



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



ΚΑΜΠΑΝΟΥ ΙΩΑΝΝΑ
ΑΕΜ 5991

Τα κρίσιμα μέταλλα στην ενεργειακή μετάβαση
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Λίθιο



Χαλκός

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2023





ΙΩANNA KAMPIANOY

Τα κρίσιμα μέταλλα στην ενεργειακή μετάβαση

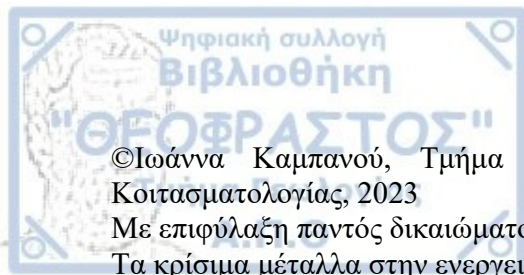
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Μέλφος Βασίλειος, Καθηγητής

©Ιωάννα Καμπανού, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



©Ιωάννα Καμπανού, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Τα κρίσιμα μέταλλα στην ενεργειακή μετάβαση– *Διπλωματική Εργασία*

© Ioanna Kampanou, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2023
All rights reserved.
Critical metals in energy transition– *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.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΙΨΗ	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ABSTRACT	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1 Γενικές Πληροφορίες.....	4
1.2 Η ενεργειακή μετάβαση.....	4
1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	6
2.Ο ρόλος των κρίσιμων μετάλλων στην ενεργειακή μετάβαση	7
2.1 Η υφιστάμενη κατάσταση στον κλάδο της ενέργειας και η ανάγκη μετάβασης «καθαρή» ενέργεια.....	7
2.3 Η σημασία των αποθεμάτων.....	10
3.Τα κρίσιμα μέταλλα με σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση	14
3.1 Λίθιο.....	14
3.2 Χαλκός.....	16
4.Προκλήσεις και απαραίτητες πρωτοβουλίες για την επίτευξη του στόχου της βιώσιμης ανάπτυξης	29
4.1 Ο στόχος και οι προτεραιότητες	29
4.2 Οι κυβερνητικές πολιτικές.....	33
4.3 Ο ρόλος της διεθνούς κοινότητας.....	39
5.Επίλογος	43
5.1 Τελικές παρατηρήσεις.....	43
5.2 Περιορισμοί και προτάσεις μελλοντικής έρευνας	45
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	47



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα κρίσιμα μέταλλα στην ενεργειακή μετάβαση

Ιωάννα Καμπανού

Η παρούσα εργασία διερευνά τον κεντρικό ρόλο των κρίσιμων μετάλλων στην προώθηση της μετάβασης στην καθαρή ενέργεια. Συγκεκριμένα, υπό το πρίσμα της διεθνούς βιβλιογραφίας περιγράφεται ο επείγων χαρακτήρας αυτής της μετάβασης, υπογραμμίζεται η σημασία των κρίσιμων μετάλλων, όπως τα στοιχεία σπανίων γαιών και το λίθιο και εξετάζονται οι σχετικές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών ανησυχιών και των γεωπολιτικών επιπλοκών που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα. Η μελέτη διερευνά επίσης τις αλλαγές που πρέπει να γίνουν και τις πρωτοβουλίες που πρέπει να ληφθούν σε επίπεδο κανονιστικού πλαισίου και πολιτικών για την επίτευξη του στόχου της βιώσιμης ανάπτυξης, ενώ αναδεικνύει και τη σημασία της διεθνούς συνεργασίας.



ABSTRACT

Critical metals in the energy transition

Ioanna Kampanou

This diploma thesis explores the central role of critical metals in driving the clean energy transition. In particular, the urgency of this transition is described in the light of the international literature, the importance of critical metals such as rare earth elements and lithium is highlighted and the associated challenges are examined, including environmental concerns and geopolitical complications affecting availability. The study also explores the changes that need to be made and the initiatives that need to be taken at the regulatory and policy level to achieve the goal of sustainable development, while also highlighting the importance of international cooperation.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη βιβλιογραφική μελέτη πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος της Διπλωματικής Εργασίας του Η' Εξαμήνου στο Γεωλογικό τμήμα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το θέμα της παρούσας διπλωματικής έρευνας μου ανατέθηκε από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο, κατά τον μήνα Οκτώβριο του 2022.

Αρχικά, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον επιβλέπων Καθηγητή, τον κύριο Βασίλειο Μέλφο, για την πολύτιμη συνδρομή του τόσο στην επιλογή του θέματος της εργασίας μου, όσο και στην συνεχή παροχή συμβουλών, γνώσεων και χρόνου που μου παραχώρησε. Επιπλέον ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου για την υπομονή και την υποστήριξη τους όλο αυτό το διάστημα.

1.1 Γενικές Πληροφορίες

Η ενεργειακή μετάβαση είναι μια σημαντική αλλαγή στις τεχνολογίες και τις συμπεριφορές που απαιτούνται για τη μετάβαση από ένα είδος ενεργειακής πηγής σε μια άλλη. Συγκεκριμένα, μια μεγάλη διαρθρωτική αλλαγή σε ένα ενεργειακό σύστημα που επηρεάζει την προσφορά και την κατανάλωση είναι γνωστή με τον ενεργειακή μετάβαση (ή μετασχηματισμός του ενεργειακού συστήματος).

Για την επιβράδυνση της κλιματικής αλλαγής, υπάρχει σήμερα μια μετάβαση προς τη βιώσιμη ενέργεια, κυρίως τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μια άλλη ονομασία. Η αναγνώριση της ανάγκης για σημαντική μείωση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι αυτή που προκαλεί τη σημερινή αλλαγή. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα ορυκτά καύσιμα καταργούνται σταδιακά και ολόκληρα συστήματα ανακατασκευάζονται ώστε να λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

1.2 Η ενεργειακή μετάβαση

Μόλις πέρσι, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) δημοσίευσε το τρίτο μέρος της 6ης έκθεσής της, συγκεντρώνοντας τις πλέον πρόσφατες επιστημονικές μελέτες σχετικά με την κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση του πλανήτη (IPCC, Sixth Assessment Report, 2022). Τα αποτελέσματα της παραπάνω έκθεσης είναι ανησυχητικά, καθώς προκύπτει πως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που απελευθερώθηκαν κατά τη διάρκεια της τρέχουσας δεκαετίας ήταν οι υψηλότερες που καταγράφηκαν ποτέ. Περαιτέρω, η κλιματική αλλαγή γίνεται όλο και περισσότερο αντιληπτή σε κάθε γωνιά του πλανήτη με την εκδήλωση φαινομένων όπως ξηρασίες, τυφώνες και πλημμύρες, όπως αυτές που έπληξαν πρόσφατα την Ελλάδα.

Υπό το παραπάνω πρίσμα, ο προγραμματισμός και η υλοποίηση σημαντικών αλλαγών στον τομέα της ενέργειας είναι μάλλον η πιο κρίσιμη πρωτοβουλία για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη και αυτό γιατί ο συγκεκριμένος κλάδος είναι υπεύθυνος για περίπου το 75% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του

θερμοκηπίου, με άλλους κλάδους, όπως κυρίως η γεωργία και η βιομηχανία να ευθύνονται υπεύθυνες για το υπόλοιπο. Σε αυτό το πλαίσιο, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) έχει ήδη διαμορφώσει μια στρατηγική «καθαρών μηδενικών εκπομπών» (NZE), η οποία φιλοδοξεί να εξαλείψει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο μέχρι το 2050 (Bouckaert et al. 2021).

Βέβαια, η διαδικασία της ενεργειακής μετάβασης έχει ξεκινήσει, έστω και σε μικρότερο βαθμό εδώ και αρκετά χρόνια, όπως προκύπτει από την εμφάνιση ανεμογεννητριών, ηλιακών συλλεκτών, ακόμη και ηλεκτρικών αυτοκινήτων όλο και περισσότερο παγκοσμίως. Παρά ταύτα, οι πρωτοβουλίες της πράσινης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής, της αιολικής, της υδραυλικής κλπ. μέχρι στιγμής αντιπροσωπεύουν ένα μικρό μόνο ποσοστό του παγκόσμιου ενεργειακού αποτυπώματος, γεγονός που καθιστά την ανάγκη επίσπευσης της διαδικασίας της ενεργειακής μετάβασης ακόμη πιο επιτακτική.

Συγκεκριμένα, θα πρέπει να συνεχίσει εντατικά η ανάπτυξη ηλιακών και αιολικών πάρκων μεγάλης κλίμακας που σε συνδυασμό με την πυρηνική και την υδροηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να αποτελέσουν τα θεμέλια του νέου παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Ταυτόχρονα, οι εν λόγω πηγές ενέργειας χαμηλών εκπομπών θα πρέπει να συνδυάζονται με λύσεις αποθήκευσης, όπως μεγάλες μπαταρίες ή σταθμοί παραγωγής ενέργειας υδρογόνου για την αντιμετώπιση της σπατάλης ενέργειας και την αποθήκευση της περίσσειας, ενόψει της πρόβλεψης χαμηλότερων περιόδων παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, η χρήση ορυκτών καυσίμων υψηλών εκπομπών και η κατασκευή αυτοκινήτων θερμικών κινητήρων μεταξύ άλλων πρέπει να μειωθούν δραστικά.

Βέβαια, αν και ουσιαστική, εντούτοις η ευρεία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των συστημάτων αποθήκευσης εγείρει εύλογες ανησυχίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα και τη βιωσιμότητα των απαιτούμενων πρώτων υλών. Ειδικότερα, οι υπό κρίση «πράσινες» τεχνολογίες δεν καταναλώνουν μεν καύσιμα, αλλά απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερες δαπάνες σε μέταλλα. Για παράδειγμα, ένα τυπικό ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία (BEV) απαιτεί έξι φορές περισσότερα ορυκτά σε σχέση με ένα συμβατικό, ενώ αντίστοιχα η παραγωγή αιολικής ενέργειας απαιτεί περίπου εννέα φορές περισσότερα ορυκτά σε σχέση με μια παρόμοια ποσότητα που παράγεται με αέριο. Έτσι, δεδομένης της περιορισμένης ποσότητας αυτών των υλικών στον φλοιό της γης, της γεωγραφικής συγκέντρωσης των αποθεμάτων τους, του ενεργειακού κόστους της εξόρυξής τους, και των ηθικών και γεωπολιτικών ζητημάτων που εγείρονται, η προμήθεια πρώτων υλών και η επάρκειά τους αποτελούν τις μεγαλύτερες ίσως προκλήσεις που σχετίζονται με την προσπάθεια ενεργειακής μετάβασης.

1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση

Βασικό ζήτημα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι η διερεύνηση του ρόλου των κρίσιμων ορυκτών μετάλλων στην ενεργειακή μετάβαση. Για την πλήρη κατανόηση αυτού του θέματος και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων επιλέχθηκε και αξιοποιήθηκε η μεθοδολογική προσέγγιση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Ειδικότερα, η εργασία δομήθηκε στη βάση της επισκόπησης της υφιστάμενης διεθνούς βιβλιογραφίας για το ερευνώμενο ζήτημα. Συγκεκριμένα, η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας περιλάμβανε ακαδημαϊκές εργασίες, δημοσιευμένες μελέτες, εκθέσεις διεθνών και κυβερνητικών οργανισμών κλπ.. Χάρης στην εκτεταμένη συλλογή δεδομένων κατέστη δυνατή η πλήρης και εις βάθος ανάλυση του υπό κρίση ζητήματος. Παράλληλα, αναγνωρίζοντας την πολυπλοκότητα του θέματος, υιοθετήθηκε μια διεπιστημονική προσέγγιση που επέτρεψε το συγκερασμό γνώσεων από διαφορετικά επιστημονικά πεδία, όπως η γεωλογία, η οικονομία και οι περιβαλλοντικές επιστήμες, για τη διαμόρφωση μιας ολιστικής προσέγγισης στο ερευνώμενο ζήτημα και την εξαγωγή μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης που συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση του θέματος.

2.Ο ρόλος των κρίσιμων μετάλλων στην ενεργειακή μετάβαση

2.1 Η υφιστάμενη κατάσταση στον κλάδο της ενέργειας και η ανάγκη μετάβασης «καθαρή» ενέργεια

Από την αρχή της βιομηχανικής περιόδου, η ζήτηση για ενέργεια αυξάνεται συνεχώς, εξαιρουμένης της περιόδου εξαιρετικών συνθηκών που διαμόρφωσε η πανδημία του Covid-19. Τα τελευταία χρόνια, η ηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει περίπου το 20% της χρησιμοποιούμενης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο (IEA. World Energy Outlook 2019)

Γενικώς, οι ενεργειακές πηγές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες με κριτήριο τις εκπομπές CO₂ και τη βιωσιμότητά τους. Τα ορυκτά καύσιμα είναι η πρώτη κατηγορία, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που παράγεται από τον άνθρακα, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, τα οποία είναι πρώτες ύλες που εξάγονται απευθείας από το έδαφος. Παρόλο δε που οι συγκεκριμένες πηγές ενέργειας είναι αρκετά αξιόπιστες, το παγκόσμιο απόθεμα πόρων ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένο, ενώ οδηγούν στην παραγωγή μεγάλης ποσότητας εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, όταν καίγονται. Παράλληλα, τα πρόσφατα τραγικά γεγονότα στην Ουκρανία ανέδειξαν τον κίνδυνο να βασίζεται κανείς σε γεωγραφικά συγκεντρωμένες πρώτες ύλες.

Στη δεύτερη κατηγορία ενεργειακών πηγών περιλαμβάνεται η πυρηνική ενέργεια. Πολλές χώρες όπως η Γαλλία, η Κίνα ή οι ΗΠΑ λειτουργούν πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας για να παράγουν φθηνή ηλεκτρική ενέργεια. Παρά την αξιοπιστία της, τις χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το σχετικά χαμηλό κόστος της, η πυρηνική ενέργεια και η παραγωγή της έχει διαχρονικά αποτελέσει αντικείμενο προβληματισμού λόγω του κινδύνου ατυχήματος και της διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων. Το 2020, η πυρηνική ενέργεια αντιπροσώπευε μόλις το 4% του παγκόσμιου ενεργειακού μείγματος.

Τέλος, στην τελευταία κατηγορία εντάσσονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) λογίζονται μεταξύ άλλων η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια κλπ.. Η συγκεκριμένη κατηγορία ενεργειακών πηγών δικαίως χαρακτηρίζονται «καθαρές» ή «πράσινες» κι αυτό γιατί χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Παρά την σημαντική αύξηση του ποσοστού συνεισφοράς του στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση, οι ανανεώσιμες πηγές υπολείπονται σημαντικά των παραπάνω πιο παραδοσιακών και ρυπογόνων πηγών.

Από τα παραπάνω συνάγεται, ότι το υφιστάμενο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα στηρίζεται κατά βάση στα ορυκτά καύσιμα, τόσο σε τεχνολογικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο υποδομών και αποθήκευσης. Ως εκ τούτου, οι χώρες θέτουν καθαρούς στόχους μηδενικών εκπομπών άνθρακα για να αποφύγουν την καταστροφική κλιματική αλλαγή ως αποτέλεσμα της Συμφωνίας του Παρισιού, η οποία υπογράφηκε το 2015. Για να επιτύχουν τον καθορισμένο καθαρό στόχο μηδενικών εκπομπών άνθρακα και να καλύψουν την ενεργειακή τους ζήτηση, οι χώρες πρέπει να δημιουργήσουν ποικίλα συστήματα που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) (Figueres et al. 2017).

2.2 Η σύνδεση των κρίσιμων μετάλλων με την ενεργειακή μετάβαση

Η σημασία των κρίσιμων μετάλλων για την ενεργειακή μετάβαση εδράζεται κατά βάση στο ρόλο που διαδραματίζουν για την ανάπτυξη και συντήρηση των τεχνολογιών ΑΠΕ, αλλά και ηλεκτρικών οχημάτων (EV) που απαιτούν συνεχή ροή και απόθεμα ορυκτών πόρων (λίθιο, νικέλιο, κοβάλτιο, μαγγάνιο κλπ). Συγκεκριμένα, ακριβώς λόγω της παραπάνω σύνδεσής τους με τις εν λόγω σύγχρονες και «πράσινες» πηγές ενέργειας, τα κρίσιμα μέταλλα διαδραματίζουν σημαίνοντα ρόλο στη διαδικασία μετάβασης σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Calvo and Valero 2022; Toro et al. 2020; Vidal 2017).

Ειδικότερα, σήμερα, η στρατηγική σημασία των συγκεκριμένων ορυκτών εξακολουθεί να τονίζεται και ο ανταγωνισμός για την προμήθειά τους γίνεται εντονότερος εξαιτίας της έντασης των εμπορικών συγκρούσεων και της αβεβαιότητας στη διεθνή σκηνή (Zhu et al. 2022; Huang et al. 2021). Όπως θα εξετάσουμε και ευθύς παρακάτω στην επόμενη ενότητα το ζήτημα της επάρκειας αποθεμάτων κρίσιμων μετάλλων υπό το πρίσμα της αυξημένης ζήτησής τους αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα θέματα στην προσπάθεια υλοποίησης της πρωτοβουλίας της ενεργειακής μετάβασης.

Ταυτόχρονα, τα πράγματα περιπλέχθηκαν συνεπεία της αβεβαιότητας που δημιούργησε η πανδημία της Covid-19, η οποία επηρέασε ολόκληρο τον κόσμο το 2020. Συγκεκριμένα, οι ιδιαιτερότητες που έχει προκαλέσει ανέδειξαν τον πιθανό κίνδυνο διακοπής στις αλυσίδες εφοδιασμού βασικών ορυκτών, κάτι που στην περίπτωση αυτή εμποδίζει τη διαδικασία μετάβασης στην καθαρή ενέργεια (Giese 2022, Zhu et al. 2021· Kim and Karpinski 2020· Chadha 2020). Ως εκ τούτου, κάθε χώρα που φιλοδοξεί να αποκτήσει πρωταγωνιστικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση και την ανάπτυξη ΑΠΕ θα πρέπει να έχει λάβει κεντρική θέση στο

βασικό δίκτυο εμπορίου ορυκτών ασκώντας κάποιας μορφής έλεγχο και επιρροή σε αυτό (Zhu et al. 2022; Xi et al. 2019).

Όπως σημειώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη των κρίσιμων μετάλλων που κατέχουν εξέχουσα θέση στην προσπάθεια ανάπτυξης και εκτεταμένης αξιοποίησης των ΑΠΕ και ως εκ τούτου στο στόχο μείωσης των εκπομπών CO₂ και την ενεργειακή μετάβαση. Αφού αναδείξουμε τη σύνδεση μεταξύ των κρίσιμων μετάλλων και της ενεργειακής μετάβασης, αλλά και τη σημασία της επάρκειας αποθεμάτων τους στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε το ρόλο των βασικότερων εξ αυτών των κρίσιμων μετάλλων στο επόμενο κεφάλαιο.

Ακολούθως, η πρωτοβουλία της υλοποίησης της προσπάθειας για ενεργειακή μετάβαση σε διεθνές επίπεδο συνδέεται άρρηκτα και με τη δέσμευση αρκετών χωρών παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων χωρών- εξαγωγών ορυκτών για τον παγκόσμιο στόχο σχετικά με τις εκπομπές άνθρακα και τη διατήρηση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας κάτω από τον 1,5 °C) (Calvo και Valero 2022). Η επίτευξη των παραπάνω στόχων προϋποθέτει μεταξύ άλλων, την ανάπτυξη και αξιοποίηση των ΑΠΕ, αλλά και την εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων.

Η σημασία των κρίσιμων μετάλλων για την ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΠΕ αναδεικνύεται και υπό το πρίσμα της αυξημένης ζήτησής τους, την οποία θα εξετάσουμε στην αμέσως επόμενη ενότητα. Συγκεκριμένα, πολλοί συγγραφείς έχουν εστιάσει στη σημασία της πρόσβασης στα κρίσιμα μέταλλα που είναι απαραίτητα για την παραγωγή, τη διανομή ή την τεχνολογία αποθήκευσης που χρησιμοποιούν οι ΑΠΕ (Vakulchuk et al. 2020; Mills 2020).

Για παράδειγμα, μια ηλιακή μονάδα ηλεκτροπαραγωγής χρειάζεται τέσσερις τόνους χαλκού για να παράγει ένα μεγαβάτ εγκατεστημένης ισχύος, ενώ ταυτόχρονα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περιλαμβάνουν κράμα χαλκού-ινδίου-γαλλίου-σεληνίου (CIGS) ή κάδμιο-τελλούριο (CdTe) και ασημιού (Bleiwas 2010). Ακόμη, τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν συχνά λίθιο, κοβάλτιο ή νικέλιο για μπαταρίες. Συνεπώς, στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων που κερδίζουν ολοένα και μεγαλύτερο έδαφος τα τελευταία χρόνια, ο κύριος μοχλός ανάπτυξης είναι η διατήρηση σταθερής και αξιόπιστης πρόσβασης στους συγκεκριμένους ορυκτούς πόρους (Ballinger et al. 2019).

Ως εκ τούτου, οιαδήποτε χώρα επιθυμεί να κάνει σημαντικά βήματα στον τομέα της ενεργειακής μετάβασης και της ανάπτυξης «καθαρών» πηγών ενέργειας και ΑΠΕ θα πρέπει να έχει πρόσβαση στα κρίσιμα μέταλλα που απαιτούνται για την ανάπτυξη και συντήρησή τους (Islam et al. 2022b· Zhu et al. 2022· Gielen 2021· Liang et al. 2022· Klimenko et al. 2021· Ren et al. 2021· Toro et al. 2020· Månberger and Stenqvist al. 2018).

Παράλληλα, αναμενόμενη είναι φυσικά και η σημαντική αύξηση της ζήτησης για κρίσιμα μέταλλα, όπως το λίθιο, το κοβάλτιο, στοιχεία σπανίων γαιών και γραφίτη, τα οποία είναι απαραίτητα για την κατασκευή μπαταριών. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται, ότι θα υπάρξει επταπλάσια αύξηση της ζήτησης για μπαταρίες ιόντων λιθίου έως το 2025 και 11–13 φορές αύξηση έως το 2030 (Dolganova et al. 2020· Küpper et al. 2018).

Ακόμη, συνολική παγκόσμια ζήτηση ορυκτών αναμένεται να ξεπεράσει το 40% για χαλκό και σπάνιες γαίες, 60-70% για νικέλιο και κοβάλτιο και πάνω από 90% για λίθιο στο πλαίσιο της Συμφωνίας του Παρισιού τα επόμενα 20 χρόνια (Mróz 2022). Το λίθιο είναι πλέον το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό σε ηλεκτρικά οχήματα και αποθήκευση μπαταριών (Diouf και Pode 2015). Συνοψίζοντας, η σημασία των κρίσιμων μετάλλων για την ενεργειακή μετάβαση μέσω της αξιοποίησής τους για την ανάπτυξη ΑΠΕ αποδεικνύεται από την ολοένα και αυξανόμενη ζήτησή τους (Lee et al. 2020). Ακριβώς το συγκεκριμένο ζήτημα των αποθεμάτων των εν λόγω κρίσιμων μετάλλων θα εξετάσουμε ευθύς παρακάτω, στην επόμενη ενότητα.

2.3 Η σημασία των αποθεμάτων

Η προμήθεια των απαραίτητων πρώτων υλών, συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών αποτελεί διαχρονικά και δη πολύ πριν την λήψη πρωτοβουλιών για την ενεργειακή μετάβαση αντικείμενο προβληματισμού για τις κυβερνήσεις, τους ακαδημαϊκούς, αλλά και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς ανά τον κόσμο. Συγκεκριμένα, η συζήτηση σχετικά με τις «κρίσιμες πρώτες ύλες» για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών συνήθως επικεντρωνόταν στους κινδύνους σε επίπεδο προσφοράς, καλύπτοντας μια ποικιλία θεμάτων σε οικονομικά στρατηγικούς τομείς στην παγκόσμια πολιτική οικονομία.

Ειδικότερα, ο όρος «κρίσιμες πρώτες ύλες» περιγράφει τους πόρους εκείνους που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε κρίσιμους οικονομικούς τομείς και παρουσιάζουν σχετική εξάρτηση από τις εισαγωγές (Nassar & Fortier, 2021). Υπό το παραπάνω πρίσμα, οι κυβερνήσεις διεθνώς έχουν καταρτίσει λίστες για να εντοπίσουν υλικά που είναι κρίσιμης σημασίας για την οικονομία τους (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2010; 2020b; 2020c; USGS, 2022a), και να καταγράψουν διάφορους πολιτικούς και οικονομικούς κινδύνους.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια και στα πλαίσια της λήψης πρωτοβουλιών διεθνώς για την ενεργειακή μετάβαση η συζήτηση όλο και περισσότερο επικεντρώνεται στις πρώτες ύλες και

τα μέταλλα που διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο σε αυτήν. Το ζήτημα επιτείνεται από το γεγονός, ότι οι «πράσινες» πηγές ενέργειας απαιτούν μάλλον μεγαλύτερη συγκέντρωση υλικών σε σχέση με τις πηγές υψηλών εκπομπών (IEA, 2021a). Κατά συνέπεια, γεννώνται και κίνδυνοι που σχετίζονται με την προσφορά των συγκεκριμένων πρώτων υλών που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία των ΑΠΕ και κατά συνέπεια την ενεργειακή μετάβαση.

Συγκεκριμένα, έχει υποστηριχθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις υλικών η εξόρυξη υπό τις τρέχουσες τιμές μπορεί να μην είναι οικονομικά βιώσιμη. Ταυτόχρονα, υπάρχουν αρκετές συνθήκες που καθιστούν την προσφορά των περισσότερων υλικών ως ανελαστική βραχυπρόθεσμα, όπως π.χ. οι μεγάλοι χρόνοι που απαιτούνται για την δημιουργία των νέων ορυχείων και τη ανάπτυξη ικανότητας διύλισης, η οποία με τη σειρά της επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωγραφική θέση, την ποιότητα μεταλλεύματος και συνθήκες χρηματοδότησης (Παγκόσμια Τράπεζα, 2016). Ειδικότερα, υπολογίζεται, ότι οι παραπάνω διαδικασίες μπορεί να υπερβούν τη δεκαετία για ορισμένα υλικά (Schodde, 2017). Οι εν λόγω περιορισμοί δύνανται δε να προκαλέσουν βραχυπρόθεσμη ανελαστικότητα σε επίπεδο προσφοράς ενισχύοντας τον κίνδυνο ελλείψεων.

Ακολούθως, υπό το παραπάνω πρίσμα, μπορούμε να διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τύπους παραγόντων κινδύνου που σχετίζονται με την προσφορά των εν λόγω πρώτων υλών και δη τους αμιγώς γεωπολιτικούς παράγοντες και τους κινδύνους που αφορούν στην παραγωγή και μπορεί να περιλαμβάνουν κοινωνικές επιπτώσεις, λειτουργικά ζητήματα και περιβαλλοντικούς κινδύνους.

Ειδικότερα, οι γεωπολιτικοί παράγοντες σχετίζονται με την εξάρτηση από τις παγκόσμιες αλυσίδες αξίας για την παροχή επαρκών υλικών και εν προκειμένω κρίσιμων μετάλλων για την ανάπτυξη τεχνολογιών ΑΠΕ που οδηγούν στην ενεργειακή μετάβαση. Αυτή η εξάρτηση αποτελεί πηγή σημαντικής ευπάθειας και κινδύνου για τις εξαρτώμενες από τις εισαγωγές οικονομίες. Η συγκεκριμένη κατάσταση επιδεινώνεται σε περίπτωση εξάρτησης από αλυσίδες εφοδιασμού που υπόκεινται σε υψηλή γεωγραφική συγκέντρωση και συγκέντρωση αγοράς (Gielen, 2021).

Από την άλλη, οι κίνδυνοι για την προσφορά που σχετίζονται με την παραγωγή αφορούν κατά βάση τις σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την εξόρυξη, την επεξεργασία και την κατασκευή πολλών υλικών (Elshkaki et al., 2017). Ταυτόχρονα, καθώς οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι ολοένα και πιο σοβαρές, τα περιβαλλοντικά περιστατικά αποτελούν μια αυξανόμενη πηγή κινδύνου για την προσφορά (Northey et al., 2017).

Ειδικά στην περίπτωση των κρίσιμων μετάλλων και γενικά των πρώτων υλών που είναι απαραίτητες για την ενεργειακή μετάβαση, οι Elshkaki et al. (2013) διαπιστώνουν, με βάση ένα μοντέλο δυναμικής ροής υλικού σχετικά με τα βασικά μέταλλα (αλουμίνιο, χαλκός, χρώμιο, νικέλιο, μόλυβδος και σίδηρος), ότι η προσφορά δεν περιορίζει την ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ενώ τονίζουν πως οι περιορισμοί στην προσφορά για διάφορα υλικά μπορεί να περιορίσει την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών (PV) ηλιακών τεχνολογιών. Αντίστοιχα, ο De Koning (2018) διερευνά πιθανά σημεία συμφόρησης στην προμήθεια ενός ευρέος φάσματος μετάλλων, λαμβάνοντας υπόψη ένα υποθετικό σενάριο, στο οποίο σταδιακά εισάγονται και εφαρμόζονται εκτεταμένες πολιτικές για το κλίμα σε παγκόσμιο επίπεδο έως το 2050.

Σε αντίθεση με βιβλιογραφία των προηγούμενων ετών που εστιάζει στο ζήτημα της διαθεσιμότητας των υλικών υπό το πρίσμα της εθνικής ασφάλειας, η υφιστάμενη βιβλιογραφία σε σχέση με την ενεργειακή μετάβαση και εν γένει το κλίμα εισάγει επιπλέον στο κάδρο το στοιχείο του κινδύνου που προκαλείται από την ζήτηση. Συγκεκριμένα, διάφορες μελέτες επιχειρούν να προβλέψουν την πιθανή ζήτηση υλικών κάτω από διαφορετικά σενάρια μετάβασης, υπογραμμίζοντας τις πιθανές επιπτώσεις και τα σημεία συμφόρησης που μπορεί να προκύψουν από την υιοθέτηση διαφορετικών σχεδίων και βημάτων στη διαδικασία της ενεργειακής μετάβασης (Deetman et al., 2018; Hund et al., 2020; IEA, 2021a; Watari et al., 2019).

Συγκεκριμένα, πολυάριθμες μελέτες επιχειρούν να εκτιμήσουν τη μελλοντική ζήτηση υλικών κάτω από διαφορετικά σενάρια μετάβασης, συμπεριλαμβανομένων εκείνων του IEA (IEA, 2021a), της Παγκόσμιας Τράπεζας (Hund et al., 2020), καθώς και των σεναρίων SETPlan που αναπτύχθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2022a). Ακόμη, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός, ότι διαφορετικές μελέτες εστιάζουν σε διαφορετικές ΑΠΕ και δη υπάρχουν ερευνητές που επικεντρώθηκαν μόνο σε τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Elshkaki et al., 2013), ηλεκτρικά οχήματα (EVs) (Ballinger et al., 2019), συγκεκριμένα υλικά, όπως τα σημεία συμφόρησης πλατίνας που σχετίζονται με τη μετάβαση (Rasmussen et al., 2019) ή η αιολική ενέργεια REEsin στην Κολομβία (Gallego, 2021).

Ως εκ τούτου, καθώς οι περισσότερες εκ των διαθέσιμων στη διεθνή βιβλιογραφία μελετών περιλαμβάνουν την επισκόπηση μιας σειράς τεχνολογιών (Månberger & Stenqvist, 2018; Blagoeva et al., 2016), σε λίγες μόνο από αυτές πραγματοποιείται μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση όλων των γνωστών επί του παρόντος τεχνολογιών και υποτεχνολογιών που σχετίζονται με την ενεργειακή μετάβαση.

Για παράδειγμα, σε μια θεμελιώδη συμβολή του, ο IEA (2021a) διερευνά τον ρόλο των κρίσιμων μετάλλων στην ενεργειακή μετάβαση προς την «καθαρή ενέργεια». Ειδικότερα, στη μελέτη καταγράφονται και εκτιμώνται διάφοροι περιορισμοί της ζήτησης και της προσφοράς, αλλά και το ενδεχόμενο αυξημένης ζήτησης, σύμφωνα με διαφορετικά σενάρια του ΔΟΕ και δη τα δηλωμένα σενάρια πολιτικής (STEPS) και τα σενάρια βιώσιμης ανάπτυξης (SDS). Η Παγκόσμια Τράπεζα (Hund et al., 2020) εστιάζει αντ' αυτού σε διαφορετικά σενάρια μετάβασης του ΔΟΕ, δηλαδή στα σενάρια «Πέρα από 2-Μοίρες», «2- Μοίρες» και «Τεχνολογία Αναφοράς».

Ακόμη, ο Deetman (2018) εισφέρει με τη μελέτη του μια ολοκληρωμένη ανάλυση. Συγκεκριμένα, συμπεριλαμβάνοντας σε αυτήν ακόμη και οικιακές συσκευές και βασιζόμενος σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο αξιολόγησης (IAM) για την αξιολόγηση της παγκόσμιας ζήτησης πόρων και μετάλλων επιχείρησε να διερευνήσει πώς οι δημογραφικές και κλιματικές πολιτικές μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλη αύξηση της ζήτησης μετάλλων. Τέλος, οι Moreau et al. (2019) υποστηρίζουν, με βάση τη σύγκριση διαφορετικών απαιτήσεων μετάλλων σε διαφορετικά μεταβατικά σενάρια, ότι η σπανιότητα σχετίζεται περισσότερο με την τεχνοοικονομική προσφορά παρά με τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών, υπογραμμίζοντας τη σημασία του να ληφθούν υπόψη, τόσο ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης όσο και η διαθεσιμότητα υποκατάστατων.

Πίνακας 1: Τρέχουσα προσφορά και προβλεπόμενη ζήτηση το 2050 στο σενάριο του 1,5°C (Πηγή: κάτωθι βιβλιογραφία)

	2020 [Mt/χρόνο.]	2050 [Mt/χρόνο]	Πηγές
Χαλκός	30 ^a	50-70	Elshkaki <i>et al.</i> , 2016; ICSG, 2021a
Νικέλιο	(2019) 2.54	5-8	Elshkaki <i>et al.</i> , 2017
Λίθιο (LCE)	(2019) 0.41	2-4	Moore and Bullard, 2021
Κοβάλτιο	0.14	0.5-0.6	Hund <i>et al.</i> , 2020
Νεοδύμιο	0.03	0.2-0.5	Barrera, 2021; Alves Dias <i>et al.</i> , 2020; Deetman <i>et al.</i> , 2018

3. Τα κρίσιμα μέταλλα με σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση

3.1 Λίθιο

Η συνολική παγκόσμια παραγωγή λιθίου το 2019 ανήλθε σε περίπου 77.000 τόνους (USGS, 2020). Σύμφωνα με το BloombergNEF, η ζήτηση λιθίου θα κυμαίνεται μεταξύ 1,3 εκατομμυρίων και 2 εκατομμυρίων τόνων LCE, μέχρι το 2030, ήτοι ποσότητα τριπλάσια σε σχέση με τα επίπεδα του 2019 (BloombergNEF, 2021a). Ένας από τους κύριους μοχλούς αυτής της προβλεπόμενης αύξησης της ζήτησης λιθίου είναι η χρήση του στα ηλεκτρικά οχήματα (Kelly et al., 2021).

Περαιτέρω, η παραγωγή ανθρακικού λιθίου από πόρους με βάση την άλμη αντιπροσωπεύει περίπου το 40% της παγκόσμιας παραγωγής, και αυτό συμπληρώνεται από την παραγωγή από πόρους με βάση το μέταλλευμα. Με βάση το USGS το 2020 υπήρχαν διαθέσιμα αποθέματα λιθίου μεταξύ 17 Mt και 80 Mt. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των αποθεμάτων και δη περισσότερα αφορούσαν αποθέματα με βάση την άλμη στην Αργεντινή, τη Βολιβία και τη Χιλή και τα υπόλοιπα κατά κύριο λόγο με βάση τον σποδουμένη στην Αυστραλία, τον Καναδά, την Κίνα και τις ΗΠΑ. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι αμφότεροι οι τύποι παραγωγής επεκτείνονται ραγδαία. Βέβαια, επειδή η παραγωγή άλμης οδηγεί σε σημαντική αποστράγγιση των υπόγειων υδάτων, δεν είναι σαφές σε ποιο βαθμό αυτή η παραγωγή μπορεί να επεκταθεί στις περιοχές της ερήμου στη Νότια Αμερική, όπου κυρίως απαντάται προς το παρόν.

Παράλληλα, είναι σημαντικό πως συνεχίζουν να εντοπίζονται νέοι πόροι, όπως στην περίπτωση της Γερμανίας που ανακοίνωσε πως αποθέματα λιθίου αναπτύσσονται στη Σαξονία και γεωθερμικοί πόροι στην κοιλάδα του Άνω Ρήνου (NS Energy, 2021a, 2021b). Όσον αφορά στις ΗΠΑ, το Salton Sea στην Καλιφόρνια από μόνο του, έχει υπολογιστεί πως θα μπορούσε να παράγει 0,6 Mt λιθίου ετησίως – ποσότητα μεγαλύτερη από τη σημερινή παγκόσμια παραγωγή. Σε αυτή την περίπτωση, η γεωθερμική ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ενέργεια εξάτμισης (Cantú, 2021). Το θαλασσινό νερό περιέχει επίσης λίθιο. Ωστόσο, αυτή τη στιγμή δεν είναι οικονομική η εξαγωγή λιθίου από το θαλασσινό νερό καθώς η συγκέντρωση λιθίου σε αυτό είναι πολύ χαμηλή.

Παρά ταύτα, οι ανησυχίες για τη διαθεσιμότητα του λιθίου είναι έντονες και οφείλονται κυρίως στην αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης που σχετίζεται με τη σημαντική αύξηση στην

αγορά LIB. Για αυτό και η κατανόηση των τομέων εφαρμογής και του ρόλου τους στις μεγάλες τάσεις της παγκόσμιας ζήτησης είναι υψίστης σημασίας.

Ειδικότερα, το 2015 η παγκόσμια ζήτηση για λίθιο ήταν περίπου 34,6 kt., με βασικές αγορές τα ηλεκτρικά οχήματα (14%), τα σταθερά ESS (περίπου 1%), τις παραδοσιακές αγορές μπαταριών (25%) και τις εφαρμογές χωρίς μπαταρίες (60%). Η κατάσταση άλλαξε τα επόμενα χρόνια, όταν αυξήθηκε ραγδαία η ζήτηση για εφαρμογές μπαταριών, η οποία κατέλαβε πάνω από το 60% της ζήτησης το 2019 οδηγώντας στην αύξηση της κατανάλωσης λιθίου σε 49 kt το ίδιο έτος.

Η παραπάνω τάση διατηρείται μέχρι και σήμερα και αναμένεται να συνεχιστεί και τα επόμενα χρόνια. Σύμφωνα με τον μακροπρόθεσμο στόχο των Ηνωμένων Εθνών για παγκόσμια ισότητα (United Nations. Sustainable Development Goals, New York, 2017), ένας παγκόσμιος πληθυσμός 11,2 δισεκατομμυρίων ανθρώπων που ζει σε ευρωπαϊκό επίπεδο ευημερίας θα απαιτεί 40 MWhth πρωτογενούς ενέργειας κατά κεφαλήν μέχρι το τέλος του αιώνα.

Αυτό φυσικά αυξάνει και τη ζήτηση αποθήκευσης μπαταρίας. Το λίθιο θεωρείται ένα μέταλλο ιδιαίτερα σημαντικό στις εφαρμογές μπαταρίας. Συγκεκριμένα, με γνώμονα το κόστος, τα κινητά LIB που χρησιμοποιούνται στα EV θεωρείται ότι εξυπηρετούν μια «δεύτερη ζωή» ως σταθερές μπαταρίες. Βέβαια, πέραν του λιθίου, υπάρχουν και άλλα συστήματα μπαταριών π.χ. μπαταρίες οξειδοαναγωγικής ροής βαναδίου ή μπαταρίες νατρίου-θείου που θα μπορούσαν μελλοντικά να αποκτήσουν επίσης σημαντικό μερίδιο την αγορά σταθερών μπαταριών.

Παράλληλα, ο ρόλος του λιθίου στην ενεργειακή μετάβαση είναι σημαντικός στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων. Ήδη από το 2016 υπολογίστηκε πως κυκλοφορούσαν περίπου ένα δισεκατομμύριο ελαφρά οχήματα (LDV) στους δρόμους δρόμο (ICCT, Washington, DC, 2012). Με βάση δε, τις προβλέψεις και τους ρυθμούς ανάπτυξης του κλάδου που αναμένει η ICCT, ο αριθμός αυτός θα αυξηθεί σε 3,05 δισεκατομμύρια το 2050. Έτσι, σε ένα υποθετικό δείγμα δέκα δισεκατομμύρια ανθρώπων η αντιστοιχία θα είναι περίπου 0,3 LDV/κάτοικο.

Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων (EV), ένας όρος που περιλαμβάνει συνδυαστικά τόσο τα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα, όσο και τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα είναι πράγματι ένα ζήτημα που αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη προσοχή. Λόγω της υπόσχεσής του να γίνει η λύση με το χαμηλότερο κόστος για τα μέσα μεταφοράς, αναμένεται να απολαμβάνει αυξανόμενο μερίδιο αγοράς αν και οι προβλεπόμενοι ρυθμοί αύξησής του ποικίλλουν ανάλογα με την πηγή (RBC Capital Markets, New York, 2018).

Ακολούθως, το υπόλοιπο μερίδιο αγοράς των ελαφρών οχημάτων (LDV) που χρησιμοποιούν 100% ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρείται ότι θα βασιστεί σε εναλλακτικές

ιδέες όπως η ισχύς σε υγρό, τα βιοκαύσιμα, η ηλεκτρική ενέργεια σε αέριο, τα ηλεκτρικά οχήματα με νέα χημεία μπαταρίας ή τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου με βάση το υδρογόνο. Ωστόσο, φαίνεται, ότι οι συγκεκριμένες προβλέψεις δεν είναι μάλλον αρκετά εύστοχες και διατυπώνονται υπό το πρίσμα της ιδιαίτερης προβολής που γνωρίζουν στο παρόν τα ηλεκτρικά οχήματα.

Γενικώς, όπως σημειώθηκε και παραπάνω, η αγορά ηλεκτρικών οχημάτων θεωρείται ότι αποτελείται από τις BEV και PHEV. Η υποτιθέμενη μέση χωρητικότητα μπαταρίας ανά όχημα έχει οριστεί σε 60 kWh για το BEV και 15 kWh για το PHEV, το οποίο θα έχει διάρκεια ζωής 8 ετών σε ένα ηλεκτρικό όχημα (Franklin, 2017). Στο τέλος του παραπάνω προσδόκιμου ζωής τους, οι εν λόγω μπαταρίες θα χρησιμοποιηθούν για επιπλέον 8 χρόνια ως σταθερές μπαταρίες, πριν εισέλθουν σε διαδικασία ανακύκλωσης. Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί ακόμη, ότι ο υποτιθέμενος χρόνος σέρβις των 16 ετών είναι χαμηλότερος από τη διάρκεια ζωής των 20 ετών που παρέχει η βιομηχανία για σταθερές μπαταρίες, σύμφωνα με τους Turcheniuk et al. (2018).

Τέλος, θα πρέπει να γίνει λόγος και για την ανακύκλωση μπαταριών βασισμένων στο λίθιο. Ειδικότερα, παρόλο που οι διαδικασίες ανακύκλωσή τους βρίσκονται ακόμη σε σχετικά πρώιμα στάδια, ήδη από το 2018 καταγράφηκε η ανακύκλωση ποσότητας μπαταριών λιθίου 97.000 τόνων σε παγκόσμιο επίπεδο (Melin, H. E, 2019). Ο χαμηλός ρυθμός ανάπτυξης των εν λόγω διαδικασιών οφείλεται κατά βάση σε οικονομικούς λόγους (Patel, P. & Gaines, L 2016) και δευτερευόντως στην έλλειψη κανονιστικού πλαισίου και στις εγγενείς δυσκολίες των τεχνικών διαδικασιών, αλλά και των διαδικασιών συλλογής.

Συνοψίζοντας, η συμβολή του λιθίου στην ενεργειακή μετάβαση σε εναλλακτικές, φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας είναι περισσότερο ορατή στα ηλεκτρικά οχήματα που ολοένα και αυξάνουν την παρουσία τους στους δρόμους διεθνώς. Μάλιστα, όσο οι μπαταρίες που βασίζονται στο λίθιο παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση και ταιριάζουν στις απαιτήσεις μεγαλύτερων οχημάτων, όπως αστικά και υπεραστικά λεωφορεία, τα μεσαία και τα βαρέα φορτηγά, τόσο πιο σύντομα αναμένεται η μετάβαση και των συγκεκριμένων οχημάτων στην ηλεκτροκίνηση και τη χρήση μπαταριών βασισμένων στο εν λόγω κρίσιμο μέταλλο.

3.2 Χαλκός

Ο χαλκός μπορεί να βρεθεί σε διαφορετικούς τύπους κοιτασμάτων. Τα πορφυριτικά κοιτάσματα αντιπροσωπεύουν περίπου το 60% των αποθεμάτων χαλκού παγκοσμίως. Σε αυτά τα κοιτάσματα, ορυκτά μεταλλεύματος χαλκού διαχέονται σε πυριγενείς διεισδύσεις. Ένας δεύτερος βασικός τύπος κοιτασμάτων είναι τα αποθέματα χαλκού που φιλοξενούνται σε ιζημάτα, στα οποία ο χαλκός συγκεντρώνεται σε στρώματα ιζηματογενών πετρωμάτων. Αυτά αντιπροσωπεύουν περίπου το 20% του αναγνωρισμένου χαλκού στον κόσμο. Συνολικά, τα παγκόσμια αποθέματα χαλκού (γνωστά και άγνωστα) υπολογίστηκε, ότι ανέρχονταν σε περίπου 5 600 Mt το 2015 (ICSG, 2015).

Περαιτέρω, δεδομένου ότι 21 Mt πρωτογενούς χαλκού παρήχθησαν το 2020 (ICSG, 2021a), θεωρείται εκ πρώτης όψεως δύσκολο να προκύψει ζήτημα έλλειψης χαλκού σύντομα. Παρά ταύτα, η ανάπτυξη νέων ορυχείων είναι μια εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία και ενόσω παρατηρείται ταχεία αύξηση της ζήτησης δεν μπορεί να αποκλειστεί το ενδεχόμενο να προκύψουν ελλείψεις στο συγκεκριμένο κρίσιμο μέταλλο τα επόμενα χρόνια. Περαιτέρω, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι περίπου 24 Mt εξευγενισμένου χαλκού παράγονται από μετάλλευμα και σκραπ ετησίως, ενώ περισσότερα από 5 Mt σκραπ χαλκού τήκονται απευθείας και επαναχρησιμοποιούνται.

Επίσης, η προσπάθεια που απαιτείται για την εξόρυξη του εναπομείναντος χαλκού συνεχίζει να αυξάνεται. Τα ορυχεία χαλκού χρησιμοποιούν κοιτάσματα που κυμαίνονται σε ποσοστά από 0,4% έως περίπου 2% (w/w) περιεκτικότητας σε χαλκό (Warren Centre, 2020), με μέσο όρο 0,6% περιεκτικότητας σε χαλκό (Pistilli, 2021).

Ταυτόχρονα, η συγκέντρωση χαλκού μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και ως εκ τούτου η απαιτούμενη προσπάθεια και τα απορρίμματα που δημιουργούνται ανά τόνο χαλκού αυξάνονται. Η έκπλυση (εξαγωγή διαλύτη) έχει αναδειχθεί ως μια νέα τεχνολογία για την επεξεργασία μεταλλευμάτων και απορριμμάτων χαμηλής ποιότητας και αντιπροσωπεύει πλέον το 16% της παγκόσμιας παραγωγής εξευγενισμένου χαλκού (ICSG, 2021a). Η κύρια δραστηριότητα εξόρυξης χαλκού δημιουργεί περισσότερα από 3 Gt «απορριμμάτων ορυχείων» ετησίως.

Ειδικότερα, η εξόρυξη χαλκού είναι ευρέως διαδεδομένη, με σημαντικό ποσοστό αυτής να λαμβάνει χώρα στις Άνδεις και στα Βραχώδη Όρη, καθώς και στην αφρικανική ζώνη χαλκού. Συγκεκριμένα, μόνο η Χιλή φιλοξενεί περίπου το ένα τέταρτο της σημερινής παγκόσμιας πρωτογενούς παραγωγής. Μια άλλη σημαντική χώρα για το συγκεκριμένο κρίσιμο μέταλλο είναι η Κίνα. Η συγκεκριμένη χώρα το 2019 αντιπροσώπευε λιγότερο από το 10% της παγκόσμιας εξόρυξης χαλκού, αλλά το 39% (USGS, 2021) έως και το 50% (ICSG, 2021a) της παραγωγής των μεταλλουργιών χαλκού. Η Κίνα είναι ακόμη η μεγαλύτερη αγορά χαλκού.

Όσον αφορά στο ζήτημα της ανακύκλωσης του συγκεκριμένου μετάλλου, θα πρέπει να σημειώσουμε πως το 2018, ανακυκλώθηκαν περίπου 8,5 Mt σκραπ χαλκού: 4,54 Mt σκραπ κατασκευής και 4,0 Mt σκραπ στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Παρόλο που οι συγκεκριμένες ποσότητες δεν είναι αμελητέες, εντούτοις εξακολουθούν να υπολείπονται σημαντικά σε σχέση με τα περίπου 13 Mt χαλκού που απελευθερώνονται από τη χρήση κάθε χρόνο (Copper Alliance, 2020). Ταυτόχρονα, είναι σαφές, ότι τα υψηλότερα ποσοστά ανάκτησης σκραπ θα οδηγήσουν στη μείωση της ανάγκης για πρωτογενή παραγωγή.

Όλα τα παραπάνω αποκτούν αυξημένη βαρύτητα υπό το πρίσμα του κρίσιμου ρόλου που αναμένεται να διαδραματίσει ο χαλκός στην επίτευξη των στόχων του Παρισιού για το κλίμα και την ενεργειακή μετάβαση σε «πράσινες» πηγές ενέργειας. Χωρίς σοβαρές εξελίξεις στην τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα τα επόμενα χρόνια, ολόκληρη η πορεία προς τις καθαρές μηδενικές εκπομπές θα πρέπει να προέλθει από τη μείωση των εκπομπών, την ηλεκτροδότηση και τις κυρίως τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ως το πιο οικονομικό αγωγίμο υλικό, ο χαλκός βρίσκεται στο επίκεντρο της σύλληψης, της αποθήκευσης και της μεταφοράς αυτών των νέων πηγών ενέργειας. Στην πραγματικότητα, ο ρόλος του χαλκού στην ενεργειακή μετάβαση έχει υποτιμηθεί αρκετά στα πλαίσια των συζητήσεων σχετικά με την αντικατάσταση του πετρελαίου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ειδικότερα, παρόλο που έχουν διατυπωθεί πολλές απόψεις σχετικά με την ανάγκη αντικατάστασης των υδρογονανθράκων από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εντούτοις οι ερευνητές του υπό κρίση πεδίου δεν έχουν εστιάσει αρκετά στην εξασφάλιση των πόρων που απαιτούνται για την κατασκευή νέας, βιώσιμης, ενεργειακής υποδομής. Ενόσω μάλιστα η στροφή της παγκόσμιας οικονομίας προς τις καθαρές μηδενικές εκπομπές παραμένει ο κεντρικός στόχος των περισσότερων κυβερνήσεων και διεθνών οργανισμών, τα «πράσινα μέταλλα», όπως ο χαλκός, ο ρόλος και η ζήτησή τους θα πρέπει να ερευνηθούν σε βάθος.

Εν προκειμένω, θεωρείται βέβαιο, ότι η πράσινη μετάβαση θα υποστηρίξει την αύξηση της ζήτησης χαλκού. Στον πυρήνα της θέσης αυτής ευρίσκεται η ανάγκη για τον κόσμο να απομακρυνθεί από ένα σύστημα παραγωγής που βασίζεται στη χημική ενέργεια των υδρογονανθράκων (πετρέλαιο και φυσικό αέριο), σε ένα νέο σύστημα, βασισμένο σε μια σειρά βιώσιμων πηγών, όπως η ηλεκτρομαγνητική (ηλιακή) ενέργεια, η αιολική ενέργεια και η γεωθερμία. Ο χαλκός έχει τις απαραίτητες φυσικές ιδιότητες για να μετασχηματίσει και να μεταφέρει αυτές τις πηγές ενέργειας στη χρήσιμη τελική τους κατάσταση, όπως η μετακίνηση ενός οχήματος ή η θέρμανση ενός σπιτιού.

Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποίησαν αναλυτές της επενδυτικής τράπεζας Goldman Sachs, η αύξηση της ζήτησης για την παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων, αιολικής,

ηλιακής ενέργειας και νέων εφαρμογών μπαταριών, θα οδηγήσει σε εκρηκτική αύξηση της ζήτησης του χαλκού. Ειδικότερα, υπολογίστηκε, ότι έως το 2030, η ζήτηση χαλκού από τη μετάβαση θα αυξηθεί σχεδόν κατά 600% σε 5,4 Mt. Το εν λόγω ποσοστό μάλιστα εκτιμάται ότι μπορεί να φτάσει έως και το 900% και τα 8,7 Mt στην περίπτωση αυξημένης υιοθέτησης των πράσινων τεχνολογιών.

Με την παραπάνω θέση φαίνεται να συμφωνούν και άλλοι αναλυτές που εκτιμούν, ότι η ολοένα και μεγαλύτερη ανάπτυξη της ενεργειακής μετάβασης σε πράσινες πηγές ενέργειας θα δημιουργήσει την τρέχουσα δεκαετία στη μεγαλύτερη αύξηση χαλκού στην ιστορία, φτάνοντας στο σημείο να διατυπώσουν την άποψη, ότι ο χαλκός ίσως να είναι το «νέο πετρέλαιο».

3.3 Νικέλιο

Το μέταλλευμα του νικελίου μπορεί να χωριστεί σε θειούχα σώματα μεταλλευμάτων και λατεριτικά εδάφη. Τα επόμενα χρόνια, η υδρομεταλλουργική επεξεργασία λατεριτών για την παραγωγή νικελίου και χημικών προβλέπεται, ότι θα αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία. Επί του παρόντος, περίπου το ένα τρίτο της παγκόσμιας προσφοράς νικελίου προέρχεται από την ανακύκλωση.

Το Αμερικανικό Γεωλογικό Ινστιτούτο (USGS) υπολόγισε ότι τα παγκόσμια αποθέματα του συγκεκριμένου μετάλλου το 2021 ανέρχονταν σε περίπου 89 Mt (DERA, 2021). Μερικά χρόνια πριν, το 2014, οι πόροι σε κλασικά κοιτάσματα του συγκεκριμένου μεταλλεύματος υπολογίζονταν σε σχεδόν 300 εκατομμύρια τόνους (Mudd and Jowitt, 2014). Όσον αφορά στη μελλοντική διαθεσιμότητα του συγκεκριμένου κρίσιμου μετάλλου, πιστεύεται επίσης, ότι υπάρχουν επιπλέον σημαντικά κοιτάσματα νικελίου στη θάλασσα. Συγκεκριμένα, τα οξειδία μαγγανίου, τα οποία βρίσκονται στον πυθμένα των ωκεανών, περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαφόρων μετάλλων, συμπεριλαμβανομένου του νικελίου. Πρόσφατες εκτιμήσεις δείχνουν ότι υπάρχουν περισσότεροι από 290 εκατομμύρια τόνοι νικελίου που περιέχονται σε τέτοια κοιτάσματα (Mistry, 2020).

Παράλληλα, συνεχίζεται η εξόρυξή του, προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση. Ειδικότερα, περίπου 2,54 Mt νικελίου εξήχθησαν τόσο από υπόγεια όσο και από ανοιχτά ορυχεία σε 27 χώρες και σε έξι ηπείρους το 2019. Οι κύριες περιοχές παραγωγής νικελίου ήταν η Νοτιοανατολική Ασία και η Ωκεανία, αντιπροσωπεύοντας μαζί περισσότερο από το 62% της παγκόσμιας προσφοράς το 2019. Περαιτέρω, η μοναδική χώρα παραγωγής του εν λόγω

κρίσιμου μετάλλου ήταν η Ινδονησία. Συγκεκριμένα, η πλειοψηφία της νέας παραγωγής ορυχείων μέχρι το 2025 αναμένεται να προέρχεται από την Αυστραλία και την Ινδονησία. Η παγκόσμια παραγωγή ραφιναρισμένου νικελίου έφτασε περίπου τους 2,39 Mt το 2019. Με διαφορά τα πιο σημαντικά προϊόντα ήταν ο χυτοσίδηρος νικελίου και το μέταλλο νικελίου, τα οποία μαζί αντιστοιχούσαν στα τρία τέταρτα της παραγωγής.

Όσον αφορά στη ζήτηση του νικελίου, παγκοσμίως, περισσότερα από 2.000 εξορύξεις αναπτύσσονται με το συγκεκριμένο μέταλλο, είτε ως κύριο προϊόν, είτε ως υποπροϊόν. Το 2019, η παγκόσμια κατανάλωση νικελίου ανήλθε σε περίπου 2,4 Mt. Η κινεζική ζήτηση ήταν η υψηλότερη παγκοσμίως, ακολουθούμενη από την Ινδονησία. Οι δραστηριότητες επεξεργασίας νικελίου στην Ινδονησία ήταν αμελητέες μέχρι το 2016, αλλά αυξήθηκαν γρήγορα για να γίνει η χώρα η δεύτερη μεγαλύτερη εταιρεία επεξεργασίας νικελίου παγκοσμίως (DERA, 2021). Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορεί να αντιπροσωπεύουν από το 1/4 έως το 1/5 της παγκόσμιας ζήτησης νικελίου έως το 2025 (0,5-0,7 Mt/έτος) (DERA, 2021).

Όπως σημειώθηκε ήδη από την εισαγωγή της παρούσας, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος για άνοδο της θερμοκρασίας κατά 3,2 βαθμούς Κελσίου, εάν δεν ληφθούν δραστικά μέτρα για τη μείωση των εκπομπών. Συγκεκριμένα, αν οι θερμοκρασίες συνεχίσουν να αυξάνονται υπό τους σημερινούς ρυθμούς, θα εμφανιστούν περισσότερες περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων που θα έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στον πλανήτη. Ο κόσμος πρέπει να μειώσει στο μισό τις εκπομπές κατά την επόμενη δεκαετία και να φτάσει τις καθαρές μηδενικές εκπομπές άνθρακα έως το 2050, προκειμένου να περιοριστεί η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας στους 1,5°C.

Ως εκ τούτου, η ενεργειακή μετάβαση σε τεχνολογίες καθαρής ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές θα πρέπει να αποτελέσει την προκρινόμενη λύση για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα, παρατηρείται μια ενθαρρυντική τάση προς αυτήν την κατεύθυνση. Για παράδειγμα, το 2020, η ζήτηση ενέργειας από πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα μειώθηκε κατά 5% σε σχέση με το προηγούμενο έτος εξαιτίας των συνεπειών της πανδημίας του Covid-19. Παράλληλα, η ζήτηση ενέργειας από νέα ενεργειακά συστήματα, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, παρέμεινε σταθερή.

Ο ρόλος του νικελίου στην ενεργειακή μετάβαση είναι εξαιρετικά σημαντικός. Ειδικότερα, το νικέλιο απαιτείται για τη διευκόλυνση της επιτυχούς ανάπτυξης νέων ενεργειακών τεχνολογιών. Με μοναδικές ιδιότητες που το καθιστούν ζωτικής σημασίας για πολλές εφαρμογές, το νικέλιο χρησιμοποιείται σε πολλές τεχνολογίες καθαρής ενέργειας, όπως στις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων (EV) και τις μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας.

Ορισμένες τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών μπορεί να απαιτούν μόνο μικρές ποσότητες νικελίου, αλλά αυτή η μικρή ποσότητα εξακολουθεί να παίζει κρίσιμο ρόλο.

Συγκεκριμένα, το νικέλιο υπάρχει σε πολλές τεχνολογίες μπαταριών και δη είναι η βασική επιλογή στις μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται για τα ηλεκτρικά οχήματα, επειδή προσφέρουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα στην αγορά. Η ενεργειακή πυκνότητα αποτελεί προτεραιότητα για τους κατασκευαστές πρωτότυπου εξοπλισμού (OEM), επειδή καθορίζει το εύρος της απόστασης που μπορεί να διανύσει ένα όχημα ανά φόρτιση. Το κόστος της μπαταρίας είναι επίσης κρίσιμο, γιατί τα ηλεκτρικά οχήματα πρέπει να είναι προσιτά στον γενικό καταναλωτή. Εκτός από την παροχή υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας, η υψηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο των μπαταριών λιθίου κάνουν τις μπαταρίες αυτές μικρότερες και ελαφρύτερες. Επομένως, η χρήση νικελίου οδηγεί σε ένα πιο αποδοτικό ηλεκτρικό όχημα, επιτρέποντας μεγαλύτερη αυτονομία οδήγησης.

Την τελευταία δεκαετία, ένα μείγμα οξειδίων νικελίου, κοβαλτίου και μαγγανίου ή αλουμινίου (NMC/NCA) ήταν η πιο αποδοτική και προτιμητέα τεχνολογία για τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων, χωρίς να φαντάζει πιθανή η αντικατάστασή τους στο άμεσο μέλλον. Έχει αναφερθεί, ότι ο τομέας των μπαταριών λιθίου θα συνεχίσει να κινείται προς την υψηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο. Συγκεκριμένα, οι μπαταρίες λιθίου με υψηλή περιεκτικότητα νικελίου αντιπροσωπεύει σήμερα ένα ποσοστό περίπου 8%, το οποίο αναμένεται να αυξηθεί σε σχεδόν 50% έως το 2030.

Περαιτέρω, η σύγχρονη τεχνολογία μπαταριών επιτρέπει στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανεμογεννήτριες ή ηλιακούς συλλέκτες να αποθηκεύεται και να χρησιμοποιείται, μόνο όταν απαιτείται. Καθώς η ηλιακή και η αιολική ενέργεια δεν μπορούν να ληφθούν κατόπιν ζήτησης, πρέπει να χρησιμοποιηθούν μπαταρίες για να συλλέγουν ενέργεια και να την απελευθερώνουν όταν χρειάζεται. Η κυρίαρχη τεχνολογία είναι τα ιόντα λιθίου. Τούτο δε, είναι αποτέλεσμα της μακράς ιστορίας του συγκεκριμένου κρίσιμου μετάλλου στην αγορά ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης και των πρόσφατων επενδύσεων στη βιομηχανία ιόντων λιθίου.

Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι παρά το ρόλο τους στην ενεργειακή μετάβαση, ορισμένα από τα μέταλλα αυτά είναι αναπόφευκτα ενεργοβόρα κατά την παραγωγή τους, χωρίς τούτο φυσικά να είναι ικανό να δημιουργήσει σύγχυση σχετικά με τα εμφανή πλεονεκτήματά τους σε περιβαλλοντικό επίπεδο. Στη συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσεται και το νικέλιο, η παραγωγή του οποίου είναι υπεύθυνη για ένα, όχι αμελητέο, αποτύπωμα άνθρακα(Mistry,2020). Υπό το παραπάνω πρίσμα, θα πρέπει να γίνουν σημαντικές προσπάθειες για την μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της παραγωγής νικελίου.

Ήδη μέχρι στιγμής, οι εταιρείες μέλη του Nickel Institute έχουν καταφέρει να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή νικελίου κατά περίπου 9%. Το ως άνω ποσοστό αναμένεται να αυξηθεί ακόμη περισσότερο καθώς οι συγκεκριμένες εταιρείες-μέλη του Nickel Institute έχουν δεσμευτεί να μειώσουν τις εκπομπές άνθρακα μέσω της εφαρμογής μιας σειράς λύσεων, διασφαλίζοντας ότι οι διεργασίες τους γίνονται κατά τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον και με σαφώς λιγότερες εκπομπές άνθρακα.

Ένας από τους τρόπους να μειωθεί το αποτύπωμα άνθρακα του νικελίου είναι φυσικά η ανακύκλωση. Συγκεκριμένα, η ανακύκλωση του νικελίου θα συμβάλει στη μείωση των εκπομπών άνθρακα, καθώς τα προϊόντα που περιέχουν νικέλιο, όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, έχουν σχεδιαστεί για μακροχρόνια χρήση. Το νικέλιο και τα κράματα που περιέχουν νικέλιο μπορούν να επιστραφούν στην αρχική τους κατάσταση ή μπορούν να μετατραπούν σε μια εξίσου πολύτιμη μορφή.

Για παράδειγμα, θραύσματα ανοξείδωτου χάλυβα που περιέχουν νικέλιο από ανακυκλωμένες μπαταρίες μπορούν να μετατραπούν σε νέο ανοξείδωτο χάλυβα και νικέλιο. Μεταξύ όλων των ανακυκλώσεων μετάλλων, η ανακύκλωση νικελίου έχει μία από τις υψηλότερες αποδόσεις, καθώς περίπου το 68% του συνόλου του νικελίου που διατίθεται από καταναλωτικά προϊόντα ανακυκλώνεται και ξεκινά έναν νέο κύκλο ζωής και το 15% εισέρχεται στον κύκλο ανθρακούχου χάλυβα. Ωστόσο, το 17% εξακολουθεί να καταλήγει σε ΧΥΤΑ.

Παράλληλα, κάθε χρόνο παράγεται κολοσσιαία ποσότητα ηλεκτρονικών αποβλήτων (e-waste), με πάνω από 53 εκατομμύρια τόνους να παράγονται μόνο το 2020. Επί του παρόντος, μόνο περίπου 10 εκατομμύρια τόνοι ηλεκτρονικών αποβλήτων ανακυκλώνονται πραγματικά. Υπάρχει νικέλιο στα ηλεκτρονικά απόβλητα και στην κυκλική οικονομία είναι απαραίτητο να ανακτήσουμε όσο περισσότερο μπορούμε.

Κάθε παραγωγός νικελίου που ασχολείται με την ανακύκλωση έχει τη δική του οδό επεξεργασίας για τα ηλεκτρονικά απόβλητα. Ξεκινά με την προεπεξεργασία, καθώς τα ηλεκτρονικά απόβλητα περιέχουν μια σειρά από πλαστικά, κεραμικά και άλλα μη μεταλλικά υλικά που έχουν ξεχωριστή διαδρομή.

Περαιτέρω, ο χάλυβας στις συσκευές μπορεί να διαχωριστεί μαγνητικά και να αποσταλεί σε χαλυβουργία για άμεση ανακύκλωση. Κυκλώματα και ολόκληρα κινητά τηλέφωνα μπορούν επίσης να τεμαχιστούν σε μικρά κομμάτια για να βοηθήσουν τη διαδικασία διαχωρισμού. Ορισμένες εταιρείες θα διαθέτουν ξεχωριστή γραμμή ανακύκλωσης για τους διάφορους τύπους μπαταριών, η προσφορά των οποίων για ανακύκλωση αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία καθώς οι μπαταρίες EV φτάνουν στο τέλος της ζωής τους. Η

πυρομεταλλουργία (υψηλή θερμοκρασία), η υδρομεταλλουργία (διάλυση σε οξέα), ή μερικές φορές και οι δύο διαδικασίες, εμπλέκονται στην ανάκτηση του χαλκού, του νικελίου και των πολύτιμων μετάλλων.

Συνοψίζοντας, η ανακύκλωση στην περίπτωση του νικελίου θα πρέπει να αποτελέσει βασική προτεραιότητα ενόψει και της χρησιμότητας του εν λόγω κρίσιμου μετάλλου στην ενεργειακή μετάβαση. Συγκεκριμένα, καθώς το νικέλιο έχει εξαιρετικές ιδιότητες και υψηλή απόδοση ανακύκλωσης, μπορεί να επανέλθει στην οικονομία μετά το τέλος της ζωής των προϊόντων που περιέχουν νικέλιο. Ως εκ τούτου, το νικέλιο και ο ανοξείδωτος χάλυβας που περιέχει νικέλιο δείχνουν πώς τα πρωτογενή υλικά μπορούν να συμβάλουν σε μια κυκλική οικονομία.

3.4 Νεοδύμιο

Ο όρος «σπάνιες γαίες» περιγράφει μια ομάδα στοιχείων που ονομάζονται επίσης μέταλλα σπανίων γαιών και οξειδία σπανίων γαιών. Αυτή η ομάδα των 17 χημικών στοιχείων είναι σε μέτρια αφθονία στον φλοιό της Γης και έχει μοναδικές ιδιότητες. Τα 40 μεγαλύτερα έργα εξερεύνησης υποδεικνύουν πάνω από 3 000 Mt συμπερασματικούς πόρους (σε διάφορους βαθμούς) σε περισσότερες από 15 χώρες, ενώ 11 ορυχεία λειτουργούσαν το 2017 (USCRS, 2020).

Η παραγωγή μετάλλων σπανίων γαιών βρισκόταν ξανά σε άνοδο το 2020, φτάνοντας τους 240 κιλোটόνους (kt) παγκοσμίως. Οι κύριες οικονομικές πηγές στοιχείων σπανίων γαιών είναι τα ορυκτά και οι άργιλοι. Αυτοί οι πόροι περιέχουν διαφορετικούς τύπους μετάλλων σπανίων γαιών και αυτά παράγονται από κοινού. Το νεοδύμιο είναι συνήθως το 10-18% της περιεκτικότητας σε σπάνιες γαίες των εμπορικών κοιτασμάτων των ελαφρών ορυκτών σπανίων γαιών μαστιχασίτη και μοναζίτη.

Αν και οι κύριες περιοχές εξόρυξης βρίσκονται στην Κίνα, άλλες βρίσκονται στην Αυστραλία, τη Βραζιλία, την Ινδία, τη Σρι Λάνκα και τις ΗΠΑ. Τα παγκόσμια αποθέματα νεοδυμίου υπολογίζονται σε περίπου 8 εκατομμύρια τόνους, καθιστώντας το ως το δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο σπανίων γαιών μετά το δημήτριο. Επομένως, οι πόροι είναι επαρκείς, αλλά η βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη αύξηση της προσφοράς μπορεί να αποτελέσει πρόκληση.

Σύμφωνα με το USGS, η Γροιλανδία κατέχει τα μεγαλύτερα αποθέματα μη ανεπτυγμένων κοιτασμάτων σπανίων γαιών, ιδιαίτερα νεοδυμίου. Αυτό προσφέρει την προοπτική αύξησης της προσφοράς. Ωστόσο, μια τέτοια εξόρυξη είναι αμφιλεγόμενη. Ένα από τα γεωπολιτικά ζητήματα ήταν ότι η εξόρυξη και η επεξεργασία κυριαρχούνται από την Κίνα. Η ασφάλεια εφοδιασμού για μέταλλα σπανίων γαιών βρίσκεται ψηλά στην ατζέντα των χωρών που σχεδιάζουν να επεκτείνουν τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, η ανάπτυξη ορυχείων και ικανότητας επεξεργασίας εκτός Κίνας έχει μέχρι στιγμής παρεμποδιστεί από οικονομικές και περιβαλλοντικές ανησυχίες και την εμφάνιση ραδιενεργών υποπροϊόντων ουρανίου και θορίου σε πολλά κοιτάσματα.

Οι σπάνιες γαίες, ιδίως το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο, χρησιμοποιούνται ευρέως για μόνιμους μαγνήτες σε ηλεκτρικές γεννήτριες (π.χ. ανεμογεννήτριες) και σε ηλεκτρικούς κινητήρες (για ηλεκτρικά οχήματα). Είναι ενδεικτικό, ότι ένα μεγαβάτ χωρητικότητας ανεμογεννητριών μπορεί να απαιτεί περίπου 500 κιλά μόνιμων μαγνητών (ιδίως για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες), ενώ ένα τυπικό ηλεκτρικό όχημα απαιτεί περίπου 3 κιλά μαγνήτες. Σε παγκόσμιο επίπεδο, αυτές οι εφαρμογές θα μπορούσαν να απαιτήσουν περίπου 150 kt ετήσιας παραγωγής μόνιμου μαγνήτη έως το 2030 και να δημιουργήσουν περίπου 50 kt ζήτησης για στοιχεία σπανίων γαιών.

Περαιτέρω, οι μαγνήτες νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB), λόγω των προϊόντων υψηλής ενέργειας τους, προσφέρονται για συμπαγή σχέδια που οδηγούν σε καινοτόμες εφαρμογές και χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Στους εμπορικούς συνηγμένους μαγνήτες NdFeB, το νεοδύμιο συνήθως υποκαθίσταται εν μέρει από άλλα στοιχεία σπανίων γαιών, όπως το πρασεοδύμιο, το δυσπρόσιο και το τέρβιο (Advanced Magnets, 2021).

Επειδή το νεοδύμιο και το πρασεοδύμιο συνυπάρχουν συνήθως στο μετάλλευμα και τα δύο αυτά στοιχεία διαθέτουν παρόμοιες φυσικές και χημικές ιδιότητες, είναι πιο οικονομικό να παραχθεί κράμα πρασεοδύμιο-νεοδύμιο αντί για καθαρό μέταλλο νεοδυμίου από μετάλλευμα και να χρησιμοποιηθεί αυτό το κράμα ως πρώτη ύλη για τους μαγνήτες. Γενικώς, η συνολική περιεκτικότητα σε στοιχεία σπανίων γαιών είναι περίπου 30 wt% στον μαγνήτη και το κόστος υλικού του αντιστοιχεί περίπου στο 70% του συνολικού κόστους του μαγνήτη ή ακόμη περισσότερο (Advanced Magnets, 2021).

Η παροχή δυσπροσίου είναι ακόμη πιο περιορισμένη από την παροχή νεοδυμίου. Για να λειτουργήσουν οι μαγνήτες νεοδυμίου σε υψηλές θερμοκρασίες, προστίθενται σημαντικές ποσότητες δυσπροσίου (έως και 12% κατά βάρος). Ωστόσο, όσον αφορά τη σχετική αφθονία στον φλοιό της Γης, το δυσπρόσιο αποτελεί λιγότερο από το 1% όλων των στοιχείων σπανίων γαιών (Constantinides and De Leon, 2011). Κατά συνέπεια, η προσφορά δυσπροσίου δεν είναι

δυνατό να αυξηθεί με ρυθμούς αρκετά ταχείς, ώστε να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση για μαγνήτες νεοδυμίου υψηλής θερμοκρασίας για ηλεκτρικά οχήματα. Επομένως, είναι απαραίτητα η αναζήτηση εναλλακτικών.

Ακολουθώς, έχει σημειωθεί ήδη, ότι βασικά μέταλλα, όπως ο χαλκός, είναι απαραίτητα για όλες σχεδόν τις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και χρησιμοποιούνται σε υψηλές ποσότητες σε σύγκριση με άλλα μέταλλα. Οι σπάνιες γαίες, ειδικά το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο, έχουν επίσης πολύ μεγάλη σημασία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς με βάση όσα σημειώθηκαν για μόνιμους μαγνήτες στον κινητήρα σχεδόν όλων των ηλεκτρικών οχημάτων (EV) και περίπου στο 20% των ανεμογεννητριών. Η χρήση μάλιστα μόνιμων μαγνητών σπανίων γαιών (με βάση το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο) χρησιμοποιούνται στα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα, επιτρέποντας κινητήρες υψηλής απόδοσης (Hoenderdaal et al. 2013).

Ακόμη, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η ανακύκλωση υλικών, όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και ο χαλκός, που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες είναι καθιερωμένη, με υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης. Αυτά τα υλικά αντιπροσωπεύουν μάλιστα περίπου το 80-95% των υλικών που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες. Παρόλο δε, που προς το παρόν δεν υπάρχει διαδικασία ανακύκλωσης δυσπροσίου ή νεοδυμίου από μόνιμους μαγνήτες, εντούτοις κάτι τέτοιο θα μπορούσε να είναι τεχνολογικά εφικτό στο επίκεντρο, ειδικά μάλιστα με δεδομένο πως η οικονομική βιωσιμότητα είναι το επίκεντρο σημαντικής έρευνας και ανάπτυξης σε εργαστηριακή κλίμακα.

Όσον αφορά στη ζήτηση του συγκεκριμένου μετάλλου, φαίνεται, ότι η ηλεκτρική και όχι η αιολική ενέργεια είναι αυτή που προβλέπεται να οδηγήσει στην αύξηση της ζήτησης για νεοδύμιο και δυσπρόσιο σπανίων γαιών. Ειδικότερα, η ραγδαία αύξηση των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών οχημάτων έχει ήδη αυξήσει τη ζήτηση κοβαλτίου και λιθίου για μπαταρίες ιόντων λιθίου και είναι ο κύριος μοχλός της νέας ζήτησης για αυτά τα μέταλλα.

Υπάρχει επίσης αυξημένη ζήτηση για σπάνιες γαίες, συμπεριλαμβανομένου του νεοδυμίου και του δυσπροσίου που χρησιμοποιούνται για ηλεκτρικούς κινητήρες (καθώς και για άλλες σπάνιες γαίες που χρησιμοποιούνται σε μια σειρά τεχνολογιών). Ένας μεγάλος αριθμός ορυχείων για τη δημιουργία νέων προμηθειών για αυτά τα μέταλλα βρίσκονται σε στάδια ανάπτυξης ή εξερεύνησης. Για το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο, υπολογίζεται ότι περίπου το 32% κάθε μετάλλου χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες και οχήματα, καταναμεμημένο ομοιόμορφα μεταξύ των δύο τεχνολογιών (Du and Graedel 2011).

Βέβαια, παρά το γεγονός, ότι ευθύς παραπάνω καταγράψαμε τη σημασία του συγκεκριμένου μετάλλου για την ενεργειακή μετάβαση σε φιλικές προς το περιβάλλον

τεχνολογίες και ενεργειακές πηγές, εντούτοις θα πρέπει να σημειωθεί, ότι οι κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων αναπτύσσουν επίσης τεχνολογίες κινητήρων που αντικαθιστούν το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο με σπάνιες γαίες ή διαφορετικά υλικά χαμηλότερου κόστους συνολικά (Widmer et al., 2015).

3.5 Κοβάλτιο

Οι κύριοι τύποι κοιτασμάτων κοβαλτίου, που αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής κοβαλτίου, περιλαμβάνουν πρωτογενή μαγματικά θειούχα νικελίου-κοβαλτίου, πρωτογενή και δευτερογενή στρωματοειδή θειούχα και οξειδία χαλκού-κοβαλτίου που φιλοξενούνται σε ιζήματα και δευτερογενείς λατερίτες νικελίου-κοβαλτίου.

Τα συνολικά αποθέματα κοβαλτίου υπολογίζεται σε 25,5 εκατομμύρια τόνους. Ακόμη, είναι γνωστό ότι υπάρχουν πρόσθετοι πόροι κοβαλτίου στον βυθό της θάλασσας σε εκτεταμένες εναέριες αποθέσεις οξειδίων σιδήρου-μαγγανίου και φλοιών σιδήρου-μαγγανίου (USGS, 2017).

Περίπου το 62% του συνόλου του κοβαλτίου χρησιμοποιήθηκε για μπαταρίες ιόντων λιθίου το 2020. Παράλληλα, το 2021 παρατηρήθηκε πως το 98% του κοβαλτίου είναι υποπροϊόν της εξόρυξης χαλκού και νικελίου (Global Energy Metals, 2021). Δεδομένου δε, ότι η ζήτηση για κοβάλτιο προβλέπεται να αυξηθεί πολύ πιο γρήγορα από τη ζήτηση για νικέλιο και χαλκό, το συγκεκριμένο κρίσιμο μέταλλο θα χρειαστεί περισσότερη εξόρυξη.

Συγκεκριμένα, τα κοιτάσματα κοβαλτίου μπορούν να βρεθούν σε όλο τον κόσμο και είναι πιο εμφανή στην αφρικανική ζώνη χαλκού, με πάνω από το 60% της παγκόσμιας παραγωγής κοβαλτίου από μία μόνο χώρα: τη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό (Global Energy Metals, 2021). Το κοβάλτιο βρίσκεται συνήθως στο μέταλλευμα μαζί με άλλα μέταλλα όπως ο χαλκός, το νικέλιο και τα μέταλλα της ομάδας της πλατίνας.

Δεδομένου δε, ότι οι ανθρακωρύχοι πρέπει να εξάγουν ολόκληρο το μέταλλευμα και όχι μεμονωμένα στοιχεία μέσα στο μέταλλευμα, αυτοί αποφασίζουν εάν θα εξαγάγουν με βάση τη συνολική αξία των μετάλλων στο μέταλλευμα. Στα μεταλλεύματα κοβαλτίου, η «βαθμίδα» ή η αναλογία του κοβαλτίου στο μέταλλευμα είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη από τις ποιότητες των «κυριότερων μετάλλων» όπως ο χαλκός και το νικέλιο.

Είναι χαρακτηριστικό, ότι ακόμη και στα ορυχεία της ΛΔΚ, όπου οι βαθμοί είναι οι υψηλότεροι, τα ακαθάριστα έσοδα από πωλήσεις από το κοβάλτιο το 2020 ήταν το πολύ το

ένα τέταρτο των εσόδων από χαλκό (η μόνη εξαίρεση είναι το ορυχείο Etoile στην επαρχία Haut-Katanga). Υπό αυτή την έννοια, το κοβάλτιο είναι συνήθως ένα υποπροϊόν στην εξόρυξη άλλου μετάλλου. Το κοβάλτιο κάνει την εξόρυξη ενός μεταλλεύματος πιο κερδοφόρα, αλλά οι παράγοντες που παραδοσιακά αναζητούν οι εταιρείες είναι η ποιότητα, η μάζα και η προσβασιμότητα του κύριου μετάλλου.

Περαιτέρω, το κοβάλτιο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση. Μαζί με άλλα κρίσιμα ορυκτά, το κοβάλτιο έχει σημαντικές οικονομικές χρήσεις και επί του παρόντος λίγα βιώσιμα υποκατάστατα, ενώ ταυτόχρονα ο εφοδιασμός του αντιμετωπίζει υψηλό κίνδυνο διακοπής.

Για παράδειγμα, οι κατασκευαστές μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα (EV) - μια αγορά που έχει φτάσει το 2020 να αντιπροσωπεύει το 3,2% της παγκόσμιας αγοράς οχημάτων - έχουν ανάγκη το συγκεκριμένο μέταλλο. Παράλληλα, οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων και ομοίως, η ζήτηση κοβαλτίου θα μπορούσαν να αυξηθούν πολύ περισσότερο. Η Bloomberg New Energy Finance (BloombergNEF) σύμφωνα με ένα σχετικά απαισιόδοξο σενάριο της προβλέπει ότι έως το 2025, τα ηλεκτρικά οχήματα θα αποτελούν το 16% του συνόλου των πωλήσεων νέων επιβατικών οχημάτων. Μέχρι το 2040, η συντριπτική πλειονότητα των πωλήσεων οχημάτων θα αφορά σε ηλεκτρικά (BloombergNEF, The Cost of Producing Battery Precursors in the DRC, 2021)

Παρά ταύτα, το κοβάλτιο μπορεί να μην παραμείνει σημαντικό για το συγκεκριμένο κλάδο και εν γένει την ενεργειακή μετάβαση και τις επόμενες δεκαετίες. Συγκεκριμένα, οι αγοραστές ηλεκτρικών οχημάτων, οι κατασκευαστές μπαταριών και οι ανθρακωρύχοι φοβούνται τις υψηλές τιμές και τις επιπλοκές στην αλυσίδα εφοδιασμού του συγκεκριμένου μετάλλου, καθώς και τις παραβιάσεις των ανθρωπίνων δικαιωμάτων, την καταστροφή του περιβάλλοντος, τη διαφθορά και τον πολιτικό κίνδυνο που χαρακτηρίζουν την παραγωγή του ένεκα των γεωγραφικών της ιδιαιτεροτήτων.

Υπό το παραπάνω πρίσμα, όπως και με άλλα κρίσιμα μέταλλα, οι βιομηχανίες επιδιώκουν να περιορίσουν σταδιακά τη χρήση του συγκεκριμένου. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό τα χρονικά περιθώρια που έχει η ΛΔΚ και άλλες χώρες για να επωφεληθούν από την εξόρυξη του εν λόγω μετάλλου ενδέχεται να είναι εξαιρετικά περιορισμένα. Με βάση την παραπάνω κατάσταση είναι δεδομένο, ότι θα πρέπει να ληφθούν μέτρα που κατατείνουν στην τήρηση της Συμφωνία του Παρισιού για το κλίμα, προκειμένου το κοβάλτιο ενόψει φυσικά και της σημαντικότητάς του για τον κλάδο και την ενεργειακή μετάβαση εν γένει, να συνεχίσει να αποτελεί επιλογή.

Συνοψίζοντας, πέραν της σημασίας και του ρόλου του στην ενεργειακή μετάβαση σε «πράσινες» τεχνολογίες και εναλλακτικές πηγές ενέργειας, το συγκεκριμένο κρίσιμο μέταλλο αποτελεί το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα μετάλλου, του οποίου η ζήτηση επηρεάζεται από μια σειρά διαφορετικών παραγόντων. Για παράδειγμα, μια χώρα παραγωγός, όπως η ΛΔΚ, προκειμένου να αντλήσει αξία από την εξόρυξη κοβαλτίου, θα πρέπει να λάβει σημαντικές πρωτοβουλίες για την ανάπτυξη της βιομηχανίας, της αλυσίδας εφοδιασμού μπαταριών και να αντιμετωπίσει μια σειρά από σημαντικά προβλήματα που περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων παραβιάσεις των ανθρωπίνων δικαιωμάτων, αλλά και διαφθορά. Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο θα εστιάσουμε στους παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοποίηση των κρίσιμων μετάλλων για την ενεργειακή μετάβαση.

4. Προκλήσεις και απαραίτητες πρωτοβουλίες για την επίτευξη του στόχου της βιώσιμης ανάπτυξης

4.1 Ο στόχος και οι προτεραιότητες

Η επιδίωξη του στόχου της ενεργειακής μετάβασης σε βιώσιμες πηγές ενέργειας με τη χρήση κρίσιμων μετάλλων είναι μια εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει αλλαγές σε διάφορους τομείς. Συγκεκριμένα, στους επί μέρους στόχους της εν λόγω προσπάθειας εντάσσονται μεταξύ άλλων, η προσέλκυση επενδύσεων, η διαχείριση εσόδων, η αναβάθμιση του εργατικού δυναμικού, η εξάλειψη των μη φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών εξόρυξης και η βελτίωση της διακυβέρνησης. Οι παραπάνω αλλαγές- στόχοι είναι αλληλένδετες. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να υιοθετηθεί μια πιο αποτελεσματική, ολιστική προσέγγιση σε όλο το σύστημα για την βέλτιστη ευθυγράμμιση του παραπάνω στόχου της ενεργειακής μετάβασης με τη Συμφωνία του Παρισιού.

Ειδικότερα, η υιοθέτηση μιας ολιστικής προσέγγισης σημαίνει, μεταξύ άλλων, ότι οι βιομηχανίες εξόρυξης θα πρέπει να υιοθετήσουν βιώσιμες και υπεύθυνες πρακτικές για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης ορυκτών έως το 2050 (Παγκόσμια Τράπεζα, 2020β). Θα πρέπει επίσης να ληφθούν πρωτοβουλίες που δομούνται στη βάση των αρχών της κυκλικής οικονομίας και δη να προωθηθεί σε επίπεδο εξόρυξης ορυκτών και κρίσιμων μετάλλων η βελτίωση των διαδικασιών ανακύκλωσης των βιομηχανικών αποβλήτων και των ορυχείων.

Παράλληλα, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής σε διεθνές επίπεδο θα πρέπει να ενσωματώσουν την προώθηση της ενεργειακής μετάβασης με βάση τα κρίσιμα μέταλλα και την εξόρυξή τους στις νομοθετικές πρωτοβουλίες που θα λάβουν σε επίπεδο πολιτικών και κανονισμών. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να υπάρξει πρόβλεψη για την καταπολέμηση της διαφθοράς και γενικώς να δημιουργηθεί ένα ρυθμιστικό περιβάλλον κατάλληλο για την προώθηση του παραπάνω στόχου (Manley et al. 2022)

Ακολουθώντας, είναι χρήσιμο, σε επίπεδο οικονομικής διαφοροποίησης να αναπτυχθούν βιομηχανίες επεξεργασίας ορυκτών. Στο στάδιο του σχεδιασμού, οι χώρες ή οι περιοχές που είναι πλούσιες σε αποθέματα κρίσιμων μετάλλων θα πρέπει να προετοιμαστούν για το ενδεχόμενο της μείωσης ή και της εξάντλησής τους (Breul and Nguyen 2021). Υπό το ίδιο πρίσμα και πάλι σε επίπεδο σχεδιασμού, θα πρέπει να εκπονηθούν σχέδια σε σχέση με το ενδεχόμενο τερματισμού λειτουργίας ορυχείων.

Ειδικότερα, θα πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι για τη διαχείριση του κλεισίματος ορυχείων και της αντιμετώπισης του κρίσιμου ζητήματος της εξόρυξης ορυκτών και κρίσιμων μετάλλων που είναι ζωτικής σημασίας για την ενεργειακή μετάβαση και την υποστήριξη της προσπάθειας ανάπτυξης τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Είναι ενδεικτικό, ότι σε πολλές περιπτώσεις, δεν υπάρχουν δεσμευμένοι οικονομικοί πόροι για την αντιμετώπιση ενός τέτοιου ενδεχομένου, όπως το κλείσιμο ορυχείων. Τούτο δε, θα έχει αντίκτυπο και στη βιωσιμότητα των εξορυκτικών βιομηχανιών. Θα πρέπει μάλιστα να αναφερθεί, ότι τα τελευταία χρόνια, αρκετές έννομες τάξεις άρχισαν να χρησιμοποιούν την Περιβαλλοντική Χρηματοοικονομική Διασφάλιση (EFA) στον κλάδο της εξόρυξης, δηλαδή, έναν μηχανισμό που χαρακτηρίζεται συχνά «περιβαλλοντικά ομόλογα» (UNDP, 2018) και θα μπορούσαν δυνητικά να τον εξετάσουν και άλλοι.

Ακόμη, σε επίπεδο λειτουργίας, οι βιομηχανίες εξόρυξης, οι συσχετιζόμενοι με αυτές φορείς και γενικώς τα ενδιαφερόμενα μέρη θα πρέπει να απελευθερώσουν τη διαδικασία εξόρυξης και παραγωγής ορυκτών και ενεργειακών πόρων, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην αύξηση των κρατικών εσόδων και επιτρέποντας καλύτερη πρόσβαση σε σύγχρονες ενεργειακές υπηρεσίες στις αναπτυσσόμενες χώρες (Ηνωμένα Έθνη, 2020a). Η διασφάλιση της διαφανούς και υπεύθυνης παραγωγής κρίσιμων μετάλλων είναι επίσης απαραίτητη για τον περιορισμό των επενδυτικών κινδύνων.

Περαιτέρω, είναι ενδεικτικό, ότι για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για κρίσιμα μέταλλα με δίκαιο και βιώσιμο τρόπο, σύμφωνα με το πλαίσιο E2SG, έχουν προσδιοριστεί οι ακόλουθες τέσσερις στρατηγικές προτεραιότητες στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού:

- Διασφάλιση επάρκειας εφοδιασμού και προσιτής τιμής.

Η παγκόσμια μετάβαση προς ένα μέλλον καθαρής ενέργειας θα οδηγήσει, όπως σημειώθηκε, σε ραγδαία αύξηση της ανάπτυξης τεχνολογιών «καθαρής» ενέργειας, όπως π.χ. ηλιακή, αιολική κλπ.. Όπως επίσης σημειώθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ο κομβικός ρόλος των κρίσιμων μετάλλων στην ενεργειακή μετάβαση σημαίνει, ότι θα χρειαστούν σε μεγάλες ποσότητες για την ανάπτυξη τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Ως εκ τούτου, το αποτέλεσμα θα είναι μια σημαντική αύξηση της ζήτησης για κρίσιμα μέταλλα στο άμεσο μέλλον.

Σε επίπεδο εμπορίου και προσφοράς, οι κυβερνήσεις και τα ενδιαφερόμενα μέρη του ιδιωτικού τομέα πρέπει να αναπτύξουν στρατηγικές για τη μείωση των γεωπολιτικών κινδύνων που σχετίζονται με κρίσιμα ορυκτά και γενικότερα την εξορυκτική βιομηχανία. Ειδικότερα, καθώς ο ρόλος των κρίσιμων ορυκτών στις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού αυξάνεται,

αναδύονται όλο και πιο έντονα σχετικές γεωπολιτικές ανησυχίες. Σε γενικές γραμμές, οι κυβερνήσεις θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν πιθανούς κινδύνους διαθεσιμότητας λόγω μακροπρόθεσμων γεωπολιτικών ζητημάτων, ενώ ο ιδιωτικός τομέας διαχειρίζεται τις διακυμάνσεις της αγοράς (IRENA, 2021).

Επιπρόσθετα, η διαθεσιμότητα επαρκών ποσοτήτων ορυκτών πόρων σε προσιτές τιμές είναι κρίσιμη για τη διευκόλυνση της ενεργειακής μετάβασης. Η εξασφάλιση επαρκούς προμήθειας αυτών των κρίσιμων ορυκτών θα μειώσει τις ανησυχίες για την ενεργειακή ασφάλεια και θα οδηγήσει σε χαμηλότερες τιμές, οι οποίες μπορούν στη συνέχεια να βοηθήσουν στην επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης. Για να διασφαλιστεί ότι οι χώρες παραγωγής μπορούν να ανταποκριθούν βιώσιμα και με ασφάλεια στην αυξανόμενη ζήτηση, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στην αντιμετώπιση θεμάτων, όπως η αστάθεια των τιμών της αγοράς εμπορευμάτων, τα σημεία συμφόρησης και διαφοροποίησης της αλυσίδας εφοδιασμού, η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα της εξόρυξης, η ανακύκλωση και η κυκλική οικονομία και ο κίνδυνος εμφάνισης αυξημένων κοινωνικών και γεωπολιτικών εντάσεων.

- Δίκαιη κατανομή των ωφελειών.

Η αυξανόμενη ζήτηση για νέες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη ενός ακμάζοντος και ανθεκτικού κρίσιμου τομέα ορυκτών, εν προκειμένω στο υπό εξέταση παράδειγμα, στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού. Ειδικότερα, η ανάπτυξη του συγκεκριμένου τομέα μπορεί να συμβάλει στην κοινωνικοοικονομική ευημερία των πλούσιων σε πόρους χωρών και εν γένει της υπό κρίση περιοχής. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η αφθονία σε αποθέματα και τα έσοδα από την εκμετάλλευση των συγκεκριμένων πόρων δεν μεταφράζονται πάντοτε και απαραίτητα σε κοινωνικοοικονομικά οφέλη «ευρείας βάσης». Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι γνωστό ως «κατάρρα των πόρων» (Badeeb et al., 2017). Ο τρόπος καλύτερης διαχείρισης των μεγάλων κοιτασμάτων κρίσιμων μετάλλων, τόσο στην περιοχή του παραδείγματος, όσο και παγκοσμίως είναι επομένως ένα κρίσιμο ζήτημα.

- Ανθρωποκεντρικός και χωρίς αποκλεισμούς σχεδιασμός.

Εξέχων παράγοντας στην προσπάθεια μετασχηματισμού του κλάδου στην ερευνώμενη περιοχή θεωρήθηκε εύλογα και η καλύτερη διαχείριση των κοινωνικών και περιβαλλοντικών ανταλλαγών που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του τομέα. Ειδικότερα, θεωρήθηκε πως τούτο απαιτεί ένα κοινό και χωρίς αποκλεισμούς όραμα. Η

προσέγγιση της ανάπτυξης αυτού του οράματος θα πρέπει να είναι ανθρωποκεντρική και να περιλαμβάνει τη συμμετοχή όλων των σχετικών ενδιαφερόμενων φορέων και μερών, ιδιαίτερα των πιο ευάλωτων. Αυτό θα επέτρεπε την συμπερίληψη διαφορετικών συμφερόντων και οριζόντιων θεμάτων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και δη εκείνων που είναι ουσιαστικής σημασίας για την ανάπτυξη γνώσεων σχετικά με τις υποκείμενες αντισταθμίσεις που απαιτούνται για τη συμφιλίωση διαφορετικών απόψεων, προοπτικών και συμφερόντων.

- Διατήρηση περιβαλλοντικής και κοινωνικής ακεραιότητας.

Η διαχείριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ανάπτυξης ορυκτών συχνά περιλαμβάνει την υιοθέτηση μιας προσέγγισης διαχείρισης του κύκλου ζωής που καλύπτει τον προγραμματισμό και το σχεδιασμό, την παραγωγή και την κατανάλωσή- αξιοποίησή τους. Πολλώ δε μάλλον, ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός του πλήρους κύκλου ζωής της διαδικασίας εξόρυξης είναι απαραίτητος, εφόσον εύλογα κριθεί, ότι η αλυσίδα εφοδιασμού κρίσιμων μετάλλων πρόκειται να αποτελέσει παράγοντα ανάπτυξης για τον τομέα (Manley et al. 2022).

Τούτο σημαίνει, ότι δεν θα πρέπει να εστιάσουμε στο σίγουρα βασικό σημείο της για την ανάπτυξη ορυκτών, δηλαδή την ίδια την βιομηχανία εξόρυξης, αλλά να εξετάσουμε επίσης τη βιώσιμη ανάπτυξη των περιφερειών και των κοινοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των επενδύσεων σε σιδηροδρομικές, οδικές και λιμενικές υποδομές, για την παράδοση προϊόντων στην αγορά, την υποστήριξη για την κατάρτιση των εργαζομένων. Συγκεκριμένα, μέσω της κατάρτισης των εργαζομένων και της δημιουργίας ενός εκπαιδευτικού συστήματος που μπορεί να υποστηρίξει την οικονομική διαφοροποίηση, αναμφίβολα θα ενισχυθεί η κοινωνικο-οικονομική ανθεκτικότητα των περιοχών εξόρυξης (Syahrir et al. 2020) και θα μετριαστούν οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Συνοψίζοντας, η εξόρυξη ορυκτών είναι μια διαδικασία που, όπως επανειλημμένα αναφέρθηκε στην παρούσα, έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων CO₂ και μεθανίου. Συνδέεται επίσης με μια σειρά από άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η μόλυνση των υδάτων και του εδάφους και η αποψίλωση των δασών. Αυτά τα ζητήματα έχουν δυνητικά σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις για τη βιοποικιλότητα και ενέχουν σημαντικούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία, ειδικά σε κοινότητες που βρίσκονται κοντά σε εξορυκτικές δραστηριότητες. Ως εκ τούτου, η ελαχιστοποίηση των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εξόρυξης ορυκτών πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα.

Για την επίτευξη των ως άνω στρατηγικών προτεραιοτήτων, θα πρέπει να ληφθούν μια σειρά από ρυθμιστικές πρωτοβουλίες σε επίπεδο νομοθεσίας και πολιτικών από τις κυβερνήσεις διεθνώς.

- Οι επενδύσεις

Συγκεκριμένα, θα πρέπει να εισαχθούν καινοτόμα μέσα, τόσο για την εξασφάλιση επενδύσεων στην παραγωγή κρίσιμων μετάλλων, όσο και για την παροχή κινήτρων για περιβαλλοντικά βιώσιμες πρακτικές εξόρυξης, ενώ οι κυβερνήσεις θα πρέπει ακόμη να χρηματοδοτήσουν την έρευνα και την ανάπτυξη πρακτικών και διαδικασιών βιώσιμης εξόρυξης κρίσιμων ορυκτών, βασισμένων στις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

Ειδικότερα, η χρηματοδότηση επενδύσεων που παρέχουν περιβαλλοντικά οφέλη, π.χ. πράσινη χρηματοδότηση (Boettcher, 2022), μπορεί να ενισχύσει τις χρηματοοικονομικές ροές από τον δημόσιο, ιδιωτικό και μη κερδοσκοπικό τομέα σε προτεραιότητες βιώσιμης ανάπτυξης που διαχειρίζονται καλύτερα τους περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς κινδύνους (Lee, 2020). Η πράσινη χρηματοδότηση αναπτύσσεται γρήγορα με τη μορφή εξειδικευμένων χρηματοπιστωτικών μέσων (π.χ. πράσινα ομόλογα, πράσινα δάνεια, βιώσιμα ομόλογα, ομόλογα που συνδέονται με τη βιώσιμη ανάπτυξη, «μπλε ομόλογα» κλπ) και ιδρυμάτων. Για παράδειγμα, ο μηχανισμός «Environmental Financial Assurance» (EFA), που συνήθως αναφέρεται με τον όρο «περιβαλλοντικά ομόλογα», εισάγεται όλο και περισσότερο (UNDP, 2018) και η αξιοποίησή του θα πρέπει να ενθαρρύνεται.

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις για την πράσινη χρηματοδότηση, συμπεριλαμβανομένης της έλλειψης κατάλληλου ρυθμιστικού πλαισίου, των πολύ σύντομων περιόδων δανεισμού, της απουσίας συνεκτικών ορισμών των πράσινων επενδύσεων και του χαμηλού βαθμού τυποποίησης και διαφάνειας. Σε περίπτωση δε, που οι παραπάνω προκλήσεις δεν αντιμετωπιστούν, η ανάπτυξη των μηχανισμών και του πλαισίου της πράσινης και βιώσιμης χρηματοδότησης σε παγκόσμιο επίπεδο, θα είναι περιορισμένη (Spinaci, 2021).

Ως εκ τούτου, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα ευνοϊκό πλαίσιο με περισσότερη διαφάνεια, μέσω του οποίου θα προωθείται η πράσινη χρηματοδότηση, προκειμένου να ευθυγραμμιστούν οι προσδοκίες και οι πρακτικές των ενδιαφερομένων. Συγκεκριμένα, η αποκάλυψη πληροφοριών θα πρέπει να είναι υποχρεωτική και οι δημοσιονομικές πολιτικές θα πρέπει επίσης να προσαρμοστούν στην παραπάνω κατεύθυνση, λ.χ. αυξάνοντας τις

επιδότησεις για την «πράσινη ανάπτυξη» και καταργώντας τις επιδοτήσεις για ορυκτά καύσιμα (Lee, 2020).

Επιπλέον, η πανδημία της Covid-19 έχει υπογραμμίσει την επείγουσα ανάγκη για κλιμάκωση της πράσινης χρηματοδότησης και την οργάνωση συντονισμένων χρηματοδοτικών δράσεων για την παγκόσμια βιώσιμη ανάπτυξη. Συγκεκριμένα, τα πακέτα χρηματοοικονομικής τόνωσης που αναπτύχθηκαν ως απάντηση στην πανδημία Covid-19 θα πρέπει, κατά περίπτωση, να χρησιμοποιηθούν ως ευκαιρίες για την προετοιμασία των βιομηχανιών εξόρυξης και ανακύκλωσης στα πλαίσια ενίσχυσης της βιωσιμότητας.

Γενικώς, η πανδημία ανέδειξε τη δυνατότητα προώθησης της ενεργειακής μετάβασης (Li et al., 2022). Η παγκόσμια ανάκαμψη από την πανδημία της Covid-19 προσφέρει μια ευκαιρία να εξεταστεί η ανάγκη για επενδύσεις σε κρίσιμα ορυκτά για τη στήριξη της ενεργειακής μετάβασης. Έχει υποστηριχθεί, ότι τα σχέδια οικονομικής ανάκαμψης από την πανδημία θα μπορούσαν να συμπεριλάβουν επενδύσεις στην παραγωγή και την ανακύκλωση των κρίσιμων ακατέργαστων μετάλλων που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Παγκόσμια Τράπεζα, 2020β). Η παραπάνω πρωτοβουλία θα μπορούσε με τη σειρά της να συμβάλει στη βιώσιμη ανάπτυξη, π.χ. ενθαρρύνοντας την ανάπτυξη και δημιουργώντας θέσεις εργασίας. Η Πρωτοβουλία Χρηματοδότησης για την Ανάπτυξη στην εποχή του Covid-19 και έκτοτε (FFDI), που διοργανώθηκε από τα Ηνωμένα Έθνη, παρέχει μια χρήσιμη πλατφόρμα για την κινητοποίηση οικονομικών πόρων για την κάλυψη των επενδυτικών αναγκών του υπό κρίση τομέα.

Τέλος, η επένδυση σε πρωτοβουλίες έρευνας και ανάπτυξης θα μπορούσε αναμφίβολα να εισφέρει στην προσπάθεια ομαλούς ανάπτυξης του στόχου της ενεργειακής μετάβασης σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την ελαχιστοποίηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, την αύξηση των οικονομικών ευκαιριών και τη βελτίωση των διαδικασιών ανάκτησης ορυκτών από τα απόβλητα. Για την υλοποίηση της παραπάνω πρωτοβουλίας είναι απαραίτητη η σύνδεση του κλάδου με την επιστημονική και τεχνική εμπειρογνομosύνη, προκειμένου να ξεπεραστούν τα εμπόδια στην αλυσίδα αξίας κρίσιμων ορυκτών και να αυξηθεί η E&A κρίσιμων ορυκτών (Κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου, 2022).

- Εξόρυξη χαμηλότερων εκπομπών

Οι υπάρχουσες τεχνικές και διαδικασίες για τη μείωση της έντασης εκπομπών στην βιομηχανία παραγωγής ορυκτών που στοχεύουν στην μεταστροφή του κλάδου σε καθαρά καύσιμα και ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών βελτιώνοντας παράλληλα την απόδοση, θα πρέπει να προωθηθούν μεταξύ των παραγωγών κρίσιμων μετάλλων, που προς το παρόν

τουλάχιστον, επιδεικνύουν σημαντικές διακυμάνσεις στο αποτύπωμα εκπομπών τους. Οι αυξημένες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης, σε επίπεδο τεχνολογικής καινοτομίας, τόσο από την πλευρά της ζήτησης όσο και από την πλευρά της παραγωγής, μπορούν να οδηγήσουν σε πιο αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων, να επιτρέψουν την υποκατάστασή τους και να «ξεκλειδώσουν» σημαντικές νέες προμήθειες, με αποτέλεσμα σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την ασφάλεια.

Ειδικότερα, η μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των βιομηχανιών εξόρυξης απαιτεί ένα καλά σχεδιασμένο και επιβεβλημένο ρυθμιστικό πλαίσιο, που καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής των βιομηχανιών εξόρυξης. Ορισμένες βασικές πτυχές ενός τέτοιου πλαισίου θα πρέπει να περιλαμβάνουν: την αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, την αξιολόγηση ήδη από τη φάση σχεδιασμού μιας τοποθεσίας εξόρυξης, την επιβολή ελάχιστων προτύπων απόδοσης, κατά τη φάση λειτουργίας της και την αποκατάσταση του περιβάλλοντος και των φυσικών τοπίων που επηρεάζονται από τις εξορυκτικές δραστηριότητες στη φάση παροπλισμού της (Ηνωμένα Έθνη, 2020a).

Τέλος, θα πρέπει να αναπτυχθεί μια προσέγγιση «κύκλου ζωής» για την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της εξόρυξης, μεταφοράς και κατανάλωσης ορυκτών, για την προώθηση της ανάκτησης όλων των χρήσιμων ορυκτών και τη μείωση των αποβλήτων εξόρυξης (IRENA, 2021). Αυτή η προσέγγιση θα πρέπει να περιλαμβάνει μέτρα για την προώθηση της απορρόφησης καθαρής ενέργειας στην παραγωγή ορυκτών, λ.χ. με την αντικατάσταση του εξοπλισμού ντίζελ σε υπόγεια ορυχεία με κινητό εξοπλισμό εξόρυξης που αξιοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια (Κυβέρνηση Καναδά, 2022).

- Ανακύκλωση και κυκλική οικονομία

Η ανακύκλωση αποβλήτων και άλλων προϊόντων που περιέχουν κρίσιμα μέταλλα και ορυκτά θα πρέπει επίσης να ενισχυθεί και μάλιστα άμεσα. Οι κατασκευαστές και οι έμποροι λιανικής πρέπει να αναλάβουν μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης στις διαδικασίες ανακύκλωσης. Επιπλέον, ο ρυθμός ανακύκλωσης κρίσιμων ορυκτών (π.χ. λιθίου και σπανίων γαιών) είναι χαμηλός, εν μέρει εξαιτίας τεχνολογικών περιορισμών, όπως σημειώθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Ως εκ τούτου, η αντιμετώπιση των τεχνολογικών δυσκολιών και η αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης θα απαιτήσει μια παγκόσμια προσπάθεια και διεθνή τεχνολογική συνεργασία (Gill, 2022).

Περαιτέρω, η διαμόρφωση ενός ενιαίου πλαισίου πολιτικών προς την κατεύθυνση της ανακύκλωσης θα μπορούσε να διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο στην εν λόγω προσπάθεια μέσω (i) της ενθάρρυνσης της ανακύκλωσης προϊόντων που έχουν φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης

ζωής τους, (ii) της υποστήριξης και προώθησης των αποτελεσματικών δραστηριοτήτων συλλογής και διαλογής και (iii) της χρηματοδότησης προσπάθειών έρευνας και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών ανακύκλωσης. Ακόμη, οι διαμορφωθείσες πολιτικές θα πρέπει να προβλέπουν κίνητρα για την ανακύκλωση ορυκτών πόρων από απόβλητα και τη μείωση των αποβλήτων εξόρυξης (Παγκόσμια Τράπεζα, 2020β). Τέλος, στο περιεχόμενο των παραπάνω πολιτικών θα πρέπει δεδομένα να περιλαμβάνεται η διαμόρφωση σχεδίων για την προώθηση της κυκλικής οικονομίας. Τούτο σημαίνει, ότι θα πρέπει να ενισχυθεί η προσπάθεια ευαισθητοποίησης, ανάπτυξης ικανοτήτων και στρατηγικών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης.

- Διαχείριση εσόδων

Απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου τα έσοδα από την ανάπτυξη κρίσιμων μετάλλων να συμβάλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη είναι η αποτελεσματική είσπραξη φόρων και η δίκαιη κατανομή τους. Συγκεκριμένα, η βελτίωση του συστήματος είσπραξης φόρων είναι το πρώτο βήμα προς την καλή διαχείριση των εσόδων. Για παράδειγμα, ένα ψηφιοποιημένο σύστημα είσπραξης φόρων θα μπορούσε να καταστήσει τις πληρωμές πιο βολικές, να ενθαρρύνει τη συμμόρφωση μεταξύ των φορολογουμένων και να διασφαλίσει τη λογοδοσία, αποθαρρύνοντας έτσι τη διαφθορά και ενθαρρύνοντας τη δικαιοσύνη (Ezenagu, 2021).

Περαιτέρω, οι κυβερνήσεις και οι εξορυκτικές βιομηχανίες θα πρέπει να συνεργαστούν για την εξάλειψη των παράνομων χρηματοοικονομικών ροών από τις εξορυκτικές βιομηχανίες υποστηρίζοντας τη χρηματοοικονομική διαφάνεια μεταξύ των φορέων και τη λήψη πρωτοβουλιών κατά της διαφθοράς και υπέρ της βελτίωσης της διαφάνειας (UNDP, 2018). Ακόμη, οι κυβερνήσεις διεθνώς θα πρέπει να απαιτούν από τις εταιρείες που λειτουργούν υπό τη δικαιοδοσία τους να αποκαλύπτουν λεπτομερείς οικονομικές πληροφορίες για εξορυκτικά έργα (Marques, 2020).

- Καλύτερη διακυβέρνηση

Για τη βελτίωση της διακυβέρνησης των δραστηριοτήτων εξόρυξης, η διαδικασία λήψης αποφάσεων για την ανάπτυξη κρίσιμων μετάλλων θα πρέπει να περιλαμβάνει τη συμμετοχή όλων των βασικών ενδιαφερομένων φορέων και εν γένει μερών και ιδίως των μειονεκτούντων ομάδων και της κοινωνίας των πολιτών.

Συγκεκριμένα, η αύξηση της κοινωνικής ένταξης στη βιομηχανία εξόρυξης απαιτεί την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ κυβερνήσεων, διεθνών οργανισμών και φορέων του

ιδιωτικού τομέα. Διαφορετικοί φορείς, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, των κυβερνήσεων διαφορετικών κρατών θα πρέπει να συνεργαστούν για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση των κινδύνων, αφού μελετήσουν ένα μείγμα διαφορετικών νομικών πλαισίων και ρυθμίσεων σε διάφορες έννομες τάξεις.

Περαιτέρω, ο συγκερασμός αντιφατικών στόχων μεταξύ των διαφορετικών ενδιαφερομένων απαιτεί από τις κυβερνήσεις να δημιουργήσουν περιβάλλοντα που να μην επιτρέπουν τον αποκλεισμό, επιτρέποντας παράλληλα στον ιδιωτικό τομέα να οδηγεί τις επενδύσεις (ESCAP, 2021b). Προσέτι, οι κυβερνήσεις θα πρέπει να σχεδιάσουν και να εφαρμόσουν ολοκληρωμένες πολιτικές για τη διαχείριση των φυσικών πόρων μέσω μιας δημοκρατικής προσέγγισης διακυβέρνησης με τη συμμετοχή όλων των ενδιαφερομένων, η οποία αναβαθμίζει την αποδοτικότητα των πόρων και οδηγεί στη βιώσιμη διαχείριση των κρίσιμων μετάλλων και πόρων.

Τα υφιστάμενα νομικά, κανονιστικά και πολιτικά πλαίσια για τις κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς και η διαφανής και υπεύθυνη διαχείριση των εσόδων από τους διαθέσιμους πόρους (Addison and Roe 2018), θα πρέπει να επικαιροποιούνται και να βελτιώνονται συνεχώς με στόχο την ενίσχυση της καταλληλότητάς τους. Ειδικότερα, η διαμόρφωση του κατάλληλου ρυθμιστικού πλαισίου θα καταστήσει δυνατή την καλύτερη διανομή και κατανομή των οικονομικών παραγώγων της εξόρυξης και παραγωγής φυσικών πόρων, καθώς και τη διασφάλιση των ανθρωπίνων δικαιωμάτων και του περιβάλλοντος και θα προωθήσει την πρόοδο στην κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη που τελικά θα οδηγήσει στην επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης.

Κατά την εφαρμογή της προαναφερθείσας κανονιστικής μεταρρύθμισης, θα πρέπει επίσης να δοθεί προσοχή στη μείωση της γραφειοκρατίας στον κλάδο. Για παράδειγμα, οι διαδικασίες ρύθμισης και έγκρισης κρίσιμων ορυκτών μπορεί να χρειαστεί να βελτιστοποιηθούν σε ορισμένες χώρες. Πολλές εταιρείες κρίσιμων μετάλλων αντιμετωπίζουν τις ίδιες επαχθείς και χρονοβόρες διαδικασίες ρύθμισης και έγκρισης. Η καθυστέρηση και η αβεβαιότητα σε οποιοδήποτε έργο παραγωγής κρίσιμων μετάλλων θα υπονόμει τον συγκεκριμένο στόχο και μετά ταύτα η απλούστευση των διαδικασιών έγκρισης είναι ένας στόχος ιδιαίτερα σημαντικός για την επίτευξή του (Pickford, 2022).

Ακολούθως, η αξιοποίηση των υφιστάμενων θεσμικών πλαισίων και εργαλείων (όπως λ.χ. EITI, OECD EFFECT, Blue Dot Network, Mining Awards Corruption Risk Assessment tool and Infrastructure Anti-Corruption Toolbox), όπως και η ανάπτυξη νέων εργαλείων και μηχανισμών μπορεί να εντοπίσει και να μειώσει τους κινδύνους διαφθοράς στην προμήθεια κρίσιμων μετάλλων και εν γένει στην αλυσίδα εφοδιασμού.

Επιπλέον, η Διεθνής Οργάνωση Εργασίας (ILO) έχει αναπτύξει αρκετά χρήσιμα έργα σχετικά με τον τρόπο προώθησης της συμμετοχικής διακυβέρνησης. Προσδιορίζουν διαφορετικούς τύπους συμμετοχής, συμπεριλαμβανομένης, για παράδειγμα, μιας επίσημης, θεσμοθετημένης τριμερούς αλληλεπίδρασης μεταξύ των εκπροσώπων της κυβέρνησης, των συνδικαλιστικών οργανώσεων και του κλάδου σε θέματα κοινών συμφερόντων (π.χ. πολιτικές για την αγορά εργασίας). Παράλληλα, προωθούνται και πιο άτυπες μορφές διαλόγου μεταξύ των διαφόρων ενδιαφερομένων, κυρίως για την ανταλλαγή πληροφοριών.

- Αναβάθμιση εργατικού δυναμικού

Για την ανταπόκριση στην αυξανόμενη ζήτηση εργατικού δυναμικού στην ερευνώμενη βιομηχανία των κρίσιμων μετάλλων που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη τεχνολογιών πράσινης ενέργειας δεν αρκεί μόνον η πρόσληψη νέων εργαζομένων. Συγκεκριμένα, κρίσιμη είναι η κατάρτιση, αναβάθμιση των δεξιοτήτων και επανεκπαίδευση του ήδη υπάρχοντος σχετικού εργατικού δυναμικού. Παράλληλα, οι κυβερνήσεις διεθνώς θα πρέπει να δημιουργήσουν βιώσιμες θέσεις εργασίας για ντόπιους, μετανάστες και γυναίκες, ώστε να συμμετέχουν και να εργάζονται, όχι μόνο σε θέσεις στις κρίσιμες αλυσίδες εφοδιασμού ορυκτών, αλλά και στον κλάδο της παροχής υπηρεσιών στην εν λόγω βιομηχανία.

Περαιτέρω, τα προγράμματα προσέλκυσης και διατήρησης ταλέντων είναι ζωτικής σημασίας για την επέκταση του υφιστάμενου εργατικού δυναμικού και την κάλυψη των τρεχουσών και μελλοντικών αναγκών σε κρίσιμους τομείς ορυκτών. Το Ταμείο Ανάπτυξης Δεξιοτήτων (SDF), ένα πρόγραμμα αναβάθμισης των δεξιοτήτων εργατικού δυναμικού με γνώμονα τη βιομηχανία στην Καμπότζη, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα προς αυτήν την κατεύθυνση. Στόχος του συγκεκριμένου Οργανισμού είναι να βοηθήσει τη βιομηχανία να ικανοποιήσει τη ζήτηση εργατικού δυναμικού παρέχοντας οικονομική, αλλά και άλλου είδους βοήθεια στα προγράμματα κατάρτισης και εκπαίδευσης.

Παράλληλα, χρειάζονται επίσης καινοτόμοι τρόποι, μηχανισμοί και μέθοδοι κατάρτισης και απασχόλησης για την αύξηση του εργατικού δυναμικού των τομέων εξόρυξης και ανακύκλωσης. Η αύξηση των ευκαιριών εκπαίδευσης είναι επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη της εργασίας που σχετίζεται με κρίσιμες αλυσίδες εφοδιασμού ορυκτών.

Υπό το παραπάνω πρίσμα, μέσω της συνεργασίας με πανεπιστήμια, κολέγια, εξειδικευμένα ιδρύματα κατάρτισης και λοιπούς εκπαιδευτικούς φορείς είναι δυνατή η παροχή κατάλληλων και βιωματικών ευκαιριών κατάρτισης για τους ανθρώπους. Ειδικότερα, θα δοθεί η ευκαιρία σε πολλούς εργαζόμενους στον κλάδο να αποκτήσουν τις πιστοποιήσεις και τα

προγράμματα κατάρτισης που χρειάζονται στον τομέα των κρίσιμων μετάλλων και ορυκτών (Government of the United Kingdom, 2022). Επιπλέον, η οικοδόμηση ενός κρίσιμου αριθμού ειδικευμένων και έμπειρων εργαζομένων έχει καθοριστικό ρόλο στην αντιμετώπιση της έλλειψης εργατικού δυναμικού, προσδιορίζοντας τη ζήτηση για κρίσιμους τομείς ορυκτών.

Τέλος, οι κατευθυντήριες γραμμές για μια δίκαιη μετάβαση προς περιβαλλοντικά βιώσιμες οικονομίες και κοινωνίες για όλους, που αναπτύχθηκε από τη ΔΟΕ, παρέχουν μερικές χρήσιμες προτάσεις για το πώς να προετοιμαστεί καλύτερα το εργατικό δυναμικό για ευκαιρίες που προκύπτουν από την ανάπτυξη και παραθέτουν δεξιότητες που θα μπορούσαν να βελτιώσουν την δυνατότητα πρόσληψής τους και να ταιριάζουν με την προσφορά και τη ζήτηση δεξιοτήτων μέσω στενής συνεργασίας με τον κλάδο για την αξιολόγηση των αναγκών του σε δεξιότητες (ILO, 2015).

4.3 Ο ρόλος της διεθνούς κοινότητας

Με βάση όσα σημειώθηκαν ευθύς παραπάνω στις προηγούμενες ενότητες, καθίσταται σαφές, ότι ο στόχος της ενεργειακής μετάβασης σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με την αξιοποίηση κρίσιμων μετάλλων είναι μια σύνθετη και δύσκολη διαδικασία, η επιτυχής υλοποίηση της οποίας απαιτεί τη συνδρομή πολλών παραγόντων. Φυσικά, ένας από τους παράγοντες που διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην εν λόγω προσπάθεια είναι η διεθνής συνεργασία. Ως εκ τούτου, ο ρόλος της διεθνούς κοινότητας δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να υποτιμάται, αλλά να αναδεικνύεται.

Συγκεκριμένα, η διεθνής κοινότητα θα πρέπει να θέσει ορισμένες προτεραιότητες, προκειμένου να ενισχύσει την προσπάθεια υλοποίησης των παραπάνω στόχων. Συγκεκριμένα, οι τρεις βασικές προτεραιότητες της διεθνούς κοινότητας είναι:

- η ανάπτυξη διεθνών προτύπων και πρακτικών για την ενίσχυση της ασφάλειας και της διαφάνειας στις αγορές κρίσιμων μετάλλων.
- η δημιουργία διεθνών φόρουμ για την ανταλλαγή γνώσεων και εμπειριών σχετικά με τις πολιτικές, το κανονιστικό πλαίσιο, τις βέλτιστες πρακτικές, τα δεδομένα της παραγωγής, την κατανάλωση και τις πρακτικές ESG για τις εταιρείες· και
- ο συντονισμός των περιβαλλοντικών και άλλων πρακτικών διακυβέρνησης για την προστασία του περιβάλλοντος και τη διαφάνεια της διαχείρισης των φόρων και των εσόδων των ορυχείων. Η προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης κρίσιμων μετάλλων χρειάζεται συντονισμό μεταξύ των χωρών. Λόγω της συγκέντρωσης πόρων σε λίγες χώρες, ο

περιφερειακός προγραμματισμός και η στενή συνεργασία με τους γείτονες έχει καταστεί απαραίτητος και επιθυμητός για την ανάπτυξη CRM (Manley et al., 2022). Η βοήθεια των αναπτυσσόμενων χωρών στη διαχείριση των εσόδων για πράσινες επενδύσεις και η χρηματοδότηση SDG θα πρέπει επίσης να αποτελεί διεθνή προτεραιότητα για τις αναπτυξιακές τράπεζες, τους διεθνείς οργανισμούς στήριξης και τις ομάδες προβληματισμού. Σε τέτοιες συνθήκες, πρέπει να τεθούν σε εφαρμογή μηχανισμοί για τον συντονισμό των ενεργειών πολιτικής για την προώθηση αλλαγών σε πολλαπλά μέτωπα με συντονισμένο τρόπο.

Ειδικότερα, οι έννομες τάξεις διεθνώς θα πρέπει να συνεργαστούν για να υποστηρίξουν τις εθνικές προσπάθειες για τη βελτίωση των νομικών και κανονιστικών πρακτικών, την υιοθέτηση πιο βιώσιμων επιχειρησιακών πρακτικών και τη διαχείριση εσόδων και κινδύνων. Παράλληλα, υπό το ανωτέρω πρίσμα, ιδιαίτερα κρίσιμη είναι η θέσπιση κοινών επιχειρησιακών κανόνων για τις αγορές και την πράσινη χρηματοδότηση και η διαμόρφωση διεθνών προτύπων.

Συγκεκριμένα, οι διεθνείς οργανισμοί και οι κυβερνήσεις των κρατών θα πρέπει να συνεργαστούν για να δημιουργήσουν κανόνες και ενιαία ρυθμιστικά πλαίσια για την προώθηση ελεύθερων αγορών για τα κρίσιμα μέταλλα. Η εν λόγω πρωτοβουλία μπορεί να συμβάλει στη διασφάλιση βιώσιμου και ασφαλούς εφοδιασμού για τα κρίσιμα μέταλλα και ορυκτά. Θα πρέπει επίσης να διερευνηθεί η δυνατότητα σύναψης μιας διεθνούς συμφωνίας για τον μετριασμό των επιπτώσεων των διαταραχών της αλυσίδας εφοδιασμού και την προώθηση της βιώσιμης χρήσης των κρίσιμων μετάλλων και των σπανίων ορυκτών πόρων (Henckens et al. 2016).

Ταυτόχρονα, είναι απαραίτητη η διαμόρφωση ενός διεθνούς πλαισίου για τη διαχείριση της πράσινης χρηματοδότησης, αλλά και για τη διευκόλυνση της ρυθμιστικής εναρμόνισης και την τυποποίηση των πρακτικών της αγοράς (Sachs et al. 2019; Spinaci, 2021). Ακόμη, κρίσιμη είναι και η αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως το blockchain και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (big data analytics). Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες μπορούν να παρέχουν σημαντική υποστήριξη στη διαδικασία ρυθμιστικής εναρμόνισης και τυποποίησης της αγοράς, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών με διάφορους ενδιαφερόμενους, διατηρώντας παράλληλα την ασφάλεια και το απόρρητο των δεδομένων (Singh, 2022).

Ακόμη, η διεθνής συνεργασία είναι απαραίτητη και για τη διαμόρφωση διεθνών προτύπων, όπως λ.χ. η διαμόρφωση μιας τυποποιημένης και εναρμονισμένης προσέγγισης για

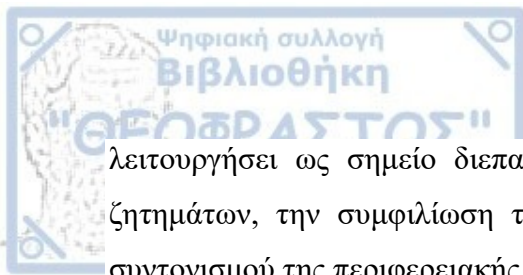
την παραγωγή κρίσιμων μετάλλων, εστιάζοντας στα περιβαλλοντικά και κοινωνικά ζητήματα, καθώς και στις πτυχές διακυβέρνησης (ESG) σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιπλέον, η διεθνής συνεργασία είναι απαραίτητη για την ενίσχυση της ασφάλειας των αλυσίδων εφοδιασμού και την ανάπτυξη και εφαρμογή στρατηγικών κυκλικής οικονομίας.

Φυσικά, η σημασία του ρόλου της διεθνούς συνεργασίας δεν θα πρέπει να υποτιμηθεί και σε επίπεδο διαμοιρασμού γνώσεων και ανάπτυξης ικανοτήτων. Συγκεκριμένα, η ανταλλαγή γνώσεων και εμπειριών μεταξύ διαφορετικών κρατών και φορέων με στόχο την ενίσχυση της κυβερνητικής ικανότητας είναι μια χρήσιμη μέθοδος για την οικονομικά αποδοτική ευθυγράμμιση της εξορυκτικής βιομηχανίας με τους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης. Η ενίσχυση της ικανότητας των πλούσιων σε πόρους αναπτυσσόμενων χωρών για τη διαχείριση πόρων, αλλά και τη βελτίωση σε λοιπούς τομείς σχετικούς με τη διακυβέρνηση θα βοηθήσει αυτές τις χώρες, αλλά και την παγκόσμια κοινότητα στο σύνολό της να επιτύχουν την ενεργειακή μετάβαση και τους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης.

Ειδικότερα, πολλές διεθνείς πρωτοβουλίες, όπως η EITI (Marques, 2020), παίζουν σημαντικό ρόλο στη διασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξης της βιομηχανίας εξόρυξης κρίσιμων μετάλλων, κάτι που θα πρέπει να ενθαρρυνθεί και να επεκταθεί. Τομείς στους οποίους πρέπει να εστιάσουμε είναι ο σχεδιασμός πολιτικής, η νομοθεσία και οι κανονισμοί, η περιβαλλοντική διακυβέρνηση, η διαχείριση εσόδων και η διεθνής συνεργασία. Οι διεθνείς οργανισμοί θα πρέπει να προωθήσουν και να βοηθήσουν στην υιοθέτηση των βέλτιστων πρακτικών το συντομότερο δυνατό. Απαιτείται επίσης βαθιά κατανόηση της σύνδεσης της παραγωγής ορυκτών με τη μείωση της φτώχειας και την ανθρώπινη ανάπτυξη (Franks et al. 2022).

Τέλος, εξαιρετικά σημαντικός στα πλαίσια όσων ήδη σημειώθηκαν είναι ο περιφερειακός και διεθνής συντονισμός των προσπαθειών. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να εγκριθεί ένας ενιαίος μηχανισμός συντονισμού των πρωτοβουλιών μεταξύ των ενδιαφερομένων σε διεθνές επίπεδο. Για παράδειγμα, παρόλο που ορισμένοι διεθνείς οργανισμοί, όπως το UNEP, το Διακυβερνητικό Φόρουμ για την εξόρυξη, τα ορυκτά, τα μέταλλα και την αειφόρο ανάπτυξη και οργανώσεις της κοινωνίας των πολιτών, όπως το World Resources Forum και το Future Earth, διαθέτουν προγράμματα παραγωγής και ανταλλαγής γνώσεων, εντούτοις χρειάζονται περισσότερα για τη βελτίωση της χάραξης πολιτικής.

Ειδικότερα, θα πρέπει να ληφθούν πιο εξειδικευμένες πρωτοβουλίες για την ευθυγράμμιση και τον συντονισμό των διαφόρων δράσεων, μηχανισμών και προσεγγίσεων. Για παράδειγμα, η σύσταση μιας περιφερειακής επιτροπής με μέλη που θα αντιπροσωπεύουν όλα τα ενδιαφερόμενα κράτη, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό όργανο στην προσπάθεια συντονισμού της διεθνούς συνεργασίας. Μια τέτοια επιτροπή θα μπορούσε να



λειτουργήσει ως σημείο διεπαφής για την άμβλυνση διαφορών, την επίλυση κρίσιμων ζητημάτων, την συμφιλίωση των διαφορετικών συμφερόντων και την διευκόλυνση του συντονισμού της περιφερειακής πολιτικής.

5.Επίλογος

5.1 Τελικές παρατηρήσεις

Η μετάβαση στην καθαρή ενέργεια αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη διαδρομή για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών και κλιματικών κρίσεων που προκαλούνται από την εξάρτηση του κόσμου από τα ορυκτά καύσιμα. Όπως αναλύθηκε στην παρούσα εργασία, στα πλαίσια της επισκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας, ο ρόλος των κρίσιμων μετάλλων σε αυτή τη μετάβαση είναι σημαντικός.

Συγκεκριμένα, τα κρίσιμα μέταλλα που εξετάσαμε υποστηρίζουν τις τεχνολογίες που οδηγούν τη στροφή προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακά πάνελ, ανεμογεννήτριες και μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων. Στοιχεία σπανίων γαιών, λίθιο, κοβάλτιο και διάφορα άλλα κρίσιμα μέταλλα είναι οι αφανείς ήρωες της επανάστασης της καθαρής ενέργειας, καθένα από τα οποία διαθέτει μοναδικές ιδιότητες που είναι θεμελιώδεις για τη λειτουργικότητα αυτών των τεχνολογιών.

Ακολουθώντας, ο επείγων χαρακτήρας της μετάβασης στην καθαρή ενέργεια δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Τα στοιχεία των καταστροφικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής αυξάνονται και η ανάγκη για ταχεία μετάβαση σε καθαρότερες πηγές ενέργειας είναι ολοένα και πιο εμφανής. Τα κρίσιμα ορυκτά είναι βασικοί παράγοντες για αυτήν τη μετάβαση, καθώς αποτελούν ζωτικά στοιχεία τεχνολογιών που μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να ανακουφίσουν τις περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιβαρύνσεις που συνδέονται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων.

Ενώ ο ρόλος των κρίσιμων μετάλλων στην ενεργειακή είναι σαφής, εντούτοις η βιώσιμη εξόρυξη, ο εφοδιασμός και η αξιοποίησή τους συνιστούν σημαντικές προκλήσεις. Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες, που κυμαίνονται από την καταστροφή των οικοσυστημάτων, έως τα τοξικά απόβλητα, συνοδεύουν την εξόρυξη και την επεξεργασία αυτών των ορυκτών. Οι γεωπολιτικές εντάσεις και οι εμπορικές διαμάχες περιπλέκουν περαιτέρω την παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού, οδηγώντας σε κινδύνους σχετικά με τη διαθεσιμότητά τους. Επιπλέον, οι ηθικές ανησυχίες σχετικά με τις εργασιακές πρακτικές και τις κοινωνικές επιπτώσεις των εργασιών εξόρυξης είναι πειστικά ζητήματα που απαιτούν προσοχή.

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις και να διασφαλιστεί μια επιτυχημένη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια, είναι επιτακτική ανάγκη να ληφθούν ολοκληρωμένες και ενιαίες πρωτοβουλίες σε επίπεδο κανονιστικού πλαισίου και πολιτικών. Η παρούσα εργασία

εξέτασε την ανάγκη διαμόρφωσης ενός ενιαίου και κατάλληλου ρυθμιστικού πλαισίου σχετικά με τα κρίσιμα μέταλλα και δη την εξόρυξη, εκμετάλλευση και ανακύκλωσή τους και εντόπισε αρκετούς τομείς στους οποίους χρειάζονται βελτιώσεις. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στην υπεύθυνη προμήθεια, τις βιώσιμες πρακτικές και τη δίκαιη πρόσβαση σε κρίσιμα ορυκτά. Η διεθνής συνεργασία, οι διπλωματικές διαπραγματεύσεις και η σφυρηλάτηση ισχυρών εταιρικών σχέσεων μεταξύ εθνών και οργανισμών αποτελούν βασικά συστατικά για την επίτευξη αυτών των στόχων.

Παράλληλα, η διεθνής συνεργασία διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην επίλυση των πολύπλοκων ζητημάτων που σχετίζονται με τα κρίσιμα μέταλλα. Η ανάπτυξη μιας βιώσιμης αλυσίδας εφοδιασμού απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια για διαφοροποίηση των πηγών, επενδύσεις σε τεχνολογίες ανακύκλωσης και μείωση της εξάρτησης από μικρό αριθμό προμηθευτών. Επιπλέον, η διπλωματία και η συνεργασία μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή εμπορικών διαφορών και γεωπολιτικών εντάσεων που μπορεί να διαταράξουν τον εφοδιασμό αυτών των βασικών ορυκτών.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία υπογραμμίζει την σημασία των κρίσιμων μετάλλων για την ενεργειακή μετάβαση σε καθαρές πηγές ενέργειας. Καθώς ο κόσμος αντιμετωπίζει την επείγουσα ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, ο ρόλος αυτών των μετάλλων στην ενεργοποίηση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν μπορεί να υποτιμηθεί.

Τα ευρήματα αυτής της εργασίας υποδεικνύουν την ανάγκη για μια ολιστική προσέγγιση που εξισορροπεί την επιταγή της περιβαλλοντικής ευθύνης με την αναγκαιότητα μιας ταχείας μετάβασης στην καθαρή ενέργεια. Για να επιτευχθεί αυτό, οι παγκόσμιες πολιτικές και κανονισμοί πρέπει να επικαιροποιηθούν και να ενισχυθούν. Οι διπλωματικοί διάυλοι πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας και τη διασφάλιση σταθερού εφοδιασμού κρίσιμων ορυκτών. Η συνεργασία μεταξύ κυβερνήσεων, φορέων της βιομηχανίας και διεθνών οργανισμών είναι απαραίτητη για την υπέρβαση των εμποδίων και την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού των κρίσιμων ορυκτών για την οικοδόμηση ενός βιώσιμου και καθαρότερου ενεργειακού μέλλοντος για τις επόμενες γενιές.

5.2 Περιορισμοί και προτάσεις μελλοντικής έρευνας

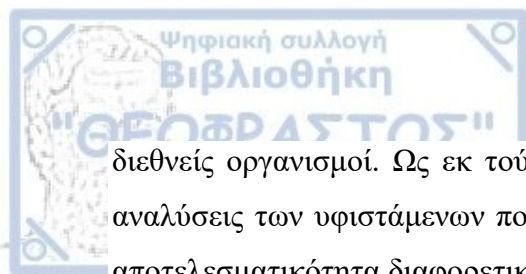
Παρόλο που η παρούσα εργασία, έχει παράσχει πολύτιμες γνώσεις για το ρόλο των κρίσιμων μετάλλων στην ενεργειακή μετάβαση σε «καθαρές» πηγές ενέργειας, εντούτοις είναι σημαντικό να αναγνωριστούν ορισμένοι περιορισμοί της που είναι εν πολλοίς εγγενείς στη μεθοδολογική προσέγγιση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Αυτοί οι περιορισμοί θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των ευρημάτων και μπορούν να χρησιμεύσουν ως οδηγός για μελλοντικές έρευνες που θα εξετάσουν το ερευνώμενο ζήτημα σε μεγαλύτερο βάθος.

Ένας από τους κύριους περιορισμούς αυτής της εργασίας είναι η εξάρτησή της από υπάρχουσες δημοσιεύσεις. Η διαθεσιμότητα και η πληρότητα των δεδομένων για κρίσιμα ορυκτά και τεχνολογίες καθαρής ενέργειας μπορεί να ποικίλλει, οδηγώντας ενδεχομένως σε κενά στην ανάλυση. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να εξετάσει το ενδεχόμενο διεξαγωγής εμπειρικών μελετών και προσπαθειών συλλογής δεδομένων για τη συμπλήρωση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.

Οι τεχνολογίες καθαρής ενέργειας και η εξάρτησή τους από κρίσιμα ορυκτά εξελίσσονται συνεχώς. Αυτή η ανασκόπηση βασίζεται στη βιβλιογραφία που είναι διαθέσιμη μέχρι μια συγκεκριμένη ημερομηνία και ενδέχεται να έχουν προκύψει νεότερες εξελίξεις από τότε. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να συνεχίσει να παρακολουθεί και να αξιολογεί τις αναδυόμενες τεχνολογίες και τις απαιτήσεις τους σε ορυκτά για να εξασφαλίσει ενημερωμένες γνώσεις.

Η σημασία συγκεκριμένων κρίσιμων ορυκτών μπορεί να ποικίλλει ανά γεωγραφική περιοχή και τομέα. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει αυτές τις περιφερειακές και τομεακές παραλλαγές για να παρέχει μια πιο λεπτή κατανόηση των προκλήσεων και των ευκαιριών που σχετίζονται με κρίσιμα μέταλλα υπό διαφορετικά πλαίσια. Επίσης, η παρούσα ανασκόπηση έθιξε ηθικές ανησυχίες που σχετίζονται με την κρίσιμη εξόρυξη ορυκτών, αλλά δεν εμβάθυνε σε κοινωνικές πτυχές του ερευνώμενου ζητήματος. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει τις κοινωνικές επιπτώσεις της κρίσιμης εξόρυξης ορυκτών στις τοπικές κοινότητες και να εξετάσει στρατηγικές για την προώθηση υπεύθυνων και βιώσιμων πρακτικών που ωφελούν τόσο το περιβάλλον όσο και τους τοπικούς πληθυσμούς.

Τέλος, η εξέταση παγκόσμιων πολιτικών και κανονισμών που σχετίζονται με κρίσιμα ορυκτά σε αυτή τη διατριβή παρέχει μεν μια ευρεία επισκόπηση, ωστόσο δεν εμβαθύνει στους συγκεκριμένους μηχανισμούς και στρατηγικές που μπορούν να εφαρμόσουν οι χώρες και οι



διεθνείς οργανισμοί. Ως εκ τούτου, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διεξάγει εις βάθος αναλύσεις των υφιστάμενων πολιτικών και κανονιστικών πλαισίων και να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα διαφορετικών ρυθμιστικών προσεγγίσεων για τη διασφάλιση υπεύθυνης προμήθειας κρίσιμων μετάλλων. Παράλληλα, ενώ η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη σημασία των κρίσιμων μετάλλων για τις τεχνολογίες καθαρής ενέργειας, εντούτοις δεν διερεύνησε εκτενώς πιθανές εναλλακτικές λύσεις ή καινοτομίες που θα μπορούσαν να μειώσουν την εξάρτηση από αυτά τα ορυκτά. Ως εκ τούτου, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει εναλλακτικά υλικά και τεχνολογίες που θα μπορούσαν να μετριάσουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με την κρίσιμη προσφορά ορυκτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Addison, T. and Roe A. (2018). Extractive Industries: The Management of Resources as a Driver of Sustainable Development Protecting the Environment During and After Resource Extraction. In *Oopen.Org*, September 2020.
- Advanced Magnets (2021), «Introduction to basic composition and microstructure of sintered NdFeB magnet».(www.advancedmagnets.com/introduction-to-basic-composition-and-microstructure-of-sintered-ndfeb-magnet.)
- Badeeb, R. A., H. H. Lean and J. Clark (2017). The evolution of the natural resource curse thesis: A critical literature survey. *Resources Policy*, vol. 51, pp. 123-134.
- Ballinger, B., Stringer, M., Schmeda-Lopez, D.R., Kefford, B., Parkinson, B., Greig, C. and Smart, S., 2019. The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply. *Applied Energy*, 255, p.113844.
- Bleiwas, D.I., 2010. *Byproduct mineral commodities used for the production of photovoltaic cells* (Vol. 1365). Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- BloombergNEF (2021a), «BloombergNEF ups battery demand forecast», *Canadian Mining Journal*, www.canadianminingjournal.com/news/bloombergnef-ups-battery-demand-forecast).
- Boettcher, A. (2022). *What is Green Finance and Why it Matters - UNC Institute for the Environment*.
- Breul, M. and T. X. T. Nguyen (2022). The impact of extractive industries on regional diversification – evidence from Vietnam. *Extractive Industries and Society*, vol. 11, 100982.
- Calvo, G. and Valero, A., 2022. Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. *Environmental Development*, 41, p.100640.
- Cantú, A.M., 2021. In search of ‘Lithium Valley’: why energy companies see riches in the California desert. *The Guardian*.
- Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Citation.pdf)
- Constantinides, S. and De Leon, J., 2011. Permanent magnet materials and current challenges. In *Adv. Powder Metall. Part. Mater.-2011, Proc. 2011 Int. Conf. Powder Metall. Part. Mater. PowderMet* (pp. 858-875).

- De Koning, A., Kleijn, R., Huppes, G., Sprecher, B., Van Engelen, G. and Tukker, A., 2018. Metal supply constraints for a low-carbon economy?. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, pp.202-208.
- Deetman, S., Pauliuk, S., Van Vuuren, D.P., Van Der Voet, E. and Tukker, A., 2018. Scenarios for demand growth of metals in electricity generation technologies, cars, and electronic appliances. *Environmental science & technology*, 52(8), pp.4950-4959.
- Diouf, B. and Pode, R., 2015. Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. *Renewable Energy*, 76, pp.375-380.
- Dolganova, I., Rödl, A., Bach, V., Kaltschmitt, M. and Finkbeiner, M., 2020. A review of life cycle assessment studies of electric vehicles with a focus on resource use. *Resources*, 9(3), p.32.
- Du, X. and Graedel, T.E., 2011. Global in-use stocks of the rare earth elements: a first estimate. *Environmental science & technology*, 45(9), pp.4096-4101.
- Elshkaki, A. and Graedel, T.E., 2013. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 59, pp.260-273.
- Elshkaki, A. and Graedel, T.E., 2013. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 59, pp.260-273.
- Elshkaki, A., Reck, B.K. and Graedel, T.E., 2017. Anthropogenic nickel supply, demand, and associated energy and water use. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, pp.300-307.
- Ezenagu, A. (2021). Boom or bust, extractives are no longer saviours: The need for robust tax regimes in Gulf countries. *The Extractive Industries and Society*, vol. 8, No. 2, 100848.
- Figueres, C., Schellnhuber, H.J., Whiteman, G., Rockström, J., Hopley, A. and Rahmstorf, S., 2017. Three years to safeguard our climate. *Nature*, 546(7660), pp.593-595.
- Fortier, S.M., Nassar, N.T., Kelley, K.D., Lederer, G.W., Mauk, J.L., Hammarstrom, J.M., Day, W.C. and Seal II, R.R., 2021. USGS 2020 critical minerals review. *Mining Engineering*, 73(5), p.32.
- Franks, D. M., J. Keenan and D. Hailu (2022). Mineral security essential to achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability* 2022, pp. 1-7.
- Gallego, C.A., 2021. The role of Rare Earth Elements in the deployment of wind energy in Colombia. *Boletín Geológico*, 48(2), pp.61-79.
- Gielen, D., 2021. Critical minerals for the energy transition. *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*.

- Giese, E.C., 2022. E-waste mining and the transition toward a bio-based economy: The case of lamp phosphor powder. *MRS Energy & Sustainability*, 9(2), pp.494-500.
- Henckens, M. L. C. M., P. P. J. Driessen, C. Ryngaert and E. Worrell (2016). The set-up of an international agreement on the conservation and sustainable use of geologically scarce mineral resources. *Resources Policy*, vol. 49, pp. 92-101.
- Hoenderdaal, S., Espinoza, L.T., Marscheider-Weidemann, F. and Graus, W., 2013. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies?. *Energy*, 49, pp.344-355.
- Islam, M.M.U., Li, J., Roychand, R., Saberian, M. and Chen, F., 2022. A comprehensive review on the application of renewable waste tire rubbers and fibers in sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, p.133998.
- Kelly, J.C., Wang, M., Dai, Q. and Winjobi, O., 2021. Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, p.105762.
- Kim, T.Y. and Karpinski, M., 2020. Clean energy progress after the Covid-19 crisis will need reliable supplies of critical minerals.
- Klimenko, V.V., Ratner, S.V. and Tereshin, A.G., 2021. Constraints imposed by key-material resources on renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, p.111011.
- Kupper, C., Weißhar, B., Reißmann, S. and Bessler, W.G., 2018. End-of-life prediction of a lithium-ion battery cell based on mechanistic aging models of the graphite electrode. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(14), p.A3468.
- Lee, J., Bazilian, M., Sovacool, B., Hund, K., Jowitt, S.M., Nguyen, T.P., Månberger, A., Kah, M., Greene, S., Galeazzi, C. and Awuah-Offei, K., 2020. Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, p.109789.
- Lee, W. J. (2020). Green Finance and Sustainable Development Goals: The Case of China. *Journal of Asian Finance*, vol. 7, No. 7, pp. 577-586.
- Månberger, A. and Stenqvist, B., 2018. Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development. *Energy Policy*, 119, pp.226-241.
- Manley, D., P. R. P. Heller and W. Davis (2022). No Time to Waste: Governing Cobalt Amid the Energy Transition.

Manley, D., P. R. P. Heller and W. Davis (2022). *No Time to Waste: Governing Cobalt Amid the Energy Transition*.

Marques, I. S. (2020). *Extractives transparency in the era of energy transition*. Available at <https://eti.org/blog/extractives-transparency-in-era-of-energy-transition>

Melin, H.E., 2019. State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries—A research review. *Circular Energy Storage*, 1, pp.1-57.

Mills, R., 2020. A fine balance: The geopolitics of the global energy transition in MENA. *The geopolitics of the global energy transition*, pp.115-150.

Mistry, M. (2020), «Is there enough nickel? Reserves, resources and recycling»], Nickel Institute. (<https://nickelinstitute.org/blog/2020/january/reserves-resources-and-recycling-is-there-enough-nickel>.)

Moreau, V., Dos Reis, P.C. and Vuille, F., 2019. Enough metals? Resource constraints to supply a fully renewable energy system. *Resources*, 8(1), p.29.

Mróz, M., 2022. Energy security in danger? A comparative analysis of oil and copper supply. *Energies*, 15(2), p.560.

Mudd, G.M. and Jowitt, S.M., 2014. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments. *Economic Geology*, 109(7), pp.1813-1841.

Northey, S.A., Mudd, G.M., Werner, T.T., Jowitt, S.M., Haque, N., Yellishetty, M. and Weng, Z., 2017. The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change*, 44, pp.109-124.

Patel, P. and Gaines, L., 2016. Recycling Li batteries could soon make economic sense. *MRS Bulletin*, 41(6), pp.430-431.

Perdigón-Toro, L., Zhang, H., Markina, A., Yuan, J., Hosseini, S.M., Wolff, C.M., Zuo, G., Stolterfoht, M., Zou, Y., Gao, F. and Andrienko, D., 2020. Barrierless free charge generation in the high-performance PM6: Y6 bulk heterojunction non-fullerene solar cell. *Advanced Materials*, 32(9), p.1906763.

Pickford, A. (2022). *Delving into critical minerals: What Canada can learn from the Australian experience*. Macdonald-Laurier Institute.

Rasmussen, K.D., Wenzel, H., Bangs, C., Petavratzi, E. and Liu, G., 2019. Platinum demand and potential bottlenecks in the global green transition: a dynamic material flow analysis. *Environmental science & technology*, 53(19), pp.11541-11551.

Ren, X., Cheng, C., Wang, Z. and Yan, C., 2021. Spillover and dynamic effects of energy transition and economic growth on carbon dioxide emissions for the European Union: A dynamic spatial panel model. *Sustainable Development*, 29(1), pp.228-242.

- Sachs, J., C. Kroll, G. Lafortune, G., Fuller and F. Woelm (2021). Sustainable Development Report 2021. In *Sustainable Development Report 2021*. Cambridge University Press.
- Schodde, R., 2017, October. Long term trends in global exploration–Are we finding enough metals?. In *Fennoscandian Exploration and Mining Conference*.
- Singh, V. K. (2022). *Regulatory and Legal Framework for Promoting Green Digital Finance*. In: Taghizadeh-Hesary, F., Hyun, S. (eds), *Green Digital Finance and Sustainable Development Goals. Economics, Law, and Institutions in Asia Pacific book series*. pp. 3-27.
- Singhania, M., Gupta, S., Chadha, G., Braune, E., Dana, L.P. and Idowu, S.O., 2023. Mapping 26 years of climate change research in finance and accounting: a systematic scientometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, pp.1-27.
- Spinaci, S. (2021). *Green and sustainable finance*. European Parliamentary Research Service.
- Syahrir, R., F. Wall and P. Diallo (2020). Socio-economic impacts and sustainability of mining, a case study of the historical tin mining in Singkep Island-Indonesia. *Extractive Industries and Society*, vol. 7, No. 4, pp.1,525-1,533.
- Turcheniuk, K., Bondarev, D., Singhal, V. and Yushin, G., 2018. Ten years left to redesign lithium-ion batteries.
- USGS (2020), «Lithium», in *Mineral Commodity Summaries*, US Geological Survey, Reston. (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-lithium.pdf>.)
- Vakulchuk, R., Overland, I. and Suryadi, B., 2023. ASEAN's energy transition: How to attract more investment in renewable energy. *Energy, Ecology and Environment*, 8(1), pp.1-16.
- Vidal, O., 2017. *Mineral resources and energy: future stakes in energy transition*. Elsevier.
- Wang, Y., Liu, L., Ma, T., Zhang, Y. and Huang, H., 2021. 2D graphitic carbon nitride for energy conversion and storage. *Advanced Functional Materials*, 31(34), p.2102540.
- Widmer, J.D., Martin, R. and Kimiabeigi, M., 2015. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable Materials and Technologies*, 3, pp.7-13.
- Zhu, Q., Xu, Q., Du, M., Zeng, X., Zhong, G., Qiu, B. and Zhang, J., 2022. Recent progress of metal sulfide photocatalysts for solar energy conversion. *Advanced Materials*, 34(45).