψε, σύμφωνα με τους ερευνητές από επεξεργασία των στοιχείων που προέρχονται από Statista, Nickel Production Top Countries (2020).

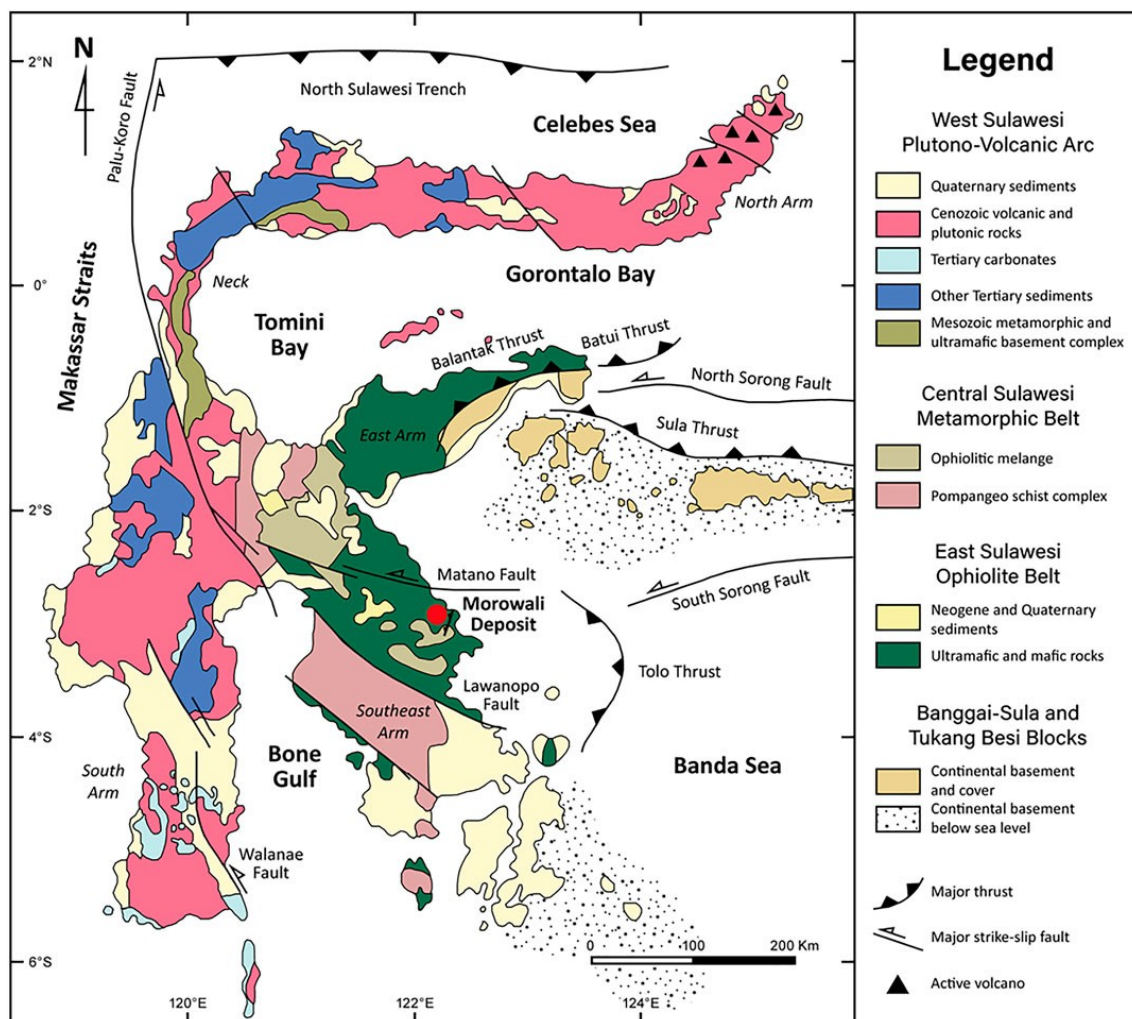
Η ταχύτατη αύξηση στην παραγωγή του νικελίου που παρατηρήθηκε μεταξύ των ετών 2010-2020 (Εικ. 6), δεν άφησε ανεπηρέαστους τους ανθρώπους και το περιβάλλον. Σύμφωνα με τον Naryono (2023), οι εντατικές δραστηριότητες εξόρυξης οδήγησαν σε υποβάθμιση του περιβάλλοντος (αποψίλωση δασών και καταστροφή παράκτιων οικοσυστημάτων) καθώς επίσης αναφέρθηκαν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία των κατοίκων αλλά και στην περιθωριοποίηση των γυναικών.

Αν και όπως φαίνεται στον χάρτη (Εικ. 5) εξόρυξη νικελίου πραγματοποιείται σε πολλές περιοχές της Ινδονησίας όπως στην B.A Irian Jaya (Thirnbeck 2001), τη νήσο Singkep (Syahrir et al. 2020) κ.ά., στην παρούσα εργασία θα γίνει περιγραφή των αποθεμάτων Ni στις

νήσους Sulawesi που εντοπίστηκε και πραγματοποιήθηκε η πρώτη εξόρυξη Ni (όπως έχει ήδη αναφερθεί) και Halmahera (Van der Ent et al. 2013).

Η εκμετάλλευση κοιτασμάτων Ni στη νήσο Sulawesi, Ινδονησία

Η νήσος Sulawesi (εικ. 7) με χατακτηριστική μορφολογία που μοιάζει με το γράμμα **K** (Fu et al. 2014), έχει έκταση 186.216,16 km², με το κεντρικό τμήμα του νησιού να είναι ορεινό (<https://en.wikipedia.org/wiki/Sulawesi>). Εμφανίζονται τέσσερις διακριτές λιθοτεκτονικές ζώνες, με τα περισσότερα κοιτάσματα νικελίου να εντοπίζονται στη ζώνη οφιολίθων (ανατολικά) και την κεντρική ζώνη με πετρώματα που έχουν υποστεί μεταμόρφωση. Η μεταλλευτική δραστηριότητά εντοπίζεται, κυρίως στο κεντρικό, νότιο και ανατολικό τμήμα του νησιού (Rafianto et al., Fu, et al. 2014, Choi et al. 2021). Συνολικά μέχρι το 20121 είχαν εκδοθεί 293 άδειες σε επιχειρήσεις για την εκμετάλλευση νικελίου σε συνολική έκταση 6394,03 km² (Naryono 2023).

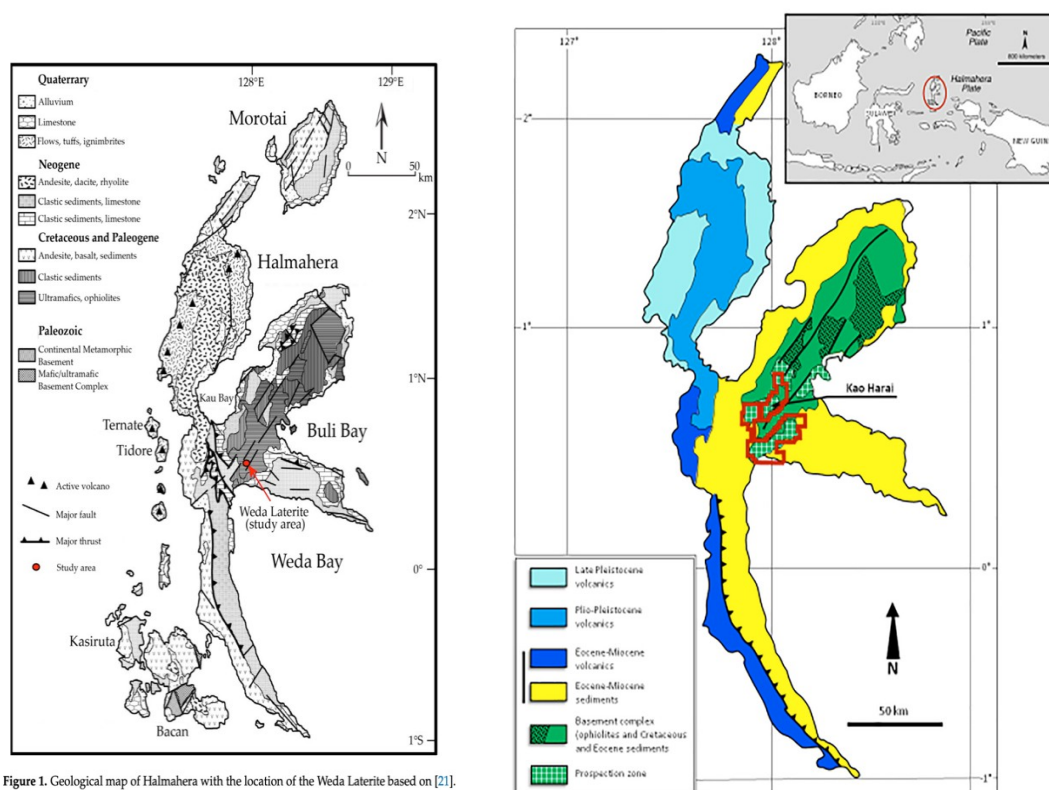


Εικόνα 7. Γεωλογικές χάρτης της νήσου Sulawesi της Ινδονησίας. Με κόκκινο κύκλο η περιοχή των αποθεμάτων Morowali (Hall & Wilson 2000, Choi et al.2021).

Ένα πολύ ενδιαφέρον κοίτασμα Ni εντοπίζεται, επίσης, στην ανατολική περιοχή Morowali, σε λατερίτη που προέρχεται από τη διάβρωση οφιολίθων με το μητρικό πέτρωμα να αποτελείται κυρίως από σερπεντινοποιημένο χαρτσβουργίτη. Εμφανίζει τρεις ορίζοντες: σιδηρούχο (επάνω), λειμωνίτη στο μέσον και σαπρολίτη (πυθμένα). Οι μεγαλύτερες ποσότητες σε μέταλλευμα Ni περιέχονται σε γαρνιερίτη, ένυδρο ορυκτό που περιέχει Mg και Si, $[(Ni,Mg)_6Si_4O_{10}(OH)_8]$, που εντοπίζεται στον ορίζοντα του σαπρολίτη. Η διάλυση του Mg και του Si, κατά την περίοδο των βροχών, και η αντικατάστασή τους από Ni οφείλεται κατά κύριο λόγο στο τροπικό κλίμα της περιοχής (Choi et al. 2021).

Η εκμετάλλευση κοιτασμάτων Ni στη νήσο Halmahera, Ινδονησία

Η νήσος Halmahera έχει και αυτή σχήμα **K**, όπως και η νήσος Sulawesi, αλλά μικρότερης κλίμακας (Εικ. 8). Οι δυτικοί βραχίονες του K σχηματίζουν ηφαιστειακό τόξο, ενώ οι ανατολικοί περιλαμβάνουν κυρίως οφιολίθους. Η περιοχή Halmahera αποτελεί ένα από τα ελάχιστα παραδείγματα ενεργού σύγκρουσης τόξου-τόξου όπου και διατηρούνται οι διαδικασίες καταβύθισης (Hall 1987).



Εικό

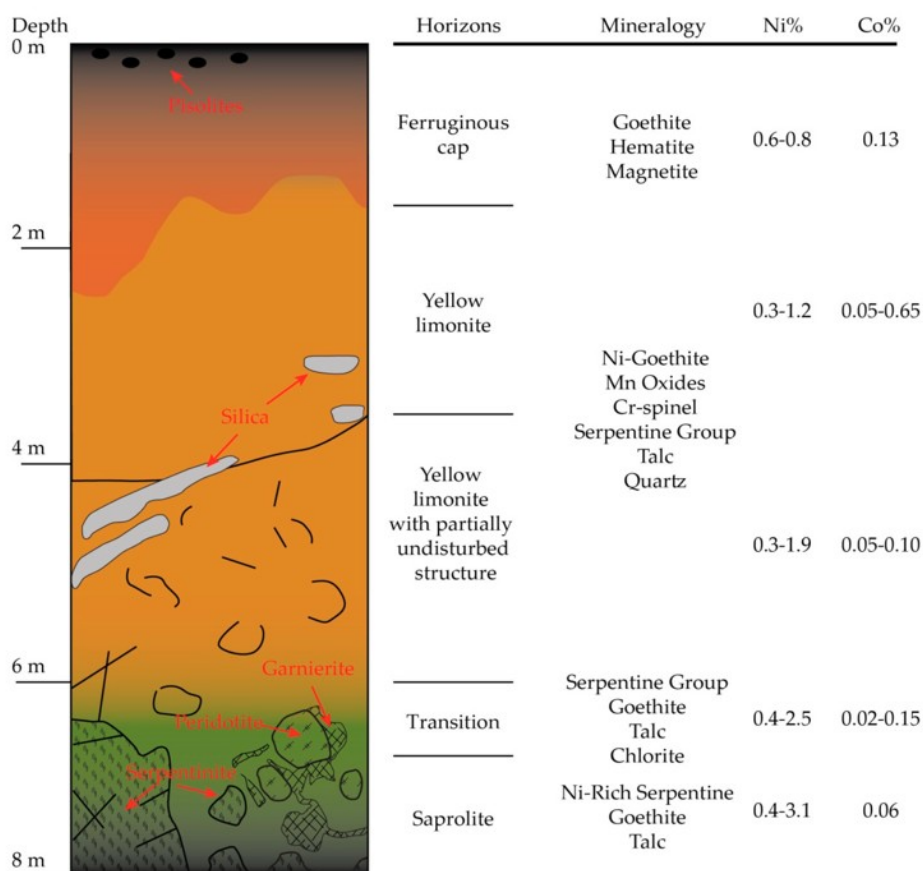
να 8. Γεωλογικός χάρτης της νήσου Halmahera, Ινδονησία, από τους Farrokhpay et al. (2019) σύμφωνα με τους Cock & Lynch, (1999), όπως οι ίδιοι αναφέρουν.

Οι Widiatmoko et al. (2020) ανέλυσαν πετρώματα από την παράκτια περιοχή Buli στην ανατολική Halmahera (Εικ. 8), που προέρχονταν τόσο από ρυάκια όσο και από παράκτια ιζήματα με την παρακάτω σύστασή:

- υπερβασικά (10-47%),
- σερπεντίνη (12-24%),
- μεταμορφωμένα (3-12%).

Τα ιζήματα περιείχαν σιδηρονικέλιο (Fe - Ni) καθώς και ενώσεις νικελίου - αρσενικού (Ni - As). Οι συγγραφείς χαρακτηρίζουν ως ενδιαφέρουσα για περαιτέρω έρευνα την παρουσία νικελίου στα υποθαλάσσια ιζήματα που αναλύθηκαν.

Όμως το μεγαλύτερο γνωστό κοίτασμα νικελίου εντοπίζεται στην περιοχή «Weda Bay» της κεντρικής Halmahera (εικ. 8) και καλύπτει μια έκταση 550 km² με εκτιμώμενους πόρους 139 Mt και με μέση περιεκτικότητα σε Ni της τάξης του 1,59 wt% (Konopka et al. 2022). Οι λατερίτες που είναι πλούσιοι σε Ni έχουν εμφανίζονται σε μητρικά πετρώματα αποτελούμενα κυρίως από δουνίτη και χαρζβουργίτη (Farrokhpay et al. 2019).

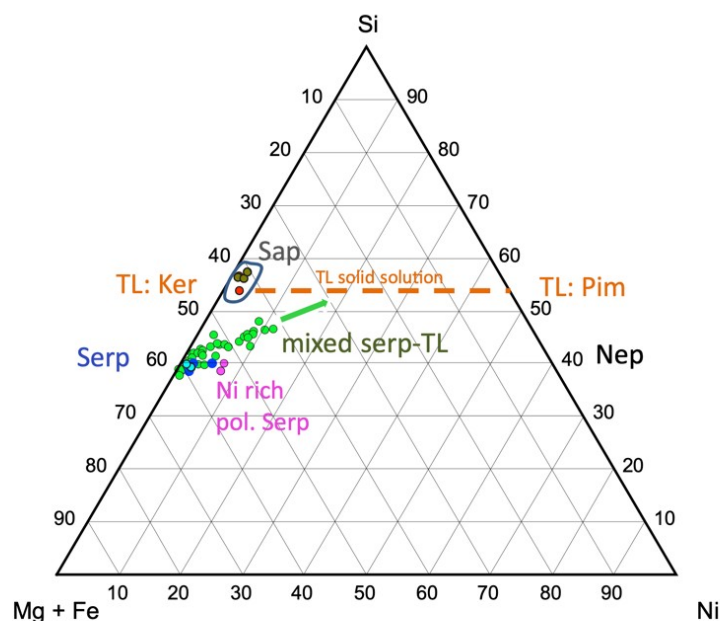


Εικόνα 9. Τομή του λατερίτη στην περιοχή Weda Bay (Konopka et al. 2022).

Σύμφωνα με τους Konopka et al. (2022) το επάνω στρώμα χρώματος κόκκινου - καφέ αποτελείται κυρίως από τα σιδηρούχα ορυκτά αιματίτη (Fe_2O_3), γκαιτίτη $\text{FeO}(\text{OH})$ και μαγνητίτη (Fe_3O_4). Οι συγκεντρώσεις σε νικέλιο είναι σχετικά μικρές από 0,6 μέχρι 0,8% κ.β ενώ εντοπίζονται και ίχνη από κοβάλτιο (Εικ. 9). Στο αμέσως επόμενο στρώμα λατερίτη κυριαρχούν δύο τύπου μεταλλεύματος οξείδια (προς τα επάνω) αποτελούμενη από κίτρινο λειμωνίτη με τις συγκεντρώσεις σε Ni να είναι σχετικά μικρές από 0,3 μέχρι 1,9% κ.β και εντοπίζεται κυρίως σε γκαιτίτη. Οι μεγαλύτερες όμως συγκεντρώσεις νικελίου εντοπίζονται στο σαπρολίτη (κατώτατο στρώμα) όπου εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις (από 0,4 μέχρι 3,1% κ.β) κυρίως σε σερπεντίνη (Εικ. 9).

Οι Farrokhpay et al. (2019) από την ανάλυση δειγμάτων εντόπισαν την διαδοχική εμφάνιση τριών γενεών σερπεντίνη (εικ. 10):

Η πρώτη εμφανίζεται φτωχή σε νικέλιο και πλούσια σε σίδηρο και μαγνήσιο και που αναπτύσσεται απευθείας από την διάβρωση τη αρχικού οφιολιθικού πετρώματος (δουνίτης, περιδοτίτης) σε σαπρολίτη (συμβολίζεται με μαύρους κύκλους στο διάγραμμα της εικόνας 10). Η δεύτερη που είναι πλούσια σε μαγνήσιο και νικέλιο και συμβολίζεται με ροζ κύκλους στο διάγραμμα της εικόνας 10. Η τελευταία φάση κρυστάλλωσης, σερπεντίνη πλούσια σε Mg και φτωχή Ni (εικ.10 πράσινοι κύκλοι).

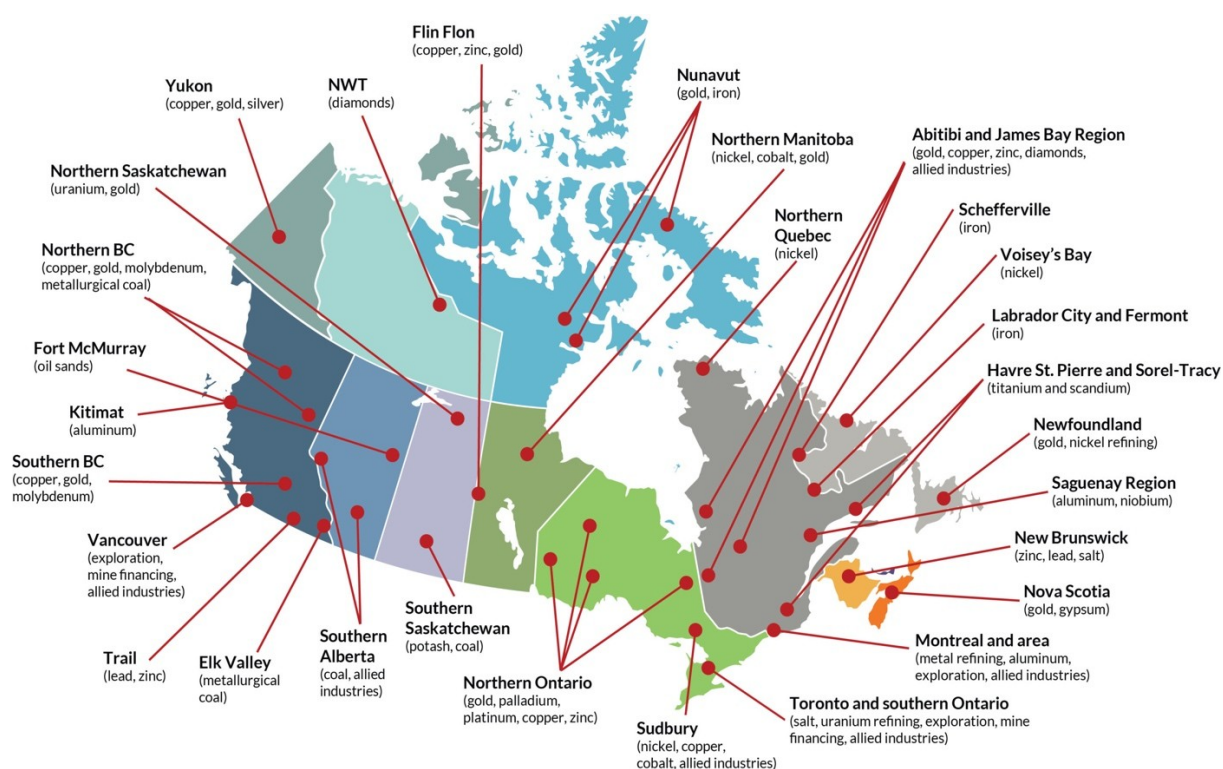


Εικόνα 10. Διάγραμμα Si, Fe +Mg, Ni, όπου της χημικής ανάλυσης σερπεντίνη από την περιοχή «Weda Bay» της κεντρικής Halmahera, Ινδονησία σύμφωνα με τους

Farrokhpay et al. (2019). (TL: talk-like, Nep: nepouite, Ker: kerolite, Pim: pimelite).

Καναδάς

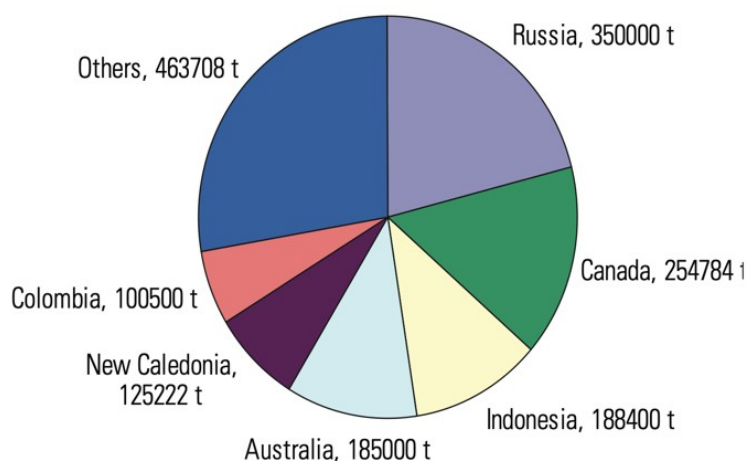
Ο Καναδάς είναι μια χώρα πλούσια σε μεταλλεύματα (Εικ. 11). Από τα τέλη της δεκαετίας του 1880 βρέθηκε μεγάλο κοίτασμα νικελίου στην περιοχή Sudbury της επαρχίας Ontario (Mudd, 2010). Τα κοιτάσματα αποτελούνται από σουλφίδια που προέρχονται από βασικά - υπερβασικά πετρώματα με σπουδαιότερο ορυκτό για την εξαγωγή χρωμίου τον πεντλανδίτη $(\text{Ni, Fe})_9\text{S}_8$. Εκτός από την περιοχή Sudbury εξόρυξη του νικελίου εντοπίζεται κυρίως στις περιοχές (εικόνες 5 και 11): Newfoundland (Gale 1969), Quebec (Auclair et al. 1993, Seabrook et al. 2004) και Manitoba (Menard et al. 1996, Good et al. 2009). Σε όλες τις περιπτώσεις έχει αναφερθεί η ύπαρξη χαλκού (Cu) καθώς επίσης και στοιχείων της ομάδας του λευκόχρυσου (Platinum Group Elements -PGE) σε μικρές ποσότητες (Dickin et al. 1992, Barnes & Francis 1995).



Εικόνα 11. Χάρτης του Καναδά με τις περιοχές και τα μέταλλα που εξάγουν σύμφωνα με: *Mining Association of Canada*. <https://mining.ca>

Το 1942 η συνολική παραγωγή νικελίου ανέρχονταν σε 141.616 tn ενώ το 1954 προσέγγισε τους 160.000 tn (Davis 1943, McClelland 1955). Το μέγιστο της παραγωγής 254.784 tn εμφανίζεται το 2007 (Εικ. 12) ενώ από το 2010 και μετά εμφανίζει μια μικρή μεν

αλλά συνεχή πτωτική τάση με την παραγωγή να πέφτει κάτω από τους 200.000 (Εικ. 6). Η μείωση της παραγωγής την τελευταία δεκαετία μπορεί να αποδοθεί σε μια από σειρά αιτίες όπως η συσχέτιση της έκθεσης σε νικέλιο με μια σειρά από σοβαρές ασθένειες (Duda-Chodak, & Blaszczyk 2008, Lightfoot et al. 2010, Genchi et al. 2020) σε συνδυασμό με τις αυστηρές προδιαγραφές που έχουν τεθεί από τους αρμόδιους φορείς (SQGHH 2015), αλλά και στην αύξηση της παραγωγής νικελίου από την Ινδονησία τις Φιλιππίνες και την Κίνα (Εικ. 6), με αποτέλεσμα την αύξηση της προσφοράς.



Εικόνα 12. Κατάταξη των χωρών ως προς την παραγωγή νικελίου το 2007 σύμφωνα με τους Bide et al. (2008).

Οι Eckstrand & Hulbert (2007) μελετώντας κοιτάσματα νικελίου από διάφορες περιοχές του Καναδά κατέληξαν ότι τα θειούχα μεταλλεύματα Ni, Cu και PGE φιλοξενούνται σε βασικά ή υπερβασικά μαγματικά πετρώματα που προέρχονται από τον μανδύα όπως κοματιίτης, δουνίτης, νορίτης και διακρίνονται στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες:

- Βασικό τήγμα που δημιουργήθηκε από την τήξη των σουλφιδίων εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασίας (πάνω από 1700 °C) που αναπτύχθηκε από την πρόσκρουση μετεωρίτη με μοναδικό παράδειγμα το Sudbury στη περιοχή Οντάριο του Καναδά (Keays & Lightfoot 2004).

- Εισροή, κυρίως βασάλτη, σε ρηξιγενείς ζώνες όπως στις περιοχές (Nunavut και Crystal) Lake του Καναδά.

- Διεισδύσεις κοματιτών πλουσίων σε μαγνήσιο όπως στις περιοχές (Thompson, Manitoba, Quebec και Ontario) του Καναδά.

- Άλλες βασικές - υπερβασικές διεισδύσεις όπως στις περιοχές (Voisey's Bay στο Labrador, Lynn Lake στη Manitoba, και στην British Columbia) του Καναδά.

Οι παραπάνω περιοχές αναφέρονται στο χάρτη που παρουσιάζεται στην εικόνα 11.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ένα από τα πλουσιότερα σε νικέλιο κοίτασμα αυτό που βρίσκεται στο Sudbury στη περιοχή Οντάριο του Καναδά.

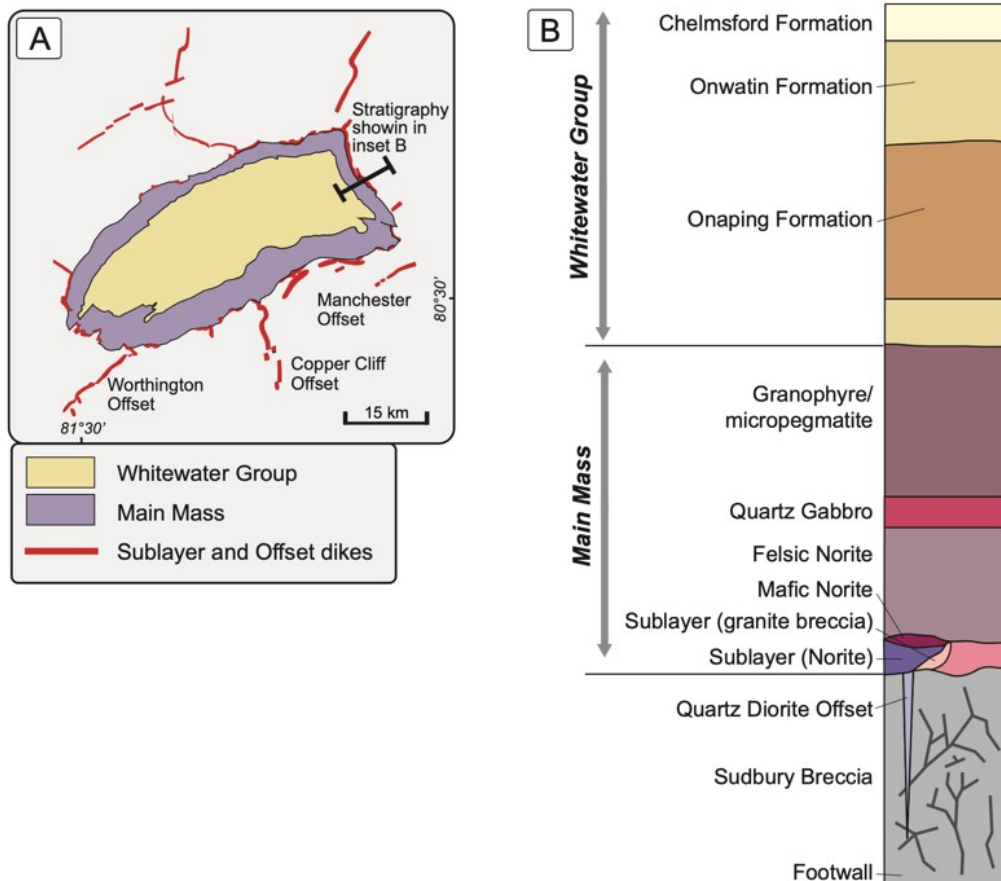
Sudbury, Οντάριο Καναδάς

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το κοίτασμα στο Sudbury, ανακαλύφθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1880 και αποτέλεσε την απαρχή για την ανάπτυξη της βιομηχανίας του νικελίου στον Καναδά. (Mud 2010). Όπως φαίνεται στην εικόνα 13 η κύρια μάζα (Main Mass) του συμπλέγματος πυριγενών πετρωμάτων του Sudbury (Sudbury Igneous Complex) έχει πάχος από 300 - 3000 m, υποδιαιρείται σε Βόρειο και Νότιο τμήμα, ενώ εμφανίζουν σημαντικές διαφορές τόσο στο ιστορικό διαφοροποίησης όσο και στο βαθμό παραμόρφωσης και μεταμόρφωσης των πετρωμάτων (Ripley et al 2015). Στο βόρειο, τμήμα όπως φαίνεται και από τη στρωματογραφία (Εικ. 13), η κύρια μάζα από τη βάση προς την κορυφή αποτελείται από νορίτη (περίπου 30%), χαλαζία και γάββρο - νορίτη (περίπου 10%) και από γρανοφύρη που έχει υποστεί παραμόρφωση και μεταμόρφωση (περίπου 60%). Στο βασικό νορίτη οι συγκεντρώσεις έχουν τιμές: σε Ni (40-1000 ppm) σε Cu (40-1140 ppm) και σε PGE (Pd 1,9-7,8 ppb και Pt 1,8-7,3 ppb), ενώ μειώνονται αισθητά όσο ανεβαίνουμε προς την κορυφή του συμπλέγματος (Dickin et al. 1992, Keays & Lightfoot 2004, Lightfoot & Zotov 2005, Ripley et al, 2015).

Ως προς το τρόπο δημιουργίας των πλούσιων σε Ni - Cu αποθεμάτων της περιοχής, οι Keays & Lightfoot (2020) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι συσσωρεύσεις θειούχων Ni - Cu προήλθαν από προϋπάρχουσες συγκεντρώσεις τους στα βασικά - υπερβασικά πετρώματα του μανδύα. Σύμφωνα με τους (Long 2004, Holm et al. 2020), η συγκέντρωση αυτή σχετίζεται με την πενοκαϊκή ορογένεση που ξεκίνησε πριν από 2,2 δις έτη ενώ η κύρια φάση της πριν 1,87 μέχρι 1,82 δις έτη, όταν ένα ωκεάνιο τόξο, συγκρούστηκε με το νότιο περιθώριο της ξηράς με αποτέλεσμα την εμφάνιση οπίσθιου τόξου στα βόρεια. Σύμφωνα με τους ερευνητές, αυτό είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες αποθέσεις βασικού θειούχου μάγματος στο εκτεταμένο ρήγμα του οπίσθιου τόξου που πιθανά ενισχύθηκε από την ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Ακριβώς στη μέση αυτής της φάσης (1,85 δις έτη) ένας μεγάλος μετεωρίτης προσέκρουσε στη περιοχή του Sudbury. Η πρόσκρουση είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και τη δημιουργία τήγματος προερχόμενου από τη μητρική στοιβάδα. Στο συμπέρασμα αυτό κατέληξαν οι Dickin et al. (1992), από την ανάλυση των συγκεντρώσεων του νορίτη σε Ni και Cu και τη σύγκρισή τους με παρόμοιες δομές από άλλες περιοχές, όπου παρατήρησαν ότι μειώνονται αισθητά από την βάση προς την κορυφή, πιο συγκεκριμένα:

νορίτης στη βάση του κοιτάσματος Ni από 40 μέχρι 1000 ppm, Cu από 40 μέχρι 1140 ppm
νορίτης στη κορυφή του κοιτάσματος Ni από 15 μέχρι 40 ppm, Cu από 7 μέχρι 40 ppm.



Εικόνα 13. Α. Γενική άποψη του συμπλέγματος των πυριγενών πετρωμάτων του Sudbury. Β. Σρωματογραφικά δεδομένα από την Βόρεια περιοχή του συμπλέγματος, σύμφωνα με τους Ripley et al. (2015).

Ο Long (2004) διατυπώνει την άποψη ότι τα αποτελέσματα των παρατηρήσεών του σέ ολόκληρη τη λεκάνη του Sudbury σε συνδυασμό με τις αυξημένες συγκεντρώσεις σε Ni - Cu και PGE, δεν μπορούν να ερμηνευθούν αποκλειστικά και μόνο ως αποτέλεσμα της διαδικασίας πρόσκρουσης- τήξης- επανακρυστάλλωσης- ή από τη χρήση απλών ηφαιστειογενών μοντέλων. Θεώρησαν, για τους παραπάνω λόγους, ότι ήταν αναγκαία μια πιο σύνθετη προσέγγιση σύμφωνα με την οποία η πρόσκρουση του μετεωρίτη μπορεί εκτός από την τήξη και επανακρυστάλλωση του μητρικού πετρώματος να πυροδότησε ή και να ενίσχυσε τις συνεχιζόμενες διεργασίες του φλοιού κατά τη διάρκεια της ορογένεσης. Το ίδιο έτος οι Keays & Lightfoot (2004) διατύπωσαν ένα μοντέλο για την δημιουργία του

συμπλέγματος των πυριγενών πετρωμάτων του Sudbury, που παίρνει υπόψιν του όλη την προαναφερθείσα συζήτηση, ως μία αλληλουχία γεγονότων:

- Πρόσκρουση μετεωρίτη - τήξη
- Θραύσματα πυρίμαχων βασικών πετρωμάτων του μητρικού πετρώματος συσσωρεύονται κατά μήκος του δαπέδου του φύλλου τήξης.
- Συνέχιση της θερμικής διάβρωσης των υποκείμενων μητρικών πετρωμάτων.
- Καθίζηση σε προυπάρχοντες θαλάμους μάγματος και επανακρυστάλλωση (δημιουργία πλούσιων σε Ni-Cu-PGE σουλφιδίων)
- Προσθήκη νέου υλικού (από μητρικά βασικά πετρώματα ή από τον μανδύα)
- Αύξηση της συγκέντρωσης σε Cu και PGE στα πλούσια σε Ni - Fe θειούχα πετρώματα.
- Διάρρηξη του θαλάμου - Μετατόπιση του τήγματος προς τα περιθώρια του δαπέδου του.
- Συνέχιση της διαδικασίας συσσώρευσης από μέταλλα του υπερκείμενου τήγματος.
- Δημιουργία των πετρωμάτων επαφής των οποίων τα θειούχα έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε Cu, Ni και PGE συγκριτικά με αυτά του αρχικού διαχωρισμού.
- Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, επιπλέον ποσότητες Cu, Se και PGE προστίθενται στο τμήμα του φύλλου τήξης.

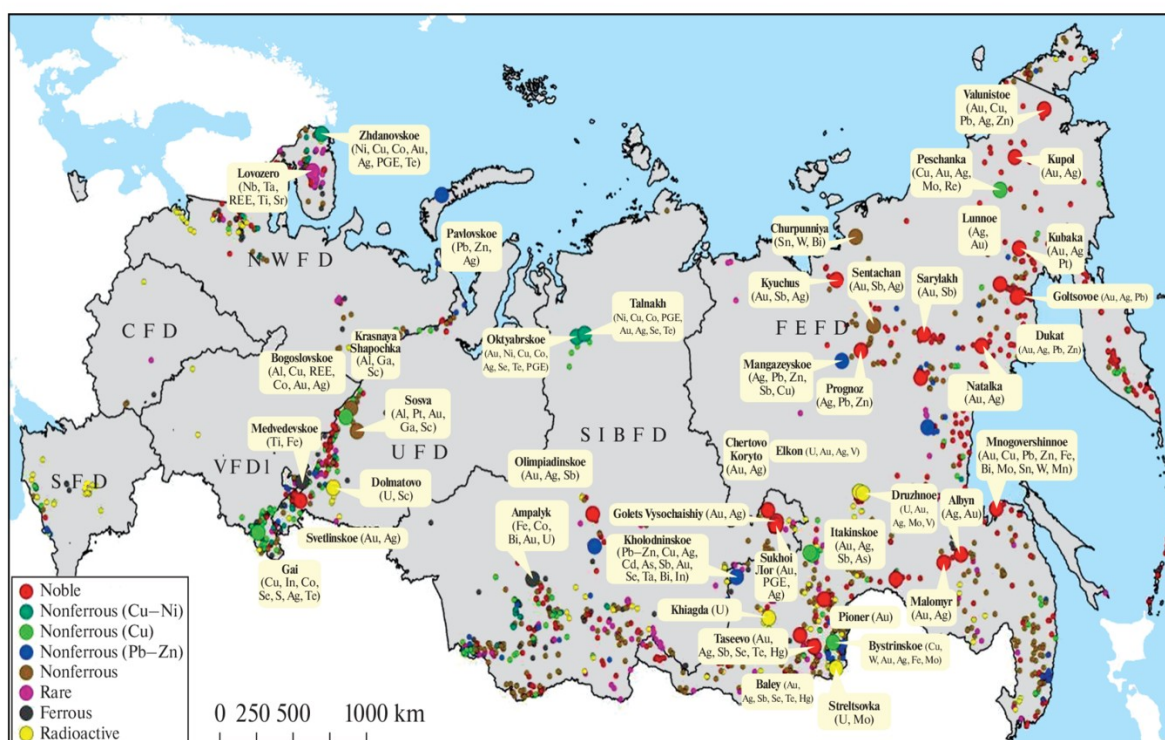
Ρωσική Ομοσπονδία

Η Ρωσική Ομοσπονδία που δημιουργήθηκε το 1991 είναι το μεγαλύτερο κράτος του πλανήτη που εκτείνεται σε δύο ηπείρους, Ευρώπη και Ασία (Σιβηρία) με συνολική έκταση που υπερβαίνει τα 17.098 km² (Εικ. 14). Εκτός από την εξόρυξη ορυκτών καυσίμων (φυσικό αέριο - πετρέλαιο) η Ρωσία κατέχει σημαντική θέση στην παγκόσμια εξόρυξη και παραγωγή κρίσιμων για τη βιομηχανία μετάλλων (Εικ. 14) όπως: αλουμίνιο, βωξίτη, άνθρακα, κοβάλτιο, χαλκό, νικέλιο, λίθιο, χρυσό, διαμάντια PGE κ.ά. (Levine & Wallace 2007).

Από όλα τα μεταλλεύματα στη εργασία αυτή θα μας απασχολήσει μόνο η μεταλλευτική δραστηριότητα που σχετίζεται με το νικέλιο. Τα σπουδαιότερα από αυτά εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα της ομοσπονδία (Εικ. 14) πλησίον του αρκτικού κύκλου (Εικ. 14) και είναι (Mudd 2010):

α) στη χερσόνησο Kola που βρίσκεται στο βόρειο δυτικό άκρο της Ρωσικής ομοσπονδίας στα σύνορα με τη Φιλανδία,

β) στη χερσόνησο Taimyr που βρίσκεται στα βόρεια και περιλαμβάνει δύο από τα σπουδαιότερα πεδία του Talnakh και του Norilsk, το οποίο θα μας απασχολήσει αναλυτικότερα στη συνέχεια.

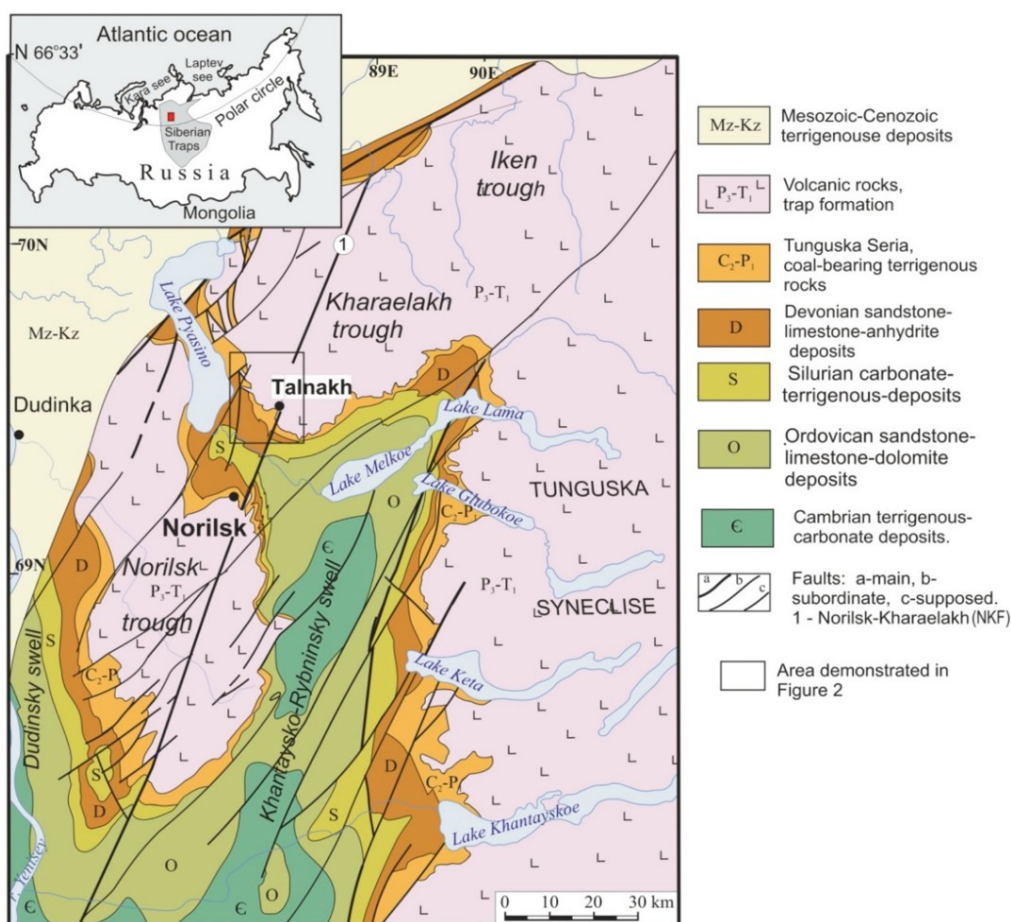


Εικόνα 14. Χάρτης με τα σπουδαιότερα αποθέματα μετάλλων στη Ρωσική Ομοσπονδία.

Πηγή: Bortnikov et al. (2022).

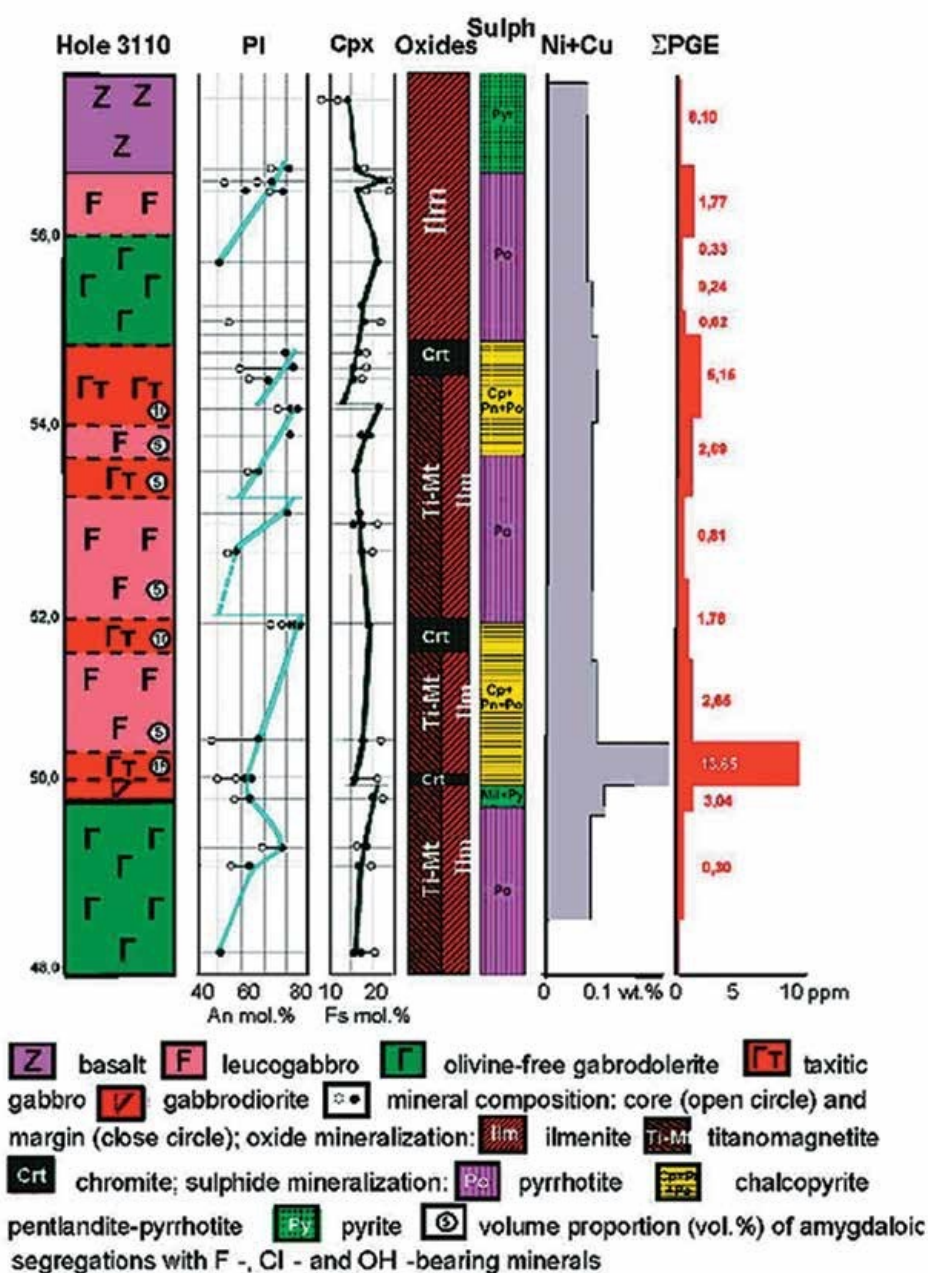
Norilsk, Ρωσική Ομοσπονδία (Σιβηρία)

Το Norilsk είναι μια βιομηχανική πόλη που βρίσκεται στον αρκτικό κύκλο (εικ.14). Παρά το πολύ ψυχρό κλίμα που επικρατεί, είναι μια αναπτυσσόμενη βιομηχανική περιοχή πλούσια σε νικέλιο, χαλκό, κοβάλτιο, χρώμιο και PGE. Αν και η ύπαρξη Ni ήταν γνωστή από της αρχές του περασμένου αιώνα, η πρώτη βιομηχανική ανάκτηση του πραγματοποιήθηκε το 1942. Τα κοιτάσματα εντοπίζονται σε βασικά-υπερβασικά πυριγενή πετρώματα και διαφέρουν ουσιαστικά από τα άλλα μαγματικά κοιτάσματα που έχουν εντοπιστεί παγκόσμια εξαιτίας της νεότερης ηλικίας τους, αφού πριν την ανακάλυψή τους όλα τα μεγάλα γνωστά κοιτάσματα μεταλλευμάτων χαλκού-νικελίου και λευκοχρύσου στον κόσμο συνδέονταν με γιγάντιες Πρωτεροζωικές υπερβασικές εισβολές (Starostin & Sorokhtin 2011, Sluzhenikin et al. 2014, Krivolutskaya et al. 2019). Στην εικόνα 14 που ακολουθεί δίνεται ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Norilsk σύμφωνα με τους (Krivolutskaya et al. 2020).



Εικόνα 15. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Norilsk όπου απεικονίζεται και η θέση του στα όρια της Ρωσικής ομοσπονδίας σύμφωνα με τους Krivolutskaya et al. (2020).

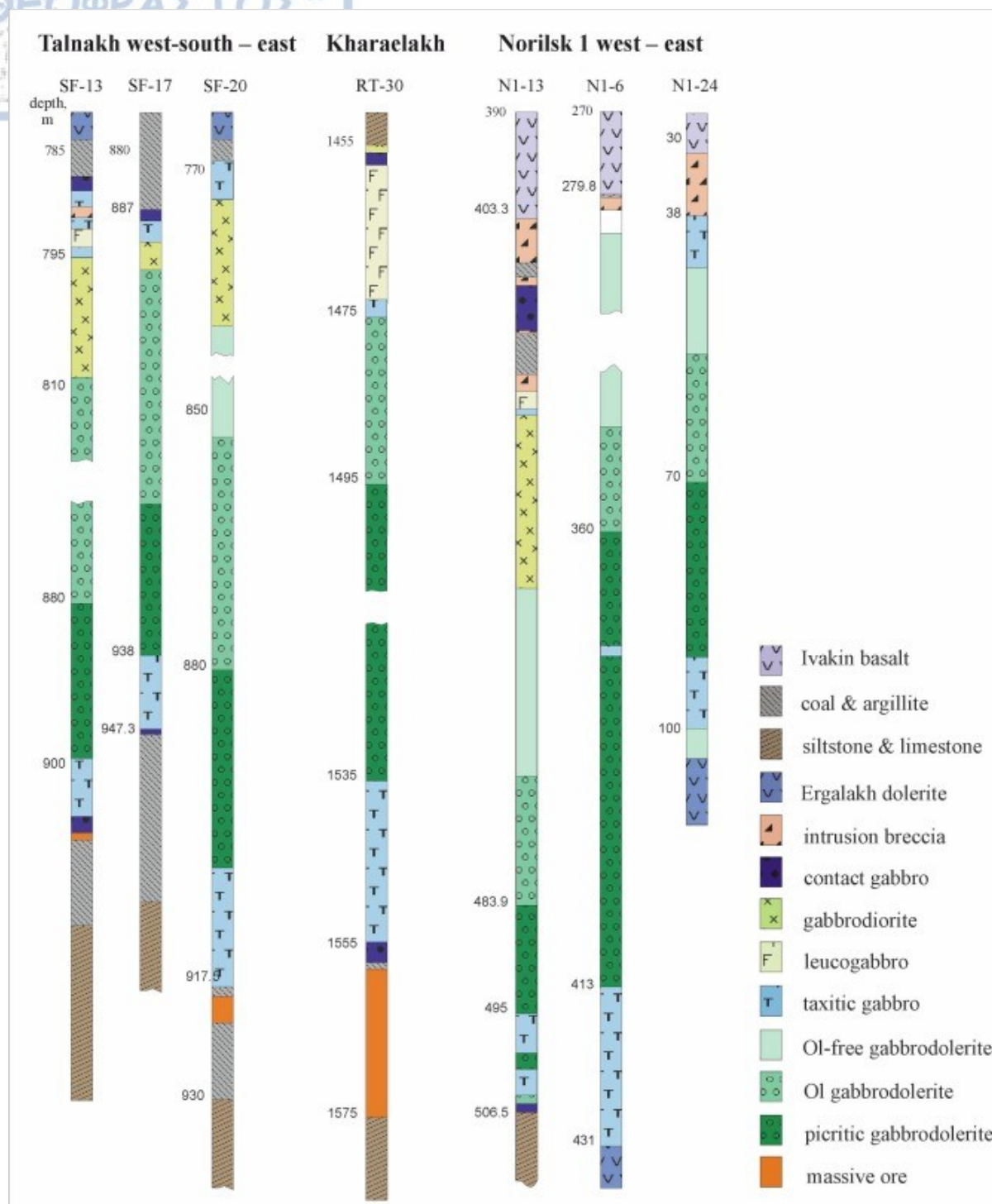
Οι Diakon et al. (2002) θεωρούν ότι τα κοιτάσματα δημιουργήθηκαν σε θαλάμους από διαδοχικές εισβολές βασικού πλουτωνικού μάγματος που διείσδυσε στο φλοιό από υπάρχοντα ρήγματα του μανδύα. Σε αυτούς τους θαλάμους από μάγμα πραγματοποιήθηκε μερική πέψη του φλοιού και στη συνέχεια οι παλμοί μάγματος μεταφέρθηκαν προς την επιφάνεια μέσω ιζηματογενών πετρωμάτων πάχους 8 - 10 km που ήταν πλούσια σε άνθρακα, θείο και ανθρακικά. Εμφανίστηκε έτσι μια χαρακτηριστική στρωμάτωση από ιζηματογενή και ηφαιστειακά πετρώματα. Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται η μεταβολή στη σύνθεση των πετρωμάτων από τη γεώτρηση με αριθμό (3110) σύμφωνα με τους Sluzhenikin et al. (2014).



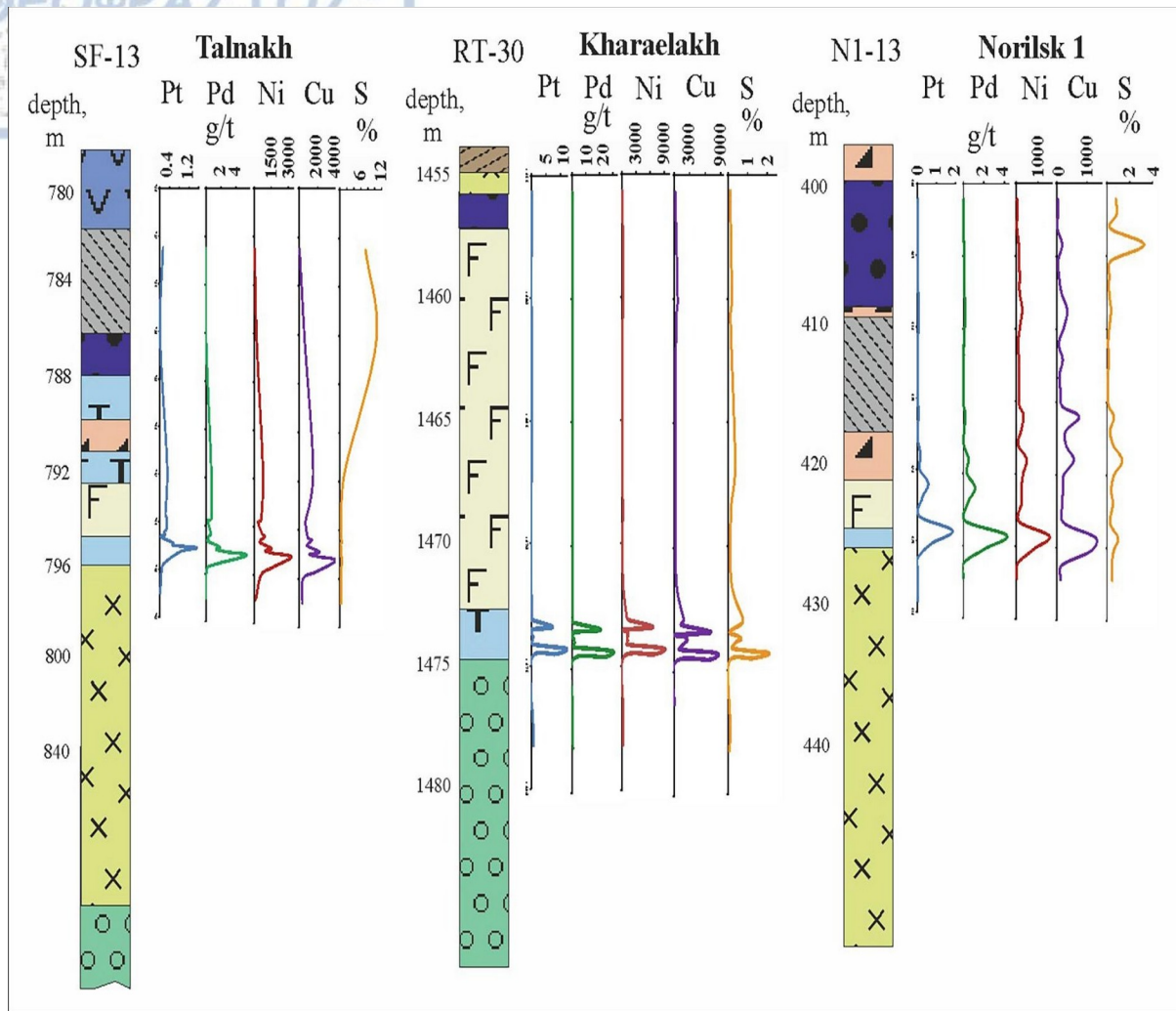
Εικόνα 16. Μεταβολή στη σύνθεση των πετρωμάτων στη γεώτρηση με αριθμό 3110 σύμφωνα με τους Sluzhenikin et al. (2014).

Τα ιζηματογενή πετρώματα διακρίνονται σε τρεις ενότητες: α) εδαφογενή στρώματα Πρωτεροζωικού-Καμβρίου (Proterozoic-Cambrian), θαλάσσια ιζήματα Σιλουρίου-Δεβόνιου (Silurian-Devonian) και γ) Λιθανθρακοφόρου-Κατώτερου Περμίου (Carboniferous-Lower Permian). Τα πετρώματα αυτά επικαλύπτονται από μια ακολουθία ηφαιστειακών πετρωμάτων με πάχος περίπου 3,5 km που εντοπίζονται σε πολλές κοιλότητες σε όλη την έκταση της περιοχής. Οι αποθέσεις PGE-Cu-Ni βρίσκονται στις διασταυρώσεις αυτών των κοιλοτήτων με το μεγάλο ρήγμα Norilsk-Kharaelakh (Sereda et al. 2020).

Σε απόσταση 25 km βόρεια του Norilsk βρίσκεται η πόλη Talnakh που έχει ενσωματωθεί με το Norilsk από το 2005. Στη περιοχή αυτή, όπως και στην Kharaelakh, έχουν βρεθεί πολυάριθμα κοιτάσματα ορυκτών σε ηφαιστειακές-πλουτωνικές κοιλότητες Diakon et al. (2002). Στην εικόνα 17 παρουσιάζεται η στρωματογραφία των τριών περιοχών ενώ στην εικόνα 18 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις σε Ni, Cu, Pt Pd σε g/t και S σε % κ.β.. Όπως παρατηρείται, οι συγκεντρώσεις είναι αυξημένες στην ανώτερη στοιβάδα με γάββρο. Το βάθος στη περιοχή Norilsk 1 εντοπίζεται στα 420-430m από την επιφάνεια, στις περιοχές Talnakh και Kharaelakh στα 790-800 και 1470-1480 αντίστοιχα (Gritsenko et al. 2022). Στο Norilsk 1 οι συγκεντρώσεις σε Pt και Pd είναι μεγαλύτερες από τις άλλες περιοχές, ενώ αντίθετα οι συγκεντρώσεις σε Ni και Cu είναι μικρότερες (Εικ. 18).



Εικόνα 17. Στρωματογραφία των περιοχών Talnakh, Kharaelakh και Norilsk 1. Το βάθος δίνεται σε m από την επιφάνεια σύμφωνα με τους Gritsenko et al. (2022)



Εικόνα 18. Η συγκεντρώσεις σε μέταλλα (Ni, Cu, Pt, Pd g/t) και S σε %κ.β. σε γάββρο από τις περιοχές Norilsk 1, Talnakh και Kharaelakh. Τα σύμβολα παρουσιάζονται στην εικόνα 17. Το βάθος δίνεται σε m από την επιφάνεια. Πηγή: Gritsenko et al. (2022).

Χερσόνησος Kola (Σύνορα με Φιλανδία)

Η χερσόνησος Kola με έκταση περίπου 100.000 km², βρίσκεται στο βόρεια δυτικό τμήμα της Ρωσικής ομοσπονδίας στα σύνορα με τη Φιλανδία και βρέχεται από τη Θάλασσα Μπάρεντς και τη Λευκή Θάλασσα (Εικ. 14). Το μέγεθος των αποθεμάτων σε Ni που εκτιμάτε σε περίπου είναι 150 Mt με συγκέντρωση σε Ni της τάξης του 1%, τα καθιστά σε μεσαίου μεγέθους σε παγκόσμια κλίμακα (Barnes et al.2001, Mudd 2010).

Τα θειούχα κοιτάσματα πλούσια σε Ni, Cu, PGE προέρχονται από τον μανδύα μέσω ηφαιστειακών παλμών βασικού και υπερβασικού μάγματος (Barnes et al.2001, Bekker et al. 2016). Η σύσταση των πετρωμάτων και η στρωματογραφία παρουσιάζεται στην εικόνα19.

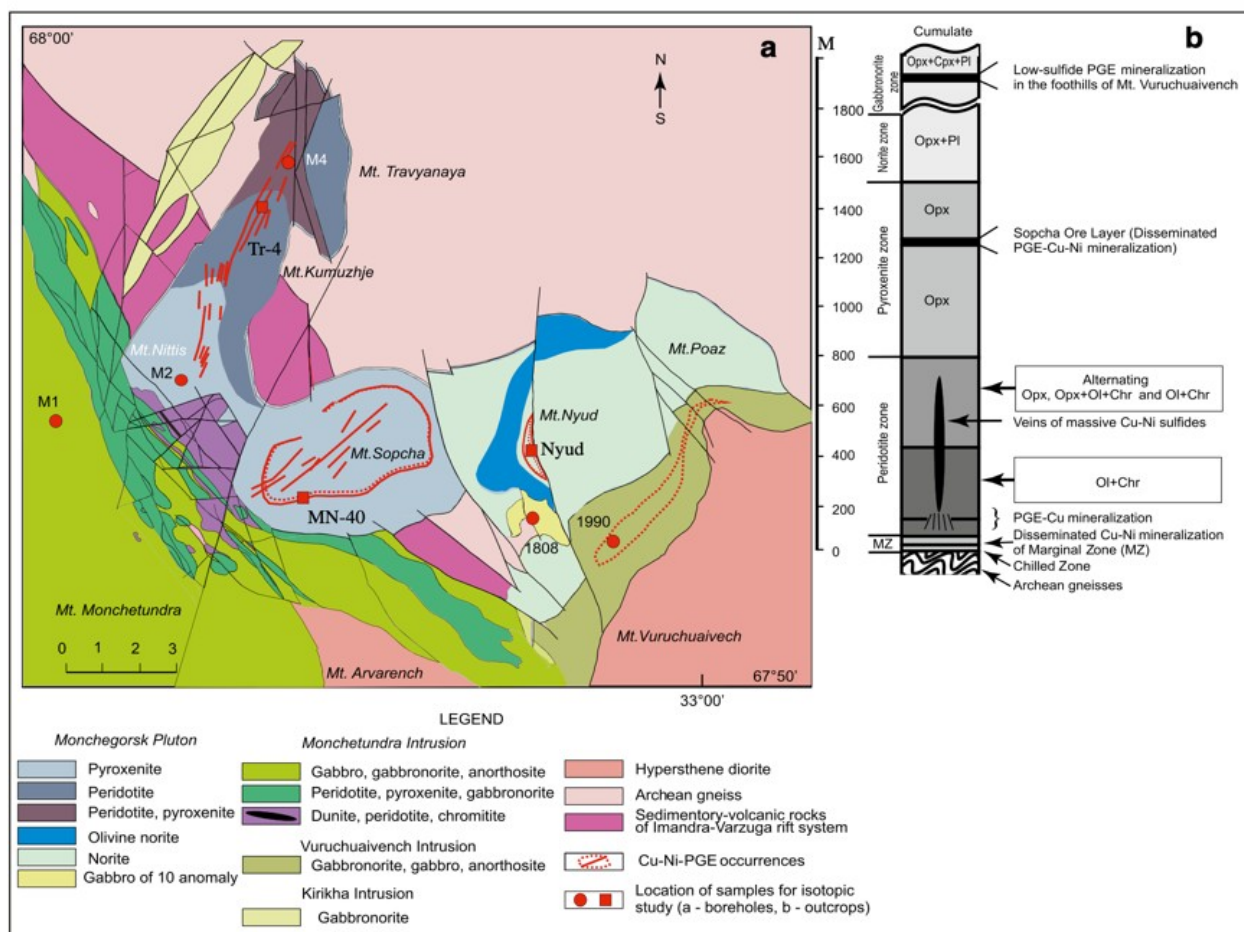


Fig. 2 a Detailed map of the Monchegorsk pluton showing locations of samples used in this study. b Schematic stratigraphic column of the Monchegorsk pluton showing distribution of Ni-Cu-PGE mineralization

Εικόνα 19. a. Χάρτης των πλουτωνικών πετρωμάτων της περιοχής Monchegorsk στην χερσόνησο Kola. b. Στρωματογραφική στήλη των πλουτωνικών πετρωμάτων της περιοχής Monchegorsk που δείχνει την κατανομή ορυκτών Ni-Cu-PGE. Σύμφωνα με τους Bekker et al. (2016).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agarwal, D. C. (2004). Nickel and nickel alloys. Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs, 217-270.
- Akbar, F. F. (2022). Long-term Indonesia's Nickel Supply Chain Strategy for Lithium-Ion Battery as Energy Storage System. International Journal of Business and Technology Management, 4(3), 281-291.
- Akinyele, D., Belikov, J., & Levron, Y. (2017). Battery storage technologies for electrical applications: Impact in stand-alone photovoltaic systems. Energies, 10(11), 1760.
- Auclair, M., Gauthier, M., Trottier, J., Jebrak, M., & Chartrand, F. (1993). Mineralogy, geochemistry, and paragenesis of the Eastern Metals serpentinite-associated Ni-Cu-Zn deposit, Quebec Appalachians. Economic Geology, 88(1), 123-138.
- Barnes, S. J., & Francis, D. (1995). The distribution of platinum-group elements, nickel, copper, and gold in the Muskox layered intrusion, Northwest Territories, Canada. Economic Geology, 90(1), 135-154.
- Barnes, S. J., Melezhik, V. A., & Sokolov, S. V. (2001). The composition and mode of formation of the Pechenga nickel deposits, Kola Peninsula, northwestern Russia. The Canadian Mineralogist, 39(2), 447-471.
- Bekker, A., Grokhovskaya, T. L., Hiebert, R., Sharkov, E. V., Bui, T. H., Stadnek, K. R.,... & Wing, B. A. (2016). Multiple sulfur isotope and mineralogical constraints on the genesis of Ni-Cu-PGE magmatic sulfide mineralization of the Monchegorsk Igneous Complex, Kola Peninsula, Russia. *Mineralium Deposita*, 51, 1035-1053.
- Bertin, F. C. H., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2015). Ch. 10: Batteries. Electronic Waste, 129.
- Bide, T., Hetherington, L., & Gunn, G. (2008). Nickel.
- Böhm, H., & Beyermann, G. (1999). ZEBRA batteries, enhanced power by doping. journal of power sources, 84(2), 270-274.
- Borah, R., Hughson, F. R., Johnston, J., & Nann, T. (2020). On battery materials and methods. Materials Today Advances, 6, 100046.
- Bortnikov, N. S., Volkov, A. V., Galyamov, A. L., Vykentiev, I. V., Lalomov, A. V., & Murashov, K. Y. (2022). Fundamental problems of development of the mineral-resource base of high-tech industry and energy of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 64(6), 313-328.
- Bose, B. K. (2010). Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics. IEEE Industrial Electronics Magazine, 4(1), 6-17.

Brown, T. J., Bide, T., Walters, A. S., Idoine, N. E., Shaw, R. A., Hannis, S. D.,... & MacKenzie, A. C. (2011). World mineral production 2005-09. British Geological Survey.

Cairns, E. J. (2004). Batteries, overview. Encyclopedia of Energy, 1, 117-126.

Choi, Y., Lee, I., & Moon, I. (2021). Geochemical and mineralogical characteristics of garnierite from the Morowali Ni-Laterite deposit in Sulawesi, Indonesia. Frontiers in Earth Science, 9, 761748.

Cock, G. C., & Lynch, J. E. (1999). Discovery and evaluation of the Weda Bay nickel/cobalt deposits, central Halmahera, Indonesia. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 4/99, 197-206.

Dalvi, A. D., Bacon, W. G., & Osborne, R. C. (2004, March). The past and the future of nickel laterites. In PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange (pp. 1-27). The prospectors and Developers Association of Canada Toronto.

Damm, A., Köberl, J., Prettenthaler, F., Rogler, N., & Töglhofer, C. (2017). Impacts of + 2 C global warming on electricity demand in Europe. Climate Services, 7, 12-30.

Davis, H. W. (1943). Nickel. Skillings" Mining Review, 31(42), 2.

Decker, F. (2005). Volta and the pile. Electrochemistry Encyclopedia.

Dehghani-Sanij, A. R., Tharumalingam, E., Dusseault, M. B., & Fraser, R. (2019). Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 104, 192-208.

Diakov, S., West, R., Schissel, D., Krivtsov, A., Kochnev-Pervoukhov, V., & Migachev, I. (2002). Recent advances in the Noril'sk model and its application for exploration of Ni-Cu-PGE sulfide deposits.

Dickin, A. P., Richardson, J. M., Crocket, J. H., McNutt, R. H., & Peredery, W. V. (1992). Osmium isotope evidence for a crustal origin of platinum group elements in the Sudbury nickel ore, Ontario, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56(9), 3531-3537.

Duda-Chodak, A., & Blaszczyk, U. (2008). The impact of nickel on human health. Journal of Elementology, 13(4), 685-693.

Dustmann, C. H. (2004). Advances in ZEBRA batteries. Journal of power sources, 127(1-2), 85-92.

Eckstrand, O. R., & Hulbert, L. J. (2007). Magmatic nickel-copper-platinum group element deposits. Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district

- metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: geological association of Canada, mineral deposits division, Special Publication, 5, 205-222.
- Elias, M. (2002). Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation. Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication, 4, 205-220.
- Elliott, T., & Steele, R. C. (2017). The isotope geochemistry of Ni. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 82(1), 511-542.
- Faessler, B. (2021). Stationary, second use battery energy storage systems and their applications: A research review. Energies, 14(8), 2335.
- Farrokhpay, S., Cathelineau, M., Blancher, S. B., Laugier, O., & Filippov, L. (2019). Characterization of Weda Bay nickel laterite ore from Indonesia. Journal of Geochemical Exploration, 196, 270-281.
- Fetcenko, M. A., Ovshinsky, S. R., Reichman, B., Young, K., Fierro, C., Koch, J.,... & Ouchi, T. (2007). Recent advances in NiMH battery technology. Journal of Power Sources, 165(2), 544-551.
- Fu, W., Yang, J., Yang, M., Pang, B., Liu, X., Niu, H., & Huang, X. (2014). Mineralogical and geochemical characteristics of a serpentinite-derived laterite profile from East Sulawesi, Indonesia: Implications for the lateritization process and Ni supergene enrichment in the tropical rainforest. Journal of Asian Earth Sciences, 93, 74-88.
- Gale, G. H. (1969). The primary dispersion of Cu, Zn, Ni, Co, Mn and Na adjacent to sulfite deposits, Springdale Peninsula, Newfoundland (Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland).
- Gall, L., Williams, H. M., Halliday, A. N., & Kerr, A. C. (2017). Nickel isotopic composition of the mantle. Geochimica et Cosmochimica Acta, 199, 196-209.
- Ghosh, S. K., & Ghosh, B. K. (2020). Fossil fuel consumption trend and global warming scenario: Energy overview. Glob J Eng Sci, 5(2), 2641-2039.
- Gleeson, S. A., Butt, C. R. M., & Elias, M. (2003). Nickel laterites: a review. SEG Newsletter, (54), 1-18.
- Good, D., Mealin, C., & Walford, P. (2009). Geology of the Ore Fault Ni-Cu Deposit, Bird River Sill Complex, Manitoba. Exploration and Mining Geology, 18(1-4), 41-57.
- Goudsblom, J. (2012). Energy and civilization. International Review of Sociology, 22(3), 405-411.

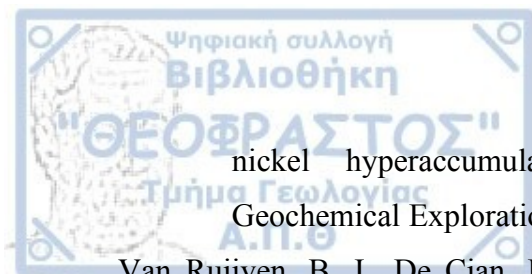
- Gramlich, J. W., Beary, E. S., Machlan, L. A., & Barnes, I. L. (1989). The absolute isotopic composition and atomic weight of terrestrial nickel. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 94(6), 357.
- Gritsenko, Y. D., Kondrikova, A. P., Gilbricht, S., Schoneveld, L., Barnes, S. J., Godel, B. M.,... & Yudovskaya, M. A. (2022). Quantitative assessment of the relative roles of sulfide liquid collection, magmatic degassing and fluid-mediated concentration of PGE in low-sulfide ores of the Norilsk intrusions. *Ore Geology Reviews*, 148, 105042.
- Gu, M., Belharouak, I., Genc, A., Wang, Z., Wang, D., Amine, K., & Wang, C. (2012). Conflicting roles of nickel in controlling cathode performance in lithium ion batteries. *Nano letters*, 12(10), 5186-5191.
- Habeck M (2013) Eco-USA toxic chemicals. Available on <http://www.eco-usa.net/toxics/index.shtml>. Accessed 12 Mar 2013
- Hall, R. (1987). Plate boundary evolution in the Halmahera region, Indonesia. *Tectonophysics*, 144(4), 337-352.
- Hall, R., & Wilson, M. E. J. (2000). Neogene sutures in eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6), 781-808.
- Harman, C. G., & King, B. W. (1952). Applications of nickel compounds in ceramics. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(5), 1015-1017.
- Heth, C. L. (2019). Energy on demand: A brief history of the development of the battery. *Substantia*, 3(2), 77-86.
- Hoatson, D. M., Jaireth, S., & Jaques, A. L. (2006). Nickel sulfide deposits in Australia: Characteristics, resources, and potential. *Ore Geology Reviews*, 29(3-4), 177-241.
- Holm, D., Medaris Jr, L. G., McDannell, K. T., Schneider, D. A., Schulz, K., Singer, B. S., & Jicha, B. R. (2020). Growth, overprinting, and stabilization of Proterozoic Provinces in the southern Lake Superior region. *Precambrian Research*, 339, 105587.
- Jeyaseelan, C., Jain, A., Khurana, P., Kumar, D., & Thatai, S. (2020). Ni-Cd Batteries. *Rechargeable Batteries: History, Progress, and Applications*, 177-194.
- Keays, R. R., & Lightfoot, P. C. (2004). Formation of Ni-Cu-platinum group element sulfide mineralization in the Sudbury impact melt sheet. *Mineralogy and Petrology*, 82, 217-258.
- Keim, W. (1990). Nickel: an element with wide application in industrial homogeneous catalysis. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 29(3), 235-244.

- Kluiters, E. C., Schmal, D., ter Veen, W. R., & Posthumus, K. J. (1999). Testing of a sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery for electric propulsion of ships and vehicles. *Journal of power sources*, 80(1-2), 261-264.
- Kopera, J. J., & Orion, M. I. (2005). Considerations for the utilization of NiMH battery technology in stationary applications. White paper COBASYS, 1-10.
- Krepelková, M. (2017). Evolution of batteries: From experiments to everyday usage. In 21th International Student Conference on Electrical Engineering.
- Krivolutskaya, N. A., Latyshev, A. V., Dolgal, A. S., Gongalsky, B. I., Makarieva, E. M., Makariev, A. A.,... & Asavin, A. M. (2019). Unique PGE-Cu-Ni Noril'sk deposits, Siberian trap province: magmatic and tectonic factors in their origin. *Minerals*, 9(1), 66.
- Krivolutskaya, N., Bychkova, Y., Gongalsky, B., Kubrakova, I., Tyutyunnik, O., Dekunova, E., & Taskaev, V. (2020). New geochemical and mineralogical data on rocks and ores of the ne flank of the oktyabr'skoe deposit (Norilsk area) and a view on their origin. *Minerals*, 11(1), 44.
- Kurzweil, P. (2010). Gaston Planté and his invention of the lead-acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, 195(14), 4424-4434.
- Levine, R. M., & Wallace, G. J (2007). THE MINERAL INDUSTRIES OF ARMENIA, AZERBAIJAN, BELARUS, GEORGIA, KAZAKHSTAN, KYRGYZSTAN, MOLDOVA, RUSSIA, TAJIKISTAN, TURKMENISTAN, UKRAINE, AND UZBEKISTAN. In "U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK—2005" (Dec. 2007).
- Li, G., Lu, X., Kim, J. Y., Meinhardt, K. D., Chang, H. J., Canfield, N. L., & Sprengle, V. L. (2016). Advanced intermediate temperature sodium-nickel chloride batteries with ultra-high energy density. *Nature communications*, 7(1), 10683.
- Li, H., Wang, Y., Na, H., Liu, H., & Zhou, H. (2009). Rechargeable Ni-Li battery integrated aqueous/nonaqueous system. *Journal of the American Chemical Society*, 131(42), 15098-15099.
- Lightfoot, P. C., & Zotov, I. A. (2005). Geology and geochemistry of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada: Origin of nickel sulfide mineralization associated with an impact-generated melt sheet. *Geology of Ore Deposits C/C of Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*, 47(5), 349.

- Lightfoot, N. E., Pacey, M. A., & Darling, S. (2010). Gold, nickel and copper mining and processing. *Health Promotion and Chronic Disease Prevention in Canada*, 29.
- Long, D. G. (2004). The tectonostatigraphic evolution of the Huronian basement and the subsequent basin fill: geological constraints on impact models of the Sudbury event. *Precambrian Research*, 129(3-4), 203-223.
- Manzoni, R., Metzger, M., & Crugnola, G. (2008). ZEBRA electric energy storage system: From R&D to market. Present. HTE Hi. Tech. Expo-Milan, 25th-28th November, 25, 28.
- Marston, R. J., Groves, D. I., Hudson, D. R., & Ross, J. R. (1981). Nickel sulfide deposits in Western Australia; a review. *Economic Geology*, 76(6), 1330-1363.
- Mcclelland, M. (1955). Nickel in Canada. Department of Mines and Technical Survey Mem, (130).
- Meng, Y. S., Srinivasan, V., & Xu, K. (2022). Designing better electrolytes. *Science*, 378 (6624), eabq3750.
- Mudd, G. M. (2009, August). Nickel sulfide versus laterite: the hard sustainability challenge remains. In *Proceedings of the 48th Conference of Metallurgists* (pp. 23-26).
- Mudd, G. M. (2010). Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. *Ore Geology Reviews*, 38(1-2), 9-26.
- Muslimin, S., Nawawi, Z., Suprpto, B. Y., & Dewi, T. (2022, February). Comparison of batteries used in electrical vehicles. In *5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)* (pp. 421-425). Atlantis Press.
- Naryono, E. (2023). Nickel Mine Exploitation In Indonesia, Between A Blessing And A Disaster Of Environmental Damage (No. y58qe). Center for Open Science.
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability. *Journal of power technologies*, 97(3), 220-245.
- Nogueira, C. A., & Margarido, F. (2007). Chemical and physical characterization of electrode materials of spent sealed Ni-Cd batteries. *Waste Management*, 27(11), 1570-1579.
- Notten, P. H. (2000). Nickel-metal hydride batteries: from concept to characteristics. *Hemijaska industrija*, 54(3), 102-115.
- Ogunniyi, E. O., & Pienaar, H. C. V. Z. (2017, April). Overview of battery energy storage system advancement for renewable (photovoltaic) energy applications. In *2017 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)* (pp. 233-239). IEEE.

- Oliveira, L., Messagie, M., Mertens, J., Laget, H., Coosemans, T., & Van Mierlo, J. (2015). Environmental performance of electricity storage systems for grid applications, a life cycle approach. *Energy conversion and management*, 101, 326-335.
- Omer, A. M. (2012). The energy crisis, the role of renewable and global warming. *Greener Journal of Environment Management and Public Safety*, 1(1), 038-07.
- Oxley, A., Smith, M. E., & Caceres, O. (2016). Why heap leach nickel laterites?. *Minerals Engineering*, 88, 53-60.
- Pandyaswargo, A. H., Wibowo, A. D., Maghfiroh, M. F. N., Rezqita, A., & Onoda, H. (2021). The emerging electric vehicle and battery industry in Indonesia: Actions around the nickel ore export ban and a SWOT analysis. *Batteries*, 7(4), 80.
- Paquet, H., Clauer, N., & Trescases, J. J. (1997). The lateritic nickel-ore deposits. *Soils and sediments: mineralogy and geochemistry*, 125-138.
- Pop, V., Bergveld, H. J., Notten, P. H. L., & Regtien, P. P. (2005). State-of-the-art of battery state-of-charge determination. *Measurement science and technology*, 16(12), R93.
- Rafianto, R., Attong, F., Matano, A., & Noor, M. E. S. (2012). The serpentine-related nickel sulphide occurrences from Latao SE Sulawesi; a new frontier of nickel exploration in Indonesia. *Majalah Geologi Indonesia*, 27, 87-107.
- Ripley, E. M., Lightfoot, P. C., Stifter, E. C., Underwood, B., Taranovic, V., Dunlop III, M., & Donoghue, K. A. (2015). Heterogeneity of S isotope compositions recorded in the Sudbury Igneous Complex, Canada: Significance to formation of Ni-Cu sulfide ores and the host rocks. *Economic Geology*, 110(4), 1125-1135.
- Scheppe, F., Sahm, P. R., Hermann, W., Paul, U., & Preuhs, J. (2002). Nickel aluminides: a step toward industrial application. *Materials Science and Engineering: A*, 329, 596-601.
- Scherson, D., & Palencsár, A. (2006). Batteries and electrochemical capacitors. *The Electrochemical Society Interface*, 15(1), 17.
- Seabrook, C. L., Prichard, H. M., & Fisher, P. C. (2004). Platinum-group minerals in the Raglan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Cape Smith, Quebec, Canada. *The Canadian Mineralogist*, 42(2), 485-497.
- Sereda, E., Belyatsky, B., & Krivolutsкая, N. (2020). Geochemistry and geochronology of southern Norilsk intrusions, SW Siberian traps. *Minerals*, 10(2), 165.
- Siburian, R., Paiman, S., Hutagalung, F., Simatupang, L., Goei, R., & Rusop, M. M. (2022). Developing Nickel/Graphene Nano Sheets as an alternative primary battery anode. *Ceramics International*, 48(9), 12897-12905.

- Sigit, S. (1973). Large scale mineral exploration and new mining development prospects in Indonesia.
- Šimić, Z., Topić, D., Knežević, G., & Pelin, D. (2021). Battery energy storage technologies overview. *International journal of electrical and computer engineering systems*, 12(1), 53-65.
- Sluzhenikin, S. F., Krivolutskaya, N. A., Rad'ko, V. A., Malitch, K. N., Distler, V. V., & Fedorenko, V. A. (2014). Ultramafic-mafic intrusions, volcanic rocks and PGE-Cu-Ni sulfide deposits of the Noril'sk Province, Polar Siberia.
- SQGH, P., & Provisional, S. Q. G. E. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (2015).
- Stanković, S., Stopić, S., Sokić, M., Marković, B., & Friedrich, B. (2020). Review of the past, present, and future of the hydrometallurgical production of nickel and cobalt from lateritic ores. *Metallurgical & Materials Engineering*, 26(2), 199-208.
- Starostin, V. I., & Sorokhtin, O. G. (2011). A new interpretation for the origin of the Noril'sk type PGE-Cu-Ni sulfide deposits. *Geoscience Frontiers*, 2(4), 583-591.
- Statista. Nickel Production Top Countries 2020|Statista. In Nickel Production Top Countries 2020; Statista: New York, NY, USA, 2020; Available online: <https://www.statista.com/statistics/264642/nickel-mine-production-by-country/>
- Sufyan, M., Rahim, N. A., Aman, M. M., Tan, C. K., & Raihan, S. R. S. (2019). Sizing and applications of battery energy storage technologies in smart grid system: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(1).
- Sudworth, J. L. (2001). The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery. *Journal of power sources*, 100(1-2), 149-163.
- Syahrir, R., Wall, F., & Diallo, P. (2020). Socio-economic impacts and sustainability of mining, a case study of the historical tin mining in Singkep Island-Indonesia. *The Extractive Industries and Society*, 7(4), 1525-1533.
- Szydło, Z.A. (2021). Chemical electricity. *Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*, 26 (1-2), 5-29.
- Thirnbek, M. R. (2001, June). The Sentani and Siduarsa nickel-cobalt laterite deposits, northeast Irian Jaya, Indonesia. In *Proc. PNG Geology, Exploration and Mining Conference* (eds. G. Hancock) Australasian Inst. Mining Metall., Melbourne.
- Van der Ent, A. J. M. M. J., Baker, A. J. M., Van Balgooy, M. M. J., & Tjoa, A. M. M. J. (2013). Ultramafic nickel laterites in Indonesia (Sulawesi, Halmahera): mining,



- nickel hyperaccumulators and opportunities for phytomining. *Journal of Geochemical Exploration*, 128, 72-79.
- Van Ruijven, B. J., De Cian, E., & Sue Wing, I. (2019). Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nature communications*, 10(1), 2762.
- Whittingham, M. S. (2012). History, evolution, and future status of energy storage. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue), 1518-1534.
- Widiatmoko, H. C., Mirnanda, E., & Kurnio, H. (2020). Nickel in Buli Coastal Area, East Halmahera. *Bulletin of the Marine Geology*, 35(1).
- Xu, J., Lin, F., Doeff, M. M., & Tong, W. (2017). A review of Ni-based layered oxides for rechargeable Li-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(3), 874-901.
- Zhong, C., Deng, Y., Hu, W., Qiao, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2015). A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 44(21), 7484-7539.